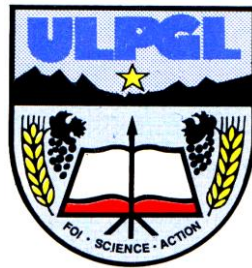


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
APPLIQUEES



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE

DIMENSIONNEMENT ET ETUDE D'IMPLANTATION D'UN
RESEAU D'ECLAIRAGE PUBLIC (Application sur le tronçon CCLK
Keshero-Pont de Sake de la route nationale 2)

Travail de fin de cycle présenté en vue de l'obtention du
Diplôme de Graduat en Sciences Appliquées

Par : **SADIKI JOSCELYN Noé**

Option : Génie Electrique et Informatique

Directeur : Assoc. Prof. PhD. DI. Dr. Tech AKWIR
NKIEDIEL Alain

Encadreur : MPhil. Ir IRENGE BAGUMA Raoul

ANNEE ACADEMIQUE 2021 – 2022

EPIGRAPHE

*« L'éducation de l'intelligence n'a pas pour objet la possession du savoir,
mais la maîtrise des méthodes qui permettent la conquête du savoir »*

Quidam

DEDICACE

A tous les membres de ma famille, tant rapproché qu'éloigné, et de façon particulière à notre regrettée grande sœur Bisulia Binti SADIKI.

SADIKI JOSCELYN Noé

REMERCIEMENTS

La rédaction du présent travail de fin de cycle a été pour nous une exaltante mission. Nous profitons donc de l'occasion pour exprimer notre profonde gratitude à l'endroit de ceux qui d'une manière ou d'une autre, y sont intervenus.

Nous remercions également tout le personnel académique et administratif de la faculté des sciences et des technologies appliquées, en particulier l'Assoc. Prof. PhD. DI. Dr. Tech AKWIR NKIEDIEL Alain, notre directeur pour la direction de qualité reçue ; ainsi que le MPhil. Ir IRENGE BAGUMA Raoul pour la précieuse aide reçue de sa part ;

Nos sincères remerciements s'adressent également à mon père Charles SADIKI ALI-SIBWER, ma mère BISOCHI ASSUMANI Durante et à toute la famille SADIKI pour leur soutien tant morale, spirituelle, matériel que financier qu'ils n'ont cessé de nous accorder. Qu'ils trouvent, dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de leurs efforts ainsi que l'expression de ma plus affectueuse gratitude.

Enfin notre gratitude va à l'endroit de nos amis et connaissances à leurs titres respectifs, de façon particulière : MUMBERE MWEDERWA Gloire, LUTU VATSURAKI Grâce.

SADIKI JOSCELYN Noé

RESUME

Le présent travail de fin de cycle consiste à faire une étude et un dimensionnement d'un réseau d'éclairage public. Après une étude documentaire des travaux antérieurs et l'arrêt des travaux de la société SONADES dans la ville de GOMA, ce travail propose une application technique entre CCLK et Sake. Cela permettant d'une part de contribuer significativement au développement de la population Goma-Sake et ses environs mais aussi sécuriser les déplacements nocturnes grâce à une bonne perception des obstacles par tous les usagers, qu'ils soient à pied ou motorisés. Pour y parvenir, non seulement le logiciel MATLAB a été utilisé, pour générer un modèle ou schéma qui illustre notre réseau d'éclairage public, mais également le logiciel QElectrotech nous a permis de faire des schémas électriques.

LISTE DES ABBREVIATIONS

A : Ampère

BT : Basse tension

CCP : Coffret de Commande et de Protection

EN : Norme Européenne

EP : Eclairage public

h : Heure

HT : Haute tension

IRC : Indice de rendu de couleur

K : Kelvin

Km : Kilomètre

kV : kilovolt

kW : kilowatt

LED : Light Emmitend Diode (anglais) = diode électroluminescente

Lm : Lumen

Lx : Lux

m : mètre

mm : millimètre

MT : Moyen tension

REP : Réseaux d'éclairage public

RN2 : Route Nationale 2

SNEL : Société nationale d'électricité

U.L.P.G.L : Université Libre des Pays des Grands Lacs

V : Volt

V : Volt (tension de courant)

W : Watt

W : Watt (puissance énergétique)

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1. Caractéristiques principales des sources de lumière [4]</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 2. Systèmes d'éclairage [2].....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 3. Type d'implantation recommandé [2]</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 4. Caractéristiques de la lampe LED OROLUX 80W [12].....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 5. Les caractéristiques du mât en acier galvanisé cylindro-conique à une crosse [13]</i>	<i>59</i>

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1. Deux propriétés importantes du rayonnement interprétées par l'œil : la puissance et la longueur d'onde [4].</i>	15
<i>Figure 2. Spectres typiques des sources de lumière usuelles [4]</i>	16
<i>Figure 3. Flux visible [4]</i>	18
<i>Figure 4. - Exemple d'indicatrices d'un luminaire d'éclairage urbain [4].</i>	20
<i>Figure 5 . Mesures de l'éclairement [4]</i>	21
<i>Figure 6. Lampe à incandescence [6]</i>	23
<i>Figure 7 . Lampe fluorescente [7]</i>	24
<i>Figure 8. Lampe à halogène [8]</i>	24
<i>Figure 9. Lampe à décharge [9]</i>	25
<i>Figure 10. Lampe LED [6]</i>	25
<i>Figure 11. Eclairage routier [2]</i>	32
<i>Figure 12. Eclairage des espaces publics [2]</i>	33
<i>Figure 13. Eclairage des espaces sportifs [2]</i>	33
<i>Figure 14. Eclairage d'ambiance [2]</i>	34
<i>Figure 15. Type d'implantation recommandé [2]</i>	40
<i>Figure 16. Maintenance de l'éclairage public [2]</i>	43
<i>Figure 17. Maintenance de l'éclairage public [2]</i>	44
<i>Figure 18. Armoire électrique [2]</i>	54
<i>Figure 19. Image satellite du tronçon</i>	56
<i>Figure 20. Réseau public (moyenne tension)</i>	61
<i>Figure 21. Illustration du schéma de notre ligne</i>	62
<i>Figure 22. Illustration du schéma suivant les départs</i>	63
<i>Figure 23. Illustration du schéma de notre réseau</i>	66
<i>Figure 24. Résultats obtenus</i>	67

TABLE DES MATIERES

EPIGRAPHE	1
DEDICACE.....	2
REMERCIEMENTS	3
RESUME	4
LISTE DES ABBREVIATIONS	5
LISTE DES TABLEAUX	6
LISTE DES FIGURES	7
INTRODUCTION GENERALE	10
1. Problématique.....	10
2. Intérêt.....	11
3. Hypothèses.....	11
4. Méthodologie	11
5. Objectifs.....	11
6. Résultat attendu.....	12
7. Plan provisoire.....	12
CHAPITRE 1 : THEORIES SUR L'ECLAIRAGE PUBLIC.....	13
1.1. INTRODUCTION	13
1.2. ECLAIRAGE PUBLIC	Error! Bookmark not defined.
1.2.1. Objectif de l'éclairage public	13
1.3. HISTORIQUE.....	14
1.4. METHODES DE MESURE DE LA LUMIERE	14
1.4.1. Rayonnement, lumière et grandeurs associées	14
1.4.2. Flux visible	17
1.5. AUTRES GRANDEURS ENERGETIQUES ET PHOTOMETRIQUES.....	19
1.5.1. Le flux total, l'efficacité	19
1.5.2. L'éclairement	19
1.5.3. La luminance.....	19
1.5.4. L'intensité	20
1.5.5. Grandeurs énergétiques spectrales	21
1.6. LA MESURE DE L'ECLAIREMENT	21
1.6.1. La mesure de l'intensité	22
1.6.2. La mesure de luminance.....	22
1.7. MOYENS D'ECLAIRAGE PUBLIC.....	23
1.7.1. Lampes.....	23

1.8.	COMPOSANTS PRINCIPAUX D'UN RESEAU D'ECLAIRAGE PUBLIC	26
1.8.1.	Le lampadaire	26
1.8.2.	Armoire électrique	28
1.8.3.	Postes de distributions	31
1.9.	TYPES D'ECLAIRAGE PUBLIC	32
1.10.	SYSTEMES D'ECLAIRAGE	35
1.11.	TYPES D'IMPLANTATION SUR L'ESPACE PUBLIC.....	39
1.12.	POLLUTION LUMINEUSE.....	41
1.12.1.	Les impacts de la pollution lumineuse	41
1.12.2.	Réduction de la pollution lumineuse.....	42
1.13.	MAINTENANCE DE L'ECLAIRAGE PUBLIC.....	42
1.14.	NORMES MONDIALES.....	45
1.15.	CONCLUSION	45
CHAPITRE 2.	DIMENSIONNEMENT D'UN RESEAU D'ECLAIRAGE PUBLIC.....	46
2.1.	INTRODUCTION	46
2.2	DIMENSIONNEMENT D'UN RESEAU D'ECLAIRAGE PUBLIC	46
2.2.1.	Délimitation de la zone à éclairer.....	46
2.2.2.	Détermination des Points lumineux et de la puissance	46
2.2.3.	Dimensionnement de l'unité de production	49
2.2.4.	Le Dimensionnement des postes de distributions et des câbles	49
2.5.	CONCLUSION	54
CHAPITRE 3.	ETUDE PRATIQUE ET DIMENSIONNEMENT D'UN RESEAU D'ECLAIRAGE PUBLIC UTILISANT DE L'ELECTRICITE PRODUITE PAR LA SOCIETE NATIONALE D'ELECTRICITE (SNEL).....	55
3.1.	INTRODUCTION	55
3.2.	ANALYSE SPATIAL	55
3.3.	PRESENTATION DU SITE	55
3.3.1.	Présentation	55
3.4.	DIMENSIONNEMENT DU RESEAU D'ECLAIRAGE PUBLIC.....	56
3.4.1.	Délimitation de la zone à éclairer ((le tronçon CCLK Keshero-Pont de Sake sur la route nationale)	56
3.4.2.	Dimensionnement du réseau d'éclairage public.....	57
3.4.2.	Dimensionnement de l'unité de production d'énergie.....	60
3.4.3.	Dimensionnement du poste de distribution et les câblages.....	61
CONCLUSION GENERALE		68
BIBLIOGRAPHIE.....		69
ANNEXE		Error! Bookmark not defined.

INTRODUCTION GENERALE

L'éclairage public est l'un des besoins importants de notre vie quotidienne qui varie dans la forme, les objectifs et les utilisations. De nos jours, il est un facteur rendant la vie confortable que ce soit en milieu urbain ou en milieu rural. L'éclairage des lieux publics, des voies de circulation, des monuments et sites, des villes et campagnes est devenu aujourd'hui une préoccupation majeure des distributeurs d'énergie électrique et des autorités administratives et politiques (représente 19% de toute l'électricité consommée). Il joue un rôle très important dans les villes aussi bien sur le plan économique que social.

De manière générale, la lumière permet aux individus de se repérer dans l'espace afin de pouvoir se mouvoir ou se défendre. Sachant que l'homme se sert de la lumière du soleil comme source de lumière pendant la journée. Mais quand la nuit tombe, l'homme se trouve dans l'incapacité de bien continuer ses activités et se trouve donc dans l'obligation de chercher des moyens adéquats pour doter son environnement des conditions de luminosité qu'il estime nécessaires pour assurer son confort et garantir sa sécurité pendant ces activités nocturnes.

Cependant, pour y arriver, l'homme recourt à des techniques et appareils ayant pour but de produire une lumière artificielle suffisante pour éclairer l'intérieur de sa résidence mais aussi pour tout endroit où l'éclairage est nécessaire pendant la nuit. C'est le cas de l'éclairage extérieur encore appelé éclairage public qui permet non seulement la mobilité des personnes pendant la nuit mais aussi permet de renforcer la sécurité des personnes et de leurs biens. C'est donc un besoin primordial pour toute nation et plus particulièrement la République Démocratique du Congo.

1. Problématique

Depuis sa création 2008, la SONADES spécialisée en éclairage public, distribution moyenne et basse tension, tirages des lignes et construction des cabines MT/BT sera rapidement positionnée parmi les partenaires clés dans le programme d'électrification du pays, mais leur mission d'apporter l'éclairage partout où le besoin se fait sentir sans discrimination géographique a échoué [1]. Sachant que certaines parties des zones rurales comme urbaines sont connectées au réseau électrique de la Société nationale d'électricité (SNEL), plusieurs routes baignent dans le noir régulièrement comme notre tronçon CCLK Keshero-Pont de Sake sur la route nationale 2 suite au manque d'un réseau d'éclairage public.

Ceci occasionne donc :

La difficulté de la population à effectuer les transactions Goma-Sake à cause de l'insécurité liée d'une part à l'obscurité qui se vit sur cette partie de la route nationale. L'insécurité se posant sur cette route ne permet pas aux usagers de cette route à circuler librement comme le veut la constitution pendant les heures tardives.

Est-il possible de dimensionner et de mettre en place un réseau d'éclairage public dépendant de l'électricité produite et distribuée par la SNEL, afin d'éclairer le tronçon CCLK Keshero-Pont de Sake sur la route nationale 2 ?

2. Intérêt

Ce travail va nous permettre d'approfondir davantage les notions en optique et en électronique plus particulièrement en électricité mais aussi servir de référence dans la base des données pour les futurs chercheurs qui s'orienteront dans domaine similaire au nôtre.

3. Hypothèses

Eu égard à la question soulevée ci haut nous émettons l'hypothèse selon que :

Il serait possible de concevoir un réseau d'éclairage public connecté au réseau déjà existant SNEL permettant de desservir l'éclairage dans le tronçon CCLK Keshero-Pont de Sake sur la route nationale 2 de façon régulière.

4. Méthodologie

Méthodes : déductive, analytique et expérimentale

Technique : documentaire et interviews libres

L'utilisation du logiciel informatique Google Earth pour réaliser certaines cartes et mesures

5. Objectifs

Notre objectif principal est de contribuer significativement au développement de la population Goma-Sake et ses environs, en proposant un modèle de réseau d'éclairage public fonctionnant avec l'électricité produite par la Société nationale d'électricité (SNEL) afin d'éclairer ledit tronçon. De surcroit, l'objectif secondaire est de participer à la création d'emplois pour nous futurs ingénieurs.

6. Résultat attendu

Au terme de ce travail, il sera question de présenter le réseau d'éclairage public dimensionné susceptible à utiliser de l'électricité produite la Société nationale d'électricité (SNEL). Ainsi que le coût économique de ce dernier.

7. Plan provisoire

Hormis l'introduction et la conclusion, notre travail est subdivisé en trois parties :

Chap. 1 Théories sur l'éclairage public

Chap. 2 Dimensionnement d'un réseau d'éclairage public

Chap. 3 Etude pratique et dimensionnement d'un réseau d'éclairage public entre CCLK et Sake.

