



**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB, BLIDA1**

Faculté de Technologie

Département des Énergies Renouvelables

**Mémoire en Vue d'Obtention du Diplôme de MASTER 2**

Thème :

**Etude et Conception d'un Eclairage Périphérique  
Photovoltaïque à LED pour le Site de l'UDES**

**Présenté par :**

ARBANE Ouadie

KHIAT Riadh

Soutenu le 07 Septembre 2020.

Devant le jury composé de :

Mr. T.DOUMAZ	Professeur	USDB	Président
Mr. A.MAHRANE	Directeur de Recherches	UDES	Promoteur
Mr. M.BOUZAKI	Professeur	USDB	Examineur

# Remerciements

*Tout d'abord nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir accordé la connaissance, donner le courage, la patience et la santé pour réaliser notre projet de fin d'étude.*

*Nous tenons, à remercier Monsieur Djillali TASSALIT, Directeur de l'Unité de Développement Des Equipements Solaires (UDES) de nous avoir permis d'effectuer notre PFE au sein de l'UDES..*

*Nous adressons nos plus sincères remerciements tout particulièrement à notre promoteur Monsieur Achour MAHRANE, Directeur de Recherche et Directeur de la Division Equipements à Energies Renouvelables (EER) de l'UDES, pour avoir suivi de très près nos travaux, pour son aide, ses orientations pédagogiques dans l'élaboration de ce mémoire et tous les conseils qu'il nous a prodigués durant toute la durée du PFE.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude à notre Co-promoteur Mr Moustapha BOUZAKI Maître de Conférences (MA) à l'Université Saad DAHLAB de Blida (USDB) pour avoir accepté de codiriger ce travail.*

*Nous exprimons notre sincère gratitude à Mr Toufik DOUMAZ, Professeur à L'Université Saad DAHLAB de Blida (USDB) pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.*

*Nous tenons à témoigner notre sincère reconnaissance à Mr Ali Laldji et Mr Smaïn BERKANE pour l'aide, assistance et contribution constante qu'ils nous ont apportées tout au long du PFE.*

*Que Mr Aissa MEFLAH, soit remercié pour l'aide qu'il nous a apporté pour les mesures d'illuminance et l'utilisation du logiciel Dialux pour les simulations de l'éclairage ainsi que Mr Madjid CHIKH, pour les discussions enrichissantes que nous avons eues avec lui et pour avoir partagé avec nous son expérience dans le domaine du photovoltaïque.*

*Que les collaborateurs au niveau de DIMEL et CONDOR soient remerciés pour leur disponibilité et pour toutes les informations qu'ils nous ont fournies à chaque fois que nous les avons sollicités.*

*Enfin, que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce mémoire trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus sincères.*

# Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail, tout d'abord à nos parents. Aucun hommage ne peut être à la hauteur de l'amour qu'ils nous ont toujours prodigué et du soutien sans faille qu'ils n'ont jamais cessé de nous apporter. Qu'Allah leur procure santé et longue vie..

A toutes nos familles et nos amis, spécialement ceux de la 2<sup>ème</sup> année Master, eux qui ont traversé les mêmes épreuves que nous.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire nous leur disons à tous  
Merci.

## ملخص

هذه المذكرة تحتوي على الدراسة اللازمة لإنجاز هيكل إنارة محيطية جديد لموقع و.ت.أ.ش ببواسماعيل, وهذا باستعمال مصابيح مزودة بألواح شمسية, الملف يبدأ بعموميات عن الإنارة و تأثيرها الطاقوي, و من ثم بحث حول مختلف تكنولوجيات الإنارة المطورة الثورية و الأكثر رواجاً, و في الأخير يشمل الاجراءات و الحسابات اللازمة (المصدر الشمسي و دراسة الأجهزة) لغرض معرفة أو تحديد التركيبة الأكثر جودة.

الكلمات المفتاحية: إنارة محيطية، مصابيح، ألواح شمسية، الطاقوي، المصدر الشمس .

## Abstract

The present paper contains a study destined for the setting up and the making of a new peripheral lighting for the site of UDES of BOU-ISMAIL using pole top mounted lamps supplied by solar panels, the document starts with some generalities about lighting and it's power impact, then a research about the different technologies of lighting developed and the most revolutionary and common ones, in the end it holds the necessary calculations (solar source and material study) in order to figure out the optimal configuration to use.

**Key words:** peripheral lighting, lamps, solar panels, power, solar source.

## Résumé

Ce mémoire contient une étude destiné à mettre en place un nouvel éclairage périphérique pour le site de l'UDES de BOU-ISMAIL en utilisant des lampadaires alimentés par des panneaux photovoltaïque, le document commence par des généralités sur l'éclairage et son impact énergétique, ensuite une recherche sur les technologies d'éclairage développée et les types de lampes révolutionnaires et les plus célèbres , pour en finir avec les calculs menée (gisement solaire et étude de matériel) afin d'aboutir à une configuration optimale du lampadaire solaire a utilisé.

