

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Par : Rahmani Mokhtar et Chehrouri Maamar

Sujet

Etude de la valorisation des lampes LED dans une optique de créer une filière de recyclage

Soutenue publiquement en 24/06/2024 devant le jury composé de :

Dr. BOUANANE M.

Univ. Saida

Président

Dr. MEZIANE R.

Univ. Saida

Rapporteur

Dr. AIMER F.A.

Univ. Saida

Examineur

Année universitaire 2023/2024



Remerciements

**Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et
Miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.**

La première personne que nous tenons à remercier est notre Superviseur M « **Meziane Rachid » pour l'orientation, la confiance, la patience et ses bonnes explications qui ont été grande apport considérable sans lui ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.**

**Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury
Pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant
D'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.**

**Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les
Professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la
poursuite de nos études.**



**Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui sont participé de près
ou de loin à la réalisation de ce travail.**

Dédicace

Avant tout je tiens mes remerciements à mon dieu tout puissant De mon avoir donner
la force et le courage.

Avec tout mon amour, je dédie le fruit de ma remise de diplôme à :

Mon Père : mon premier soutien dans mon parcours, ma force après Dieu, ma fierté et
ma source de fierté, Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir, que ce travail
traduit ma gratitude et mon affection.

A ma très chère Mère : Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice.
Ta prière et ta Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie.
Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma
profonde reconnaissance. J'espère ne jamais te décevoir, ni trahir ta confiance et tes
sacrifices. Puisse Dieu tout puissant, te préserver et t'accorder Santé, longue vie et
bonheur.

A mes frères Mohamed, Khaled et ma sœur Wafaa: ceux qui ont éclairé mes
chemins, qui ont toujours été à mes côtés et m'ont soutenu tout au long de mon
parcours éducatif, je vous remercie beaucoup et je vous dédie ceci le travail.

À ma petite chérie et à la prunelle de mes yeux, j'ai de la chance de l'avoir dans ma
vie, **Sondos**

A tous mes chers professeurs qui m'ont enseigné, et à toutes les personnes que j'aime
et apprécie

Chehrouri Maamar

Dédicace

Avant tout je tiens mes remerciements à mon dieu tout puissant De mon avoir donner
la force et le courage.

Avec tout mon amour, je dédie le fruit de ma remise de diplôme à :

À Mes Parents : Mille salutations et toute ma gratitude. Grâce à vous, je suis arrivé là
où je suis aujourd'hui. J'espère que cette réalisation sera la première étape de mon
succès et un modeste hommage pour vous, mes chers parents.

À Mes Frères et Sœurs : J'espère être un bon exemple pour vous, après nos parents.

À Tous Mes Camarades de l'Université Dr. Moulay Tahar : Abdel Malek, Hamza,
Islam, Ismaïl, Abdel Malek, merci pour votre amitié et votre soutien.

À Mon Ami Avec qui j'ai préparé cette thèse, merci pour ton aide et ton soutien
inestimable.

À Tous Les Enseignants du Département des Sciences et Technologies

**Un grand merci à tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à la
réalisation de ce projet.**

Rahmani Mokhtar

Table des matières

Introduction Générale :	1
CHAPITRE I : La photométrie	3
I.1.Introduction :	4
I.2 Définition de la photométrie :	4
I.3 Les domaines utilisation de la photométrie :	4
I.3.1 Dans le domaine de Biologie en trouve :	4
I.3.2 Dans le domaine de Physique :	5
I.4 Importance de l'étude de la photométrie dans le domaine de l'éclairage :	5
I.4.1 Grandeurs photométriques :	5
I.4.1.1. Flux lumineux :	5
I.4.1.2 Efficacité lumineuse :	6
I.4.1.3 Intensité lumineuse :	6
I.4.1.4 Luminance lumineuse :	7
I.4.1.5 Éclairement lumineux :	7
I.5. Source Lumineuses :	7
I.6 La luminance :	8
I.7.Concept et unité de mesure (Lumen) :	8
I.8 L'éclairement :	9
I.9.Eclairement d'une surface :	9
I.10.Relation entre le flux lumineux et l'éclairement :	9
I.11 Utilisation de l'éclairement pour estimer la quantité de lumière disponible dans différents endroits :	9
I.12 Rôle du flux lumineux dans l'éclairage :	10
I.13 Différents types d'éclairage :	10
I.13.1 Sources continues :	10
I.13.2 Sources discrètes :	10

I.13.3. Sources monochromatiques :	11
I.13.4 Sources naturelles :	11
I.14.Méthodes de mesure de l'éclairage et outils associés :	11
I.14.1 Mesure de l'éclairement :	11
I.14.2 Mesure des luminances :	11
I.15 La qualité de lumière :	11
I.15.1. L'indice de rendu des couleurs (IRC) :	12
I.15.2 La température de couleur :	14
I.16 Défis et innovations dans le domaine de la photométrie :	14
I.16.1 Défis :	14
I.16.1.1 Améliorer la précision et la fiabilité des mesures :	14
I.16.1.2 Développer de nouveaux instruments et techniques :	14
I.16.1.3 Harmoniser les normes et les procédures :	14
I.16.2 Innovations :	14
I.16.3 Sources de lumière plus stables et plus précises :	15
I.16.4 Techniques d'étalonnage plus précises :	15
I.16.5 Intelligence artificielle et apprentissage automatique :	15
I.16.5.1 Exemples d'applications :	15
I.16.5.1.1 Industrie :	15
I.16.5.1.2 Recherche scientifique :	15
I.16.5.1.3 Médecine :	15
I.16.5.1.4 Éclairage :	15
I.17.Conclusion:	16
CHAPITRE II : Différents types de lampes	17
II.1. Introduction :	18
II.2 Types d'appareil d'éclairage et lampes :	18
II.2.1 Conversion d'énergie par incandescence :	18

II.2.1.1 Principe :	18
II.2.1.2 Lampe à incandescence :	18
II.2.1.3 Constitution :	19
II.2.1.4 Le filament :	19
II.2.1.5 Le culot :	20
II.2.1.6. Avantages et inconvénients des lampes à incandescence:	21
II.2.1.6.1. Avantages :	21
II.2.1.6.2 Inconvénients :	21
II.2.2 Conversion d'énergie par fluorescence et luminescence :	21
II.2.2.1 Principe :	21
II.2.2.2 Constitution :	22
II.2.2.3 Les électrodes :	23
II.2.2.4 Les culots :	23
II.2.2.5 Composition du tube :	23
II.2.2.6 Allumage du tube :	23
II.2.2.7 Allumage par starter:	24
II.2.2.8 Avantages et inconvénients des lampes fluorescentes :	24
II.2.2.8.1. Les Avantages :	24
II.2.2.8.2. Les inconvénients :	24
II.2.3 Lampes tungstène halogène basse tension :	25
II.2.3.1 Principe :	25
II.2.3.2 Constitution :	25
II.2.3.3 Avantages des lampes halogènes basse tension :	26
II.2.3.4 Inconvénients :	26
II.2.4. Les lampes à décharge :	26
II.2.4.1. Principe :	26
II.2.4.2. Constitution :	27

II.2.4.3 Les lampes à décharge ont besoin des éléments pour fonctionner :	27
II.2.4.4 Avantages des lampes de décharge :	27
II.2.4.5 Inconvénients :	27
II.2.5 Diodes électroluminescentes ou LED (Light Emitting Diodes) :	28
II.2.5.1 Principe :	28
II.2.5.2. Constitution :	28
II.2.5.3 Avantages des LED :	28
II.2.5.4 Inconvénients des LED :	29
II.3. Conclusion :	29
CHAPITRE III : Introduction au recyclage des lampes LED	30
III.1 Introduction :	31
III.2 Recyclage les lampes LED :	31
III.3 Composition d'une lampe à technologie LED :	31
III.4 Exemples d'applications :	32
III.5 La composante visée dans le recyclage des LED :	32
III.6 L'importance du recyclage des LED :	32
III.7 Le processus suivi pour le recyclage des lampes LED :	33
III.8 Les derniers défis à relever pour le recyclage des LED :	33
III.9 Les différents types de puces LED :	34
III.10 La composition des puces à LED :	36
III.11 État de l'Art de la Gestion des Déchets Électroniques :	38
III.12 Impacts Économiques et Environnementaux de la Filière de Recyclage des Lampes LED :	38
III.13 Gestion des déchets :	39
III.14 Les différentes étapes de gestion des déchets :	39
III.15 La valorisation énergétique des déchets électroniques :	40
III.16 Impact des lampes usées sur l'homme et l'environnement :	41

III.17 Définition de l'économie circulaire :.....	41
III.18 Conclusion :.....	41
CHAPITRE IV : Récupération par le recyclage des lampes LED.....	43
IV.1 Introduction :.....	44
IV.2 Caractérisation massique :.....	44
IV.3 Potentiel de valorisation global :.....	45
IV.4 Les filières de traitement de déchets :	46
IV.5 Traitement et recyclage des lampes usagées internationales :	46
IV.5.1 Traitement et recyclage en Afrique	46
IV.5.1.1 Traitement et recyclage en Algérie :	46
IV.5.1.1.1 Gestion des déchets en Algérie :	47
IV.5.1.2 Traitement et recyclage au Maroc :	48
IV.5.1.3 Traitement et recyclage en Afrique du Sud :	49
IV.5.2 Traitement et recyclage des lampes en Europe :	49
IV.5.2.1 Traitement et recyclage en France :	49
IV.6 Le rôle des éco-organismes :	49
IV.7 Sensibiliser et responsabiliser les organismes étatiques et les entreprises :	50
IV.8 Conclusion :	51
Conclusion Générale	54
Références bibliographiques :	56

LISTE DES FIGURES :

FIGURE	PAGE
CHAPITRE I	
Fig. (I.1) : Palette de couleurs définie pour le calcul de l'IRC	12
Fig. (I.2) : Positions des couleurs R1 à R8 dans le diagramme de chromaticité CIE (1931 - D65)	13
Fig. (I.3) : Schéma de de calcul IRC.	13
CHAPITRE II	
Fig. (II.1) : Lampe à incandescence	19
Fig. (II.2) : Différents types de filaments	20
Fig. (II.3) : Les différents types de culots.	20
Fig. (II.4) : Principe de l'émission de la lumière par fluorescence	22
Fig. (II.5) : Tube fluorescent	22
Fig. (II.6) : Différents types de culot.	23
Fig. (II.7) : Allumage par starter	24
Fig. (II.8) : Lampes à réflecteur dichroïque basse tension.	25
Fig. (II.9) : lampe à décharge	27
Fig. (II.10) : Lampe Diodes électroluminescentes (LED)	28
CHAPITRE III	
Fig. (III.1) : Composition d'une lampe à technologie LED.	31
Fig. (III.2) : Puces à LED DIP	34
Fig. (III.3) : Puces à LED SMD	35
Fig. (III.4) : Puces à LED à haute	35
Fig. (III.5) : Puce à LED COB	36

Liste des tableaux :

TABLE	PAGE
Tableau (I.1) : Valeurs des couleurs R1 à R8	25
Tableau IV.1: Bilan matériaux et composants des principaux types de lampes et spots à LED [43]	45
Tableau IV.2: Valorisation économique des matériaux constitutifs dans une tonne de dispositifs lampes à LED E25 en plastique	46
Tableau IV.3: Valorisation économique des matériaux constitutifs dans une tonne de dispositifs lampes à LED E27 en plastique.	46

Introduction Générale

Introduction Générale :

Dans un monde en constante évolution technologique, l'utilisation croissante des appareils électroniques, notamment les lampes à LED, a engendré une problématique environnementale majeure : la gestion des déchets électroniques. L'obsolescence rapide de ces équipements, couplée à une demande toujours croissante, mène à une accumulation considérable de déchets qui nécessitent une attention particulière en termes de traitement et de recyclage. La gestion adéquate de ces déchets est devenue une nécessité pressante pour minimiser les impacts négatifs sur la santé publique, l'environnement et l'économie.

Le premier chapitre de cette étude se concentre sur l'analyse approfondie de la photométrie, une discipline cruciale pour évaluer avec précision les performances des lampes LED en termes d'efficacité lumineuse, de distribution spectrale et d'autres paramètres clés. La compréhension du fonctionnement et de l'importance de la photométrie est essentielle pour mener des recherches significatives dans le domaine de l'éclairage LED.

Le deuxième chapitre explore les différents types de lampes disponibles sur le marché, en mettant particulièrement l'accent sur les avantages et les inconvénients des lampes LED par rapport aux technologies d'éclairages traditionnelles telles que les lampes à incandescence et les lampes fluorescentes. Cette analyse comparative éclaire les décisions stratégiques concernant l'adoption et l'intégration des lampes LED dans divers contextes.

Le troisième chapitre aborde le défi particulier que représente le recyclage des lampes à LED. Composées de divers matériaux tels que le plastique, l'aluminium, les composants électroniques et parfois des substances dangereuses, leur décomposition et valorisation requièrent des méthodes sophistiquées et spécialisées. Cette recherche vise à explorer les différentes composantes des lampes à LED en analysant leur composition, leur potentiel de valorisation économique et les méthodes actuelles de traitement et de recyclage, notamment en Algérie. L'objectif est d'identifier les pratiques optimales pour gérer ces déchets de manière durable, en maximisant les bénéfices économiques tout en minimisant les impacts environnementaux.

Le quatrième chapitre examine les filières de traitement et de recyclage des déchets de lampes LED à l'échelle internationale. En mettant en lumière les pratiques adoptées dans différents pays, notamment en Algérie, en Afrique du Sud et en France, ce chapitre met en évidence les défis et les opportunités liés à la gestion des déchets électroniques. De plus, il souligne le rôle

des éco-organismes et la nécessité de sensibiliser et de responsabiliser les organismes étatiques et les entreprises pour une gestion efficace et durable des déchets.

CHAPITRE I

La photométrie

I.1.Introduction :

Dans le vocabulaire de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), la photométrie désigne les techniques de mesure de la lumière considérée comme porteuse de l'excitation visuelle. La première étude quantitative rationnelle de la propagation de la lumière date de 1729 (Pierre Bouguer), bien antérieurement à la découverte de l'infrarouge et de l'ultraviolet (1801). L'importance pratique puis économique de l'éclairage artificiel a conduit à développer des méthodes de mesures utilisant l'œil comme détecteur, ce n'est guère qu'à partir de 1930 que l'on a commencé à remplacer l'œil par des cellules photoélectriques pour les mesures photométriques, entre-temps, les métrologues avaient développé la quasi-totalité des méthodes utilisées aujourd'hui.