CHAPITRE 1 : THEORIES SUR L'ECLAIRAGE PUBLIC

1.1. INTRODUCTION

L'éclairage public est un système d'éclairage qui est installé dans les espaces publics tels que les rues, les places, les parcs, les trottoirs et autres zones similaires. Son but est de fournir une illumination suffisante pour permettre la circulation et la sécurité des personnes, ainsi que de mettre en valeur les espaces publics et de contribuer à la qualité de vie des habitants.

L'éclairage public peut être installé dans différentes configurations, allant des lampadaires classiques aux projecteurs montés sur des poteaux, en passant par des lampes solaires et des lumières LED. Le choix de la configuration dépend des exigences d'éclairage de la zone et des préférences des autorités locales.

L'éclairage public est généralement géré et financé par les autorités locales, telles que les municipalités ou les gouvernements locaux. Ces dernières sont responsables de la planification, de l'installation, de l'entretien et de la réparation des installations d'éclairage public.

.Ainsi dans ce chapitre nous expliciterons d'abord quelques notions essentielles sur l'éclairage

1.1.1. Objectif de l'éclairage public [2]

L'éclairage public a plusieurs objectifs, notamment de :

- Sécuriser les déplacements grâce à une bonne perception des obstacles par tous les usagers, qu'ils soient à pied ou motorisés
- Assurer la sécurité des personnes et des biens par un éclairage d'ambiance satisfaisant
- Repérer aisément les lieux et les points particuliers, carrefours, passages piétonniers, etc.
- Permettre les activités nocturnes, sportives ou autres
- Créer une ambiance agréable en harmonie avec les différents espaces
- Valoriser les bâtiments et les façades ainsi que les espaces verts
- Eviter les nuisances lumineuses telles que l'éblouissement et l'effet de zone obscures
- Maîtriser l'intégration des installations, candélabres et luminaires, avec le mobilier urbain dans leur environnement de jour, sans occasionner de gêne majeure.

1.2. HISTORIQUE [3]

L'éclairage public est apparu dès l'Antiquité, mais il était réservé aux zones les plus riches et les plus importantes. Les Grecs et les Romains ont construit des lampes à huile, des torches et des bougies pour éclairer leurs rues et leurs places publiques.

Au Moyen Âge, l'éclairage public était rare et souvent limité aux châteaux et aux cathédrales. Les villes étaient sombres la nuit, ce qui les rendait dangereuses et peu accueillantes. Les premières tentatives d'éclairage public moderne ont eu lieu à Londres au XVIIe siècle. La ville a commencé à installer des lampes à huile le long de ses rues principales pour améliorer la sécurité.

Au XVIIIe siècle, les lampes à gaz ont commencé à remplacer les lampes à huile dans les grandes villes européennes. Les premières lampes à gaz ont été installées à Paris en 1820, et elles ont rapidement été adoptées dans d'autres villes du monde entier. Les lampes à gaz ont été remplacées par des lampes à incandescence à la fin du XIXe siècle.

Au XXe siècle, l'éclairage public est devenu plus courant et plus avancé. Les lampes à incandescence ont été remplacées par des lampes fluorescentes, puis par des lampes à LED plus efficaces. Les systèmes d'éclairage public ont également été automatisés, permettant aux villes de régler l'intensité de la lumière en fonction des besoins.

Aujourd'hui, l'éclairage public est omniprésent dans les villes du monde entier. Il est essentiel pour la sécurité des piétons et des conducteurs, ainsi que pour la création d'ambiances et l'animation des espaces publics. Les technologies de l'éclairage intelligent sont en plein essor, permettant une gestion plus fine et plus économe de l'éclairage public, tout en offrant de nouvelles fonctionnalités telles que l'éclairage connecté et la reconnaissance de forme.

1.3. METHODES DE MESURE DE LA LUMIERE [4]

1.3.1. Rayonnement, lumière et grandeurs associées

1.3.1.1. Flux énergétique et longueur d'onde

Le flux énergétique est la quantité d'énergie qui traverse une surface donnée par unité de temps. Il est généralement exprimé en watts par mètre carré (W/m^2).

La longueur d'onde est la distance entre deux crêtes successives ou deux creux successifs d'une onde. Elle est généralement exprimée en mètres (m), mais elle peut également être exprimée en nanomètres (nm) ou en angströms (Å).

Il existe une relation entre le flux énergétique et la longueur d'onde pour les ondes électromagnétiques, telles que la lumière. Cette relation est décrite par la loi de Planck, qui énonce que l'énergie d'un photon (la particule élémentaire de la lumière) est directement proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique correspondante, et inversement proportionnelle à sa longueur d'onde.

Ainsi, pour une onde électromagnétique donnée, plus la longueur d'onde est petite, plus l'énergie des photons correspondants est élevée, et donc plus le flux énergétique est important. Cela explique pourquoi les rayons gamma, qui ont des longueurs d'onde très courtes, sont beaucoup plus énergétiques que la lumière visible, qui a des longueurs d'onde plus grandes.

- La puissance, ou flux énergétique (qui se traduit sous forme de sensation de luminosité);
- La longueur d'onde (qui s'interprète sous forme de couleur).

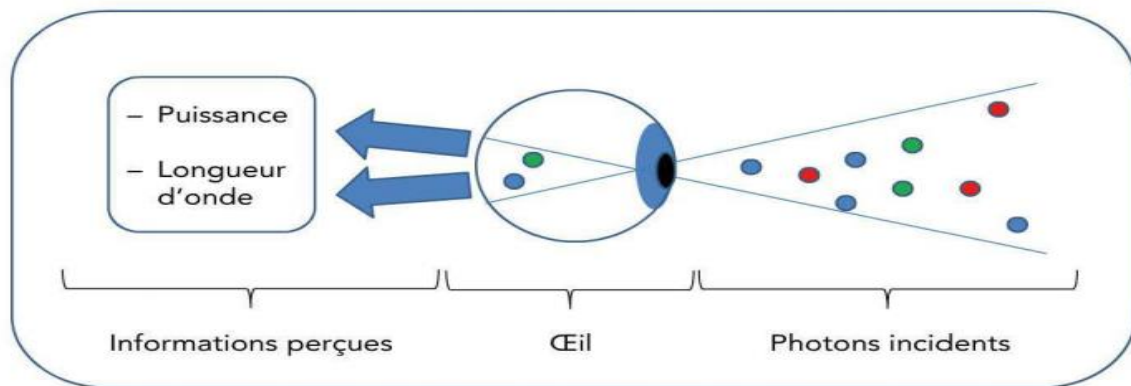


Figure 1. Deux propriétés importantes du rayonnement interprétées par l'œil : la puissance et la longueur d'onde [4].

1.3.1.2. Flux spectrique énergétique [4]

Les deux grandeurs mentionnées précédemment sont indépendantes. On peut ainsi les représenter sur un graphique, en exprimant, pour chaque longueur d'onde, la puissance véhiculée correspondante. Cette puissance par unité de longueur d'onde s'appelle le **flux spectrique** énergétique et s'exprime usuellement en watts par nanomètre (W/nm). Le graphique obtenu s'appelle un spectre.

Un spectre est une forme de signature pour une source de lumière. Chaque source de lumière a un spectre qui lui est propre et, pour qui est du métier, il est aisé de reconnaître telle ou telle source simplement à la vue de son spectre. À titre d'exemple, **la figure 2** présente différents spectres typiques des sources de lumière usuelles.

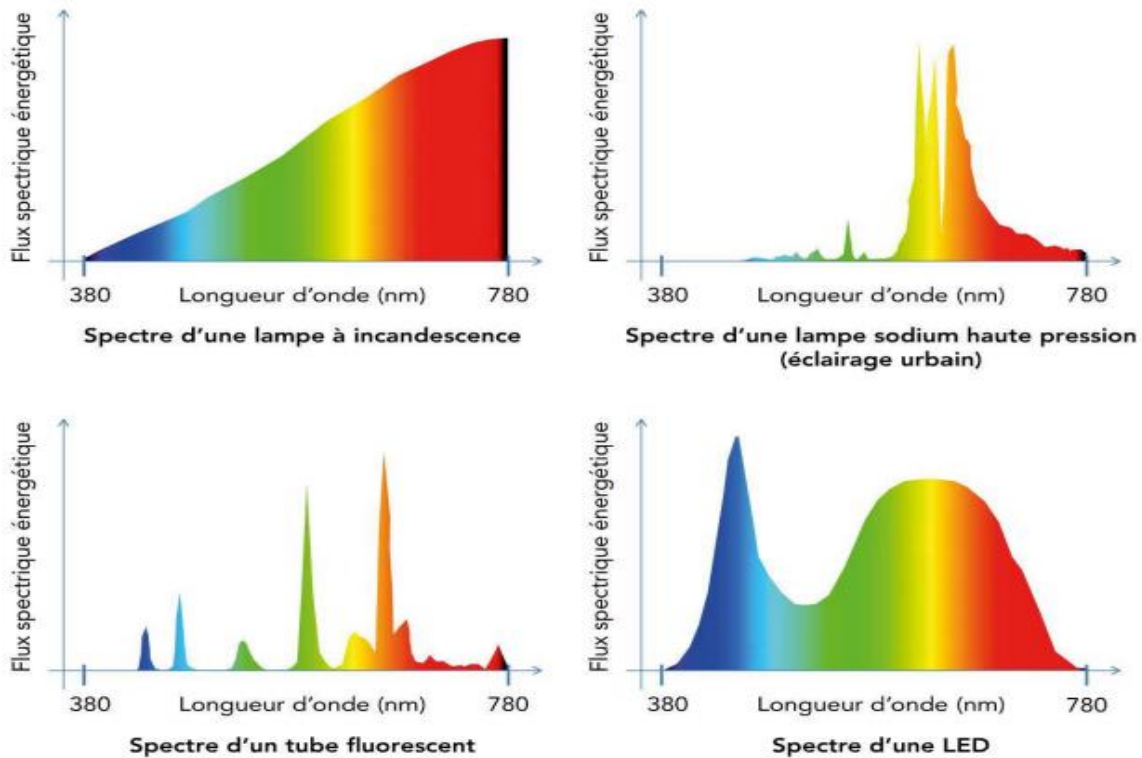


Figure 2. Spectres typiques des sources de lumière usuelles [4]

Le spectre contient l'ensemble des informations nécessaires à la caractérisation d'une source de lumière et on peut, à partir de lui, calculer les grandeurs suivantes:

- Flux visible;
- Coordonnées chromatiques ;
- Température de couleur.

Ces notions seront introduites dans la suite de ce chapitre.

Le calcul du flux énergétique d'une source à partir de son spectre s'obtient en sommant les contributions à la puissance de chaque longueur d'onde. Puisque les sources ont des spectres continus, ceci se traduit par l'intégration du flux spectrique énergétique sur une gamme de longueurs d'onde choisie.

$$\Phi = \int_{380}^{780} f(\gamma) d\gamma \quad (1)$$

Avec :

- Φ : flux énergétique
- f : flux spectrique énergétique (W/nm)
- γ : longueur d'onde (nm)

1.3.2. Flux visible

Le flux visible, également connu sous le nom de lumière visible ou de lumens (lm), est une mesure de la quantité de lumière visible émise par une source lumineuse ou reçue par l'œil humain. La lumière visible est une forme de rayonnement électromagnétique qui se situe dans la gamme de longueurs d'onde de 400 à 700 nanomètres. . Le flux visible mesure la quantité totale de lumière visible qui est émise dans toutes les directions par une source lumineuse, quelle que soit la direction dans laquelle cette lumière est émise.

Le flux lumineux, mesuré en lumens (lm), est une mesure de la quantité totale de lumière émise par une source lumineuse dans toutes les directions. Cela diffère de l'intensité lumineuse, mesurée en candela (cd), qui mesure la quantité de lumière émise dans une direction spécifique. Le flux lumineux visible est une mesure importante pour évaluer l'efficacité de l'éclairage et pour choisir les ampoules et luminaires appropriés en fonction de la quantité de lumière nécessaire dans un espace donné. Les ampoules LED modernes ont souvent une efficacité lumineuse beaucoup plus élevée que les ampoules traditionnelles, ce qui signifie qu'elles émettent plus de lumens pour une consommation électrique donnée.

La perception de la luminosité dépend à la fois de la quantité de lumière reçue et de la sensibilité de l'œil humain aux différentes longueurs d'onde de la lumière visible. Ainsi, le flux lumineux peut être utilisé pour décrire l'intensité perçue de la lumière visible, mais il ne donne pas une mesure complète de l'effet de la lumière sur l'œil humain.

Ainsi apparaissent deux branches, complémentaires de la science de la caractérisation du rayonnement :

- la radiométrie, qui s'attache à l'étude et à la quantification du rayonnement, dans sa dimension physique ;
- la photométrie, qui décrit les propriétés de la lumière, en tant que rayonnement dans la gamme des longueurs d'onde visibles, en tenant compte de la sensibilité de l'œil humain.

Le lumen est obtenu en sommant la contribution du flux spectrique énergétique à chaque longueur d'onde d'une source mais, contrairement au calcul du flux énergétique, on applique un facteur de pondération selon la longueur d'onde considérée pour tenir compte de la sensibilité de l'œil humain. Cette sensibilité est bien sûr dépendante des individus et surtout de leur âge, mais la CIE a défini une sensibilité de référence, en 1931, qui est utilisée pour la définition du

lumen. Cette sensibilité est quantifiée selon la fonction de visibilité, appelée V . Une illustration de cette courbe de sensibilité est présentée en **figure 3**.

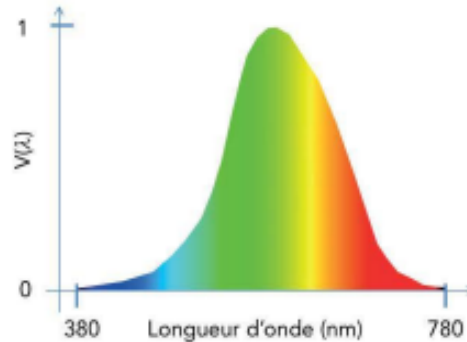


Figure 3. Flux visible [4]

À titre d'exemple, on peut imaginer une source de lumière qui émet 1 W à 450 nm, 1 W à 555 nm et 1 W à 650 nm. Le flux énergétique de cette source serait donc de 3 W. Le flux visible serait quant à lui la somme des produits respectifs du flux énergétique à chaque longueur d'onde par la sensibilité à chaque longueur d'onde, soit: $1 \text{ W} \times 26 \text{ lm/W} + 1 \text{ W} \times 683 \text{ lm/W} + 1 \text{ W} \times 73 \text{ lm/W} = 782 \text{ lm}$. Ceci est un exemple basé sur des sources monochromatiques idéales. Pour toutes les sources réelles, la relation qui lie flux spectrique énergétique et flux visible est la suivante :

$$F = K \int_{380}^{780} V(\gamma) f(\gamma) d\gamma \quad (2)$$

Avec:

- F : flux visible (lm) ;

- K : constante égale à 683 (lm/W) ;

- V : fonction de visibilité (sans unités) ;

- f : flux spectrique énergétique (W/nm) ;

- γ : longueur d'onde (nm).