**Mots clés :** éclairage périphérique, lampadaire, énergétique, panneaux photovoltaïques, gisement solaire.

# Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

**Introduction générale..... 1**

## **Chapitre 1 : Etat de l'art et problématique de l'éclairage**

1.1	Introduction.....	5
1.2	Contexte énergétique.....	5
1.2.1	Contexte énergétique International.....	5
1.2.2	Contexte énergétique national.....	7
1.3	Historique de l'éclairage.....	8
1.4	Les principales sources lumineuses pour l'éclairage.....	10
1.4.1	Les lampes à incandescence classique.....	10
1.4.2	Les lampes CFL.....	11
1.4.3	Les lampes LED.....	12
1.5	Les lampes LED.....	14
1.5.1	Fonctionnement d'une lampe LED.....	14
1.5.2	Efficacité de la technologie LED.....	15
1.5.3	Durée de Vie.....	16
1.5.4	Eclairage à LED et Ecosystème .....	17
1.5.5	Technologie LED et énergie photovoltaïque.....	18
1.6	Contexte du PFE.....	19
1.7	Conclusion.....	20

## **Chapitre 2 – Dimensionnement du lampadaire solaire pour le site de l’UDES**

2.1	Introduction.....	22
2.2	Éléments à considérer pour le dimensionnement.....	22
2.2.1	Irradiation solaire.....	22
2.2.2	Evaluation de la consommation électrique du lampadaire.....	27
2.3	Dimensionnement du kit d’éclairage solaire .....	30
2.3.1	Dimensionnement par une méthode paramétrique .....	31
2.3.1.1	Dimensionnement du module photovoltaïque .....	31
2.3.1.2	Dimensionnement de la batterie .....	34
2.3.2	Dimensionnement par le logiciel PVSYST .....	36
2.3.3	Choix du régulateur de charge/décharge.....	37
2.3.4	Dimensionnement du câblage.....	37
2.3.4.1	Calcul de la chute de tension dans le câble électrique.....	38
2.3.4.2	Dimensionnement du câblage.....	39
2.4	Choix des éléments constitutifs du kit d’éclairage solaire.....	39
2.4.1	Module Photovoltaïque.....	40
2.4.2	Batterie.....	41
2.4.3	Régulateur.....	42
2.4.4	Lampes.....	43
2.5	Fiche technique du lampadaire obtenu.....	44
2.6	Conclusion.....	45

## **Chapitre 3 : Résultats et analyses**

3.1	Introduction.....	47
3.2	Procédures de mesures et de simulation de la répartition de l’intensité lumineuse au sol des luminaires à LED et CFL.....	47
3.2.1	Conditions opératoires et procédure de mesures.....	47
3.2.2	Procédure de mesures.....	48
3.2.3	Procédure de simulation.....	48

3.3	Présentation des résultats de mesures indoor et de simulation de la répartition de l'intensité lumineuse au sol pour les luminaires à LED et CFL utilisés à l'UDES et de leurs équivalents sous Dialux dans le cas d'un mât de lampadaire de 3m.....	49
3.4	Simulation de l'étendue de la tache lumineuse au sol et répartition des intensités de la lumière pour un lampadaire ayant un mât de 4 m.....	55
3.5	Simulation de l'éclairage externe actuel de l'UDES avec Dialux pour les deux types de lampes CFL et LED.....	59
3.6	Vérification de l'autonomie du lampadaire.....	64
3.6.1	Procédure de test d'autonomie du lampadaire.....	64
3.6.2	Tests accomplis.....	65
3.7	Recommandations pour améliorer l'éclairage de l'UDES.....	66
3.8	Estimation du coût des modifications pour améliorer l'éclairage de l'UDES.....	69
3.9	Conclusion.....	70
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>71</b>

## **Bibliographie**

## Liste des figures

Figure 1.1:	Sources de production d'électricité dans le monde, année 2015.....	6
Figure 1.2:	Evolution de la consommation finale des produits pétroliers.....	8
Figure 1.3:	L'évolution de l'éclairage (luminaire).....	10
Figure 1.4:	Vue d'une lampe à incandescence.....	10
Figure 1.5:	lampe CFL.....	11
Figure 1.6:	Création d'énergie par recombinaison de couples électrons/trous dans une jonction PN.....	12
Figure 1.7:	Equivalent en termes de rendement lumineux par rapport à la puissance électrique pour les lampes LED, fluorescente et à incandescence.....	12
Figure 1.8:	Exemple de lampe LED.....	12
Figure 1.9:	Niveaux énergétiques des différents types de matériaux.....	15
Figure 1.10:	Valeurs typiques de l'efficacité énergétique de différentes sources lumineuses.....	16
Figure 1.11:	Comparaison de la durée de vie de plusieurs lampes.....	17
Figure 2.1:	Vue de la station radiométrique et météorologique de l'UDES.....	24
Figure 2.2.(a)-	Irradiation globale horizontale pour le site de l'UDES durant l'année 2016 obtenues à partir de Meteonorm, PVgis et mesures UDES.....	26