La radiométrie optique est née vers 1820 avec le développement des premiers détecteurs thermo-électriques (thermopile, galvanomètre), pendant longtemps utilisés exclusivement pour l'étude du rayonnement des corps chauds.

I.2 Définition de la photométrie :

La photométrie est la science de mesure de la lumière, en se concentrant sur les caractéristiques perceptuelles de l'œil humain. Elle prend en compte des concepts tels que la luminance, l'irradiation, l'intensité lumineuse, et d'autres paramètres pour quantifier la qualité et la quantité de la lumière dans des environnements spécifiques. [1]

I.3 Les domaines utilisation de la photométrie :

La photométrie joue un rôle essentiel dans la collecte de données, l'analyse quantitative et la compréhension des phénomènes lumineux et de leurs interactions avec la matière. Elle est présente dans plusieurs domaines. [2]

I.3.1 Dans le domaine de Biologie en trouve :

Photométrie de fluorescence : Mesure de la lumière émise par des molécules fluorescentes dans des études de biologie cellulaire, de biochimie et de microbiologie.

Photométrie en écologie : Étude de l'effet de la lumière sur la croissance des plantes, la photosynthèse et d'autres processus biologiques dans les écosystèmes.

I.3.2 Dans le domaine de Physique :

Photométrie en optique : Mesure de la lumière visible et ses propriétés, telles que l'intensité, la polarisation et la couleur, elle trouve ses applications dans l'imagerie médicale et la microscopie.

Photométrie en spectroscopie : Mesure de l'intensité lumineuse à différentes longueurs d'onde pour analyser la composition chimique des substances, l'absorption et l'émission de la lumière.

I.4 Importance de l'étude de la photométrie dans le domaine de l'éclairage :

L'importance de la photométrie dans le domaine de l'éclairage réside dans sa capacité à quantifier et à comprendre les caractéristiques de la lumière qui influent sur la perception visuelle humaine. En fournissant des mesures précises de l'intensité lumineuse, de la distribution spatiale de la lumière, de la couleur et de la luminance. La photométrie permet de concevoir des systèmes d'éclairage efficaces et ergonomiques. En tenant compte des besoins visuels des occupants, elle contribue à créer des environnements confortables, sûrs et productifs. De plus, la photométrie joue un rôle crucial dans l'évaluation de la performance des dispositifs d'éclairage, en garantissant leur conformité aux normes de qualité et de sécurité. En somme, la photométrie est un pilier essentiel de la conception, de l'optimisation et de l'évaluation des systèmes d'éclairage, assurant ainsi des environnements visuellement agréables et fonctionnels. [3][4].

I.4.1 Grandeurs photométriques :

Les grandeurs photométriques les plus importantes sont :

I.4.1.1. Flux lumineux :

Mesure totale de la puissance lumineuse émise par une source dans toutes les directions, ajustée selon la sensibilité spectrale de l'œil humain, exprimée en lumens (lm).

Le flux lumineux est noté : (ϕ) unité : le lumen (lm).

Par définition :

$$\phi = K \cdot \int_{\lambda_R}^{\lambda_B} W_\lambda V_\lambda d\lambda \quad (1-1)$$

Avec :

ϕ : Flux lumineux en lumens [lm]

K : Efficacité lumineuse en lumens par Watt [lm/W]

W_λ : Sensibilité spectrale de l'œil humain sans unité

V_λ : Puissance spectrale [W/Hz]

d_λ : longueur d'onde [nm]

I.4.1.2 Efficacité lumineuse :

L'efficacité d'une source est le flux lumineux émis $\varphi_{\text{émis}}$ par unité de puissance de la source :

$$\text{Efficacité} = \frac{\varphi_{\text{émis}}}{\text{Puissance de la source}} \quad (1-2)$$

Efficacité : Efficacité en Lumens par Watts [lm/W]

$\varphi_{\text{émis}}$: Flux en Lumens [lm]

Puissance de la source : Puissance de la source en Watts [W]

I.4.1.3 Intensité lumineuse :

Mesure de la puissance lumineuse émise dans une direction spécifique, ajustée selon la sensibilité spectrale de l'œil humain, exprimée en Candelas (cd). Par définition :

$$I = \frac{d\varphi}{d\Omega} \quad (1-3)$$

$$d\Omega = \frac{dS \cdot \cos \alpha}{d^2} \quad (1-4)$$

I : Intensité lumineuse en Candelas [Cd].

$d\varphi$: variation du flux.

$d\Omega$: l'angle solide.

S : la surface en [m²]

d : distance entre la source et la surface en [m]

α : angle entre la direction d'émission et la normale à la surface éclairée

I.4.1.4 Luminance lumineuse :

Mesure de la luminosité perçue d'une source lumineuse dans une direction spécifique, ajustée selon la sensibilité spectrale de l'œil humain, exprimée en Candelas par mètre carré (cd/m²).

$$L = \frac{I}{S \cdot \cos \theta} \quad (1-5)$$

L : en [cd/m²]

S : en [m²]

I : en candela [cd]

Θ : angle entre la normale à la surface et une direction d'émission de lumière

I.4.1.5 Éclairement lumineux :

Mesure de la lumière reçue par une surface, ajustée selon la sensibilité spectrale de l'œil humain, exprimée en Lux (lx).

$$E = \frac{\varphi}{S} \quad (1-6)$$

φ : Flux lumineux, en Lumens [Lm]

S : Surface, en [m²]

E : Eclairement en Lux [lx]

I.5. Source Lumineuses :

Il existe de multiples sources lumineuses :

Le soleil ;

La flamme de bougie, lampe à pétrole, bec de gaz, lampe à arc ;

Les lampes à incandescence ;

Les tubes à décharge, tubes fluorescents (tubes "néon ") ;

Les lasers et les diodes-lasers ;

Les diodes électroluminescentes (DEL), (Light Emitting Diodes (LED))

Elles sont caractérisées par :

Leur intensité ;

Leur couleur, ou plus précisément par leur spectre d'émission ;

Leur directivité : émission toutes les directions ou dans une direction donnée ;

Leur taille : source ponctuelle, source étendue. [5]

I.6 La luminance :

La luminance, en optique, est une mesure de la luminosité perçue d'une source lumineuse par unité de surface vue dans une direction donnée. Elle est déterminée par la quantité de lumière émise par une source dans une direction spécifique et par la façon dont cette lumière est distribuée spatialement. La luminance est souvent exprimée en candela par mètre carré (cd/m^2) et est cruciale dans la conception de systèmes d'éclairage, car elle influence directement la perception visuelle et le confort des utilisateurs. Le fait de comprendre la luminance permet de concevoir des dispositifs d'éclairage qui répondent aux normes ergonomiques et esthétiques, tout en assurant un niveau de luminosité adéquat pour les activités humaines. Les normes et les mesures de la luminance sont régies par des organisations telles que la Commission internationale de l'éclairage (CIE) et l'International Electrotechnical Commission (IEC), assurant ainsi une uniformité et une précision dans l'évaluation de la luminance. [6]

I.7. Concept et unité de mesure (Lumen) :

Le concept de lumen est fondamental en photométrie, représentant une unité de mesure pour la quantité totale de lumière visible émise par une source lumineuse dans toutes les directions. Un lumen équivaut à la quantité totale de flux lumineux émise par une source ponctuelle uniforme de 1 candela (cd) dans un angle solide de 1 stéradian (sr). Cette unité de mesure est essentielle pour évaluer la luminosité perçue d'une source lumineuse par l'œil humain, en prenant en compte la sensibilité différentielle de l'œil à différentes longueurs d'onde de la lumière. Ainsi, le lumen permet de quantifier objectivement la performance lumineuse d'une source, en tenant compte de son rendement spectral et de sa distribution spatiale. Cette mesure est largement utilisée dans l'industrie de l'éclairage pour spécifier la puissance lumineuse des lampes et des luminaires, facilitant ainsi la comparaison et le choix des produits en fonction des besoins d'éclairage spécifiques. La compréhension du concept de lumen est essentielle pour concevoir des systèmes d'éclairage efficaces et adaptés aux exigences d'application. [6]

I.8 L'éclairement :

C'est une grandeur qui mesure la quantité de lumière qui frappe une surface donnée. Elle exprime la densité de flux lumineux incident sur une surface et se mesure en lux (lx). Un lux équivaut à un flux lumineux d'un lumen réparti uniformément sur une surface d'un mètre carré. C'est une mesure importante dans le domaine de l'éclairage, car elle permet de quantifier la luminosité réelle d'une zone ou d'un objet sous l'effet d'une source lumineuse. [7]

I.9.Eclairement d'une surface :

Il correspond au quotient du flux lumineux reçu (qui tient compte de la composition spectrale de la lumière) par cette surface par cette dernière [7] :

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad (1-7)$$

E : Eclairement en Lux [lx]

L'éclairement d'une surface mesure la quantité de lumière qui atteint un élément unitaire de cette surface. Si un flux $\Delta\phi$ atteint une surface ΔA , alors :

$$E = \frac{\Delta\phi}{\Delta A} \quad (I-8)$$

Pour une surface finie A éclairée uniformément par un flux ϕ ,

$$E = \frac{\phi}{A} \quad (I-9)$$

I.10.Relation entre le flux lumineux et l'éclairement :

On peut bien voir cette relation en considérant la zone sur laquelle la lumière est distribuée. L'éclairement est calculé en divisant le flux lumineux par la zone sur laquelle la lumière se propage, cela peut s'exprimer comme suit [8] :

$$E = \frac{d\phi}{dS} = \iint_S E dS \quad (I-10)$$

I.11 Utilisation de l'éclairement pour estimer la quantité de lumière disponible dans différents endroits :

L'utilisation de l'éclairement pour estimer la quantité de lumière disponible dans différents endroits est essentielle dans la conception d'éclairage. En effet, l'éclairement permet de déterminer la luminosité effective d'un espace ou d'une zone donnée, ce qui influence directement la qualité de l'éclairage et le confort visuel des occupants.

Les concepteurs d'éclairage utilisent des logiciels de simulation et des calculs photométriques pour estimer les niveaux d'éclairement dans différents endroits. Ces outils prennent en compte divers paramètres, tels que la disposition des luminaires, leur puissance, leur distribution lumineuse, ainsi que les propriétés réfléchissantes des surfaces environnantes.

En analysant les résultats des calculs d'éclairement, les concepteurs peuvent ajuster la disposition des luminaires, leur intensité lumineuse et d'autres paramètres pour garantir des niveaux d'éclairement appropriés dans chaque zone de l'espace. Par exemple, dans un bureau, une école ou un hôpital, il est crucial d'avoir un éclairage suffisant pour soutenir les activités visuelles des occupants et favoriser leur confort visuel. [9]

I.12 Rôle du flux lumineux dans l'éclairage :

Le flux lumineux est une notion fondamentale dans le domaine de l'éclairage. Il fait référence à la quantité totale de lumière visible émise par une source lumineuse par unité de temps. Le flux lumineux quantifie la luminosité globale d'une source lumineuse. Le flux lumineux est crucial dans la conception de l'éclairage, car il a un impact direct sur la quantité de lumière émise et l'éclairement résultant dans un espace donné [7].

I.13 Différents types d'éclairage :

Les sources lumineuses peuvent être classées en différentes catégories en fonction de leur nature et de leur spectre d'émission. Voici quelques types de sources lumineuses courantes et leur impact sur la photométrie [7] [10] :

I.13.1 Sources continues :

Ces sources émettent une lumière constante sur une gamme de longueurs d'onde. Les lampes à incandescence et les lampes fluorescentes sont des exemples de sources lumineuses continues. Leur spectre est relativement continu, ce qui facilite la mesure de la photométrie dans une large gamme de longueurs d'onde. Elles sont souvent utilisées dans les applications de photométrie où une émission constante est nécessaire.

I.13.2 Sources discrètes :

Ces sources émettent de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques, comme les diodes électroluminescentes (LED) ou les lasers. Leur spectre est souvent étroit, ce qui signifie qu'ils émettent de manière sélective à certaines longueurs d'onde. Leur utilisation peut nécessiter une calibration spécifique pour s'assurer que les mesures photométriques sont précises dans les longueurs d'onde pertinentes.

I.13.3. Sources monochromatiques :

Ce sont des sources qui émettent une seule longueur d'onde spécifique. Les lasers sont un exemple courant de sources monochromatiques. Leur spectre est extrêmement étroit, ce qui en fait des outils précieux pour des applications de photométrie nécessitant une résolution spectrale élevée.

I.13.4 Sources naturelles :

La lumière du soleil est l'exemple le plus évident de source lumineuse naturelle. Le spectre solaire est continu mais varie en fonction de divers facteurs tels que la position géographique, l'heure de la journée et les conditions atmosphériques.

I.14.Méthodes de mesure de l'éclairage et outils associés :**I.14.1 Mesure de l'éclairement :**

Les mesures doivent être réalisées à l'aide de luxmètre bien étalonné et ayant une réponse spectrale correspondant à une norme définie par la Commission Internationale de l'Eclairage.

Il faut d'une part déterminer l'éclairement moyen général dans le local qui correspond à la moyenne des éclairements relevés en un certain nombre de points significatifs du local, la cellule du luxmètre étant placée horizontalement à la hauteur du plan utile. Il faut encore vérifier le niveau d'éclairement au poste de travail en plaçant la cellule au niveau des détails et des objets qui doivent être vus pour que la tâche puisse être exécutée, le salarié étant à son poste de travail dans sa position habituelle. La personne effectuant la mesure doit veiller à ne pas modifier par sa présence l'éclairement du poste de travail.

Si dans le local concerné, des fluctuations de flux lumineux sont prévisibles, dues en particulier à l'éclairage naturel, il est important de relever au poste de travail les niveaux d'éclairement à différentes périodes de la journée ou de l'année [11].

I.14.2 Mesure des luminances :

Les mesures sont effectuées à l'aide d'un luminance-mètre répondant à certaines normes. Le luminance-mètre est placé à la hauteur des yeux des travailleurs et orienté dans la direction de la source lumineuse, du reflet ou de la surface concernée [12].