1.4. AUTRES GRANDEURS ENERGETIQUES ET PHOTOMETRIQUES

1.4.1. La lumière [5]

La lumière est les ondes électromagnétiques visibles par l'œil humaine (longueur d'onde compris entre 0.38 et 0.78 μm), caractérisés par sa fréquence f et sa longueur d'onde λ pendant une durée T .

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

Avec : C : vitesse de la lumière dans le vide = 3.10^8 m/s .

1.4.2. L'éclairement

L'éclairement quantifie le flux issu d'une source de lumière sur une surface réceptrice. Il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2) ou en lux (équivalent de lm/m^2). Cette unité est largement utilisée par les professionnels de l'éclairage puisqu'elle quantifie la lumière qui arrive sur une zone et indique donc « à quel point elle est éclairée ». Ainsi des recommandations sont faites sur l'éclairement des postes de travail dans l'industrie ou le tertiaire, selon les tâches à effectuer [4].

1.4.3. La luminance [4]

Cette grandeur est peut-être la plus complexe à comprendre et c'est pourtant une notion qui nous est la plus familière puisque la luminance correspond à « ce qu'on voit ». Elle s'exprime en watts par stéradian et par mètre carré ($\text{lm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) ou en candelas par mètre carré (cd/m^2). Il s'agit du flux émis dans une direction donnée, dans un cône d'ouverture donnée, pour une petite surface émettrice donnée.

Considérons un luminaire en plafonnier à tubes fluorescents. La lumière est émise par toute la surface des tubes, réfléchi par le luminaire, par conséquent chacune de ces surfaces agit comme une source de lumière. C'est ce qu'on entend par surface émettrice. Chacune de ces petites surfaces émettrices rayonne de la lumière dans la direction de notre œil qui en recueille une portion située dans un cône dont l'ouverture est définie par l'ouverture de notre pupille. L'information que l'œil reçoit sur la rétine est donc l'expression directe de la luminance. Cette grandeur est particulièrement importante lorsqu'il s'agit de quantifier le caractère éblouissant d'une source dans son environnement. Elle s'applique bien sûr à tous les types de sources de lumière : les directes (luminaires...) et indirectes (surfaces d'objets...).

1.4.4. L'intensité

L'intensité s'exprime en watts par stéradian (W/sr) ou en candelas (cd, équivalent de lumens par stéradians). À strictement parler, cette grandeur ne concerne que les sources ponctuelles, c'est-à-dire les points lumineux. Il s'agit du flux rayonné dans une direction donnée et dans un cône d'une ouverture donnée. C'est donc l'équivalent de la luminance mais pour une source ponctuelle. Bien que les sources ponctuelles n'existent pas en réalité, on considère souvent qu'une source de lumière réelle, vue d'assez loin (le plafond d'une pièce est souvent considéré comme étant « assez loin ») est une source ponctuelle. Ainsi, on travaille souvent sur l'intensité de luminaires qui ne sont pas ponctuels. Ceci facilite grandement les considérations et calculs, en particulier lorsqu'il s'agit de quantifier l'éclairement produit par une source sur une surface à une certaine distance.

Il est cependant important de noter que les résultats obtenus seraient faux si la surface est trop peu éloignée de la source (il faut considérer environ une distance de 10 fois la plus grande dimension du luminaire). L'intensité est couramment employée pour définir la distribution spatiale du rayonnement d'un luminaire. On trace ainsi un diagramme photométrique d'un luminaire, présentant ses indicatrices.

Les indicatrices sont les graphes des intensités selon l'angle d'observation tracés en système de coordonnées polaires. Elles permettent d'identifier rapidement les spécificités d'un luminaire: directif, symétrique.

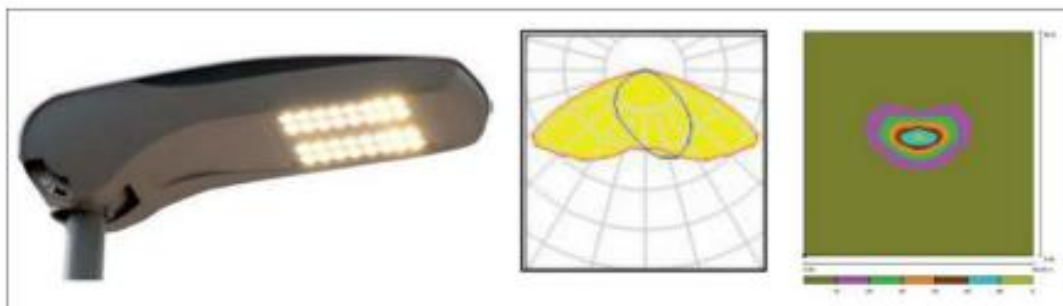


Figure 4. - Exemple d'indicatrices d'un luminaire d'éclairage urbain [4].

(a = luminaire d'éclairage urbain ; b = diagramme photométrique;
c = éclairement obtenu sur une zone de 50 m x 50 m
avec le luminaire placé au centre et monté à 6 m de haut).

1.4.5. Grandeurs énergétiques spectrales [4]

L'ensemble des grandeurs énergétiques mentionnées ci-dessus peuvent se décomposer selon les longueurs d'onde et on peut, pour chacune d'elles, représenter des spectres associés. On parle dans ce cas d'éclairiments, luminances, intensités...spectrales et leurs unités respectives sont le W/m²/nm, le W/m²/sr/nm et le W/sr/nm.

1.5. LA MESURE DE L'ECLAIREMENT [4]

Il s'agit de la mesure techniquement la plus simple à réaliser. Considérons une source ponctuelle à une certaine distance d'une petite surface sur laquelle on s'attache à calculer le flux. Sans rentrer dans aucune considération mathématique, on imagine bien que le flux reçu par cette surface est maximum lorsqu'on oriente la surface dans la direction de la source, et minimal (nul en fait) lorsqu'on ne présente que la tranche de la surface à la source. Plus précisément, si on définit l'angle ρ comme l'angle entre l'axe passant par la source et le centre de la surface, et un axe perpendiculaire à la surface, l'éclairiment s'exprime de la façon suivante avec :

$$E = \frac{I}{d^2} \cos(\rho) \quad (4)$$

- E: éclairiment sur la surface (W/m² ou lux)

-d : distance entre source et surface de mesure (m)

- ρ : angle entre la direction d'émission de la source et la perpendiculaire à la surface

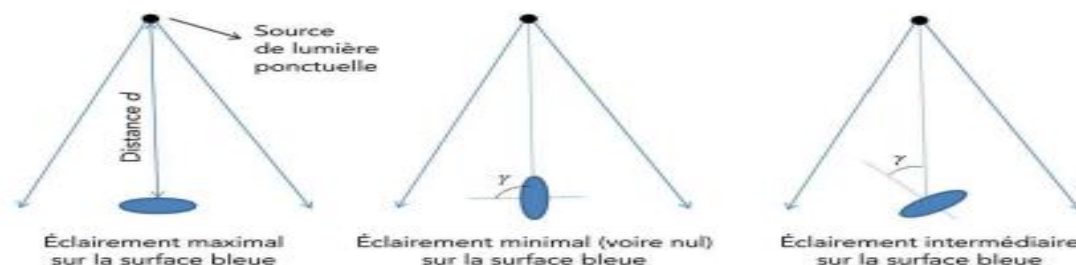


Figure 5 . Mesures de l'éclairiment [4]

Ainsi l'éclairiment sur une surface varie selon une fonction cosinus en fonction de son orientation par rapport à la source. Les photodiodes ont un comportement légèrement différent et, pour qu'elles répondent conformément à l'éclairiment à mesurer, on les couvre généralement

d'un diffuseur qui permet de reproduire la variation mentionnée ci-dessus. Ce diffuseur est appelé correcteur de cosinus.

1.5.1. La mesure de l'intensité

Comme il a été mentionné précédemment, l'intensité est une grandeur qui ne s'applique strictement qu'aux sources ponctuelles, qui sont des objets purement théoriques puisque toutes les sources réelles présentent une certaine dimension géométrique. Mais, encore une fois, cette grandeur est pratique pour bien des usages, et on l'obtient généralement par une mesure d'éclairement en utilisant la formule ci-dessous:

$$I = Ed^2 \cos(\rho) \quad (5)$$

Ceci ne peut être valable que si on se place dans l'approximation de la source ponctuelle, c'est-à-dire que la mesure d'éclairement doit se faire à une distance d'une source de lumière telle qu'on puisse négliger ses dimensions et la considérer comme ponctuelle.

1.5.2. La mesure de luminance

Nous l'avons mentionné précédemment, la luminance, correspond à ce qu'on voit. L'œil est ainsi, entre autres, un dispositif de mesure de luminance. Il va recueillir la luminance de tous les points de son champ de vision et c'est la reconstitution de cette cartographie de luminance qui produit les contrastes et donc l'image. De la même façon, un appareil photo est un dispositif de cartographie des luminances de tous les points d'une scène. Pour être plus précis, une photo en noir et blanc s'approche d'une cartographie de luminance : les luminances des différents points de la scène sont converties en niveaux de gris.

Un luminancemètre classique est généralement constitué d'une photodiode munie d'une optique (un objectif) qui permet de recueillir l'ensemble du faisceau issu de la surface d'une source dans un cône d'émission donné et de le concentrer sur la photodiode. Un luminancemètre est donc souvent doté d'un dispositif de visée qui permet :

- De pointer un point donné d'une scène dont on cherche à connaître la luminance,
- De définir une direction de mesure,
- De délimiter la surface de la source considérée.

De la même façon qu'un luxmètre, un luminancemètre destiné à des mesures photométriques en candélas par mètre carré doit être doté d'une photodiode filtrée de telle sorte que sa sensibilité s'approche de celle de l'œil humain.

1.6. MOYENS D'ECLAIRAGE PUBLIC

1.6.1. Lampes

Il existe plusieurs types de lampes, chacune ayant ses propres caractéristiques, avantages et inconvénients. Voici une brève description de quelques-uns des types de lampes les plus courants [6] :

a) Les lampes à incandescence

Ce sont les lampes les plus courantes et les plus anciennes. Elles fonctionnent en chauffant un filament métallique à haute température, ce qui produit de la lumière. Elles ont tendance à être inefficaces sur le plan énergétique et à produire beaucoup de chaleur.



Figure 6. Lampe à incandescence [7]

b) Les lampes fluorescentes

Elles fonctionnent en utilisant de l'électricité pour exciter un gaz à l'intérieur du tube de la lampe, produisant ainsi de la lumière. Elles sont plus efficaces sur le plan énergétique que les lampes incandescentes, mais contiennent également des produits chimiques nocifs.



Figure 7 . Lampe fluorescente [8]

c) Les lampes halogènes

Elles fonctionnent de manière similaire aux lampes incandescentes, mais utilisent un gaz halogène pour améliorer l'efficacité énergétique. Elles produisent également une lumière plus blanche et plus vive que les lampes incandescentes.

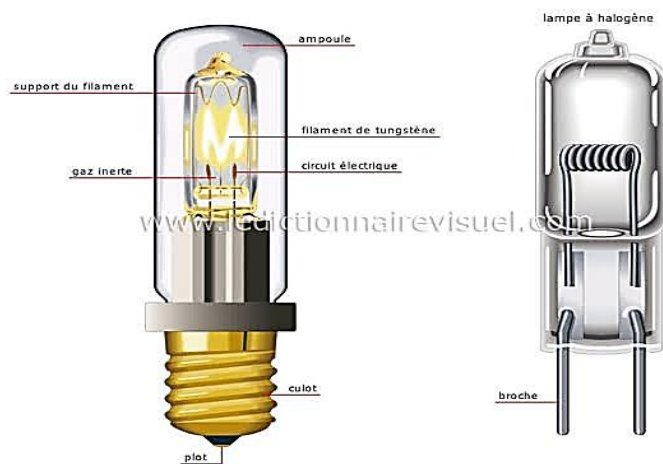


Figure 8. Lampe à halogène [9]

d) Les lampes à décharge

Elles fonctionnent en utilisant un gaz sous pression pour produire de la lumière lorsqu'un courant électrique est appliqué. Elles sont très efficaces sur le plan énergétique et sont souvent utilisées pour l'éclairage extérieur ou dans les grands espaces intérieurs.

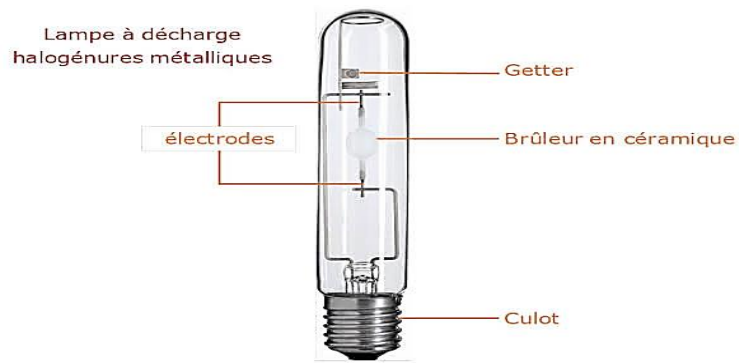


Figure 9. Lampe à décharge [10]

e) Les lampes LED

Ce sont des lampes électroluminescentes qui produisent de la lumière lorsqu'un courant électrique traverse une puce électronique. Elles sont très efficaces sur le plan énergétique, durent longtemps et sont disponibles dans une grande variété de couleurs.

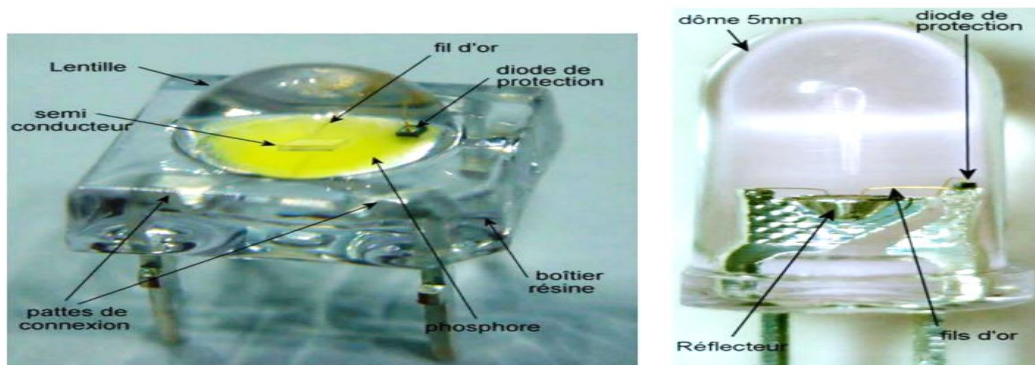


Figure 10. Lampe LED [7]

Ces différents types de lampes ont leurs propres avantages et inconvénients, et le choix dépendra des besoins spécifiques de chaque situation d'éclairage.