Figure 2.2.(b)- Irradiation globale inclinée pour le site de l'UDES durant l'année 2016 obtenues à partir de Meteonorm, PVgis et mesures UDES.....	26
Figure 2.3:(a) Durée d'ensoleillement sur une année (source Meteonorm) et (b) Rayonnement global incliné reçu sur site de l'UDES sur une année (Sources Meteonorm, PVGIS, UDES).....	27
Figure 2.4: Profil de charge du lampadaire solaire pour le jour le plus défavorable et le plus favorable de l'année et qui sont respectivement (le 14 Novembre et le 16 Août).29	
Figure 2.5: Vue générale d'un lampadaire solaire.....	30
Figure 2.6: Pré-dimensionnement d'un système isolé par PVSYST.....	36
Figure 2.7: STEACA SOLARIX PRS 2020.....	42
Figure 2.8: Luminaire LB-RS530-W025.....	43
Figure 3.1: Vue d'un lampadaire et du luxmètre.....	48
Figure 3.2: Vue d'un lampadaire CFL.....	48
Figure 3.3: Vue d'un lampadaire à LED.....	48
Figure 3.4: Répartition de l'intensité lumineuse mesurée (a) pour le luminaire à LED <i>LB- RS530-W025</i> (25W) et simulée (b) pour son équivalent PHILIPS LED BGS441 sous Dialux.....	50
Figure 3.5: Répartition de l'intensité lumineuse mesurée (a) pour le luminaire à CFL Phocos <i>CL1211C-2.2</i> (33W) et simulée (b) pour son équivalent XSP-E-2SH-L sous Dialux.....	53
Figure 3.6: Vue de la tache lumineuse et répartition de l'intensité lumineuse : (a) mesurée pour le luminaire à LED 25W et simulée pour son équivalent (PHILIPS LED BGS441) sous Dialux (b) mesurée pour le luminaire à CFL (33W) et simulée pour son équivalent(XSP-E-2SH-L) sous Dialux.....	56
Figure 3.7: Distance optimale entre deux lampadaires à LED pour un mât de 4m.....	58
Figure 3.8: Distance optimale entre deux lampadaires à CFL pour un mât de 4m. ....	58
Figure 3.9: Emplacement des lampadaires (points rouges) au niveau de l'éclairage externe actuel du site de l'UDES.....	60
Figure 3.10: Schéma d'implantation des luminaires de l'éclairage externe actuel de l'UDES utilisé sous Dialux.....	61
Figure 3.11: Taches d'illumination au sol pour l'éclairage externe actuel de l'UDES en utilisant des lampes CFL (33W).....	62
Figure 3.12: Taches d'illumination au sol pour l'éclairage externe actuel de l'UDES en utilisant des lampes LED (25W).....	63
Figure 3.13: Banc de mesure de la décharge de la batterie du lampadaire à LED (25W) :(a) Schéma électrique de câblage, (b) vue d'ensemble du banc de mesures.....	64

Figure 3.14 : Courbes de décharge de la batterie de 100Ah branchée à un luminaire à LED de 25W via un régulateur MORNING SUNLIGHT 10-10A et un régulateur STECA SOLARIX PRS 2020.....	65
Figure 3.15 : Courbes de décharge de la batterie de 100Ah, 150Ah et 200Ah branché sur un luminaire à LED de 25W via et un régulateur STECA SOLARIX PRS 2020.....	66
Figure 3.16 : : Nouvelle distribution proposée pour les lampadaires à LED afin d'améliorer l'éclairage périphérique de l'UDES.....	67
Figure 3.17: Simulation sous Dialux de la distribution des taches lumineuses au sol de l'éclairage externe de l'UDES après introduction des modifications de la disposition des lampadaires en utilisant des luminaires à LED de 25W.....	68
Figure 3.18 : Simulation sous Dialux de la distribution des taches lumineuses au sol de l'éclairage externe de l'UDES après introduction des modifications de la disposition des lampadaires mais en utilisant des luminaires à LED de 20W.....	69