I.15 La qualité de lumière :

Les critères de choix :

Avant même de choisir le matériel d'éclairage, il est indispensable de connaître deux notions d'éclairagisme fondamentales pour définir le type de lampes à savoir la température de couleur et l'indice de rendu des couleurs.

En effet, la couleur influence considérablement notre perception de l'environnement et nos performances visuelles.

I.15.1. L'indice de rendu des couleurs (IRC) :

C'est un indicateur important de la qualité de la lumière, car il permet d'évaluer la capacité d'une source lumineuse à reproduire fidèlement les couleurs. Un IRC élevé, en particulier un R_a élevé, est généralement préférable dans de nombreuses applications où la précision des couleurs est importante, telles que l'éclairage commercial, artistique et médical[12].

$$R_A = \frac{1}{8} \sum R_i \quad (i \text{ de } 1 \text{ à } 8) \quad (\text{I-11})$$

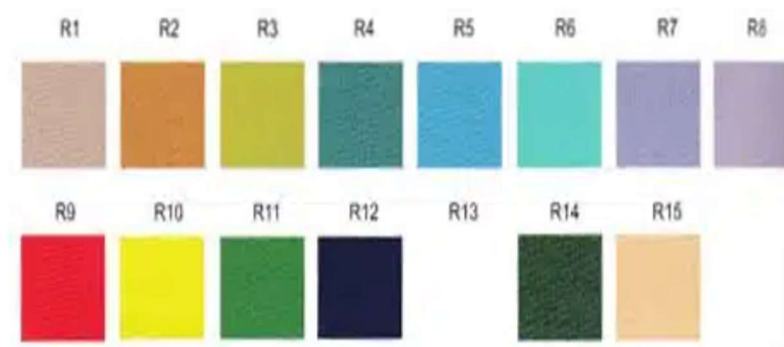


Fig. (I.1) : Palette de couleurs définie pour le calcul de l'IRC

	1	2	3	4	5	6	7	8
x	0,37797	0,38553	0,37219	0,28708	0,25977	0,24356	0,28765	0,32909
y	0,34121	0,4053	0,47375	0,41432	0,32069	0,25718	0,25354	0,27408
Notation Munsell	7,5 R 6/4	5 Y 6/4	5 GY 6/8	2,5 G 6/6	10 BG 6/4	5 PB 6/8	2,5 P 6/8	10 P 6/8
Notation CIE 13.3	light greyish red	dark greyish yellow	strong yellow green	moderate yellowish green	light bluish green	light blue	light violet	light reddish purple
Désignation Afnor	rose-orangé moyen	beige-jaune foncé	vert-jaune intense	vert moyen	bleu-vert moyen	bleu-violet clair	violet clair	pourpre grisé

Tableau (I.1) : Valeurs des couleurs R1 à R8

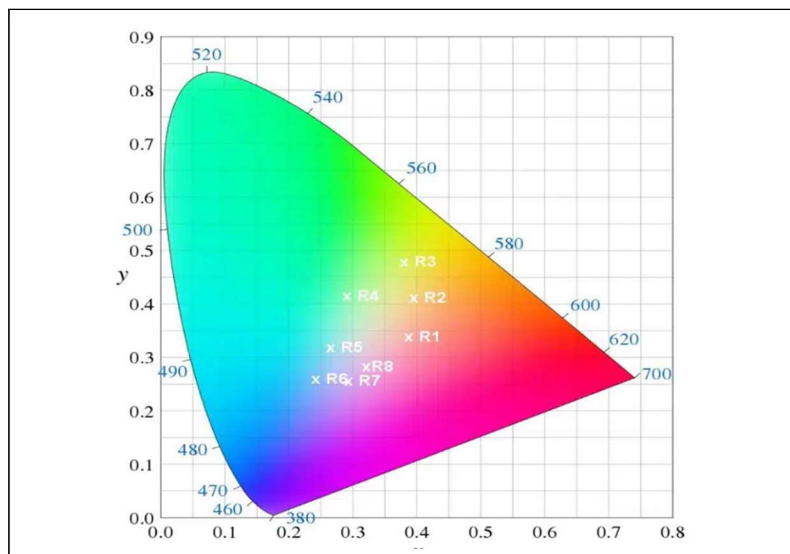


Fig. (I.2) : Positions des couleurs R1 à R8 dans le diagramme de chromaticité CIE (1931 - D65)

Calcul de l'IRC :

Le principe de calcul est simple, il est basé sur :

Les couleurs et une source de référence sont définies par la CIE 13.3 : 1995 et la FD X 08-018

Le spectre de la source étudiée est mesuré (seule mesure à effectuer)

Les rendus des couleurs sur les échantillons de couleurs définis, d'une part par la source de référence et d'autre part par la source étudiée sont comparés pour déterminer l'IRC

Voici le schéma de principe :

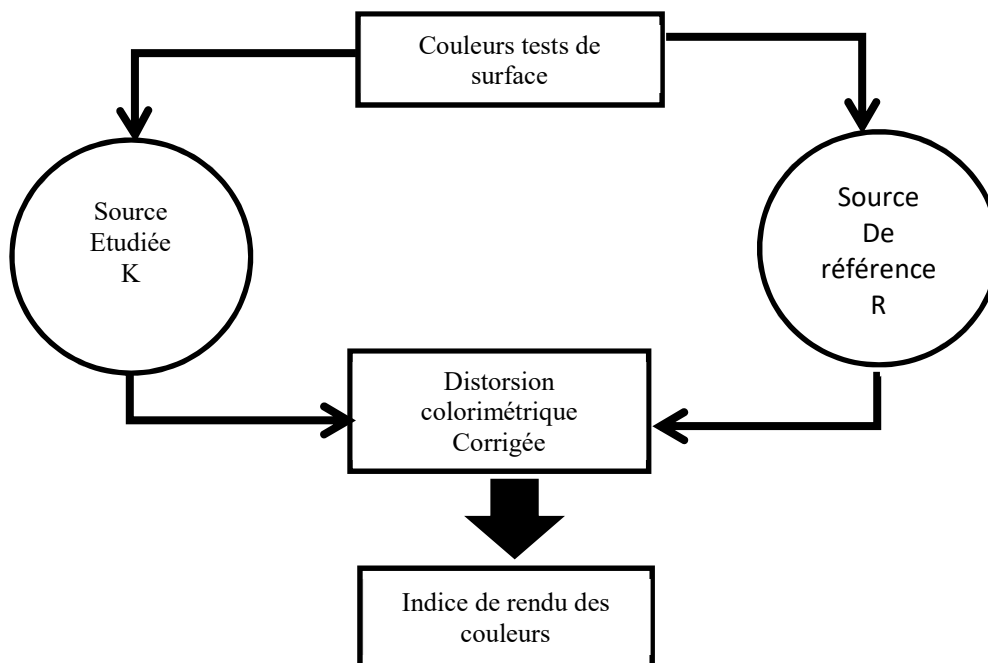


Fig. (I.3) : Schéma de de calcul IRC.

I.15.2 La température de couleur :

La température de couleur reste un facteur important pour garantir un rendu visuel optimal. Par exemple, dans le domaine de l'imagerie médicale, une température de couleur précise peut être cruciale pour assurer une interprétation précise des images radiographiques. De même, dans le domaine cinématographique, la température de couleur est souvent ajustée pour créer des ambiances spécifiques ou pour correspondre à une certaine esthétique visuelle.

Alors la température de couleur, mesurée en Kelvin, est un élément essentiel pour obtenir le rendu des couleurs souhaité dans diverses applications, qu'il s'agisse de l'imagerie médicale, de la photographie, du cinéma ou même de l'affichage sur les écrans d'appareils électroniques[12].

I.16 Défis et innovations dans le domaine de la photométrie :

I.16.1 Défis :

I.16.1.1 Améliorer la précision et la fiabilité des mesures :

La photométrie est une science complexe et les mesures peuvent être affectées par de nombreux facteurs, tels que la température, l'humidité, la distance entre la source et le détecteur, et les caractéristiques spectrales de la source. Il est important de développer des techniques et des instruments pour améliorer la précision et la fiabilité des mesures photométriques ([13], [14]).

I.16.1.2 Développer de nouveaux instruments et techniques :

Les technologies de mesure de la lumière évoluent constamment et il est important de développer de nouveaux instruments et techniques pour répondre aux besoins des utilisateurs. Cela inclut des instruments plus petits, plus portables et plus faciles à utiliser, ainsi que des techniques pour mesurer des paramètres plus complexes, tels que la polarisation de la lumière [13], [14].

I.16.1.3 Harmoniser les normes et les procédures :

Il existe de nombreuses normes et procédures différentes pour la mesure de la lumière, ce qui peut rendre difficile la comparaison des résultats entre différents laboratoires et industries. Il est important d'harmoniser les normes et les procédures pour faciliter la collaboration et le partage des données [13], [14].

I.16.2 Innovations :

Nouveaux détecteurs :

De nouveaux types de détecteurs sont en cours de développement qui offrent une meilleure sensibilité, une meilleure résolution spectrale et une plage dynamique plus large que les détecteurs traditionnels. Cela permettra d'améliorer la précision et la fiabilité des mesures photométriques ([15], [16]).

I.16.3 Sources de lumière plus stables et plus précises :

De nouvelles sources de lumière sont en cours de développement qui sont plus stables et plus précises que les sources traditionnelles. Cela permettra d'améliorer la précision des mesures photométriques et de faciliter la comparaison des résultats entre différents laboratoires [17], [18].

I.16.4 Techniques d'étalonnage plus précises :

De nouvelles techniques d'étalonnage sont en cours de développement qui permettront d'améliorer la précision des instruments de mesure de la lumière [19].

I.16.5 Intelligence artificielle et apprentissage automatique :

L'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique sont utilisés pour développer de nouvelles techniques de traitement et d'analyse des données photométriques. Cela permettra d'améliorer la précision et l'efficacité des mesures photométriques [20].

I.16.5.1 Exemples d'applications :

I.16.5.1.1 Industrie :

La photométrie est utilisée dans de nombreuses industries pour contrôler la qualité des produits, surveiller les processus de production et garantir la sécurité des travailleurs [21].

I.16.5.1.2 Recherche scientifique :

La photométrie est utilisée dans de nombreux domaines de la recherche scientifique, tels que l'astronomie, la chimie, la physique et la biologie [21].

I.16.5.1.3 Médecine :

La photométrie est utilisée dans le domaine médical pour diagnostiquer et traiter des maladies, telles que le cancer et les maladies cardiaques [21].

I.16.5.1.4 Éclairage :

La photométrie est utilisée pour concevoir et optimiser les systèmes d'éclairage [21].

I.17.Conclusion:

La photométrie n'est pas seulement un domaine scientifique, mais une discipline transversale qui impacte de manière significative notre quotidien, de l'éclairage de nos espaces de vie à la compréhension des processus biologiques fondamentaux. Alors que nous continuons à explorer les limites de notre compréhension de la lumière et de ses interactions avec le monde qui nous entoure, de nouvelles opportunités émergent pour améliorer notre qualité de vie, notre productivité et notre bien-être. Grâce à des avancées technologiques constantes, telles que l'intégration de l'intelligence artificielle et des nouveaux détecteurs, nous sommes sur le point de déverrouiller de nouveaux niveaux de précision et de sophistication dans la mesure et la manipulation de la lumière. En poursuivant notre engagement dans la recherche et le développement dans le domaine de la photométrie, nous pouvons anticiper des avancées qui transformeront notre manière d'éclairer, de percevoir et d'interagir avec le monde visuel qui nous entoure. En définitive, la photométrie est bien plus qu'une simple science; c'est une force motrice qui façonne notre avenir lumineux.

CHAPITRE II

Différents types de lampes

II.1. Introduction :

La technologie des lampes a connu une évolution significative au fil des années, passant des ampoules à incandescence traditionnelles aux technologies plus modernes et plus économique. Les principales catégories comprennent les lampes à incandescence, les lampes fluorescentes, les lampes halogènes, les lampes à LED, ainsi que d'autres technologies comme les lampes au sodium à haute pression, les lampes au xénon et les lampes à induction.

Dans ce chapitre, nous explorerons les différentes technologies d'éclairage et les types d'appareils disponibles sur le marché, chacun offrant des caractéristiques uniques adaptées à diverses applications.

II.2 Types d'appareil d'éclairage et lampes :

Il existe une grande variété de sources lumineuses et de luminaires sur le marché. Selon le type de pièce que nous souhaiterons éclairer, on devra savoir choisir les caractéristiques d'un luminaire adapté à une application choisie. Il existe trois façons de convertir l'énergie électrique en lumière : la lumière incandescente, la luminescence et la fluorescence.

II.2.1 Conversion d'énergie par incandescence :

II.2.1.1 Principe :

La conversion d'énergie électrique en lumière par incandescence implique le chauffage d'un filament à haute température à l'intérieur d'une ampoule. Cela produit un spectre de rayonnement continu et est commun dans les lampes à incandescence traditionnelles [22] [23] [24].

II.2.1.2 Lampe à incandescence :

La première ampoule électrique a été développée il y a plus de 100 ans, attribuée à Joseph Swan et Thomas Edison, bien qu'ils aient travaillé indépendamment. Leurs inventions étaient basées sur des recherches antérieures de scientifiques tels que Humphry Davy. Les lampes à incandescence, historiquement les plus anciennes et les plus couramment utilisées par le grand public, ont été brevetées par Edison en 1879.

Les ampoules à incandescence modernes sont composées d'un filament en tungstène, appelé filament, qui est chauffé à incandescence dans un vide ou une atmosphère neutre pour éviter la combustion. Lorsque l'électricité traverse le filament, il devient très chaud et émet une lumière blanche chaude. Cependant, ce processus est inefficace, avec environ 95% de l'énergie convertie en chaleur et seulement 5% en lumière. Malgré leur faible efficacité, les lampes à

incandescence ont été largement utilisées. La plupart des ampoules à incandescence ont une forme ovale ou ronde, d'où le terme "ampoule", bien que certaines aient une configuration droite similaire à des tubes fluorescents.