Tableau 1. Caractéristiques principales des sources de lumière [4]

	LED	Lampe classique à incandescence	Lampe à fluorescence	Lampe au sodium (BP*)	Lampe au sodium (HP*)	Halogène	Mercure (HP*)	Halogénure métallique
Prix	Moyen à élevé	Faible	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen
Durée de vie (h)	15 000 à 50 000	1 000	5 000 à 15 000	10 000 à 16 000	12 000 à 22 000	1 000 à 3 000	16 000 à 20 000	4 000 à 10 000
Échauffement	Conduction	IR et conduction	Conduction	Conduction	Conduction	IR et conduction	Conduction	Conduction
Robustesse	Excellente	Moyenne	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Moyenne	Mauvaise	Mauvaise
lm/watt	80 à 140	12 à 20	50 à 80	140 à 180	100 à 130	15 à 30	50 à 70	70 à 90
Flux lumineux (lm)	100 à 800	100 à 800	100 à 800			100 à 800	500 à 1 000	50 à 1 500
Taille	Faible	Petite à moyenne	Moyenne à grande			Petite à moyenne	Moyenne à grande	Moyenne à grande
Rendu des couleurs (IRC)	Mauvais à bon	Excellent	Mauvais à bon	Très mauvais	Mauvais	Excellent	Mauvais à bon	Moyen à très bon

1.7. COMPOSANTS PRINCIPAUX D'UN RESEAU D'ECLAIRAGE PUBLIC [5]

Un réseau d'éclairage public est généralement composé des éléments ci-après :

- Les lampadaires ;
- Les câbles ;
- Les armoires électriques ;
- Les postes de distributions ;
- L'unité de production de l'énergie électrique

1.7.1. Le lampadaire

Lampadaire est un dispositif d'éclairage public placé en périphérie des voies de circulations publiques, les parcs et les jardins, etc. Un lampadaire photovoltaïque est constitué principalement : le mât et le luminaire.

A. Le mât (support)

Les luminaires sont fixés sur des consoles ou des candélabres. Le support permet de placer un ou plusieurs luminaires dans la position désirée dans l'espace. Le mât est une pièce

généralement verticale est forcément fixé au sol. Il se compose de plusieurs parties:

- Le fût : Partie principale ou unique d'un poteau ;
- La plaque d'appui (option) : Cette plaque assure la liaison entre le massif de fondation et le fût
- La crosse : Elle assure le déport du luminaire au-dessus de la chaussée.

a) Les types de mât

- Poteaux en acier : Ils constituent la majeure partie des poteaux couramment utilisés.
- Poteaux en alliage d'aluminium : Ils ont une excellente tenue à la corrosion même en atmosphère polluée et ne nécessitent aucun entretien.
- Des poteaux en béton fonte et bois

b) Le mât doit pouvoir

- Résister au vent, aux chocs et aux vibrations.
- Résister aux intempéries (pluie, vents, températures, neige) et à la corrosion.
- Être ancré solidement au sol (massif en béton) ou sur une façade d'immeuble.
- Disposer d'une trappe de visite en pied de support pour recevoir un coupe-circuit électrique.

B. Le luminaire [5]

Le luminaire contient la source lumineuse ainsi que les éventuels auxiliaires. Son rôle est triple :

- dirige, au moyen de l'optique, la lumière fournie par la source lumineuse vers l'espace à éclairer ;
- protège la lampe et les éventuels auxiliaires contre les influences externes (coups, eau, poussières, etc.) ;
- Joue un rôle esthétique particulièrement important dans les applications résidentielles ou touristiques de par sa forme, ses couleurs et ses matériaux. Même si la fonction principale du luminaire est de répartir au mieux la lumière, tout luminaire absorbe une partie plus ou moins importante du rayonnement lumineux de la source qu'il contient. Leur rendement (LOR – Light Output Ratio) est définie comme le pourcentage de lumière de la lampe émis au-dessus de

l'horizontale Il est importante d'éviter tous les émissions vers le haut et l'horizontal, dans ce raison les fiches matériel doivent être accompagnées d'un diagramme photométrique.

Selon la forme de luminaire il existe plusieurs types d'éclairage :

a) Eclairage direct :

La lumière est directement projetée sur une surface à éclairer. De ce fait, les puissances installées nécessaires au confort visuel sont généralement faible.

b) Eclairage indirect :

Le rayonnement lumineux est réfléchi une première fois sur un autre plan avant de parvenir à la surface à éclairer. Cette lumière assure un bon confort visuel.

c) Eclairage diffus :

Les rayons lumineux sont transmis à travers un matériau translucide. L'éclairage diffus permet de gommer ou d'adoucie les ombres.

d) Eclairage orienté :

L'adjonction d'un bouclier ou d'une grille paralume limitant la propagation de la lumière ou l'éblouissement opère une sélection des rayons lumière émis par la lampe.

1.7.2. Armoire électrique [7]

Egalement appelée coffret de commande et de protection (CCP), l'armoire d'éclairage public permet l'alimentation du réseau d'éclairage public de distribution d'énergie. Il renferme des équipements ou dispositifs de comptage, de commande et de protection. Une armoire est généralement constituée d'une partie pour le comptage de consommation électrique, une partie de commande d'allumage des tous appareils de protection (disjoncteur, fusible).

Les composants de l'armoire électrique sont les suivants :

- Les appareils de protection ;
- L'appareil de commande ;
- Les appareils de contrôle d'allumage.

a) L'appareil de commande

Contacteur

Le contacteur est un composant électromagnétique. Il fonctionne comme un interrupteur à l'intérieur d'un circuit en établissant ou en interrompant le passage du courant.

Le rôle d'un contacteur jour/nuit ou heures creuses est de mettre en service automatiquement des équipements électriques à consommation élevée.

b) Les appareils de protection

i. Disjoncteur

Le disjoncteur électrique est un appareil qui permet de couper l'électricité en cas de court-circuit ou de surintensité. Il en existe plusieurs sortes et ils sont disposés sur le tableau électrique. Il protège aussi contre la surcharge.

Le rôle du disjoncteur est pareil que celui d'un interrupteur, sauf que le disjoncteur se déclenche automatiquement.

ii. Le fusible

Le fusible est un dispositif de sécurité conçu pour couper le courant électrique lors d'une surcharge ou d'un court-circuit. Il permet d'ouvrir le circuit électrique pendant une période de surintensité et prévient les incendies.

iii. Le parafoudre

Le parafoudre est un dispositif conçu pour sécuriser une installation électrique, ainsi que les appareils en cas de surtension provoquée par la foudre.

Il existe trois types de parafoudre.

Les parafoudres de type 1 : ils sont conçus pour être utilisés sur des installations où le risque de la foudre est important.

Les parafoudres de type 2 et ou types 3 : ils sont conçus pour être utilisés à proximité des équipements sensibles. Ils protègent l'ensemble de l'installation. Ces parafoudres sont de faibles énergies.

c) Contrôle du temps d'allumage

Les appareils susceptibles à assurer l'allumage et l'extinction des lampes de façon autonome sont les horloges, les cellules photoélectriques, les détecteurs de présence et le réducteur de puissance.

i. Horloge mécanique

C'est le premier système de régulation automatisé. Il s'agit d'une horloge classique qui, à une certaine heure, va fermer un contacteur (le courant passe) et à une autre heure va ouvrir le contacteur (le courant ne passe plus).

Inconvénients : ce système ne permet pas de changer la régulation de la tombé de la nuit (selon la saison) et ces horloges se dérèglent dans le temps par faute de synchronisation.

Aujourd'hui, elles n'existent presque plus.

ii. Horloge astronomique

Elle est très précise et détermine automatiquement, par des calculs mathématiques, l'heure à laquelle il est nécessaire de déclencher l'allumage de l'éclairage et de l'éteindre. Contrairement aux horloges mécaniques, l'horaire d'allumage varie donc de jour en jour.

L'utilisation de l'horloge astronomique représente environ 4000 h d'allumage par an. Elle peut permettre de réaliser des économies de l'ordre de 10 % dans le cas le plus favorables. De plus, elle permet par un simple réglage de programmer des coupures nocturnes.

iii. Cellule photoélectrique

Une cellule photoélectrique est un dispositif composé d'un capteur photosensible dont les propriétés électriques (tension, résistance, etc.) varient en fonction de l'intensité du rayonnement lumineux capté. Elle commande l'éclairage en fonction de la luminosité .C'est la commande automatique la plus simple qui prend le mieux en compte les conditions atmosphériques réelles.

Cet appareil doit être orienté de sorte à ne pas subir l'effet de sources lumineuses aléatoires, toute cellule photoélectrique doit être située hors de la portée du public. Elle est avantageuse du fait de leur encombrement réduit, et qu'elle est moins chère que l'horloge astronomique.

iv. Réducteurs de puissance

Réducteur de puissance permet de réduire l'éclairement en pleine nuit, donc réduire un peu la pollution lumineuse. En outre, il génère d'importantes économies d'énergie tout en maintenant un niveau d'éclairement suffisant pour les besoins voulus.

v. Détecteurs de présence

Les détecteurs de présence ou les « capteurs de proximité » sont des dispositifs autrefois mécaniques, mais aujourd'hui de plus en plus caractérisés par l'absence de liaison mécanique entre le dispositif de mesure et l'objet ciblé (personne, animal objet animé tel qu'un véhicule). L'interaction entre le capteur et sa « cible » est alors réalisée par l'intermédiaire d'une caméra

associée à un système d'analyse d'image, ou plus souvent d'un champ (magnétique, électrique, électromagnétique) ou d'un capteur infrarouge. Les avantages de ce type d'appareils sont qu'ils s'adaptent parfaitement aux besoins réels, qu'ils permettent d'éviter tout gâchis énergétique.

1.7.3. Postes de distributions

Ces postes permettent de distribuer l'énergie électrique produit sur une distance importante éloignée du milieu de consommation [5].

Celles-ci sont généralement en moyenne tension, 1kV à 52kV.

Ce poste est composé des éléments suivants :

- Ligne d'approvisionnement
- Transformateurs
- Jeux de barres
- Disjoncteur
- Contacteur
- Mise à la terre
- Protection contre les surtensions

a) Ligne d'approvisionnement

Le poste de distribution est connecté à un sous-système de transmission via au moins une ligne d'alimentation souvent appelée alimentation primaire.

b) Les transformateurs

Les transformateurs réduisent la tension de la ligne d'alimentation de niveau de distribution. Le poste de distribution utilise généralement des transformateurs triphasés.

c) Les jeux de barres

Ils peuvent être trouvés dans tout le système d'alimentation de la génération aux installations industrielles jusqu'aux tableaux électriques. Ils sont utilisés pour transporter le courant important et pour distribuer le courant à plusieurs circuits dans un appareillage ou un équipement.

d) Le Disjoncteur et le contacteur voire la section c) du point 2.2.4

e) La mise à la terre

La mise à la terre est subdivisée en deux catégories, qui sont la mise à la terre du système d'alimentation et la mise à terre des équipements. La mise à terre du système d'alimentation signifie que des connexions électriques intentionnelles existent entre conducteurs de phase du système électrique et la terre.

La mise à terre du système est nécessaire pour contrôler les surtensions et pour fournir un chemin pour le flux de courant de terre afin de faciliter la protection contre les défauts de terre sensibles basées sur la détection du flux de courant de sol.

f) Protection contre les surtensions

Les parafoudres sont utilisés dans le système d'alimentations pour protéger l'isolation des surtensions.

1.8. TYPES D'ECLAIRAGE PUBLIC

Chaque éclairage public demande une planification rigoureuse, même s'il s'agit de l'éclairage non-lieu aux aspects sécuritaires. Les spécialistes ont pour objectif de confectionner un réseau adapté à sa fonction qui respecte les normes avec une faible consommation électrique et une faible pollution lumineuse tout en garantissant une intégration harmonieuse dans l'environnement [2].

a) Eclairage routier

Eclairer les zones de circulation véhiculaire est principalement une question de sécurité. La grande vitesse des véhicules motorisés pose un risque d'accidents important que l'éclairage nocturne permet de réduire considérablement. En conséquence, la réglementation concernant l'éclairage routier est stricte, et la planification et l'exécution du projet exigent un grand soin.



Figure 11. Eclairage routier [2]

b) Eclairage des espaces publics

L'éclairage des espaces publics facilite leur surveillance pendant la nuit dans le but de prolonger leur utilité et de prévenir des accidents et des crimes. En créant une atmosphère détendue, ils sécurisent donc les utilisateurs. Par conséquent, l'illumination des espaces publics augmente la qualité de vie et stimule souvent les activités économiques dans les agglomérations principales.



Figure 12. Eclairage des espaces publics [2]

c) Eclairage des espaces sportifs

Pour permettre des activités sportives pendant des heures d'obscurité, il faut éclairer les terrains de sport avec des projecteurs spécialisés. Il est important que ceux-ci soient assez puissants et ne dérangent pas les joueurs pour éviter des accidents.



Figure 13. Eclairage des espaces sportifs [2]

d) Eclairage d'ambiance

L'éclairage des bâtiments et monuments intéressants souligne leur importance, conçoit des points d'identification et crée une atmosphère agréable. De plus, ce type d'éclairage peut

prévenir des graffiti et décharges aléatoire des déchets. Il faut être prudent lors de l'éclairage des espaces verts publics, car cela peut nuire aux plantes.