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Récapitulatifs des avantages et inconvénients pour différents types de lampes...	13
Tableau 2.1 : Irradiation globale sur le plan horizontal et incliné obtenues pour l'année 2016...	25
Tableau 2.2 : Evaluation de la consommation du lampadaire en se basant sur les données issues des trois sources (Meteonorm, PVgis, données mesurées).....	28/29
Tableau 2.3 : Récapitulatif des calculs du dimensionnement de la puissance du champ PV nécessaire pour le lampadaire à LED (25W) pour les journées les plus favorables et les plus défavorables de l'année basés sur les données issues des trois sources de données (Meteonorm, PVgis, Mesures UDES).....	33
Tableau 2.4 : Récapitulatif des calculs de la capacité de batterie nécessaire pour le luminaire pour une autonomie de 3 jours, pour une tension de batterie de 12V pour les journées favorables et défavorables pour les trois sources de données.....	35
Tableau 2.5 : Longueur de câble utilisé.....	39
Tableau 2.6 : Les sections des câbles à utiliser.....	39
Tableau 2.7 : différents modules existant dans le marché national.....	40
Tableau 2.8 : Divers modèles de batteries pouvant répondre.....	41
Tableau 2.9: Caractéristiques des régulateurs pouvant être utilisés pour le lampadaire solaire.....	42
Tableau 2.10: Luminaires à LED disponibles sur le marché national.....	43
Tableau 2.11: Fiche signalétique du lampadaire à LED destiné à l'éclairage périphérique de l'UDES.....	44

Tableau 3.1: Types de luminaires à LED et CFL utilisés à l'UDES et ceux qui leur correspondent dans la bibliothèque de Dialux.....	49
Tableau 3.2: Récapitulatif des paramètres Emax, Emin et Emoy de l'intensité lumineuse par zone pour la lampe LED (25W).....	51
Tableau 3.3: Récapitulatif des paramètres Emax, Emin et Emoy de l'intensité lumineuse mesurés et simulés par zone pour un luminaire CFL (33W).....	54
Tableau 3.4: Caractéristiques principales de l'éclairage obtenu par une lampe LED (25W) et une lampe CFL (33W) pour un mât de 3 et 4m.....	57
Tableau 3.5: Normes d'éclairage (NF EN 12665) [2] pour différents lieux.....	59

# Introduction générale

depuis l'antiquité, l'être humain dépendait quotidiennement de la lumière du soleil durant la journée afin distinguer les éléments autour de lui ou le danger qui pouvait le guetter, mais la nuit tombée, il devenait vulnérable devant l'obscurité, c'est pour cela qu'il était sans cesse à la recherche de moyens qui lui faciliteront la vie courante comme la perception visuelle pour vaquer à ses activités et pour être en sécurité en un mot des moyens pour éclairer son lieu de vie mais aussi pour se déplacer pour aller chasser par exemple.

Au cours du temps, L'éclairage a subi plusieurs innovations et développements depuis sa première apparition en l'an 1000 à Cordoba jusqu'à nos jours [6], en passant des lampes à l'huile utilisées au 18ème siècle jusqu'aux lampes à LED utilisées actuellement. L'évolution de l'éclairage est en grande partie due aux innovations technologiques dont elles ont bénéficié qui ont permis l'amélioration des performances des lampes efficacité énergétique, qui s'est traduite par une meilleure fiabilité, une plus grande longévité mais aussi en facilitant leur utilisation.

Dans un secteur énergétique en pleine mutation, la transition énergétique qui est un concept adopté et appliqué dans le monde vise à introduire un ensemble de transformations du système de production, de distribution et de consommation d'énergie dans une démarche de développement durable et de lutte contre le réchauffement climatique.

Pour le secteur de l'éclairage, très énergivore, la transition énergétique se traduirait, à la fois, par une réduction de sa consommation d'énergie et de son incidence sur l'environnement. Les tendances actuelles qui se dégagent sont l'adoption d'un éclairage à LED sous toutes ses formes (lampes, néons, panneaux de signalisation, ...) aussi bien pour le résidentiel, le tertiaire, l'éclairage public, etc., en y associant un système d'alimentation utilisant une source d'origine renouvelable.

En 2018, l'éclairage public en Algérie représentait 56% de la consommation globale d'électricité [4]. Les pouvoirs publics ont depuis tiré la sonnette d'alarme afin que des mesures énergiques soient prises pour réduire cette consommation. Afin de s'inscrire dans cet effort national, l'UDES a décidé d'apporter sa contribution en expérimentant une solution économique et durable pour l'éclairage périphérique de l'Unité et d'en évaluer son efficacité et sa viabilité.