II.2.1.3 Constitution :

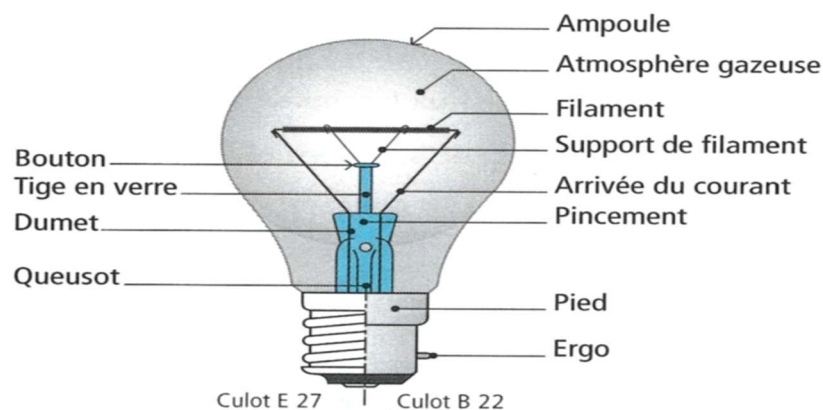


Fig. (II.1) : Lampe à incandescence

II.2.1.4 Le filament :

Pour obtenir un éclairage important et une lumière similaire à celle du jour, il est nécessaire d'utiliser un filament capable d'être porté à une température très élevée. C'est pourquoi les lampes à incandescence, qui visent à produire une lumière chaude et intense, utilisent des filaments en tungstène. Le tungstène est un matériau capable de supporter des températures extrêmement élevées sans fondre [24].

On utilise généralement le tungstène qui supporte une température du filament jusqu'à 3000°K. Afin de réduire l'encombrement et les pertes de chaleur le filament est généralement spiralé. De nos jours, on utilise la forme de la double spire qui permet non seulement de réduire les pertes d'énergie mais aussi d'augmenter l'efficacité lumineuse des lampes. Des supports en molybdène assurent le bon positionnement des filaments [24].

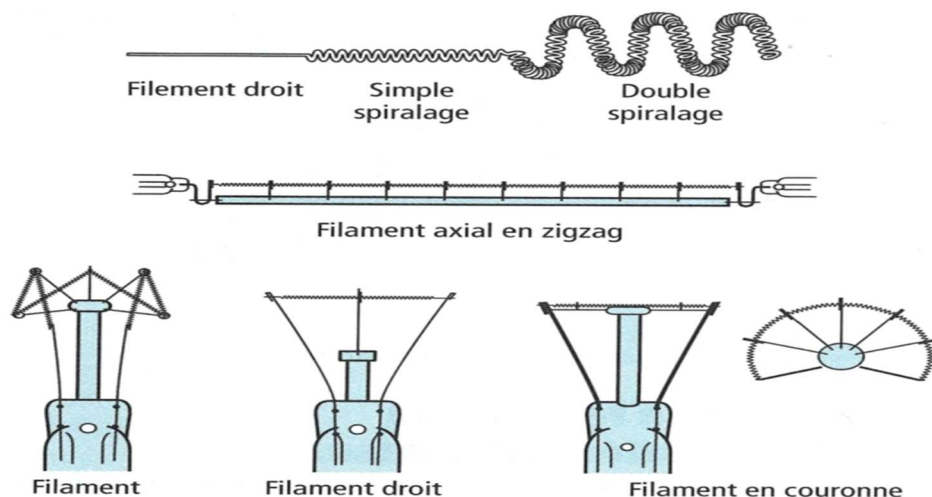


Fig. (II.2) : Différents types de filaments

II.2.1.5 Le culot :

Il assure le raccordement électrique et la fixation de la lampe dans son support. Il existe plusieurs types de culot : à vis, à baïonnette ou lisses.

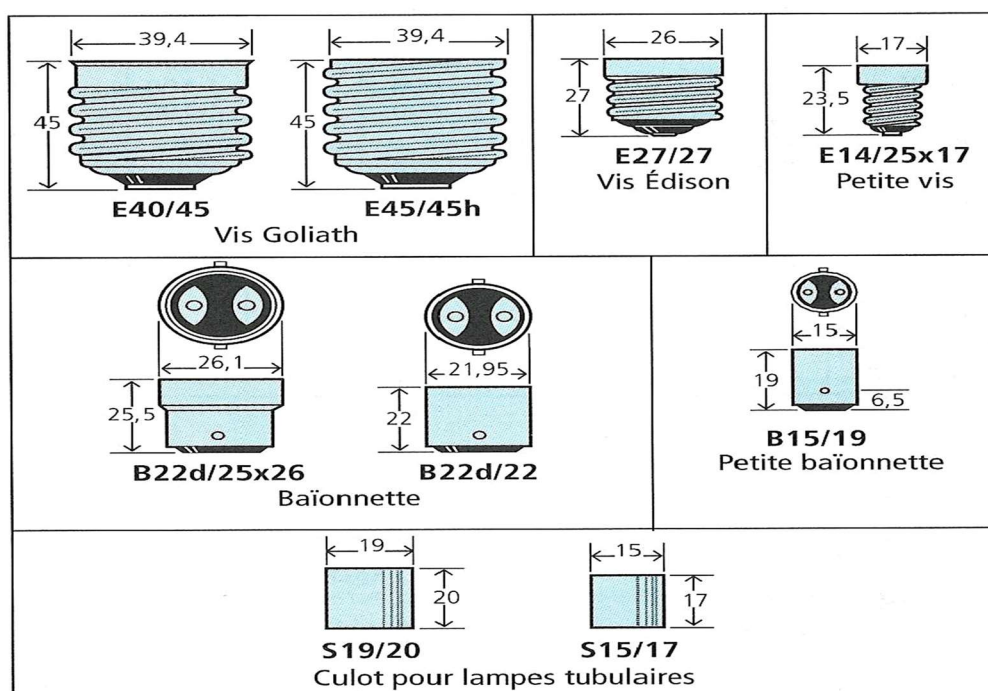


Fig. (II.3) : Les différents types de culots.

II.2.1.6. Avantages et inconvénients des lampes à incandescence:**II.2.1.6.1. Avantages :**

Les lampes à incandescence ont historiquement été moins chères à l'achat par rapport à certaines alternatives.

Elles offrent une lumière chaude et agréable, souvent préférée dans certains contextes, comme l'éclairage résidentiel.

Les lampes à incandescence s'allument immédiatement, sans temps de chauffe (mise en marche instantanée).

Elles peuvent être facilement variées en intensité en fonction de la tension appliquée, offrant une régulation simple de la luminosité.

II.2.1.6.2 Inconvénients :

Elles convertissent une grande partie de l'énergie en chaleur plutôt qu'en lumière, ce qui les rend inefficaces sur le plan énergétique.

Elles produisent une quantité significative de chaleur, ce qui peut augmenter la charge de refroidissement dans les espaces climatisés.

En raison de leur faible efficacité énergétique, elles contribuent à une consommation d'énergie plus élevée et génèrent plus de déchets (impact environnemental).

Les lampes à incandescence sont sensibles aux chocs et aux vibrations, ce qui peut réduire leur durée de vie dans certaines applications.

II.2.2 Conversion d'énergie par fluorescence et luminescence :**II.2.2.1 Principe :**

La lumière émise dans les lampes à décharge de gaz est générée par l'excitation d'un gaz, tel que le néon, l'azote ou d'autres gaz, présents à l'intérieur d'un tube sous basse pression. Si on alimente ce tube, qui est généralement vidé d'air et contient le gaz à une pression de 1 à 10 mm de mercure, avec une tension électrique aux extrémités duquel sont placées deux électrodes, on observe l'apparition d'une lueur à l'intérieur du tube lorsque la tension augmente. Ce phénomène est appelé luminescence. Lorsque le gaz est excité par la tension électrique, les électrons dans le gaz absorbent de l'énergie et passent à des niveaux d'énergie plus élevés. Lorsqu'ils retournent à leur état initial, ils émettent de la lumière. La couleur de la lumière dépend du type de gaz

utilisé. Les lampes à décharge de gaz, telles que les lampes fluorescentes ou les tubes néon, sont connues pour leur efficacité énergétique et leur capacité à produire une lumière vive et colorée.

Remarque :

Selon la nature du gaz, la couleur obtenue est différente : (Néon - » rouge, Azote - » rose, Mercure -> bleu, Sodium -> orange).

La luminescence émet un rayonnement ultraviolet invisible pour l'homme. Lorsque ce rayonnement excite une substance fluorescente, il y a production d'un rayonnement visible : phénomène de fluorescence [24] [25] [26].

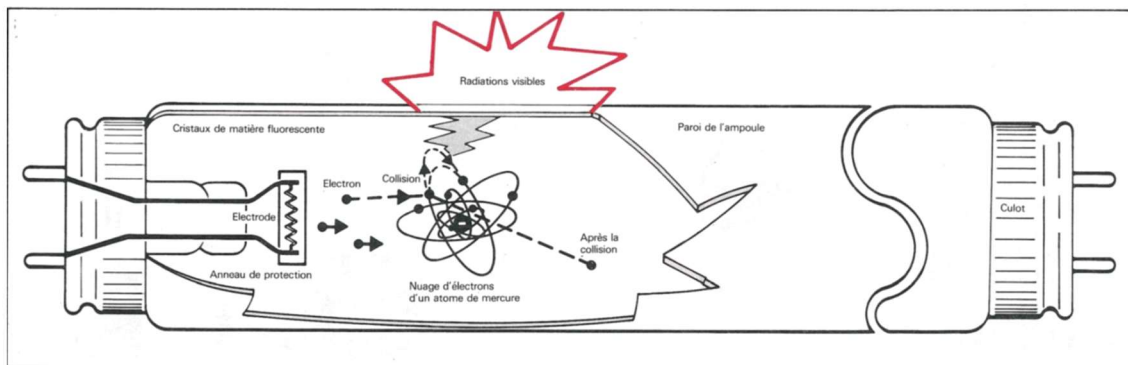


Fig. (II.4) : Principe de l'émission de la lumière par fluorescence

II.2.2.2 Constitution :

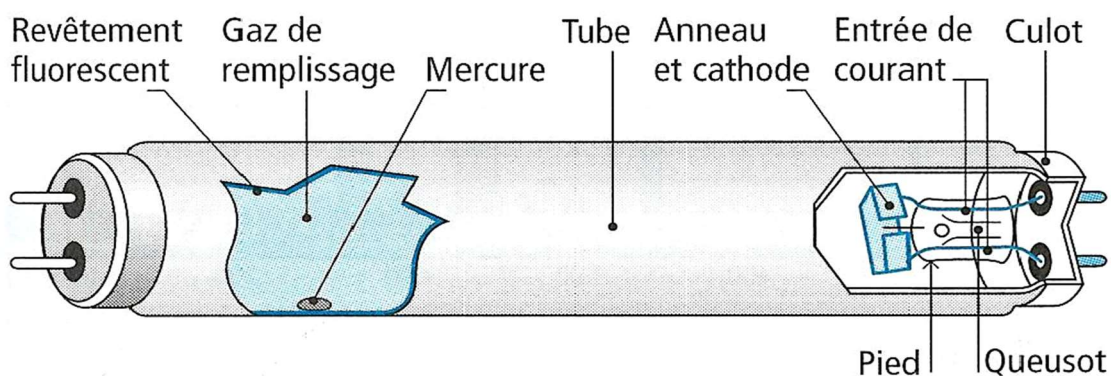


Fig. (II.5) : Tube fluorescent

II.2.2.3 Les électrodes :

Les électrodes à l'intérieur d'une lampe à décharge de gaz sont responsables de donner naissance au courant électrique qui traverse la lampe. Elles servent de liaison électrique entre le conducteur métallique et le conducteur gazeux (le gaz à l'intérieur du tube). Ces électrodes sont généralement constituées d'un fil de tungstène tri-spiralé, ce qui signifie qu'elles sont formées en utilisant trois spirales de fil de tungstène. Ces électrodes sont enduites de substances alcalino-terreuses qui favorisent l'émission des électrons. Lorsque la tension électrique est appliquée aux électrodes, le gaz à l'intérieur du tube est excité, produisant une luminescence. Le tungstène utilisé dans les électrodes est choisi pour sa capacité à résister aux températures élevées générées pendant le fonctionnement de la lampe à décharge de gaz. Les substances alcalino-terreuses revêtant les électrodes facilitent l'émission des électrons, contribuant ainsi au processus d'excitation du gaz et à la production de lumière dans la lampe.

II.2.2.4 Les culots :

Ils supportent le tube et servent à alimenter les électrodes. Ils sont normalisés suivant la figure ci-dessous :

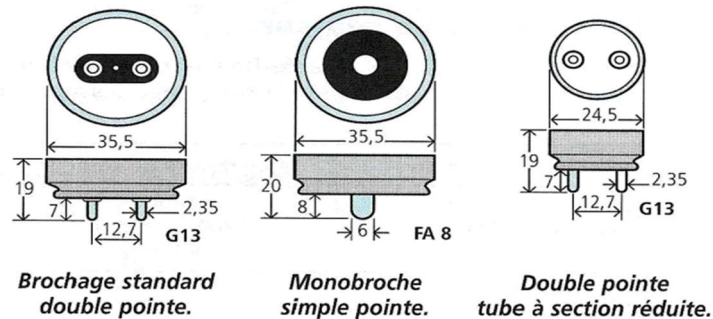


Fig. (II.6) : Différents types de culot.

II.2.2.5 Composition du tube :

Il contient de l'argon et du mercure.

Le revêtement constitué d'un mélange de sels minéraux fluorescents sous forme de poudre en cristaux de quelques microns.

II.2.2.6 Allumage du tube :

Le ballast : Organe essentiel assurant trois fonctions :

Fonction de préchauffage : Elle chauffe les électrodes pour faciliter l'émission d'électrons.

Fonction d'allumage : Elle produit une tension élevée pour amorcer un arc entre les électrodes.

Fonction stabilisation : Elle limite l'intensité du courant après l'amorçage pour éviter un court-circuit, stabilisant ainsi le courant et la puissance de la lampe [27].

II.2.2.7 Allumage par starter:

Le starter réalise un court préchauffage des électrodes et provoque une surtension qui déclenche l'allumage du tube [27].