Figure 14. Eclairage d'ambiance [2]

1.9. SYSTEMES D'ECLAIRAGE

Les avantages et désavantages des types de réseau d'éclairage public [5]

Tableau 2. Systèmes d'éclairage [2]

Système	Avantages	Désavantages
<p>Système 1 : Lampadaire solaire isolé (basse tension)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pas de facturation d'électricité 2. Installation rapide 3. Solution simple qui nécessite seulement une petite étude technique 4. Pas de nécessité de raccordement au système public 5. Pas de nécessité de compteurs, armoires, câblage coûteux, etc.) 6. Pas de câblage exposé et pas de risque d'électrocution 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coût d'achat plus élevé que les lampadaires branchés sur un réseau public existant 2. Nécessité de remplacer les batteries tous les 5 à 10 ans (en fonction de la qualité) 3. Maintenance intensive Nettoyage régulier des panneaux solaires 4. Risque de non fonctionnement en cas de manque de soleil 5. Déconseillé pour les sites ombragés (arbres, vallées, etc.) 6. Risque de vol des installations exposées (panneaux solaires, batteries, régulateurs)

<p>Système 2 : Réseau solaire isolé (basse ou moyenne tension)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pas de facturation d'électricité 2. Installation rapide 3. Pas de nécessité de raccordement au système public 4. Plus économique et fiable que les lampadaires solaires isolés pour les réseaux d'éclairage de moyenne taille 5. Réalisable même sur les sites ombragés (arbres, vallées, etc.) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coût du réseau plus élevé que les lampadaires branchés au réseau public existant 2. Nécessité de consulter un(e) spécialiste 3. Nécessité de remplacer les batteries tous les 10 à 15 ans (en fonction de la qualité) 4. Maintenance intensive: Nettoyage régulier des panneaux solaires 5. Risque d'interruption en cas de manque de soleil 6. Risque de vol des installations exposées (notamment les panneaux solaires)
---	--	--

<p>Système 3 : Réseau hybride avec système solaire et réseau public (basse ou moyenne tension)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pas de risque d'interruption en cas de manque de soleil 2. Facturation d'électricité raisonnable (en fonction de la confection du système) 3. Plus fiable que les systèmes solaires isolés 4. Réalisable même sur les sites ombragés (arbres, vallées, etc.) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nécessité de raccordement au réseau public d'électricité 2. Solution coûteuse avec des équipements spécialisés 3. Nécessité de consulter un(e) spécialiste / Implication obligatoire de la SNEL 4. Nécessité de remplacer les batteries tous les 10 à 15 ans (en fonction de la qualité) 5. Maintenance intensive: Nettoyage régulier des panneaux solaires 6. Risque de vol des installations exposées (panneaux solaires)
---	--	---

<p>Système 4 : Réseau public (moyenne tension)</p>	<p>1. Pas de risque d'interruption en cas de manque de soleil Faible en maintenance</p> <p>3. Pas de nécessité de remplacer périodiquement des équipements coûteux</p> <p>4 Possibilité de réaliser des grands réseaux</p>	<p>1. Frais de fonctionnement très élevé / Paiement régulier des factures d'électricité</p> <p>2. Implication obligatoire de la SNEL</p> <p>3. Risque d'électrocution ou d'incendie en cas de câblage exposé près des bâtiments (réseau moyenne tension)</p>
---	--	--

1.10. TYPES D'IMPLANTATION SUR L'ESPACE PUBLIC [2]

Il existe 4 types principaux d'implantation des points lumineux dans l'éclairage public.

a) Implantation unilatérale (gauche ou droite)

Dans ce type d'implantation, tous les luminaires sont implantés sur un seul côté de la route. On l'utilise principalement lorsque la largeur de la route est inférieure ou égale à la hauteur des candélabres. La luminance de la partie de la chaussée située loin des luminaires est inévitablement plus faible que celle située du même côté. Ce type d'installation est habituellement utilisé pour l'éclairage d'une route constituant une chaussée simple à double sens de circulation.

b) Implantation bilatérale en quinconce

Dans ce type d'implantation, les luminaires sont situés de chaque côté de la route, en implantation alternée (ou zigzag). On l'utilise principalement lorsque la largeur de la route est comprise entre 1 et 1,5 fois la hauteur des candélabres. Un soin particulier devra être apporté à l'uniformité des luminances de la chaussée. En effet, l'alternance de zones sombres puis éclairées peut produire un effet 'zigzag' désagréable. Ce type d'installation est habituellement utilisé pour une route constituant une chaussée simple à double sens de circulation.

c) Implantation bilatérale vis-à-vis

Ce type d'implantation est caractérisé par des luminaires implantés des deux côtés de la route et en opposition. On l'utilise principalement lorsque la largeur de la route est supérieure à 15 fois la hauteur des candélabres. Ce type d'installation est habituellement utilisé pour une route constituant une chaussée simple à double sens de circulation

d) Implantation axiale (rétro-bilatérale)

Les luminaires sont implantés au-dessus de la zone centrale. Cette solution équivaut à une installation unilatérale pour chaque chaussée individuelle.

Le Tableau suivant synthétise les principaux types d'implantation des points lumineux en fonction de la hauteur des feux et la largeur de la chaussée.

Tableau 3. Type d'implantation recommandé [2]

Type d'implantation recommandé	Rapport entre h et L	Type de chaussée	Observations
Implantation unilatérale	$L \leq h$	Chaussée simple à double sens de circulation	La luminance de la partie de la chaussée située loin des luminaires est plus faible que celle située du même côté
Implantation bilatérale en quinconce	$H < L \leq 1,5 h$		Un soin particulier doit être apporté à l'uniformité de luminance de la chaussée
Implantation bilatérale vis-à-vis	$1,5 < h$		
Implantation axiale (rétro-bilatérale)	$L \leq h$	Chaussée double à deux sens de circulation	

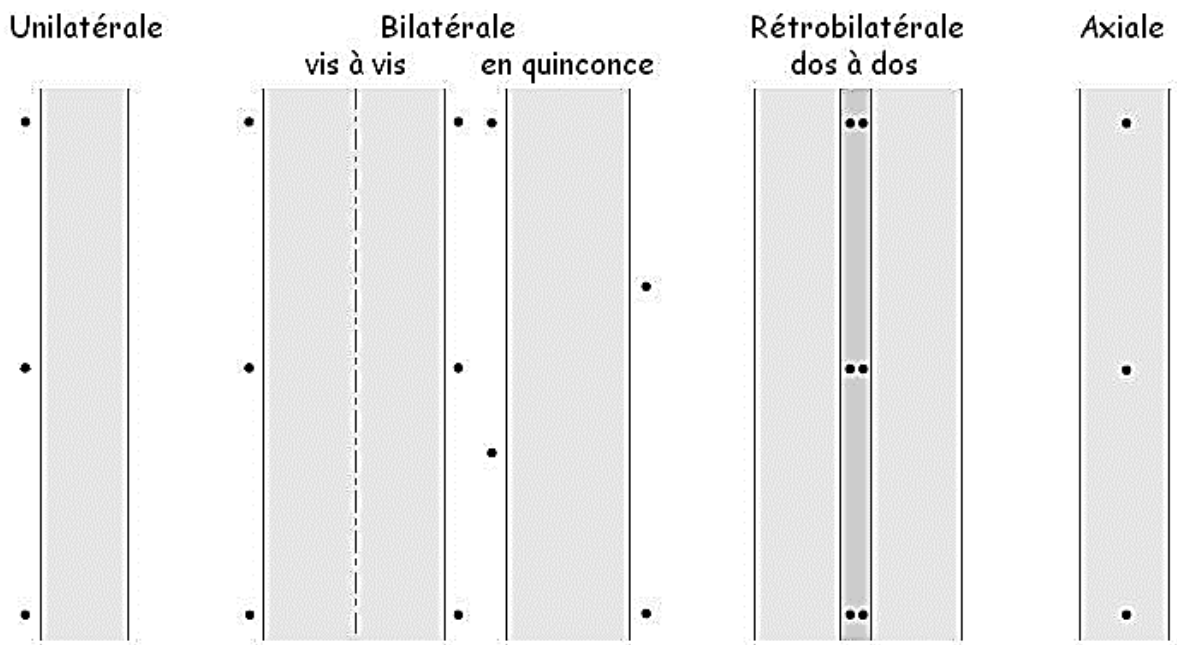


Figure 15. Type d'implantation recommandé [2]

1.11. POLLUTION LUMINEUSE [5]

Le halo lumineux au-dessus d'une ville ou d'un village est un premier signe permettant de localiser une pollution lumineuse. Elle peut se caractériser par :

- Un éclairage artificiel, brisant l'alternance entre le jour et la nuit, perturbant ainsi tout un écosystème avec des conséquences non négligeables sur les vivants ;
- Une lumière artificielle mal orientée, souvent dirigée vers le ciel, non concentrée sur la zone à éclairer, ne rabattant pas correctement le rayonnement vers le sol ;
- Une lumière intrusive, débordant vers les zones inutilement éclairées ;
- Une lumière éblouissante, préjudiciable aux conducteurs ;
- Un sur-éclairage (éclairage inadapté aux besoins) ;
- Un gaspillage énergétique.

1.11.1. Les impacts de la pollution lumineuse

a) Impact sur la faune et la flore

L'environnement nocturne est essentiel pour toutes les espèces, notamment parce qu'il contribue à leur bon fonctionnement physiologique et à leur rythme biologique. L'environnement nocturne constitue presque un écosystème à part entière. Il est un habitat, une ressource, une condition de vie ou de survie. En effet, la plupart d'espèces animales sont nocturnes et ont besoin du noir pour s'alimenter, se reproduire et se reposer.

La lumière a deux effets impactants majeurs :

- Un pouvoir attractif : elle attire certaines espèces animales et les désoriente ;
- Un effet répulsif en créant une barrière artificielle et morcelant ainsi certains habitats naturels.

Les insectes sont attirés par la lumière, ils tournent autour, meurent d'épuisement, finissent par être grillés par la chaleur de la lampe ou deviennent une proie facile pour les prédateurs tels que les chauves-souris et les oiseaux.

Les chiroptères sont des mammifères les plus affectés par la pollution lumineuse.

Certaines espèces sont repoussées par l'éclairage tel que le petit rhinolophe. D'autres par contre se retrouvent en compétition alimentaire autour des luminaires qui attirent les insectes. Ces phénomènes génèrent l'exclusion et la disparition de certaines espèces.

b) Impact sur la santé humaine

L'homme est un être diurne, qui a un rythme biologique bien défini : actif le jour et se reposant la nuit. La nuit est un moment particulièrement importante, car nous synthétisons de la mélatonine, hormone régulant d'autres hormones, le système immunitaire, la protection des cellules (antioxydant, aux propriétés anticancéreuses), mais aussi notre rythme biologique, plus communément appelé « horloge interne ». La lumière a un effet inhibiteur sur la sécrétion de la mélatonine perturbant le rythme de l'organisme et toutes les fonctions liées provoquant ainsi les troubles de sommeil.

c) Impact sur nos ressources énergétiques

Le fonctionnement de cet éclairage nécessite de l'électricité, principalement produite à partir des énergies fossiles. L'utilisation de ces énergies entraîne une émission de gaz à effet de serre. Il convient de maîtriser ces consommations électriques en évitant des lumières inutiles.

d) Impact économique

L'éclairage pèse aussi de plus en plus sur la facture énergétique d'une commune ou un quartier. Il représente 50% de sa consommation d'électricité et environ 20% de son budget énergétique.

1.11.2. Réduction de la pollution lumineuse

Pour réduire la pollution lumineuse, il faut adapter l'éclairage au besoin réel. En effet, la consultation du plan d'éclairage public d'une commune ou d'un quartier et une visite sur terrain vont permettre :

- D'installer des lampes économiques ou des faibles puissances ;
- De mettre en place des luminaires bien orientés ;
- De déterminer le nombre de lampes ;
- De déterminer la distance requise pour l'implantation des luminaires.

1.12. MAINTENANCE DE L'ECLAIRAGE PUBLIC [2]

Chaque réseau d'éclairage nécessite des travaux d'entretien pour garantir sa fonctionnalité à tout moment. Sinon, la performance des installations d'éclairage public diminue, et il en résulte un affaiblissement de la qualité d'éclairage ainsi que des inconvénients et risques potentiels liés (réduction de la fréquentation des espaces publics, accidents, sécurité réduite, etc.). Généralement la maintenance est exécutée en amont ou en aval d'une défaillance.

Trois types de maintenance existent :

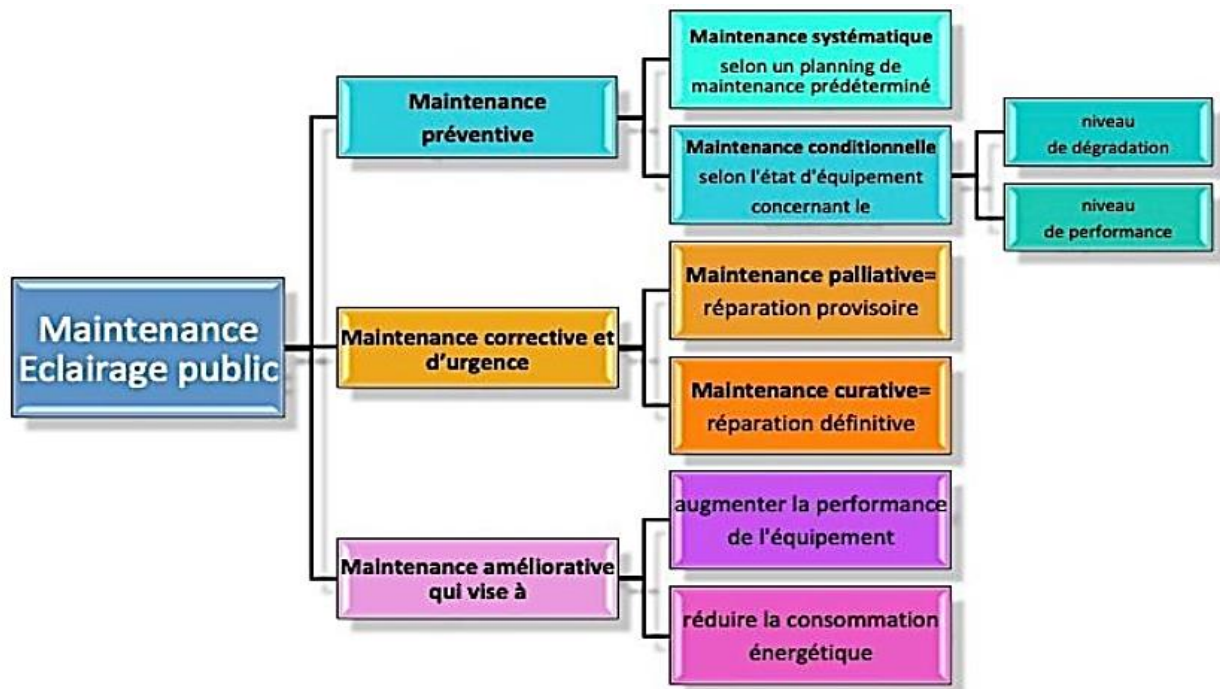


Figure 16. Maintenance de l'éclairage public [2]

En général, sont essentiels pour assurer la bonne performance des installations éclairage public :

- Les Ressources Humaines appropriées / la main d'œuvre formée
- Les véhicules de transport et de travail
- L'outillage approprié
- Le nettoyage régulier des appareils
- Le changement des ampoules, des lampes et des équipements obsolètes ou endommagés
- Le contrôle de la conformité des installations
- Un manuel d'entretien et de maintenance (soit uniquement pour l'éclairage public, soit pour l'ensemble des biens de la Commune)
- La vérification régulière des installations à travers des fiches de vérification (check-lists)
- La mise à jour des plans des réseaux et de l'inventaire des équipements.

L'optimisation de la maintenance dépend de plusieurs facteurs qui ont un impact sur la performance, la longévité, les coûts de réalisation et les frais de fonctionnement des installations d'éclairage public. Ces facteurs sont :



Figure 17. Maintenance de l'éclairage public [2]

a) Equipement sélectionné / installé

Le choix des composantes d'une installation éclairage public a un impact significatif sur les coûts d'installation et les frais de fonctionnement du système ainsi que sur la longévité et la complexité de maintenance du système. Le concepteur du système doit veiller à un bon rapport qualité-prix en tenant compte de certains facteurs spécifiques aux lieux d'installation, comme par exemple :

- Conditions climatiques (températures, pluviométrie, humidité, vents, etc.)
- Présence de facteurs nuisibles (air marin agressif, poussière, émissions, vandalisme, etc.)
- Présence de végétation.

Il est recommandé d'intégrer l'accessibilité et la simplicité dans la conception pour une maintenance plus efficace, plus rapide et moins chère. Les caractéristiques qui facilitent la maintenance sont définies comme suit :

- Un indice de protection convenable réduisant le taux d'encrassement des luminaires
- Un mode d'ouverture et de fermeture rapide
- Une conception et forme adéquate de l'appareillage facile à démonter et manipuler : une vasque en verre se nettoie mieux qu'une autre en polycarbonate.