Dans le cadre de notre Projet de Fin d'Etudes, il nous a été proposé de conduire une étude concernant l'éclairage périphérique de l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES) située à Bou Ismail, Tipaza, afin qu'il ait la meilleure efficacité énergétique possible tout en étant écologique et ce en utilisant une source d'énergie renouvelable en l'occurrence l'énergie solaire photovoltaïque.

Les travaux que nous avons conduits dans le cadre de ce projet, sont présentés dans trois chapitres selon la démarche suivante :

Dans le premier chapitre nous évoquerons, d'abord, la situation énergétique dans le monde et en Algérie et nous montrerons l'intérêt de la transition énergétique pour le secteur de l'énergie et sa mise en œuvre pour assurer la mutation du secteur énergétique en garantissant à la fois les impératifs d'économie d'énergie et environnementaux.

Nous aborderons, ensuite, le domaine de l'éclairage, objet de notre étude, en dressant un bref historique des lampes d'éclairage et l'apport des diverses innovations qui ont jalonné leur évolution dans le souci constant d'améliorer notamment leur efficacité énergétique et leur longévité. Nous présenterons, enfin, le contexte et les objectifs assignés à notre projet de fin d'études.

Dans le deuxième chapitre nous exposerons la démarche que nous avons adoptée pour déterminer la configuration optimale du lampadaire solaire destiné pour l'éclairage périphérique du site de l'UDES à Bou Ismail en utilisant une méthode analytique et un logiciel de calcul en l'occurrence PVSYST pour effectuer son dimensionnement. Les résultats obtenus par les deux voies seront confrontés. Au terme de ce chapitre, une configuration optimale du lampadaire à LED solaire sera proposée en justifiant les choix des éléments qui le constituent et en évaluant son coût.

Le contenu du troisième chapitre, sera consacré, d'abord, à une étude comparative basée sur les mesures 'indoor' de l'éclairage au sol obtenu en utilisant une lampe CFL (33W) et une lampe LED (25W). Ces mesures serviront à identifier les lampes CFL et LED de la bibliothèque du logiciel Dialux avec lesquelles nous ferons ensuite la simulation de l'éclairage périphérique existant de l'UDES. Nous relèverons l'avantage de l'éclairage à LED par rapport à celui utilisant les lampes CFL tout en notant, pour les deux cas, les carences

engendrées par la distribution actuelle des lampadaires au niveau du site de l'UDES qui se manifeste notamment par la présence de zones d'ombre. Enfin, nous proposerons les modifications à apporter pour améliorer l'éclairage périphérique actuel de l'UDES tout en évaluant leur coût.

Nous terminerons le mémoire par une conclusion générale.

# **CHAPITRE I**

**Etat de l'art et problématique de  
l'éclairage**

# **Chapitre I – Etat de l’art et problématique de l’éclairage**

## **I.1 Introduction**

Dans ce chapitre nous évoquerons d’abord la situation énergétique dans le monde et en Algérie et nous montrerons la nécessité, compte tenu, d’une part, des sources d’énergie conventionnelle utilisées, qui sont, majoritairement, polluantes et en déclin et, d’autre part, une consommation d’énergie en hausse continue concourent à un rejet des gaz à effet de serre toujours plus élevé et un réchauffement de la terre en hausse, de diversifier les sources d’énergie et de prendre des mesures énergiques pour la réduction de la consommation et préserver l’environnement.

A ce titre, l’éclairage, qui est l’un des postes les plus énergivores, constitue l’une des niches d’économie d’énergie qui doit être exploitée pour réduire la consommation notamment en utilisant les lampes les plus efficaces énergétiquement et en ayant recours à une alimentation à énergie renouvelable. Ces mesures rendront l’éclairage plus économique mais aussi plus écologique.

Pour ce faire, nous passerons en revue l’évolution de l’éclairage par le biais des innovations introduites au cours du temps sur les sources de lumière notamment les lampes. Nous présenterons ensuite la constitution et le principe de fonctionnement des principales lampes disponibles ainsi que leurs avantages et inconvénients tout en notant que la tendance actuelle est pour les LED aussi bien pour des considérations économiques qu’écologiques.

Enfin nous terminerons en présentant le contexte et les objectifs de notre Projet de Fin d’Etudes.

## **I.2 Contexte énergétique international et national**

### **I.2.1 Contexte énergétique international**

Les énergies fossiles ont de tout temps constitué la source principale d’énergie. Ainsi, en 1973, elles représentaient 86,7% de la production totale d’énergie primaire dans le monde (dont 46,2% de pétrole). Notons que les productions mondiales de gaz naturel et de charbon en 2015 ont triplé par rapport à 1973 [1]. Les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> relatives à la

combustion d'énergie ont pour leur part doublé durant cette période. Ces sources d'énergies polluantes sont en grande partie responsables des rejets de gaz à effet de serre et par conséquent du réchauffement climatique [1].