Ces éléments décrivent le processus d'allumage et de fonctionnement d'un tube fluorescent, mettant en évidence le rôle crucial du ballast et du starter dans le processus.

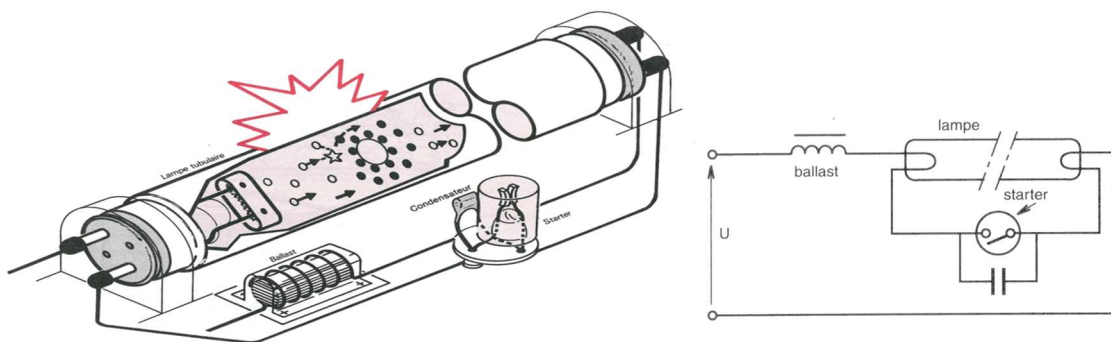


Fig. (II.7) : Allumage par starter

II.2.2.8 Avantages et inconvénients des lampes fluorescentes :

II.2.2.8.1. Les Avantages [28] :

Elles sont plus économes en énergie que les lampes à incandescence, ce qui permet de réduire la consommation d'électricité.

La durée de vie plus longue que les lampes à incandescence.

La gamme de températures de couleur disponibles offre une flexibilité pour répondre à divers besoins d'éclairage.

II.2.2.8.2. Les inconvénients [28] :

Les lampes fluorescentes contiennent une petite quantité de mercure, ce qui peut poser des problèmes environnementaux si elles ne sont pas correctement éliminées et recyclées.

Elles peuvent nécessiter un court temps de chauffe pour atteindre leur pleine luminosité (allumage initial).

Certaines applications peuvent nécessiter des formes spécifiques d'ampoules où les contraintes de taille ne sont pas bien adaptées aux lampes fluorescentes.

II.2.3 Lampes tungstène halogène basse tension :

II.2.3.1 Principe :

La lampe halogène fonctionne sur le même principe qu'une lampe à incandescence : elle produit de la lumière visible à partir d'un filament de tungstène porté à incandescence. Pour éviter une dégradation très rapide du filament, celui-ci est placé dans une ampoule à verre de quartz (pour les hautes températures) renfermant des gaz halogénés à haute pression comme l'iode et le brome [29].

A l'origine, ces lampes ont été conçues pour les projecteurs de diapositives et de cinéma. En 12 V pour la même puissance, le filament devient plus petit et plus épais que pour 230 V, ce qui permet une meilleure focalisation, ainsi qu'une augmentation du flux lumineux du fait de la plus grande masse du filament qui autorise une température de fonctionnement plus élevée. Le filament épais est plus robuste [29].

II.2.3.2 Constitution :

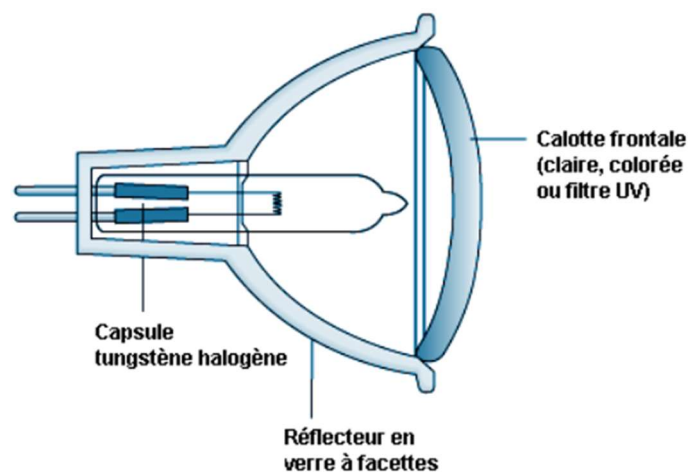


Fig. (II.8) : Lampes à réflecteur dichroïque basse tension.

II.2.3.3 Avantages des lampes halogènes basse tension [31] [32] :

Efficacité lumineuse élevée.

Température de couleur élevée.

Par rapport aux lampes à incandescence traditionnelles, les lampes halogènes basse tension ont généralement une durée de vie plus longue.

Elles peuvent être facilement utilisées avec des gradateurs pour ajuster l'intensité de la lumière, offrant une plus grande flexibilité dans l'éclairage.

II.2.3.4 Inconvénients [31] [32] :

Sont moins économes en énergie que les lampes fluorescentes, ce qui peut entraîner des coûts d'exploitation plus élevés à long terme (Consommation d'énergie élevée).

Les lampes halogènes ont tendance à dégager plus de chaleur que les lampes fluorescentes, ce qui peut être un inconvénient dans les espaces où la gestion de la chaleur est importante.

Prix plus élevé : Bien que leur durée de vie soit généralement plus longue que celle des lampes à incandescence traditionnelles, les lampes halogènes basse tension ont tendance à être plus chères à l'achat initial.

II.2.4. Les lampes à décharge :**II.2.4.1. Principe :**

Une lampe dite “à décharge” fonctionne par décharge d’un courant électrique dans une atmosphère gazeuse. Ce processus de décharge électrique à travers un gaz ou une vapeur à basse pression permet de produire de la lumière visible ou invisible, selon le type de lampe et les composants utilisés. Cette technologie est largement utilisée dans diverses applications d'éclairage en raison de son efficacité et de sa capacité à produire une lumière intense [33] [34].

Il y a deux types de lampes de décharge :

Les lampes à décharge “haute pression” (lampe au sodium haute pression, aux halogénures métalliques ou au mercure haute pression),

Lampes au sodium basse pression.

Remarque :

Les tubes fluorescents, les lampes à induction sont aussi des lampes à décharge (la lumière est aussi produite par une décharge électrique dans un gaz).

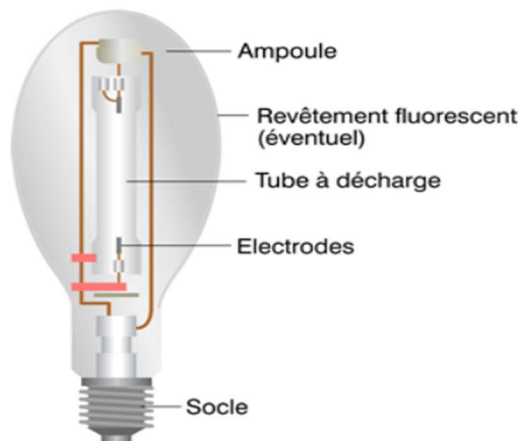
II.2.4.2. Constitution :

Fig. (II.9): Lampe à décharge

II.2.4.3 Les lampes à décharge ont besoin des éléments pour fonctionner :

Besoin d'un amorceur (l'équivalent du starter des lampes fluorescentes)

Besoin d'un ballast et d'un condensateur.

II.2.4.4 Avantages des lampes de décharge [35] :

Durabilité et longue durée de vie : Les lampes à décharge ont une durée de vie considérable, ce qui les rend économiques à long terme.

Choix varié : Elles offrent une gamme étendue de valeurs spectrales et de puissance, permettant de sélectionner le modèle le mieux adapté à chaque application.

Puissance de sortie élevée : Les lampes à décharge produisent une puissance de sortie significativement supérieure à celle d'autres types de lampes.

II.2.4.5 Inconvénients [35] :

Nécessité d'un appareil de régulation : Ces lampes nécessitent souvent un dispositif de régulation spécifique pour fonctionner correctement.

Assemblage difficile et coût élevé : Leur complexité rend leur assemblage et leur réparation difficiles, entraînant des coûts plus élevés.

Sensibilité aux fluctuations de température et de tension : Elles peuvent être sensibles aux changements de température et aux pics de tension, ce qui peut affecter leur fonctionnement.

Temps de démarrage important : Certaines lampes à décharge nécessitent un certain temps pour atteindre leur luminosité maximale après leur mise sous tension.

Élimination spécifique : Les lampes contenant du mercure nécessitent une élimination spécifique pour éviter toute contamination.

Malgré ces inconvénients, les lampes à décharge de gaz restent populaires en raison de leur puissance et de leur efficacité, les rendant toujours compétitives sur le marché de l'éclairage.

II.2.5 Diodes électroluminescentes ou LED (Light Emitting Diodes) :

II.2.5.1 Principe :

Le principe de fonctionnement d'une diode électroluminescente se base sur un semi-conducteur qui émet de la lumière lorsqu'un courant le traverse. Les LED sont couramment utilisées dans de nombreuses applications, mais le développement récent de diodes blanches ou bleues à fort rendement lumineux ouvre de nouvelles perspectives, notamment dans la signalisation (feux de circulation, panneaux de sécurité ou éclairage de secours).

Le courant moyen des LED est de 20 mA et la chute de tension est comprise entre 1,7 et 4,6 V selon la couleur.

Ces caractéristiques sont donc bénéfiques pour les alimentations très basse tension, notamment celles provenant de batteries. L'alimentation secteur nécessite un convertisseur [36].

II.2.5.2. Constitution :

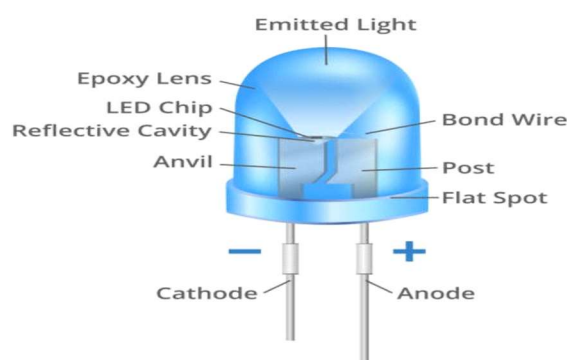


Fig. (II.10) : Lampe Diodes électroluminescentes (LED)

II.2.5.3 Avantages des LED :

Lorsque l'on parle de la puissance lumineuse d'une diode électroluminescente (LED), il est important de noter que chaque diode individuelle a une luminosité relativement basse.

Cependant, leur faible consommation d'énergie et leur capacité à fonctionner à des températures réduites contribuent à leur longévité. Pour obtenir un éclairage plus intense, les diodes LED sont souvent connectées en série. Cela signifie que plusieurs diodes sont alignées les unes après les autres dans un circuit. Lorsqu'elles sont alimentées en série, la tension s'additionne, ce qui permet d'obtenir des niveaux de luminosité plus élevés. Malgré la nécessité d'utiliser plusieurs diodes pour un éclairage puissant, l'efficacité énergétique et la durée de vie prolongée des LED en font une option très attrayante par rapport à d'autres technologies d'éclairage plus traditionnelles. [37]

II.2.5.4 Inconvénients des LED :

Bien que les coûts des LED aient considérablement diminué au fil du temps, leur prix initial peut encore être plus élevé que celui d'autres sources lumineuses. Cependant, cela est souvent compensé par leurs économies d'énergie et leur longue durée de vie.

Les LED produisent moins de chaleur que les lampes à incandescence, elles peuvent être sensibles à une accumulation de chaleur, ce qui peut affecter leur performance [37].

Les LED génèrent des harmoniques dans les réseaux électriques. Ces harmoniques peuvent altérer la qualité de l'électricité et, à grande échelle, affecter la stabilité des réseaux électriques.

II.3. Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a exploré en détail les différents types de lampes disponibles sur le marché, mettant en lumière leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et inconvénients respectifs. Nous avons examiné les lampes à incandescence, qui bien qu'historiquement populaires, présentent des inconvénients majeurs en termes d'efficacité énergétique et de durabilité. Les lampes fluorescentes ont été présentées comme une alternative plus efficace sur le plan énergétique, offrant une durée de vie plus longue et une variété de températures de couleur, bien que leur contenu en mercure nécessite une gestion environnementale appropriée.

Enfin, les diodes électroluminescentes (LED) ont été mises en avant pour leur efficacité énergétique, leur longévité et leur capacité à fournir un éclairage brillant tout en générant peu de chaleur. Cependant, leur coût initial plus élevé peut être un facteur à considérer. Dans l'ensemble, le choix d'un type de lampe dépendra des besoins spécifiques d'éclairage, des considérations environnementales et budgétaires, ainsi que des préférences esthétiques de l'utilisateur.

CHAPITRE III

Introduction au recyclage des lampes LED

III.1 Introduction :

Les lampes à LED ont commencé à être mises sur le marché, au début des années 2000. Elles présentent des avantages incontournables par rapport aux lampes fluo-compactes CFL, telles qu'une meilleure durée de vie (15000 à 20000 heures contre 6000), une consommation moindre (5 W contre 18 W) et une meilleure efficacité lumineuse. Par ailleurs, elles équipent des dispositifs d'éclairage intelligents et ne contiennent pas de substances polluantes mercurielles. L'émergence de cette nouvelle technologie des semi-conducteurs permet un gain remarquable, en consommation énergétique, évalué entre 70% à 90%, tout en assurant la même fonction d'usage. En plus de ces caractéristiques, les équipements à LED sont plus vertueux pour l'environnement. Grâce à ces caractéristiques, les équipements à LED sont considérés comme plus respectueux de l'environnement et offrent une solution durable pour l'éclairage dans une variété d'applications domestiques, commerciales et industrielles.

III.2 Recyclage les lampes LED :

Le recyclage des LED contribue à la préservation de l'environnement, à la conservation des ressources, à la réduction de la pollution et à la conformité réglementaire, tout en favorisant une économie circulaire plus durable. En recyclant les LED en fin de vie, on évite qu'elles ne se retrouvent dans les décharges, réduisant ainsi la quantité de déchets électroniques et les risques environnementaux associés à leur élimination, tels que les métaux lourds et les plastiques, peuvent être nocifs pour l'environnement s'ils sont mal gérés. En recyclant les LED de manière appropriée, on réduit les risques de pollution des sols, de l'eau et de l'air [38].