- Une gestion centralisée informatisée des réseaux d'éclairage public avec une liaison entre chaque point lumineux et le système de gestion.

Les luminaires LED nécessitent une maintenance réduite sur la source. Mais la surface éclairage et le dessus du capot requièrent un nettoyage fréquent.

b) Préservation du débit lumineux requis

La fonctionnalité du système doit toujours être garantie, en particulier aux endroits où la sécurité est un facteur important. Les considérations budgétaires ne doivent pas servir d'excuse à la négligence.

c) Gestion de matériel et des Ressources Humaines

Les activités de maintenance de l'éclairage public sont uniquement possibles si

- Le personnel formé pour effectuer la maintenance et les matériels appropriés sont disponibles (véhicules, outillages, équipement de diagnostic, etc.)

- La Commune assure une gestion efficace des matériaux et de la main d'œuvre impliquée

- Un stock des pièces de rechange existe (le cas échéant, veiller aux dates limites)

1.13. NORMES MONDIALES

La qualité d'un éclairage peut s'exprimer par le modèle tridimensionnel classique qui incorpore le bien-être de l'individu, l'économie et l'environnement. D'où les normes européennes traduisent le bien-être de l'individu par le niveau d'éclairement à prescrire et par le contrôle de l'éblouissement de l'installation d'éclairage qui apporte visibilité, confort, santé, ergonomie et sécurité dans les activités.

La norme européenne d'éclairage public a pour objectif d'établir les prescriptions sur les zones de circulation dans les espaces publics extérieurs dans le but d'assurer la sécurité aux usagers, le bon écoulement du trafic et la protection des biens et des personnes.

1.14. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a exposé brièvement quelques grandeurs photométriques, le système d'éclairage public et ses moyens d'éclairage (lampes, lampadaire), ainsi le contrôle d'allumage des lampes et les normes mondiales de l'éclairage.

CHAPITRE 2. DIMENSIONNEMENT D'UN RESEAU D'ECLAIRAGE PUBLIC

2.1. INTRODUCTION

Le dimensionnement d'un réseau d'éclairage public est une étape cruciale dans la conception d'un système d'éclairage efficace et durable. Il s'agit d'un processus complexe qui implique la prise en compte de nombreux facteurs tels que la taille de la zone à éclairer, la densité de la population, les caractéristiques du terrain, les exigences de sécurité et les normes réglementaires en vigueur. Le but de ce dimensionnement est de fournir un éclairage adéquat et uniforme tout en minimisant les coûts d'installation et de maintenance.

Avant toute installation d'un système réseau d'éclairage public il est nécessaire de déterminer la puissance maximale de l'installation électrique et de faire des calculs pour le dimensionnement des principaux éléments constituant ce système tels que les nombres des lampes, l'espacement entre deux foyers lumineux, la hauteur de mat...

Le dimensionnement est indispensable pour assurer la fiabilité de l'installation. Des erreurs de dimensionnement provoquent deux conséquences : un prix élevé (cas d'un surdimensionnement) et déficit d'énergie (cas d'un sous-dimensionnement).

2.2 DIMENSIONNEMENT D'UN RESEAU D'ECLAIRAGE PUBLIC

Le dimensionnement du réseau d'éclairage public se fait en suivant les étapes ci-après :

- 1· La délimitation de la zone à éclairer ;
- 2· La Détermination des points lumineux et de la puissance totale à fournir au réseau ;
- 3· Le Dimensionnement de l'unité de production.
- 4· Le Dimensionnement des postes de distributions et des câbles.

2.2.1. Délimitation de la zone à éclairer

Avant d'éclairer une surface, il est nécessaire de connaître ses mesures de longueur et de largeur afin de l'éclairer suivant les normes. De plus, il est important d'apporter un éclairage conforme à l'ambiance requise.

2.2.2. Détermination des Points lumineux et de la puissance

A. Détermination de la lampe

Il est important de déterminer le type de lampe à utiliser.

Actuellement les Lampes LED sont les plus sollicitées.

Les éléments nécessaires à connaître sur la lampe sont :

a) La puissance des lampes à LED dépend de la distance entre chaque luminaire, la hauteur d'installation, le volume de trafic maximal ainsi que le type de revêtement de la route

b) La faisabilité du remplacement est largement due à la longévité des LED. La durée de vie dépend à son tour des facteurs suivants :

- Qualité de la lampe à LED

- Gestion de la chaleur / dissipation thermique qui dépend de la qualité d'installation de la lampe et de la confection du luminaire

- Alimentation électrique / tension de service

c) La température de couleur idéale de la lampe à LED est de 4000 Kelvin et l'indice de rendu des couleurs (IRC) doit être supérieur à 60

d) La modularité du système : Est-ce que la lampe à LED peut être remplacée séparément ou est-ce qu'elle est intégrée au luminaire sans possibilité de la retirer?

e) La disponibilité des pièces de recharge et existence d'un réseau de service après-vente local ou régional

f) La garantie sur le système du fabricant ainsi que du vendeur et de l'installateur

g) La nécessité de veiller à une protection de surtension (sensibilité ≥ 4 kV, 10 kA)

Dans les spécifications techniques, il faut mentionner au minimum :

- La puissance électrique

- L'efficacité lumineuse

- La température de couleur et l'indice de rendu des couleurs de la lampe à LED (normalement 3000 Kelvin ou 4000 Kelvin)

- La durée de vie minimale (pour les LED normalement 35.000 heures de fonctionnement)

- La substituabilité et contrôlabilité de l'installation

- Les instructions de montage

▪La certification de la lampe à LED, par exemple par le Centre Technique des Industries Mécaniques et Electriques (CETIME) ou selon les Normes européennes ainsi qu'une certification de performance.

La hauteur requise à la placée pour que l'éclairage soit compris entre 10-50 LUX et que l'angle d'éclairage soit inférieur à 30° ;

B. Détermination de la hauteur de feu

Ensuite, il est question de déterminer la hauteur du mât conforme aux normes EN 40.

Les normes EN 40 utilisées pour les routes principales, les rues, les parkings, etc., préconisent le choix de la hauteur de feu entre 3m et 15m. La hauteur doit permettre un angle d'éclairage inférieur à 30°.

C. Détermination de l'espacement entre deux points lumineux

Cet espacement est défini par la formule :

$$e = h \times \text{coefficient de la lampe (6)}$$

Il est à noter que certains luminaires LED permettent d'atteindre des inter-distances allant jusqu'à 6 fois la hauteur de feux, ce qui contribue à la diminution du nombre de points lumineux et par conséquent ce qui réduit les frais d'exploitation, de maintenance et de la facture énergétique.

Avec

h : hauteur du feu

e : espacement entre deux foyers lumineux

D. Détermination des nombres de points lumineux

Elle est donnée par la formule suivante :

$$N = \frac{L}{e} + 1 \quad (7)$$

Avec

· N : nombre des points lumineux

· L : longueur totale de la voie

· e : espacement entre deux foyers lumineux

E. Détermination de la puissance

La formule de la puissance à fournir est de :

$$P_t = P_u \times N \quad (8)$$

Avec

P_t : puissance totale à fournir au réseau

P_u : puissance unitaire de la Lampe

N : nombre des points lumineux

En considérant, les différentes pertes concédées depuis l'unité de production jusqu'aux lieux de consommation, il est envisageable de produire une puissance de 1,3 P_t [7].

F. Détermination du type d'implantation [7]

Pour choisir l'implantation appropriée à un espace public, il est primordial de tenir compte des paramètres suivants :

- Largeur de la chaussée à éclairer
- Avancement du feu par rapport au bord de la chaussée
- Hauteur du feu
- Espacement entre deux foyers lumineux
- De la configuration de la voirie (trottoirs, pistes cyclables, couloirs bus...)
- Des aménagements (plantations, mobilier urbain...)
- De l'ambiance nocturne escomptée

2.2.3. Dimensionnement de l'unité de production

Pour notre cas, il sera question de savoir les différentes caractéristiques de notre ligne d'approvisionnement.

2.2.4. Le Dimensionnement des postes de distributions et des câbles

a) Détermination de la section des câbles

Un câble électrique est un ensemble des fils destiné à transporter l'énergie électrique. Il est utilisé pour alimenter différents types de matériel électrique en courant fort ou courant faible [11].

Le type, et la taille des **câbles** dépendent de la tension du réseau éclairage (basse tension, moyenne tension), les distances à servir, l'emplacement (sous-sol ou exposé), la protection (posé dans des gaines ou câbles armés). La façon de poser les câbles et le type de câbles ont un impact significatif sur les coûts du réseau d'éclairage [12].

En effet, il est employé pour alimenter en énergie les appareils électriques.

i. Résistance d'un câble électrique

La résistance d'un câble électrique est la propriété des conducteurs électriques de s'opposer au passage des électrons. et la formule de la résistance écrire comme suite :

$$R = \left(\frac{l}{S}\right)\rho \quad (9)$$

- R = Résistance Ω ohm
- l=longueur de câble(m)
- S=section de câble (m^2)
- ρ =La résistivité de matériau (Ω/m)

ii. Les sections et les pertes de câble électrique :

Les sections de câbles (fils) doivent être adaptées aux paramètres de l'installation, On peut calculer la section de câble en appliquant la formule suivante :

$$S = \frac{(\rho_0 \times L \times I)}{(V \times U')} \quad (10)$$

- ρ_0 = résistivité de l'aluminium (Ω^2/m)
- L=longueur totale du câble(m)
- I=courant (A)
- V=tension origine de câble (V)
- U' =chute de tension (V).

iii. **Calcul de la chute de tension le câble électrique** [13].

iv. Pour conserver une efficacité optimale de l'installation, il faut limiter la chute de tension dans les câbles électriques de l'installation et pour diminuer le phénomène de chute de tension, il suffit d'augmenter la section du câble électrique. On peut ainsi calculer la chute de tension telle que :

$$U' = K\left(\rho \frac{L}{S} \cos\varphi + XL \sin\varphi\right) \times I \quad (11)$$

Avec :

U' : La chute de tension

K : Coefficient : Triphasé = 1, Monophasé = 2

ρ : Résistivité du conducteur

L : Longueur en mètre(m)

S : Section en mm^2

$\cos\varphi$: Facteur de puissance

X : Réactance linéique = $0,08\text{m}\Omega/\text{m}$

I : Intensité en ampère (A)

Il faut aussi déterminer la perte engendrée par cette résistance des câbles électriques. Une petite partie de l'électricité transportée par un câble électrique se transforme en chaleur (effet de joule) et pour de calcul cette perte, il y a la relation suivante.

$$P = R \times I^2 \quad (12)$$

Avec :

P =Perte (W).

R =Résistance (Ω).

I =Intensité (A).

Si le câblage a été réalisé dans les règles, il ne devrait poser absolument aucun problème pendant toute la durée de vie de l'installation. La vitrification est à réaliser une fois par mois. Il faut également Inspecter les parcours de câble notamment lorsque les fils anciens sont exposés afin de vérifier qu'aucun d'entre eux ne soient ni dénudés ni en ronges.

Les chutes de tensions recommandées par la norme européenne, pour un éclairage sont de l'ordre de 3% [12]. Par ailleurs, il est important de choisir la nature chimique du câble pour connaître la résistivité du câble afin d'avoir une chute de tension conséquente. Très souvent on choisit l'aluminium à cause de sa résistivité faible permettant une bonne conduction d'électricité [14].

v. Principes de pose de câblage [2]

On distingue deux types principaux de réseaux dans l'éclairage public : Le réseau indépendant en câbles souterrains qui est le plus recommandé, car il est sécurisé et offre un éclairage plus approprié et le réseau mixte sur poteaux et sur façade avec des câbles exposés ou partiellement exposés (réseau aérien). Ce dernier continu à représenter un certain pourcentage du réseau d'éclairage public dont une partie sur façade et cette solution est habituellement moins coûteuse.

Néanmoins, l'éclairage public sur un réseau aérien ne permet pas d'obtenir un éclairage conforme aux normes en vigueur. En effet, l'inter-distance entre supports est imposée par le réseau de distribution desservant les habitations et non en fonction des besoins d'éclairage.

b) Détermination des postes de distributions [7]

Les postes de distributions sont mis en place pour réduire l'utilisation de câbles électriques dans le réseau, étant donné que l'énergie électrique transportée sur une longue distance connaît des pertes énormes d'énergie. D'où le transport de l'électricité est fait en moyenne tension pour réduire les pertes. Cependant la consommation de l'électricité se fait en basse tension (400V ou 230V).

Ainsi, il est important de disposer des postes de distributions pour quitter de la haute tension ou de la moyenne tension à la basse tension.

Les éléments principaux d'un poste de distribution sont :

- Le transformateur ;
- Le disjoncteur ;
- Le contacteur ;
- Les jeux de barres ;
- Le parafoudre.

Pour déterminer le poste de distribution, il est important de trouver un endroit propice servant au rapprochement des plusieurs départs.

Un départ est une ligne électrique servant à connecter plusieurs installations électriques rapprochées. Il est choisi en fonction de sa capacité de charge électrique à supporter.

i. Détermination du transformateur

Le transformateur sert à augmenter ou à abaisser la tension d'un réseau de distribution ou de transport.

Pour faire le choix du transformateur, il faut connaître les éléments ci-après :

- Sa puissance apparente ;
- La tension d'entrée ;
- La tension de sortie.

ii. Détermination du disjoncteur, du contacteur et du parafoudre

Le choix du disjoncteur se fait en fonction de l'intensité du courant nominale à l'arrivée du poste de distribution, ainsi que du type de réseau soit en monophasé ou en triphasé.

Cela est pareil pour le contacteur et le parafoudre.

c) Détermination des armoires électriques

Pour déterminer le nombre d'armoires électriques pour un réseau d'éclairage public, il est important de connaître le type de réseau soit en monophasé ou en triphasé. Si le réseau est en triphasé, il disposera moins d'armoires électriques. D'où il est important de préconiser le réseau en triphasé pour réduire le cout économique du réseau [7].

Spécialement une armoire électrique d'un réseau d'éclairage public triphasé est composée des éléments suivants :

- **Une horloge astronomique** est un dispositif électronique qui utilise les données astronomiques pour régler l'heure et la date. Elle est souvent utilisée pour contrôler l'éclairage public, les systèmes d'irrigation et les systèmes de chauffage et de climatisation.
- **Un contacteur tripolaire** est un dispositif électromécanique qui permet de contrôler la mise en marche et l'arrêt d'un circuit électrique triphasé. Il est souvent utilisé dans les systèmes de climatisation, les pompes à eau et les machines industrielles.
- **Un disjoncteur P+N** est un dispositif de protection électrique qui permet de couper l'alimentation électrique en cas de surcharge ou de court-circuit. Il est souvent utilisé pour protéger les circuits électriques domestiques.

- Un **disjoncteur 4P** est un dispositif de protection électrique qui permet de couper l'alimentation électrique en cas de surcharge ou de court-circuit. Il est souvent utilisé pour protéger les circuits électriques industriels et les installations électriques de grande envergure. Le "4P" signifie qu'il dispose de quatre pôles, ce qui permet de couper simultanément les quatre fils d'un circuit triphasé.