De nombreuses conférences et rencontres (Kyoto, Rio, Paris, ...) [2] ont été organisées pour sensibiliser tous les pays du monde concernant le réchauffement climatique. Des décisions importantes ont été prises et des recommandations ont été formulées pour ralentir ce réchauffement. Pour rappel, les travaux de GIEC en 2010 [1] indiquent qu'il faudrait réduire les émissions mondiales de l'ensemble des gaz à effet de serre de 40% à 70% d'ici à 2050 (par rapport au niveau de 2010) pour espérer atteindre l'objectif de l'Accord de Paris, à savoir limiter le réchauffement climatique 'nettement en dessous' de 2°C d'ici à 2100.

Bien qu'il y ait eu une prise de conscience mondiale pour une transition énergétique favorisant les énergies renouvelables, les énergies décarbonées progressent doucement mais sûrement dans le mix électrique mais elles restent pour l'heure minoritaires car elles ne représentent que 33,7% de la production mondiale [1]. L'hydroélectricité, qui est de loin la plus importante d'entre elles, a produit 3 978 TWh dans le monde en 2015 (soit 16% du mix énergétique), soit davantage que les productions nucléaire (2 571 TWh en 2015), éolienne (838 TWh en 2015) et photovoltaïque (247 TWh en 2015) réunies.

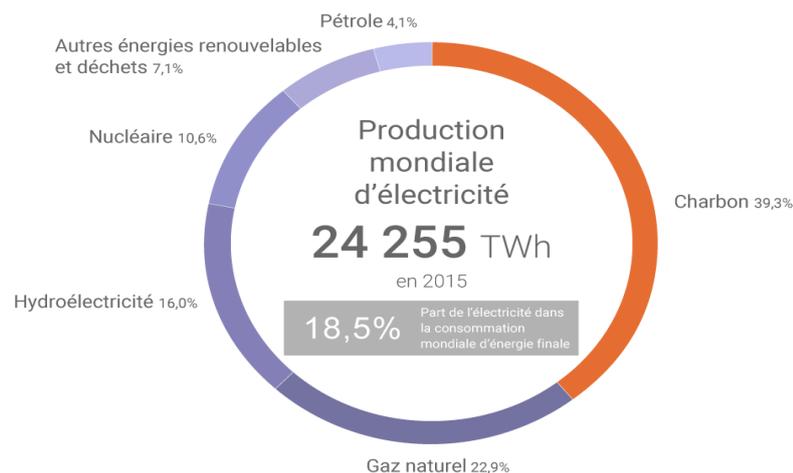


Figure 1.1: Sources de production d'électricité dans le monde, année 2015 [1]

En 2015, la répartition de la production de l'électricité par secteur était de 29% pour l'industrie, 29 % pour les transports, 21 % pour le résidentiel, 8 % pour le tertiaire, 2 % pour l'agriculture et la pêche et 9 % pour les usages non énergétiques (chimie, etc.), [1].

Par ailleurs, en 2015, La consommation mondiale d'énergie primaire était 13 647 Mtep [1], et l'électricité a représenté 18,5% de la consommation finale d'énergie (contre 9,4% en 1973) [1]. L'éclairage à lui seul représente 19 % de la consommation électrique mondiale et participe pour environ 6 % des émissions de gaz à effet de serre [1].

### **I.2.2 Contexte énergétique national**

En 2017, en Algérie, la consommation énergétique finale était de 44.65 Mtep (toutes formes confondues) répartie sur cinq secteurs de la manière suivante, [3] :

- Résidentiel et tertiaire 43%
- Transport 33%
- Industrie 22%
- Agriculture 01%
- Autres 01%

Cette consommation a été satisfaite en utilisant des sources d'énergie répartie comme suit :

- Produits pétroliers 34%
- Gaz naturel 31%
- Electricité 30%
- GPL 05%
- Charbon 0.1%

La consommation finale est passée de 42,9 Mtep en 2016 à 44,65Mtep en 2017, reflétant une hausse de 1,8Mtep, soit (4,1%), tirée par celle du gaz naturel, de l'électricité et des GPL qui ont plus que compensé la baisse des produits pétroliers.