III.3 Composition d'une lampe à technologie LED :

Les avancées technologiques récentes ont ouvert un large éventail d'applications industrielles pour les LED. Leur polyvalence et leur efficacité énergétique en font des choix attrayants pour une variété de besoins d'éclairage, des plus décoratifs aux plus fonctionnels [39].

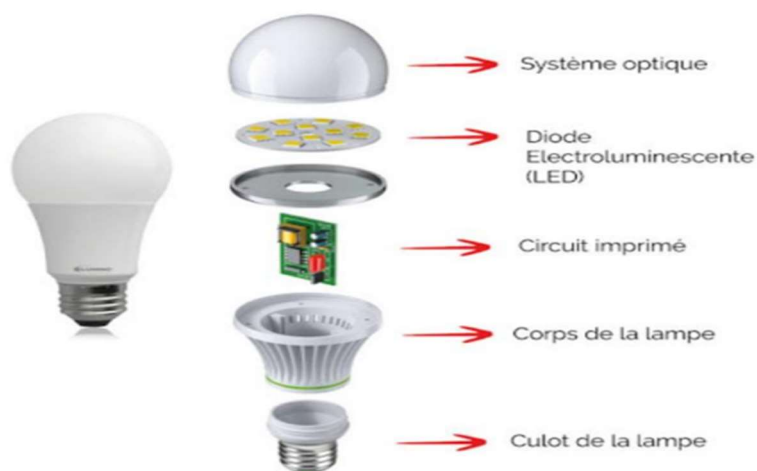


Fig. (III-1) : Composition d'une lampe à technologie LED.

III.4 Exemples d'applications :

Utilisées dans la fabrication de luminaires pour l'éclairage intérieur et extérieur. Leur petite taille permet une conception flexible, tandis que leur efficacité énergétique contribue à réduire la consommation d'énergie.

Les spots encastrables à LED offrent un éclairage directionnel précis et peuvent être utilisés dans une variété d'applications résidentielles et commerciales.

Les projecteurs à LED sont couramment utilisés pour l'éclairage extérieur, y compris l'éclairage architectural, l'éclairage de sécurité et l'éclairage de scène. Leur durabilité et leur faible entretien en font un choix populaire pour les applications extérieures.

III.5 La composante visée dans le recyclage des LED :

La partie la plus intéressante à recycler économiquement est la puce LED et les panneaux électriques, et pour plusieurs raisons :

Les puces LED et les cartes électroniques contiennent des matériaux précieux tels que l'or, l'argent, le cuivre et le palladium. Leur récupération peut donc être économiquement rentable.

Les lampes LED contiennent souvent des composants électroniques complexes qui peuvent être nocifs pour l'environnement s'ils sont jetés dans des décharges. En recyclant les puces LED et les cartes électroniques, on réduit la quantité de déchets électroniques et on évite la pollution environnementale.

La récupération des matériaux précieux contenus dans les puces LED et les cartes électroniques permet de réduire la nécessité d'extraire de nouvelles ressources naturelles. Cela contribue à la préservation des ressources et à la réduction de l'empreinte écologique de l'industrie électronique.

III.6 L'importance du recyclage des LED :

Le recyclage des lampes LED est effectivement crucial pour minimiser leur impact sur l'environnement et préserver les ressources naturelles. Les LED sont souvent vantées pour leur faible impact écologique par rapport à d'autres types d'éclairage en raison de l'absence de mercure et de la faible consommation d'énergie. Cependant, comme pour tout produit électronique, leur fabrication et leur élimination peuvent avoir des répercussions environnementales significatives.

En recyclant les lampes LED, non seulement on préserve ces ressources précieuses, mais on évite également l'ajout de ces déchets électroniques aux sites d'enfouissement. De plus, le recyclage permet de réduire les émissions de CO² et de limiter l'extraction de nouvelles matières premières, contribuant ainsi à la préservation de l'environnement [41].

III.7 Le processus suivi pour le recyclage des lampes LED :

Le défi réside dans l'établissement d'un processus industriel permettant le traitement des produits LED. Habituellement, les ampoules LED sont identifiables par un logo représentant une poubelle barrée, indiquant qu'elles ne doivent pas être jetées avec les déchets ménagers, mais plutôt recyclées. Les lampes LED sont principalement composées de verre (88%), de quelques métaux (5%) et de diverses matières (7%), incluant des métaux précieux tels que l'indium, le gallium et certains terres rares. De plus, elles contiennent plusieurs composants électroniques tels que des diodes, des semi-conducteurs et des transformateurs, nécessitant un traitement similaire à celui des équipements électroniques standard. Ainsi, les lampes LED peuvent être recyclées de la même manière que les ampoules à décharge ou fluorescentes compactes. Il suffit de les déposer dans des points de collecte, tels que les grandes surfaces ou les magasins de bricolage [41].

III.8 Les derniers défis à relever pour le recyclage des LED :

Le recyclage des lampes LED présente encore plusieurs défis à relever malgré les progrès réalisés jusqu'à présent [41] :

Variété des modèles : La grande diversité de lampes LED sur le marché, avec des formes et des compositions variables, rend le développement de procédés de recyclage efficaces plus complexe. Chaque modèle peut nécessiter une approche spécifique pour récupérer efficacement ses matériaux constitutifs.

Fragilité des cartes électroniques : Les cartes électroniques des lampes LED sont souvent fragiles et doivent être manipulées avec précaution lors du recyclage.

Faible volume de recyclage : Malgré la popularité croissante des lampes LED, leur durée de vie exceptionnellement longue signifie qu'il y a encore relativement peu de lampes LED recyclées par rapport à leur nombre total en circulation. Il est nécessaire de développer des infrastructures et des incitations pour augmenter le volume de recyclage.

Traitement spécifique : Actuellement, les lampes LED sont souvent traitées de la même manière que les lampes fluo-compactes, ce qui ne permet pas de récupérer tous les matériaux de valeur présents dans les LED. Des investissements dans la recherche et le développement sont nécessaires pour développer des méthodes de traitement spécifiques aux LED.

III.9 Les différents types de puces LED :

Le développement technologique constant dans ce domaine a conduit à des améliorations significatives en termes de performances, de durabilité, de luminosité et de réduction de taille des composants. En ce qui concerne la composition matérielle des puces à LED, elles sont principalement fabriquées à partir de semi-conducteurs. Voici les différents puces à LED [42], [43] :

Les puces à LED DIP (Dual In-Line Package):

Ces ampoules LED sont montées individuellement sur une carte de circuit imprimé. Elles sont reconnaissables par leur boîtier rectangulaire avec deux fils de connexion à chaque extrémité. Les ampoules DIP sont souvent utilisées dans les applications nécessitant une faible densité de LED et une dispersion lumineuse large. Ces puces à LED se trouvent dans des dispositifs d'éclairage de faibles puissances.



Fig. (III-2) : Puces à LED DIP

Les puces à LED SMD (Surface Mounted Devices) :

Les LED SMD sont soudées directement sur la surface d'un circuit imprimé. Elles sont généralement plus petites que les ampoules DIP et offrent une meilleure efficacité lumineuse. Les ampoules SMD sont couramment utilisées dans les écrans d'ordinateur, les rétroéclairages LED et les éclairages domestiques.



Fig. (III.3) : Puces à LED SMD

Puces à LED à Haute Puissance : Ces ampoules LED sont conçues pour fournir une intensité lumineuse élevée. Elles intègrent des LED de haute puissance et nécessitent souvent des dissipateurs de chaleur pour gérer la chaleur générée. Les ampoules haute puissance sont idéales pour les applications nécessitant un éclairage intense, telles que l'éclairage extérieur, les projecteurs et les phares de voiture.



Fig. (III-4) : Puces à LED à haute puissance

COB (Chip on Board) : Dans les ampoules COB, de multiples puces LED sont montées directement sur un substrat, créant ainsi une seule source lumineuse. Cela permet une meilleure dissipation thermique et une répartition plus uniforme de la lumière. Les ampoules COB sont souvent utilisées dans les éclairages de grande surface, les plafonniers et les projecteurs.



Fig. (III-5): Puce à LED COB

Les différences structurelles entre les types de LED résident dans leur boîtier, leur méthode de montage et la façon dont les puces LED sont disposées. Ces différences peuvent avoir un impact sur les performances, la dissipation de chaleur, l'efficacité lumineuse et la conception des applications d'éclairage.

III.10 La composition des puces à LED :

Les matériaux utilisés dans la conception des LED revêtent une importance cruciale, influençant leurs performances et leurs caractéristiques lumineuses. Voici une présentation résumée des principaux matériaux impliqués dans la fabrication des LED [43] :

Les matériaux utilisés dans les LED peuvent être catégorisés en trois groupes principaux en fonction de leur composition et de leur importance :

Précieux (or et argent)

Cuivreux (cuivre)

Terre rares et matériaux utilisés à l'état de traces ou de dopants

Avec d'autres matériaux constitutifs :

Nitru de gallium (GaN) : Essentiel pour la création de LED bleues et vertes, ainsi que pour la production de LED blanches. Il est également utilisé comme matériau de substrat pour la croissance des cristaux de GaN.

Nitru de indium et de gallium (InGaN) : Permet la fabrication de LED bleues, vertes et blanches, ainsi que de diodes laser.

La répartition de l'Indium et du Gallium est :

97,5% Gallium

2,5% Indium

Phosphore d'aluminium, de gallium et d'indium (AlGaInP) : Utilisé dans la fabrication de LED rouges, orange et jaunes, ainsi que dans les applications à haute luminosité telles que l'éclairage de la circulation.

Saphir (Sapphire) : Matériau de substrat de haute qualité utilisé dans la fabrication de LED pour fournir une base stable pour la croissance des cristaux de GaN.

Carbure de silicium (SiC) : Utilisé dans les applications LED haute puissance et dans l'électronique de puissance en raison de ses excellentes propriétés à haute température et de sa large bande interdite.

Phosphores : Convertissent la lumière émise par les LED en différentes couleurs, jouant un rôle crucial dans la création de LED blanches.

La répartition des matériaux constitutifs des luminophores est :

50,7% Yttrium

31,4% Strontium

13,2% Lutécium

1,9% Europium

0,6% Gadolinium

1,6% Terbium

0,6% Cérium

III.11 État de l'Art de la Gestion des Déchets Électroniques :

En 2022, une quantité impressionnante de 62 millions de tonnes de déchets électroniques a été produite dans le monde, ce qui équivaut à suffisamment de déchets pour remplir 1,55 million de camions de 40 tonnes, formant ainsi une file continue encerclant la Terre au niveau de son équateur. Ces chiffres alarmants, révélés par le Global E-waste Monitor, établi par des chercheurs de l'Institut des Nations unies pour la formation et la recherche (Unitar) et de l'Union internationale des télécommunications (UIT), représentent une augmentation de 82 % par rapport à 2010. Plus préoccupant encore est le fait que moins d'un quart de ces déchets, soit exactement 22,3 % au niveau mondial et 42,8 % en Europe, ont été collectés et recyclés. Cette situation équivaut à jeter à la poubelle des ressources précieuses d'une valeur de 62 milliards de dollars, ce qui risque d'entraîner une augmentation significative de la pollution. Ces déchets électroniques contiennent des additifs toxiques et des substances dangereuses, comme le mercure, connu pour ses effets néfastes sur la santé humaine, en particulier sur le cerveau [44].

III.12 Impacts Économiques et Environnementaux de la Filière de Recyclage des Lampes LED :

- La mise en place d'une filière de recyclage pour les lampes LED permet de réduire la quantité de déchets envoyés vers les sites d'enfouissement, contribuant ainsi à la diminution de la pollution environnementale et à la préservation de l'espace terrestre (Réduction des déchets).
- En recyclant les matériaux des lampes LED, tels que les métaux précieux, le verre et le plastique, on réduit la dépendance aux ressources naturelles vierges, favorisant ainsi une utilisation plus durable des ressources de la planète (Conservation des ressources naturelles).
- Le recyclage des lampes LED permet de limiter la dispersion de substances nocives dans l'environnement, réduisant ainsi les risques de contamination des sols et des eaux (Réduction de la pollution).
- La réutilisation des matériaux recyclés dans la fabrication de nouvelles lampes LED ou d'autres produits permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre associées à l'extraction et à la production de matières premières.
- Les entreprises qui s'engagent dans des initiatives de recyclage des lampes LED renforcent leur image de marque en démontrant leur engagement envers la durabilité environnementale et sociale.

- La demande croissante de technologies de recyclage plus efficaces et durables pour les lampes LED encourage l'innovation dans ce domaine, stimulant ainsi la recherche et le développement de nouvelles solutions technologiques.

III.13 Gestion des déchets :

La gestion des déchets conduit à des rejets de polluants potentiellement toxiques au même titre que l'industrie, le transport, et plus généralement l'ensemble des activités humaines.

Les principaux problèmes liés aux déchets sont le manque de sensibilisation aux risques sanitaires, le manque de formation sur la gestion des déchets, le manque de systèmes d'élimination des déchets, le manque de fonds et de personnel, et le manque d'attention portée à ce problème [46].

L'Organisation mondiale de la santé a publié le premier document d'orientation mondial complet sur la gestion des déchets médicaux (gestion sûre des déchets provenant des activités de soins de santé), qui en est désormais à sa deuxième phase. Il aborde des questions telles que la conception et la planification de la gestion, la minimisation et le recyclage des déchets, les capacités de manutention et de stockage, le transport et la formation. En collaboration avec d'autres partenaires, l'OMS a également développé une série de modules de formation sur les bonnes pratiques en matière de gestion des déchets sanitaires. Cela couvre tous les aspects de la gestion des déchets : identification, séparation puis élimination en toute sécurité par incinération ou autres méthodes.

III.14 Les différentes étapes de gestion des déchets :

La gestion des déchets vise l'économie de ressources, leur mise en valeur avec un impact minimum sur l'environnement et la santé humaine, Voici les étapes typiques du processus de valorisation des déchets [43].

Collecte : Cette étape implique le ramassage initial des déchets de leur source, L'objectif principal de la collecte est de transporter les déchets vers des installations de traitement appropriées.

Traitement : Les déchets sont traités dans des installations spéciales. Ce traitement peut prendre différentes formes en fonction des types de déchets,

Réutilisation : La réutilisation est une étape de gestion des déchets axée sur la récupération des matériaux ou des produits qui peuvent encore servir.