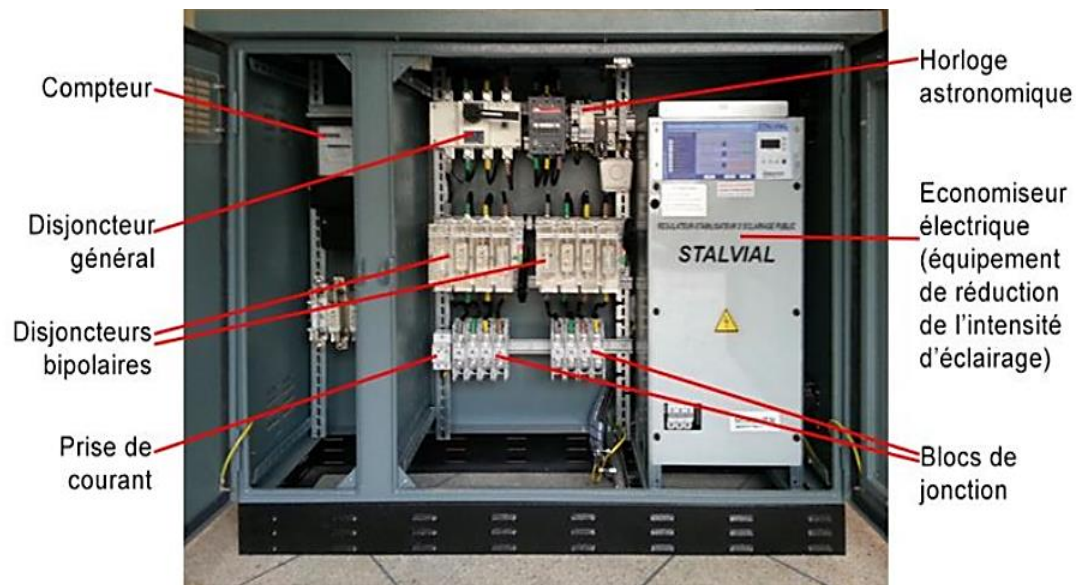


Figure 18. Armoire électrique [2]

2.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté différentes étapes de dimensionnement d'un réseau d'éclairage public de façon théorique, ces étapes sont dépendantes les unes des autres. Une erreur dans une étape provoque inéluctablement une erreur dans les étapes suivantes. C'est donc une opération itérative qui nécessite de l'attention dans les calculs. Ce chapitre décrit le dimensionnement.

CHAPITRE 3. ETUDE PRATIQUE ET DIMENSIONNEMENT D'UN RESEAU D'ECLAIRAGE PUBLIC ENTRE CCLK ET SAKE.

3.1. INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons explicitement décrit les éléments essentiels d'un éclairage public. Ainsi, dans ce chapitre nous allons présenter les résultats des études pratiques et théoriques faites sur la possibilité de mettre en place un réseau d'éclairage public utilisant de l'énergie provenant de la Société nationale d'électricité (SNEL) sur le tronçon CCLK Keshero-Pont de Sake de la route nationale 2.

Dans cette étude, on cherche à garder la même efficacité d'un éclairage conventionnel avec une réduction de consommation énergétique (électrique), en plus de la diminution de l'émission des gaz à effet de serre. L'objectif escompté est de proposer une installation qui soit la moins coûteuse avec une faible maintenance.

3.2. ANALYSE SPATIAL

Avant le dimensionnement de l'installation de réseau d'éclairage, il est nécessaire de présenter et spécifier ses caractéristiques géographiques et météorologiques de notre site.

3.3. PRESENTATION DU SITE

3.3.1. Présentation

Le tronçon faisant l'objet de cette étude se trouve entre le territoire de Masisi et la ville de Goma et fait partie de la RN2. La figure ci-dessous présente l'image satellite obtenu au moyen du logiciel Google earth du tronçon en étude.



Figure 19. Image satellite du tronçon

3.4. DIMENSIONNEMENT DU RESEAU D'ECLAIRAGE PUBLIC

- La délimitation de la zone à éclairer (le tronçon CCLK Keshero-Pont de Sake sur la route nationale 2) ;
- Le Dimensionnement du réseau d'éclairage public ;
- Le Dimensionnement de l'unité de production d'énergie ;
- Le Dimensionnement du poste de distribution et les câblages;
- L'Évaluation du coût de l'ensemble de l'installation du réseau d'éclairage public.

3.4.1. Délimitation de la zone à éclairer ((le tronçon CCLK Keshero-Pont de Sake sur la route nationale)

Nous avons ainsi réalisé une carte de la zone à éclairer du tronçon CCLK Keshero-Pont de Sake sur la route nationale 2 à l'aide du logiciel Google Earth. Cette dernière donne la précision sur la longueur du tronçon. Cette carte est décrite par la figure (19).

Longueur : 15,2 Km

Largeur de la chaussée : 6 m

3.4.2. Dimensionnement du réseau d'éclairage public

a) Détermination et choix des lampes

Le type de lampes LED à choisir doit être destinée à l'éclairage public externe et son éclairement doit être compris entre 10 Lux et 50 Lux.

Notre choix se tourne vers la lampe LED OROLUX 80W qui est l'une des lampes LED qui répond à ces deux critères ci-dessus mais également l'entreprise Luxener qui fabrique ces lampes LED est un concepteur et fabricant d'éclairage professionnel à LED.

Avec 8400 lumens et son hauteur d'utilisation allant de 6-10 m, nous pouvons calculer si bel et bien son éclairement est compris entre 10-50 Lux.

On a :

Flux lumineux de la lampe : 8400 lumens [15]

Hauteur min : 6m

Hauteur max : 10m

Largeur de la chaussée : 6m

$$Eclairement = \frac{\text{flux lumineux}}{l^2 \times hauteur} \quad (13)$$

On aura :

$$Eclairement_{min} = \frac{8400}{6^2 \times 6} = 38,88 \text{ Lux}$$

$$Eclairement_{max} = \frac{8400}{6^2 \times 10} = 23,33 \text{ Lux}$$

Ces valeurs sont bien acceptables selon les normes européennes, qui stipulent que la valeur doit être comprise entre 10 LUX et 50LUX. D'où le choix de la lampe LED OROLUX 80W.

Ce produit se trouve facilement sur notre marché en grande quantité mais aussi à un prix abordable.

Voici ci-dessous les caractéristiques de la lampe LED OROLUX 80W:

Tableau 4. Caractéristiques de la lampe LED OROLUX 80W [15]

Référence <i>Reference</i>	OROLUX M36R8041-xx
Puissance <i>Power</i>	75 W
Tension d'entrée <i>Input voltage</i>	100-240 VAC 47-63 Hz
Cosinus Phi <i>Power factor</i>	≥ 0,95
Distribution photométrique <i>Light distribution</i>	Type IIS ou Type II M
Options <i>Options</i>	Diverses et variées selon la demande DéTECTEURS, protection, communication, ...etc.
Consommation totale <i>Total Consumption</i>	80W
Nombre de Source <i>Number of Sources</i>	36
Flux LED <i>LED Output</i>	150 lm/W
Type de LED <i>LED type</i>	XX= CR Cree XPG3 – XX=LU Lumileds
Durée de vie <i>Lifespan</i>	50 000 h
IRC	RA >70
Température de couleur <i>Color temperature</i>	4000 K
Flux lumineux <i>Luminous flux</i>	CREE= 9 200 LM - Lumileds= 8 400 LM
Température d'utilisation <i>Environnement temperature</i>	-40.00°C /+45.00°C
Protection IP <i>IP Protection</i>	IP 66
Dimensions <i>Measurment</i>	818mm/350mm/132mm
Poids <i>Weight</i>	10.6 Kgs
Optique <i>Optic</i>	Verre granité trempé Tempered Shaded glass
Habillage <i>Housing</i>	Aluminium injecté Die Cast Aluminium
Angle d'éclairage <i>Viewing Angle</i>	≥ 3.5 x Hauteur du mât
Hauteur d'utilisation <i>Recommended Height</i>	6-10 m
Protection IK <i>IK Protection</i>	IK 08
Classe de protection <i>Protection Safety class</i>	1
Tenue au vent <i>Wind resistance</i>	180 Km/h
Protection	Technologie anti-foudre double (propriétaire)

b) Détermination de la hauteur de feu

Les normes EN 40 utilisées pour les routes principales, les rues, les parkings, etc., préconisent le choix de la hauteur de feu entre 3m et 15m. La hauteur doit permettre un angle d'éclairage inférieur à 30°. Notre choix porte sur les candélabres ayant 8m car le choix de notre lampe LED OROLUX 80W nous oblige d'avance une hauteur comprise entre 6-10m comme hauteur de feu. En conformité avec la norme EN 40 cette hauteur de 8m, nous permettra d'avoir un angle d'éclairage de 28° déterminé comme suit :

$$\text{Angle d'inclinaison } (\beta) = 3,5 \times \text{Hauteur du feu}(14)$$

Ce qui donne :

$$\beta = 3,5 \times 8 = 28^\circ$$

Une valeur acceptable pour un bon éclairage car elle est inférieure à 30°.

Voici les caractéristiques du mât que nous nous sommes proposé vu sa disponibilité et son cout moins cher sur le marché.

Tableau 5. Les caractéristiques du mât en acier galvanisé cylindro-conique à une crosse [16]

Hauteur	8000mm
Hauteur sous terre	1000mm
Profondeur des fondations	1300mm
Diamètre au sommet	76mm
Diamètre à la base	168mm
Hauteur portillon	300mm
Largeur portillon	80mm
Carrée inscrit portillon	85 × 78mm
Entraxe fixation	200mm
Poids	87Kg
Massif en béton	0,70 m × 0,70 m × 0,70 m
Matière	Acier galvanisé
Durée de vie	60 Ans

c) Détermination de l'espacement entre deux points lumineux

Comme, nous avons choisi la lampe LED notre espacement sera de 48 m déterminé comme suit :

Le coefficient de LED allant de 5-6

Selon l'équation (6) on a :

$$e = 8m \times 6 = 48 m$$

d) Détermination des points lumineux

Connaissant ainsi l'espacement ou l'inter distance, déterminons ainsi le nombre de poteaux sur notre voie.

On sait que :

$$N = \frac{L}{e} + 1$$

Avec $L=15200m$ et $e=48m$

$$N = \frac{15200}{48} + 1 = 317,6 \cong 318 \text{ points lumineux}$$

e) Type d'implantation :

Après que nous avons déterminé les points lumineux, l'étape suivante est celle de déterminer le type d'implantation des points lumineux.

La largeur de la chaussée est de 6m et cette chaussée est simple à double sens de circulation.

Le type d'installation correspondant à ces conditions est l'implantation unilatérale (gauche ou droite).

f) Détermination de la puissance

Etant donné que notre réseau est fait de 318 points lumineux et que la puissance unitaire de chacune de lampes choisie est de 80W.

La puissance utile à fournir au réseau sera selon l'équation (8) on a :

$$P_t = 80W \times 318 = 25440 W$$

3.4.3. Dimensionnement de l'unité de production d'énergie

Notre système de réseau sera branché sur la ligne de transport d'électricité de la moyenne tension provenant de la poste de la Société nationale d'électricité (SNEL) Goma, nous n'aurons plus à dimensionner l'unité de production d'énergie.

Le transport en Moyenne Tension de la ville de Goma vers le territoire de Masisi et ses environs se fait sous une tension de : **15kV**

La figure 21 représente la forme générale de notre système (Système 4 dans le tableau 3).

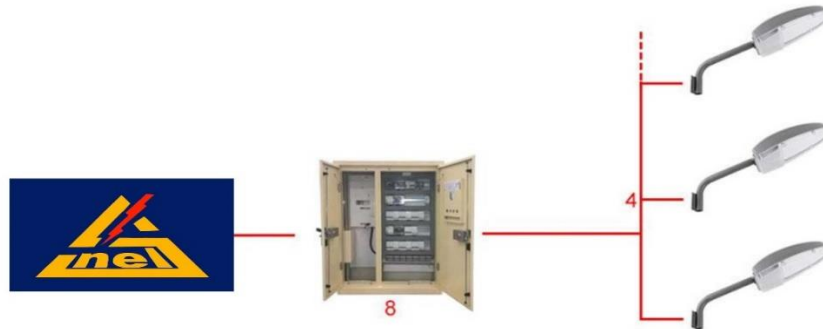


Figure 20. Réseau public (moyenne tension)

3.4.4. Dimensionnement du poste de distribution et les câblages

Notre ligne étant de 15,2Km ; enfin d'assurer une répartition parfaite de puissance, nous avons subdivisé notre ligne en trois parties. Chaque partie étant desservie par un transformateur MT/BT.

La figure 22 illustre le schéma de distribution de notre ligne, on note la présence de trois transformateurs placés à une distance de 5,07 Km chacun de l'autre afin d'assurer un transport de puissance cohérent sur toute la distance de ligne de 15 Km. Le schéma de distribution du transformateur 2 sur la figure 21 illustre de manière complète la distribution de puissance au sein de notre ligne ; le même schéma est à considérer pour les transformateurs 1 et 3.

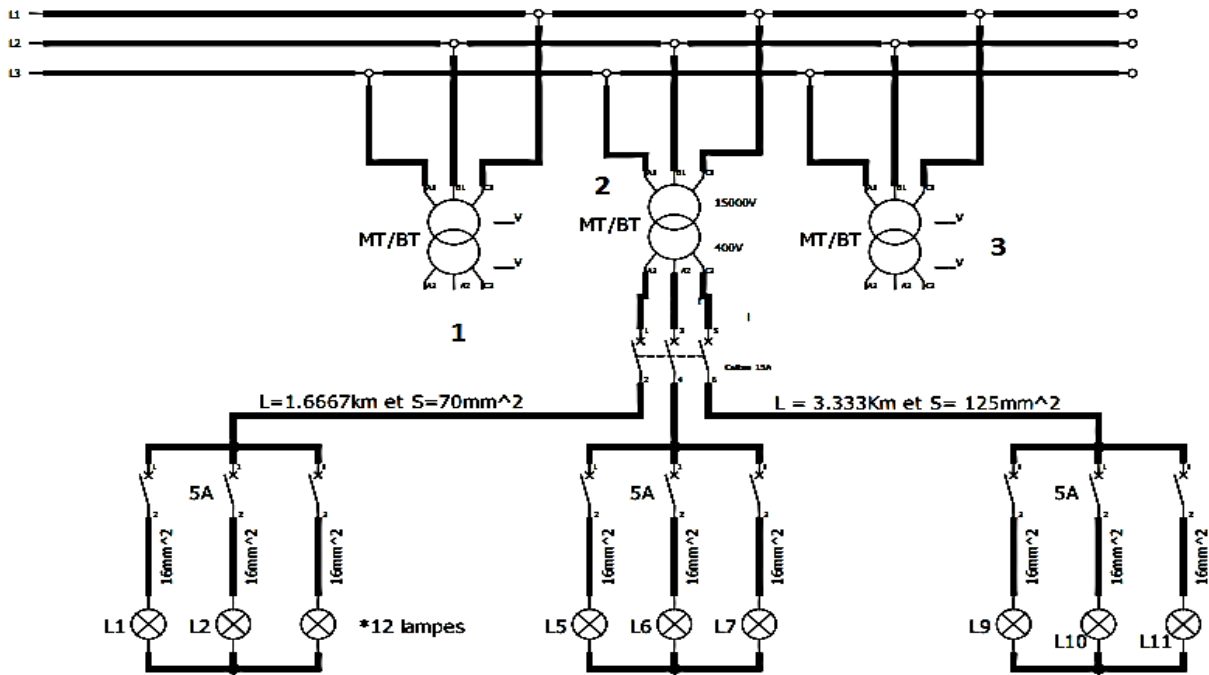


Figure 21. Illustration du schéma de notre ligne

Pour pouvoir éclairer notre réseau d'éclairage public, on admet une chute de tension en ligne de 3%.