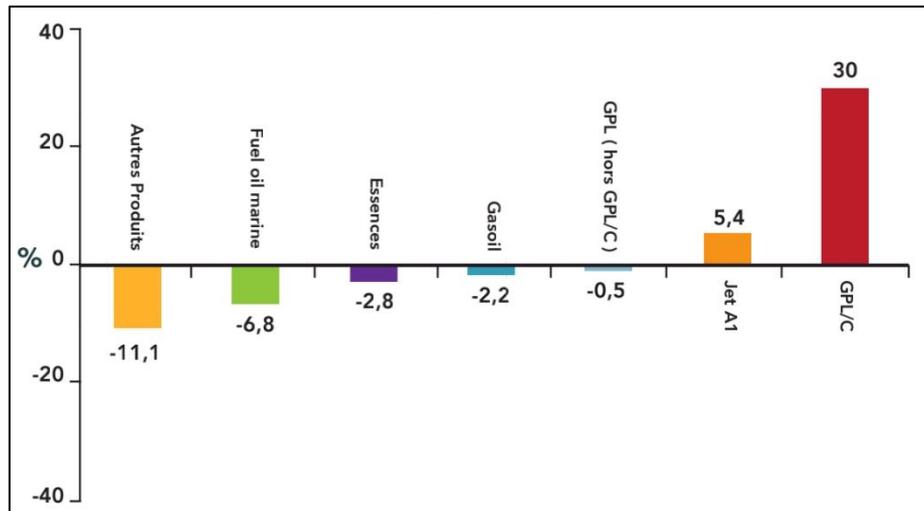


Figure 1.2: Evolution de la consommation finale des produits pétroliers [3]

L'électricité est la forme d'énergie la plus facile à utiliser et sa facture a atteint en 2018 les 27 milliards de dinars. C'est l'éclairage public qui en est la principale raison. Il représente 56% du bilan total de la consommation électrique facturé de 14.6 milliards de dinars [4]. C'est donc l'un des usages les plus énergivores, sur lequel on doit agir pour réduire cette facture. Pour ce faire, plusieurs approches sont envisageables. L'une d'elle est d'utiliser des lampes avec une grande efficacité énergétique telles que les LED. Bien qu'au premier abord elles sont plus chères mais elles sont aussi économes en énergie et présentent une durée de vie plus longue comparativement à tous les autres types de lampe (CFL, sodium, ...) disponibles sur le marché.

### I.3 Historique de l'éclairage

L'électricité est un phénomène physique qui a toujours existé, par exemple, sous forme d'éclairs. L'être humain a mis beaucoup de temps à la maîtriser comme une source d'énergie. Ses propriétés ont été comprises et utilisées aux cours de XVIIe et XVIIIe siècles. Il a fallu beaucoup de temps et plusieurs inventions pour arriver à l'utilisation actuelle du courant électrique. Celui que l'on considère comme l'inventeur de l'électricité c'est Thomas Edison car c'est lui qui a inventé la première ampoule traditionnelle à incandescence [5].

L'homme a toujours voulu continuer à vivre normalement après la tombée de la nuit, il était ainsi obligé à chercher des moyens adéquats lui facilitant la perception visuelle. C'est pour cela qu'a été développé l'éclairage. La première utilisation de l'éclairage a eu lieu en l'an 1000 à Cordoba (Al- Andalous). En ce temps-là, on utilisait des torches, des bougies, des lampes à l'huile. Au début, il s'agissait de simples pierres évidées puis remplies d'huile végétale dans lesquelles on trempait une mèche [6].

Au 18<sup>e</sup> siècle, l'éclairage a été amélioré en ajoutant un réservoir disposé à hauteur de flamme pour une meilleure stabilité. Au 19<sup>e</sup> siècle un nouveau type de lampes (lampes à gaz) a connu une expansion grâce à la production industrielle de gaz par distillation de l'huile. A partir de 1860, les lampes à pétrole ont connu un grand succès grâce à la découverte d'importants gisements de pétrole.

La révolution des lampes commencera en 1879 avec l'apparition de la lampe à incandescence. Dans un premier temps la lampe utilisait un filament en Carbone, qui a ensuite été remplacé en 1959 par un filament de tungstène (lampe halogène) à laquelle on a ajouté un gaz de remplissage (iode ou brome) pour une meilleure efficacité lumineuse.

L'éclairage a connu ensuite plusieurs innovations et inventions pour en arriver aux LED. C'est en 1970 qu'est apparue pour la première fois une lampe LED. Au début, son développement industriel était porté surtout par le monde de la signalétique. Elle n'a vu son entrée dans le domaine de l'éclairage que depuis les années 2000/2010 [6], et ce qui l'a complètement révolutionné.

En effet, les luminaires utilisés auparavant consommaient beaucoup d'énergie et il a fallu introduire plusieurs innovations pour améliorer leur efficacité énergétique et diminuer leur consommation. Nous citons dans ce qui suit les principales innovations introduites, sur les lampadaires récents, principalement l'utilisation des LED, et les avantages que l'on en tire.