Recyclage : le recyclage est une opération de valorisation qui consiste à retraiter les déchets en substances, matières ou produits pour les réutiliser dans leur fonction initiale

Valorisation : La valorisation est une opération qui vise à donner une utilité aux déchets en les substituant à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à des fins particulières, ou en préparant les déchets à être utilisés à cette fin. Cela inclut les activités telles que le recyclage, le compostage, la production d'énergie à partir de déchets et d'autres formes de récupération et de réutilisation des déchets.

III.15 La valorisation énergétique des déchets électroniques :

La valorisation énergétique des déchets électroniques présente des avantages potentiels en termes de réduction des déchets et de production d'énergie renouvelable, mais elle nécessite une gestion prudente pour minimiser les impacts environnementaux. Les normes strictes en matière d'émissions et de gestion des résidus sont essentielles pour atténuer les risques pour la santé humaine et l'environnement, on peut distinguer deux sortes de valorisation énergétique : la valorisation par traitement thermique (incinération, gazéification) et la valorisation du biogaz (Méthanisation) [46] [47] [48].

Gazéification :

Cette méthode implique l'utilisation de la chaleur générée par des processus thermiques pour transformer les déchets en énergie. Elle comprend plusieurs technologies, telles que l'incinération, la Co-incinération, la pyrolyse et la gazéification. Ces procédés thermiques permettent de brûler les déchets à des températures élevées, produisant de la chaleur qui peut être utilisée pour générer de l'électricité ou pour d'autres applications de chauffage industriel ou urbain. La pyrolyse et la gazéification sont des processus similaires à l'incinération mais se déroulent en l'absence d'oxygène, ce qui permet de produire des gaz combustibles ou des liquides utilisables comme carburant.

Méthanisation :

Cette méthode implique la fermentation anaérobie des déchets organiques pour produire du biogaz, principalement composé de méthane et de dioxyde de carbone. Les déchets organiques tels que les déchets alimentaires, les boues d'épuration, les déjections animales et les résidus de culture peuvent être utilisés comme matières premières pour la production de biogaz. Ce biogaz

peut ensuite être brûlé pour produire de la chaleur ou de l'électricité, ou être traité pour être injecté dans le réseau de gaz naturel ou utilisé comme carburant pour les véhicules.

III.16 Impact des lampes usées sur l'homme et l'environnement :

Sur l'homme [49]

La respiration de vapeur de mercure (méthyle mercure) provoque des effets nocifs sur les systèmes nerveux, sur les poumons et le rein.

Le mercure peut être fatal.

Le mercure peut déformer le fœtus.

Le mercure est une substance toxique.

Le mercure est une matière cancérogène.

Sur l'environnement [49].

Elles provoquent la pollution de l'environnement.

III.17 Définition de l'économie circulaire :

L'économie circulaire, également appelée écologie industrielle, est en effet un concept économique crucial dans le cadre du développement durable. Elle vise à transformer les modèles économiques traditionnels linéaires, où les ressources sont extraites, transformées en produits, consommées et finalement jetées, en un modèle circulaire où les déchets d'une industrie deviennent les matières premières d'une autre industrie ou du même secteur [50].

III.18 Conclusion :

En conclusion, il est impératif de reconnaître l'importance du recyclage des lampes LED pour plusieurs raisons. Tout d'abord, cela permet de préserver les ressources naturelles en récupérant les matériaux précieux utilisés dans leur fabrication. Ensuite, cela contribue à réduire la quantité de déchets électroniques envoyés vers les sites d'enfouissement, limitant ainsi les risques de pollution environnementale. De plus, le recyclage des lampes LED aide à réduire les émissions de CO₂ en évitant l'extraction de nouvelles matières premières. Enfin, cela favorise l'innovation dans le domaine du recyclage des déchets électroniques et renforce l'image des entreprises engagées dans des pratiques durables.

Il est essentiel que les gouvernements, les entreprises et les consommateurs collaborent pour mettre en place des systèmes efficaces de collecte et de recyclage des lampes LED. Cela nécessite des investissements dans la recherche et le développement de technologies de recyclage plus avancées, ainsi que des incitations pour encourager le recyclage et la réutilisation des matériaux.

CHAPITRE IV

Récupération par le recyclage des lampes LED

IV.1 Introduction :

Face à l'utilisation croissante des appareils électroniques et à leur évolution technologique rapide, cette forte consommation d'équipements électroniques et leur obsolescence rapide entraînent une production importante de déchets électroniques. La question de leur traitement est devenue plus urgente. D'autre part, la croissance démographique et sa répartition inégale peuvent conduire à une surexploitation des ressources naturelles et à une production accrue de déchets.

Tout cela constituera une menace pour la société, la santé, l'économie, la biodiversité, l'alimentation, le tourisme et l'environnement. Pour réduire efficacement les déchets, il est nécessaire d'utiliser les ressources de manière plus intelligente, de prévenir le gaspillage et d'encourager le recyclage.

IV.2 Caractérisation massique :

Pour caractériser et connaître les différents matériaux des lampes LED, nous avons mené une étude sur l'évaluation de différents modèles de lampes et spots LED. Cette étude permet de déduire la composition moyenne des LED et ses caractéristiques sur différents modèles [43] :

Lampes à LED	E25	E27	B22	E14	GU10	GU5.3	E40
Puissance (W)	9	15	9	4	5	5	80
Température(k)	2700	3000	3000	2700	4000	3000	3200
LEDs+support(g)	2.79	0.58	0.13	0.10	0.76	0.06	3.92
Drivers(g)	6.49	1.03	0.24	0.31	2.50	0.09	1.42
Acier(g)	2.02	0.19	0.21	0.10	0.43	0.01	1.18
Aluminium(g)	9.33	4.48	0.16	0.30	0.53	0.21	43.54
Plastique(g)	10.13	7.83	0.63	1.01	3.89	0.60	6.15
Silicone(g)	10.30	0.34	-	-	3.56	0.36	-
Verre	-	-	-	-	-	-	-
Masse lampe(g)	41.05	14.45	1.4	1.85	11.72	1.73	65.00

Tableau IV.1: Bilan matériaux et composants des principaux types de lampes et spots à LED

[43]

Matériaux constitutifs	LEDs +support	Drivers	Acier	Aluminium	Plastique	Silicone
Masse (kg)	67.96	158	49.20	227.28	246	250.91
Rentabilité (€/kg)	30	13.5	0.2	1.01	0.35	0.75
Valorisation (€)	2038.8	2133	9.84	229.55	86.10	188.18

Tableau IV.2: Valorisation économique des matériaux constitutifs dans une tonne de dispositifs lampes à LED E25 en plastique

Matériaux constitutifs	LEDs+ support	Drivers	Acier(g)	Aluminium	Plastique	Silicone
Masse (kg)	40.13	71.28	13.14	310.03	541.86	23.529
Rentabilité (€/kg)	30	13.5	0.2	1.01	035	0.75
Valorisation (€)	1203.9	962.28	2.628	313.13	189.65	17.64

Tableau IV.3: Valorisation économique des matériaux constitutifs dans une tonne de dispositifs lampes à LED E27 en plastique.

IV.3 Potentiel de valorisation global :

En 2020, l'éco-organisme chargé de la collecte des ampoules usagées, Ecosystème, a récupéré 4 832 tonnes d'ampoules, ce qui équivaut à 56,5 millions d'unités. Cette quantité représente environ 60% des ampoules à décharge et à LED arrivant en fin de vie la même année. Selon Xavier L'Antoinette, directeur de la recherche et de l'expertise chez Ecosystème, le pourcentage de lampes collectées est resté stable à 60% par rapport à 2019. Bien que le tonnage collecté en 2020 ait diminué de 6,6%, le nombre d'ampoules arrivant en fin de vie a également diminué d'environ 6%.

En 2020, le poids des lampes LED collectées a été multiplié par trois par rapport à 2019, représentant 305 tonnes sur l'ensemble de l'année. Selon Hervé Grimaud, directeur général

adjoint d'Ecosystème, bien que la quantité de lampes et d'ampoules LED collectées ait considérablement augmenté, ces flux restent marginaux par rapport aux autres types de lampes à économie d'énergie [51].

IV.4 Les filières de traitement de déchets :

Compte tenu de l'ampleur du problème du traitement de certains déchets (ainsi que de leur quantité). (Financement élevé et applicable, protection des sites de stockage, dégradation des paysages, etc.), structures et filières spécifiques de collecte et de traitement Il a été progressivement supprimé. L'idée est que les fabricants de produits viennent du financement de l'élimination des déchets, c'est la Responsabilité Elargie des producteurs. Alors que les entreprises répercutent ce coût supplémentaire sur leurs clients, il s'agit de payer les consommateurs, et non plus les contribuables qui doivent faire de meilleurs choix concernant leurs achats. Il s'agit également de faciliter la collecte des déchets ou des produits en fin de vie pour les gérer en gros, afin de rentabiliser au maximum par le recyclage. Garder le recyclage à l'esprit dans la conception des produits est un guide la sélection, la facilité de mise en œuvre et la volatilité favorisent le recyclage.

Parallèlement, la commission s'emploie à jeter les bases de la stratégie européenne prévention des déchets et recyclage [52].

IV.5 Traitement et recyclage des lampes usagées internationales :

Ce projet mondial de sensibilisation sur le recyclage des lampes est le fruit d'un partenariat entre l'association de l'éclairage, Mercury Recycler et l'agence américaine de protection de l'environnement. Les lampes fluorescentes, qui contiennent toutes du mercure, sont largement utilisées dans divers secteurs, mais le recyclage de ces lampes est encore peu répandu.

Pour cela, nous avons réalisé une étude sur le recyclage des lampes dans les défient pays du monde.

IV.5.1 Traitement et recyclage en Afrique

IV.5.1.1 Traitement et recyclage en Algérie [49]:

Le recrutement des personnes pour travailler dans la collecte des déchets d'ampoules se fait selon quatre méthodes :

Décharge publique : Les travailleurs récupèrent les ampoules dans les décharges de déchets.

Porte à porte : Ils se rendent directement aux domiciles pour collecter les lampes, et leur collecte est souvent rémunérée en fonction de la quantité récupérée.

Entreprises : Ils se rendent dans les entreprises, les écoles, les hôpitaux, etc., et fournissent des bacs à ordures pour le dépôt des lampes défectueuses.

Grossistes : Ils établissent des accords avec les grands grossistes de lampes pour collecter les lampes usagées.

Une fois collectées, les lampes passent par une étape de tri manuel, effectuée par des opérateurs, pour séparer les ampoules LED des autres types de lampes. Les ampoules LED sont dirigées vers un atelier de traitement spécialisé, tandis que les autres lampes sont dirigées vers un autre atelier de traitement.

Parmi les machines utilisées pour séparer les matériaux en Algérie :

Machine séparateur courant Foucault (Séparateur Magnétique N° de Modèle ECS65P).

Aimant de levage électrique.

L'unité MPC 4000.

Les séparateurs à courants de Foucault sont utilisés soit pour récupérer des métaux non ferreux en vue de leur recyclage (par exemple, des voitures broyées, des canettes en aluminium provenant de déchets), soit pour nettoyer les métaux non ferreux sur les matériaux à recycler (par exemple, du calcin, des plastiques).

IV.5.1.1.1 Gestion des déchets en Algérie [53] :

À mesure que la population et la consommation augmentent, l'Algérie connaît une augmentation significative de la production de déchets, générant environ 13 millions de tonnes de déchets solides par an, dont plus de la moitié sont des déchets domestiques et des décharges (DMA) (Service de presse algérien, 2017).

En Décembre 2001, la loi n°01-19 a introduit une nouvelle dynamique basée sur le principe de priorité en matière de gestion, de contrôle et d'élimination des déchets ; Cela passe par la réduction des déchets à la source, le développement du réemploi et du recyclage, la responsabilité des producteurs et la prévention en réduisant l'incinération et la mise en décharge des déchets.

L'objectif aujourd'hui est d'améliorer les performances des instructions de tri (séparation des flux) pour faire progresser les filières de recyclage et d'élimination. La prévention est donc la première priorité de la politique nationale des déchets. Le meilleur déchet est celui qui n'est pas produit

D'après le 2001 12 décembre Loi no. 19 Article 2, la gestion, le contrôle et l'élimination des déchets reposent sur les principes suivants :

Prévenir et réduire la production de déchets et les dommages au point d'origine ;

Organisation du tri, de la collecte, du transport et du traitement des déchets ;

Réutilisation, recyclage et utilisation des déchets dans tout autre processus visant à obtenir des matériaux réutilisables ou de l'énergie à partir de ces déchets ;

Traitement des déchets respectueux de l'environnement ;

Informier et éduquer les citoyens sur les risques posés par les déchets et leurs effets sur la santé et l'environnement, ainsi que sur les mesures prises pour prévenir, réduire ou compenser ces risques (Journal Officiel de la République Algérienne n° 77, 2001).

IV.5.1.2 Traitement et recyclage au Maroc [54] :

L'entreprise Logipro est la première unité pilote de collecte et de recyclage des lampes au Maroc, débutant son projet au premier trimestre de 2018 dans le parc industriel SAPINO à Casablanca. En partenariat avec le groupe Artémise, leader français du recyclage des sources lumineuses mercurielles, Logipro s'est fixé pour objectif de traiter et de broyer 1000 tonnes de déchets par an, en les triant et en les broyant au Maroc pour les exporter ensuite en France pour traitement. L'investissement dans cette unité s'élève à 2,2 millions d'euros, soit plus de 24 millions de dirhams, avec tous les équipements et installations fournis par le partenaire Artémise. L'entreprise emploie initialement 21 salariés qualifiés. Le processus de traitement des déchets comprend les phases de collecte, de transport, de tri manuel, de séparation des composants, de broyage du verre, de séparation des métaux ferreux, de refroidissement du mercure, et enfin, de réintroduction des produits traités dans l'industrie pharmaceutique et dans la conception industrielle spécialisée dans les lampes et luminaires.