La chute de tension en ligne se détermine par l'équation (11) :

Notre système comporte 318 lampes ayant chacune une puissance de 80 W, la puissance installée totale étant de 25440 W.

Pour des raisons économiques ainsi que d'exploitation pratique on divise cette puissance P_t en trois postes ainsi chaque poste aura :

$$P_t \text{ poste} = \frac{P_t}{3} = \frac{25440}{3} = 8480 \text{ W}$$

$$\text{Ayant } n \text{ postes} = \frac{318}{3} = 106 \text{ lampes}$$

A. Dimensionnement du réseau de transport

Chaque poste doit servir les lampes dans un rayon de 5 Km, ainsi dans chaque 5 Km on aura 106 lampes, ce qui correspond à une puissance $P_t \text{ poste} = 8480 \text{ W}$.

Déterminons le courant de ligne par :

Les lampes sont en monophasé mais elles seront répartie sur un réseau triphasé comme l'indique la figure 21 ; ainsi elles formeront ensemble une charge triphasé vu du réseau.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times \cos\phi} \quad (15)$$

On admet un $\cos\varphi = 0,98$

$$I = \frac{8480}{\sqrt{3} \times 400 \times 0,98} = 12,4896 \text{ A}$$

Chaque phase a donc un courant de ligne de 12,4896 A, le couplage des lampes est effectué en étoile la figure 23 illustre le principe de répartition sur un poste.

La puissance total P_t poste = 8480W, chaque phase a une puissance de

$$P_{\text{ligne}} = V \times I_{\text{ligne}} \quad (16)$$

$$P_{\text{ligne}} = \frac{400}{\sqrt{3}} \times 12,4896 = 2884,35 \text{ W}$$

Comme chaque poste à 106 lampes, les 106 lampes sont réparties sur les trois phases ainsi chaque phase comportera :

$$\text{Lampes par phase} = \frac{106}{3} = 35,3 \text{ lampes}$$

La 1^{ère} phase aura : 36 lampes

La 2^{ème} phase aura : 35 lampes

La 3^{ème} phase aura : 35 lampes

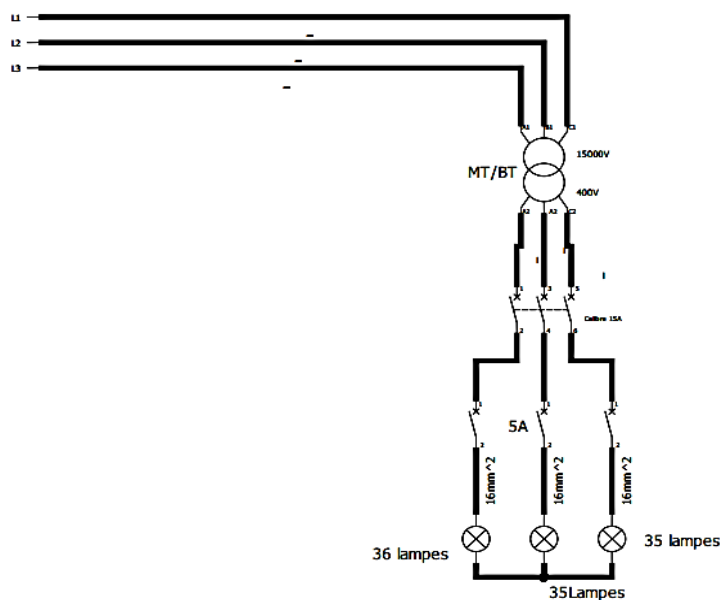


Figure 22. Illustration du schéma suivant les départs

B. Détermination de la chute de tension et de la section de câble

Chaque phase comporte environ 36 lampes à disposer en ligne, la détermination de la section des câbles en vue de minimiser les pertes et les chutes de tension en ligne est nécessaire. Ainsi la ligne 2 devra effectuer un transport d'énergie pour alimenter les 35 lampes situées à une longueur de 1,667 Km du point de départ comme illustre la figure 21.

On calcule :

- La chute de tension admise pour l'éclairage public est de 3%
- L'intensité du courant est de 12,5 A
- La résistivité de l'aluminium est de $2,7 \times 10^{-8} \Omega m$ [9]
- La longueur (L) est de 1667 m

La chute de tension U' se détermine par l'équation (10) avec comme réactance linéique : $0,08 \text{ m}\Omega/m$ pour les câbles multiconducteurs ou monoconducteurs en trèfle. (Norme NF C 15-100) [13]

$$U' = 3\% \text{ de } U \text{ avec } U = 400 \text{ V}$$

On a :

$$U' = \frac{400 \times 3}{100} = 12 \text{ V}$$

La section se calcule comme suit :

$$S = \frac{\rho \times L \times \cos\varphi \times I}{U' - XL \sin\varphi \times I}$$

Pour :

$L = 1667 \text{ m}$: Cette longueur définit la distance entre le point de départ (poste de transformation) et le début de lampes qu'il devra desservir.

$$\rho = 2,78 \times 10^{-8} \Omega m$$

$$\cos\varphi = 0,98$$

$$\sin\varphi = 0,199$$

$$I = 12,5 \text{ A}$$

$$S = \frac{2,78 \times 10^{-8} \times 1667 \times 0,98 \times 12,5}{12 - 1667 \times 0,08 \times 10^{-3} \times 0,199 \times 12,5} = 4,865 \times 10^{-4} m^2$$

$$S = 48,65 \text{ mm}^2$$

Pour la deuxième ligne

Pour :

$$L = 3,334 \text{ Km}$$

$$\rho = 2,78 \times 10^{-8} \Omega m$$

$$\cos \varphi = 0,98$$

$$\sin \varphi = 0,199$$

$$I = 12,5 \text{ A}$$

$$S = \frac{2,78 \times 10^{-8} \times 3334 \times 0,98 \times 12,5}{12 - 3334 \times 0,08 \times 10^{-3} \times 0,199 \times 12,5} = 1,0015 \times 10^{-4} m^2$$

$$S = 100,15 \text{ mm}^2$$

Pratiquement on prendra pour la 1^{ère} ligne

$$S_1 = 70 \text{ mm}^2 \quad \text{Et}$$

$$S_2 = 120 \text{ mm}^2 \quad \text{Pour la deuxième ligne telle que l'illustre la figure 21}$$

Nous remarquerons la différence de distances parce qu'on a trois phases qui doivent alimenter les lampes LED montées en ligne droite cela veut dire que si la phase 1 sert une partie de la ligne, la phase 2 devra continuer pour servir une autre partie et enfin la phase 3 pour la dernière partie.

Ainsi la phase 3 va parcourir une grande distance pour atteindre les lampes qu'elle doit desservir, la phase 2 même parcourt une certaine distance, d'où la différence de distance.

C. Dimension du réseau de distribution

Chaque poste possède 106 lampes réparties sur les trois phases : la figure illustre la répartition des lampes selon les phases.

Chaque phase supporte une puissance de 2884 W (relation démontrée en) pour de raison d'équilibrage, on divise cette puissance sur trois départs (cfr figure 23) ainsi chaque départ supportera une puissance :

$$P = \frac{2884,35}{3} = 961,45 \text{ W}$$

Chaque départ aura :

$$n = \frac{961,45}{80} = 12 \text{ lampes par départ}$$

Ainsi le courant dans chaque départ :

$$I_d = \frac{P}{U} = \frac{961,45}{230} = 4,2 \text{ A}$$

$$U' = 230 \times \frac{3}{100} = 6,9 \text{ V}$$

La section se calcule comme suit :

La figure 25 illustre les résultats obtenus lors de la simulation de notre modèle

MEASUREMENTS :

1:	'U AB: B1'	=	394.01 Vrms	29.24°
2:	'U BC: B1'	=	386.39 Vrms	-90.65°
3:	'U CA: B1'	=	390.89 Vrms	150.26°
4:	'U AB: B0'	=	400.00 Vrms	30.00°
5:	'U BC: B0'	=	400.00 Vrms	-90.00°
6:	'U CA: B0'	=	400.00 Vrms	150.00°
7:	'U AB: B2'	=	15000.00 Vrms	30.00°
8:	'U BC: B2'	=	15000.00 Vrms	-90.00°
9:	'U CA: B2'	=	15000.00 Vrms	150.00°
10:	'I A: B1'	=	12.24 Arms	0.00°
11:	'I B: B1'	=	11.82 Arms	-120.39°
12:	'I C: B1'	=	11.78 Arms	119.22°
13:	'I A: B0'	=	12.24 Arms	0.00°
14:	'I B: B0'	=	11.82 Arms	-120.38°
15:	'I C: B0'	=	11.78 Arms	119.24°
16:	'I A: B2'	=	0.33 Arms	-1.65°
17:	'I B: B2'	=	0.32 Arms	-122.08°
18:	'I C: B2'	=	0.32 Arms	117.54°

Figure 24. Résultats obtenus

Nous remarquons sur la figure que la chute de tension dans notre ligne ne dépasse pas 3% ; en effet à la barre de départ B0 la tension est de 400V, à la barre d'arrivée B1 la tension la plus basse est de 386.39V. L'expression ci-dessous illustre le calcul de la chute de tension dans une ligne :

$$U' = \frac{U_{\text{depart}} - U_{\text{moyenne arrivee}}}{U_{\text{depart}}} \times 100$$

En substituant les valeurs obtenues lors de notre simulation dans l'expression on obtient une chute de tension de :

$$U_{\text{moyenne arrivee}} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3} = \frac{394,01 + 386,39 + 390,89}{3} = 390,43 \text{ V}$$

$$U' = \frac{400 - 390.43}{400} \times 100 = 2,3925\%$$

La valeur de la chute de tension obtenue ne dépasse pas 3% d'où le dimensionnement que nous avons effectué est cohérent.

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de notre travail de fin d'études nous nous sommes fixés l'objectif de concevoir un réseau d'éclairage public connectée au réseau déjà existant SNEL permettant de desservir l'éclairage dans le tronçon CCLK Keshero-Pont de Sake de la route nationale 2. Ce qui nous a permis de parcourir quelques grandeurs photométriques, le système d'éclairage public et ses moyens d'éclairage (lampes, lampadaire), ainsi le contrôle d'allumage des lampes et les normes mondiales de l'éclairage dans le premier chapitre, parler de différentes étapes de dimensionnement d'un réseau d'éclairage public de façon théorique dont ces étapes sont dépendantes les unes des autres et selon qu'elles sont utilisés dans le deuxième chapitre, dimensionner et faire l'étude pratique d'un réseau d'éclairage public, dans le troisième chapitre.

Nous avons atteint les objectifs à succès car nous avons démontré avec notre dimensionnement qu'il était possible d'éclairer d'une façon régulière le tronçon CCLK-Sake en se connectant sur un réseau existant(SNEL), nous avons implémenté un modèle dans le logiciel MATLAB dont le résultat nous ont permis d'affirmer notre hypothèse de départ.

Pour les futurs chercheurs, en particulier ceux des domaines informatiques, électroniques, électricités, ils pourront compléter ce travail par l'implantation d'une application mobile permettant un contrôle à distance de notre éclairage public.

Nous recommandons à la population (Ingénieurs, sociétés spécialisées en éclairage public,...) d'utiliser notre système car il offre une fiabilité dans son dimensionnement tout en respectant les Normes et l'environnement

L'œuvre humaine n'étant pas toujours parfait, nous restons ouverts aux remarques et suggestions venant de tous ceux qui entreront en possession de notre projet.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. Socimex, «SONADES,» [En ligne]. Available: <https://group-socimex.com/service.php?id=7>. [Accès le 13 Mars 2022].
- [2] «Guide technique module 3 ECLAIRAGE PUBLIC,» [En ligne]. Available: <http://www.cpscl.com.tn/upload/telechargement/telechargement659.pdf>. [Accès le 22 Avril 2022].
- [3] «Wikipedia,» [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89clairage_public.
- [4] M. Laurent, LES LED POUR L'ECLAIRAGE, PARIS: DUNOD, 2012, 2015.
- [5] K. C. BOULHARES, «Etude Pratique et Dimensionnement d'un Système d'Eclairage Public Photovoltaïque Autonome Cas d'étude; Unité de Recherche d'Adrar,» Adrar, 2017/2018.
- [6] «Éclairage public (autoroutes et routes nationales) - Guide technique (SETRA-1980)».
- [7] J. PUMSU, *Etude pratique et dimensionnement d'un réseau d'éclairage public utilisant de l'électricité produite aux moyens des hydroliennes cas du quartier Mikondo (ex Ndjili brasserie)*, Kinshasa, 2020.
- [8] [En ligne]. Available: https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Lampe_fluorescente.
- [9] «ikonet,» [En ligne]. Available: <http://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/maison/electricite/eclairage/lampe-a-halogene.php>. [Accès le 2 Mars 2023].
- [10] «lightzoom,» [En ligne]. Available: <https://www.lightzoomlumiere.fr/article/lampe-a-decharge-electrique-de-la-pression-pour-eclairage-public/>. [Accès le 2 Mars 2023].
- [11] D. Gernez, «MaterielElectrique,» Nimbanet, [En ligne]. Available: <https://blmog.materielelectrique.com/disjoncteur-tag/cable-electrique/>. [Accès le 21 Janvier 2023].
- [12] «LUX la revue de l'éclairage».
- [13] «Zoom-Elec,» 13 7 2019. [En ligne]. Available: <https://schema-electrique.net/calcul-chute-de-tension-electrique-formule-calcul-section-cable-triphas-monophas.html>. [Accès le 27 12 2022].
- [14] F. Massie, «Luxener,» [En ligne]. Available: <http://www.luxener.com>. [Accès le 4 Janvier 2023].
- [15] «lampedirect,» [En ligne]. Available: www.lampedirect.fr . [Accès le 21 Janvier 2023].
- [16] P. O. B. MUSHAGE, Cours de CENTRALES ET RESEAUX ELECTRIQUES, Goma: U.L.P.G.L, 2022.
- [17] «Recommandations relatives à l'éclairage des voies publiques (AFE-1988)».

[18] «Vocabulaire de l'éclairage (AFE-1985)».

[19] «Guide pour la conception de l'éclairage public en milieu urbain (CETUR-1981)».

[20] «Guide de l'éclairage des tunnels routiers (CETU-1985)».