IV.5.1.3 Traitement et recyclage en Afrique du Sud[49] :

E-Waste African .est la première usine africaine de recyclage des lampes, fondée en 2014 en Afrique du Sud. En juillet 2014, elle a été installée et mise en service un recycleur de lampes MP8000, fourni par la société BALCAN du Royaume-Uni, lauréate du prix de l'innovation de la Reine pour sa technologie de recyclage. Cette entreprise propose diverses options pour l'élimination des déchets de lampes électriques et électroniques aux entreprises, aux institutions gouvernementales et aux organismes parapublics, notamment le stockage sur site, la collecte, le broyage et le recyclage des lampes, qui constituent le cœur de leur activité. Cette offre répond à quatre besoins essentiels de leurs clients : la réduction des déchets dangereux en décharge, la conformité à la loi, la capacité à s'adapter à l'interdiction de la mise en décharge de toutes les ampoules, et enfin, une approche respectueuse de l'éthique environnementale.

IV.5.2 Traitement et recyclage des lampes en Europe :**IV.5.2.1 Traitement et recyclage en France [55] [56] :**

En France, l'organisation Ecosystème est spécialisée dans le recyclage des lampes portant le symbole de la poubelle barrée, que l'on retrouve sur la lampe et/ou sur son emballage. Ecosystème est un éco-organisme à but non lucratif agréé par les pouvoirs publics pour la collecte, la dépollution et le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) ménagers tels que les télévisions, les lampes, les machines à laver, ainsi que des DEEE professionnels tels que les équipements médicaux et les équipements de chantier.

IV.6 Le rôle des éco-organismes :

Les organismes environnementaux sont responsables de la collecte, du tri et du recyclage des équipements électriques et électroniques. Leurs actions visent avant tout à protéger l'environnement, leur mission est de collecter :

- Lampes usagées.
- Extincteurs.
- Déchets électriques et électroniques professionnels.

Les activités des organisations environnementales sont largement financées par des contributions environnementales. Il s'agit d'une part de l'implication de chaque consommateur lors de l'achat d'une nouvelle ampoule et d'autre part des producteurs d'équipements électriques et électroniques. En effet, ces derniers ont des responsabilités quant à la gestion de leurs

produits en fin de vie. Ce financement soutient la fourniture de bacs de recyclage, la création de points de collecte et le recyclage des ampoules.

IV.7 Sensibiliser et responsabiliser les organismes étatiques et les entreprises :

En Algérie, le recyclage des déchets électroniques est en retard en raison de l'absence de loi spécifique sur leur traitement. L'État n'a pas encore accordé une grande importance à ce domaine. La loi 19-01 du 12 décembre 2001, relative au contrôle et à la gestion des déchets, et notamment son article 3, reste vague et ne cible pas les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), les considérant comme des déchets inertes ou spéciaux. Malgré l'absence de législation spécifique, la gestion des DEEE nécessite la création d'entreprises dédiées à leur collecte, tri et récupération. De plus, des campagnes de sensibilisation sont nécessaires pour informer la population des dangers de certains composants des appareils électroniques pour la santé et l'environnement [53].

Parmi les mesures que nous proposons pour sensibiliser et responsabiliser les organismes étatiques et les entreprises :

- Mettre en place des lois et des règlements spécifiques pour la gestion et le recyclage des déchets électroniques, y compris des obligations pour les fabricants et les distributeurs de reprendre et de recycler leurs produits en fin de vie.

- Établir des normes et des certifications pour les entreprises de recyclage et les produits électroniques, garantissant qu'ils répondent à des critères environnementaux stricts.

Afin d'encourager l'aspect économique :

- Offrir des subventions et des crédits d'impôt aux entreprises qui investissent dans des technologies de recyclage et des pratiques durables.

- Imposer des frais sur la production de déchets électroniques pour encourager les entreprises à réduire leurs déchets et à recycler davantage (Tarification des déchets).

- Exiger que les fabricants prennent en charge la reprise et le recyclage de leurs produits en fin de vie.

- Encourager les entreprises à concevoir des produits faciles à recycler, avec des composants facilement démontables et des matériaux recyclables.

- Exiger des entreprises qu'elles publient des rapports annuels sur leurs pratiques de gestion des déchets électroniques et leurs performances en matière de recyclage.

A partir de ces procédures, il est possible de créer une approche cohérente et efficace pour sensibiliser et responsabiliser les organismes étatiques et les entreprises au sujet du recyclage et de la réduction des déchets électroniques.

IV.8 Conclusion :

En conclusion, l'augmentation rapide des déchets électroniques due à la forte consommation d'appareils électroniques et à leur obsolescence rapide représente une menace importante pour la société, la santé et l'environnement.

L'étude menée sur la caractérisation des matériaux des lampes LED révèle une diversité de compositions et souligne le potentiel économique de leur valorisation, ont montré une augmentation significative du poids des lampes LED collectées, soulignant l'importance croissante de ce flux de déchets.

Le traitement des déchets nécessite des infrastructures spécifiques et un financement adéquat. Le principe de Responsabilité Élargie des Producteurs vise à transférer le coût de l'élimination des déchets des contribuables aux producteurs et consommateurs, tout en facilitant la collecte et le recyclage des produits en fin de vie.

Des initiatives de traitement et de recyclage des lampes existent à travers le monde, notamment en Afrique du sud et en Europe, mais des efforts supplémentaires sont nécessaires pour sensibiliser et responsabiliser les organismes étatiques et les entreprises. En Algérie, par exemple, des lois spécifiques sur le traitement des déchets électroniques font défaut, malgré des initiatives de collecte et de recyclage en place.

Pour encourager le recyclage, des mesures économiques telles que des subventions, des crédits d'impôt, des frais sur la production de déchets électroniques et des exigences de reprise des produits en fin de vie sont proposées. De plus, la conception de produits faciles à recycler et la publication de rapports annuels sur les pratiques de gestion des déchets électroniques sont essentielles pour créer une approche cohérente et efficace de la gestion des déchets électroniques.

En somme, la mise en place de politiques et de pratiques de recyclage robustes, combinée à une sensibilisation accrue, peut significativement atténuer les impacts négatifs des déchets électroniques sur notre environnement et notre société.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La gestion des déchets électroniques, et plus particulièrement des lampes à LED, représente un défi complexe mais indispensable dans notre société moderne. Les études menées sur la caractérisation des matériaux des lampes à LED ont révélé une diversité de compositions, soulignant ainsi le potentiel économique significatif de leur valorisation. La réutilisation des composants tels que le plastique, l'aluminium et les éléments électroniques peut contribuer à un modèle économique circulaire, réduisant ainsi la dépendance aux ressources naturelles vierges.

En Algérie, bien que des efforts aient été entrepris pour établir des structures et des régulations pour la gestion des déchets électroniques, il subsiste encore des défis majeurs. L'absence de législations spécifiques et la nécessité de sensibiliser davantage le public et les entreprises sont des obstacles à surmonter. L'application du principe de Responsabilité Élargie des Producteurs (REP) et l'encouragement des pratiques de conception durable sont essentiels pour améliorer la gestion des déchets.

Pour aller de l'avant, il est crucial de développer une approche intégrée et coordonnée impliquant la prévention de la production de déchets, la promotion de la réutilisation et du recyclage, et la mise en place d'infrastructures de traitement adéquates. Ces mesures permettront non seulement de réduire les impacts environnementaux mais aussi de générer des bénéfices économiques significatifs. En adoptant ces stratégies, nous pouvons espérer une gestion plus durable et efficace des ressources, bénéfique tant pour l'environnement que pour l'économie.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

Numéro	Source de référence
[01]	Site web : https://www.sigmaaldrich.com/DZ/fr/applications/analytical-chemistry/photometry-and-reflectometry
[02]	Site web : https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/8326/photometrie#:~:text=L%20photom%C3%A9trie%20est%20la%20science%20qui%20traite%20de,de%20la%20lumi%C3%A8re%20visible%20%C3%A0%20l%27aide%20d%27un%20photom%C3%A8tre.
[03]	Site web : https://leclairage.fr/th-photometrie/
[04]	M. Pharr, G. Humphreys, Physically Based Rendering Elsevier, 2004
[05]	Site web : https://www.maxicours.com/se/cours/differentes-sources-de-lumiere/
[06]	Kevin W. Houser, Thomas D. Visser, Lighting Controls Handbook, 2008.
[07]	Site web : https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/benlamoudi_azzeddine/files/p_3_pho_co_ts1.pdf
[08]	Site web : https://fr.lambdageeks.com/luminous-flux-and-illuminance-calculations/
[09]	Rea, Mark S. "The IESNA Lighting Handbook." Illuminating Engineering Society of North America, 10th edition, 2010.
[10]	Site web : https://energieplus-lesite.be/concevoir/eclairage3/choisir-le-type-d-eclairage-direct-mixte-ou-indirect/
[11]	Site web : https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/abdesselam_noura/files/cours_eclairage_licence_qhse-converti.pdf
[12]	Site web : https://lumeninside.fr/indice-de-rendu-de-couleur/
[13]	Ohno, Y. (2008). Spectroradiometric detector standards and calibration services at NIST. Metrologia, 45(6), S107-S112.
[14]	Goodman, J. W. (2005). Introduction to Fourier optics. Roberts and Company Publishers
[15]	Ghosh, A., &Ranganath, G. S. (2019). Advances in photometry: Technology and instrumentation. Proceedings of the Indian National Science Academy, 85(2), 429-437

[16]	Ghasemi, A., et al. (2017). Development of a novel spectroradiometer system for LED metrology. Measurement Science and Technology, 28(2), 025903.
[17]	Pust, O., et al. (2014). Evaluation of measurement uncertainties in photometry and radiometry: Current status and prospects. Metrologia, 51(4), R24.
[18]	Pust, O., et al. (2014). Evaluation of measurement uncertainties in photometry and radiometry: Current status and prospects. Metrologia, 51(4), R24.
[19]	Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). (2018). CIE TN 006:2018. Review of methods for LED measurement.
[20]	Deng, J., et al. (2009). ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 248-255.
[21]	Winston, R., & Hetherington, L. (2010). Light-emitting diodes (LEDs) for general illumination: History, status, and future. Journal of Display Technology, 3(2), 153-166.
[22]	Site web : https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Caract%C3%A9ristiques_%C3%A9lectriques_des_lampes
[23],[25]	https://www.tereva-direct.fr/document/A-545579-tereva-experts-quels-sont-les-differents-types-de-sources-lumineuses-#Lampes%20Fluo-Compactes%20et%20Tubes%20Fluorescents
[24]	Site web : http://edupc.fr/sand/wa_files/1STL_20Sources_20de_20lumi_C3_A8re.pdf
[26]	Site web : https://www.eeeguide.com/gaseous-discharge-lamp/
[27]	Site web : https://home.howstuffworks.com/question337.htm
[28]	Site web : https://lavalelectricien.ca/avantages-et-inconvenients-des-lampes-fluorescentes/
[29]	Site web : https://ilocis.org/fr/documents/ILO046.htm
[30]	Site web : https://energieplus-lesite.be/techniques/eclairage10/sources-lumineuses/lampes-a-incandescence/lampes-halogenes/
[31]	Site web : https://www.ampouleeconomique.fr/utilite-des-ampoules-a-incandescence-halogene/#quelques-inconv%C3%A9nients-d-ampoules-halog%C3%A8nes
[32]	Site web : https://travaux.info/faq/electricite/quels-sont-les-avantages-et-inconvenients-de-l-halogene

[33]	Site web : https://energieplus-lesite.be/techniques/eclairage10/sources-lumineuses/lampes-a-decharge/lampes-a-decharge-generalites/
[34]	Site web : https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Lampe-a-decharge-page-2.html#ref_5
[35]	Site web : https://need.electricianexp.com/fr/lampochki/specializirovannye/gazorazryadnye
[36]	Site web : https://www.quelleenergie.fr/questions/ampoules-led-caracteristiques
[37]	Site web : https://www.manomano.fr/conseil/led-avantages-et-inconvenients-2889
[38]	Site web : https://www.passiondurable.com/pourquoi-le-recyclage-est-il-important/
[39]	Site web : https://dpkgroup.ru/ustroystvo-svetodiodnoj-lampy-princip-dejstvia-konstrukcionnye-osobennosti/
[40],[50]	Site web : https://www.cairn.info/revue-courrier-hebdomadaire-du-crisp-2020-10-page-5.htm
[41]	Site web : https://www.silamp.fr/pages/recyclage-led
[42]	Site web : https://dpkgroup.ru/ustroystvo-svetodiodnoj-lampy-princip-dejstvia-konstrukcionnye-osobennosti/
[43]	Arezki Lotfi BENMAMAS<<Valorisation des systèmes d'éclairage à LED en fin de cycle de vie>>THESE pour l'obtention du grade de DOCTEUR de l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES en SCIENCES POUR L'INGENIEU , 2021
[44]	Site web : https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/pollution-dechets-electroniques-generes-an-pourraient-remplir-file-camions-encerclant-terre-81825/
[45],[55]	Site web : https://www.ecosystem.eco/
[46]	Site web : https://and.dz/presentation/strategie-nationale-de-la-gestion-des-dechets/
[47]	Site web : https://www.fnade.org/fr/produire-matieres-energie/valorisation-energetique
[48]	Site web : https://www.energystream-wavestone.com/2018/05/valorisation-energetique-dechets-fausse-bonne-idee/

[49]	Boulmerka Ismail & Kati NourElhouda<< Etude de la faisabilité de création d'une entreprise de traitement d'un déchet : lampes usées>> Projet de Fin de cycle en vue de l'obtention du diplôme de Master(LMD) , Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen,2019-2020
[51]	Site web : https://www.natura-sciences.com/comprendre/recyclage-ampoules-led.html
[52]	https://www.dunod.com/sites/default/files/atoms/files/9782100747191/Feuilletag-e.pdf
[53]	OULADKADDOUR &Leila,ZIANHakima<<Récupération & traitement des déchets d'Equipements Electriques &Electroniques>>>> Projet de Fin de cycle en vue de l'obtention du diplôme de Master(LMD) , Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen,2017-2018
[54]	Site web : https://www.logipro.ma/index.php/nos-services/collecte-et-recyclage-de-sources-lumineuses-usagees.html
[55]	Site web : https://www.ecosystem.eco/
[56]	Site web : https://www.systemed.fr/zero-dechet/recycler-ampoules-usagees-comment-faire,16045.html#paragraphe-4