- Les lampes LED ont une très bonne efficacité énergétique par rapport aux lampes classiques et leur durée de vie dépasse les 40 000h.
- Elles permettent de réaliser une télégestion, autrement dit, une gestion de l'éclairage à partir d'un centre de contrôle.
- Elles permettent aussi d'effectuer une télémaintenance, ce qui permet de transférer des informations depuis chaque lampadaire vers un centre de contrôle, notamment pour identifier les éventuels dysfonctionnements.
- L'utilisation du capteur de mouvement, offre la possibilité d'allumer le lampadaire uniquement en cas de nécessité, par exemple lors du passage d'une personne.
- L'intégration des modules solaires photovoltaïque au niveau du lampadaire pour son alimentation électrique permet une relative autonomie de ce dernier par rapport au réseau électrique conventionnel.
- L'utilisation d'un régulateur crépusculaire pour l'allumage automatique de l'éclairage à la tombée de la nuit permet une utilisation rationnelle de l'énergie.

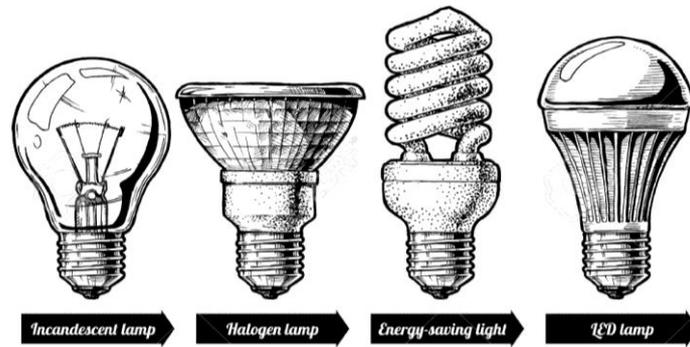


Figure 1.3: L'évolution de l'éclairage (luminaire) [6]

## I.4 Les principales sources lumineuses pour l'éclairage

L'évolution de l'éclairage au cours du temps est basée principalement sur l'innovation introduite sur la source de lumière ou lampe. Nous passons en revue, dans ce qui suit, les principales étapes de son évolution à travers le développement des lampes.

### I.4.1 Les lampes à incandescence classiques

La lampe à incandescence traditionnelle, inventée en 1879 par Joseph Swan et améliorée par les travaux de Thomas Edison, produit de la lumière en portant à incandescence un filament de tungstène, le métal qui a le plus haut point de fusion (3 430 °C). A l'origine, un filament de carbone était utilisé, ce dernier en se sublimant puis en se condensant sur le verre de la lampe, opacifiait assez rapidement le verre [7].

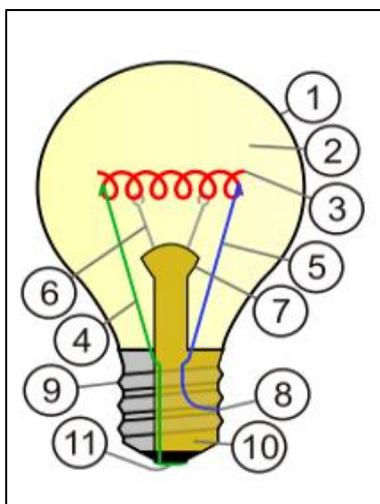


Figure 1.4: Vue d'une lampe à incandescence [7]

1. Ampoule de verre, aussi appelée globe, bulbe ou enveloppe
2. Gaz inerte
3. Filament de tungstène
4. Fil conducteur (contact avec le plot central)
5. Fil conducteur (contact avec le culot)
6. Fil de support du filament
7. Monture ou support en verre
8. Culot (contact électrique)
9. Culot (pas de vis ou baïonnette, etc.)
10. Isolant
11. Plot central (contact électrique)

#### I.4.2 Les lampes CFL

Une lampe CFL (Compact Fluorescent Light) est en réalité une ampoule à basse consommation, également appelée lampe fluo-compacte [8].

Sa conception est déjà bien connue, car il s'agit tout simplement de l'adaptation d'un tube fluorescent industriel à usage domestique. Techniquement parlant, c'est un tube fluorescent produisant de la lumière, et

dont le format a été miniaturisé par le biais d'une technique de pliage ou d'enroulage de matière.



Figure 1.5: lampe CFL [8]

L'ampoule est bien évidemment pourvue d'un culot qui assure la transmission du courant électrique, et dans lequel est incorporé le ballast électronique.

L'ampoule CFL est le fruit de l'évolution du travail d'un ingénieur américain nommé Peter Cooper Hewitt, qui inventa la lampe mercure basse pression. Le problème est qu'elle produisait une lumière bleue/verte, émettant des rayons UV, dangereux pour la peau, raison pour laquelle son usage a été restreint à l'industrie et aux studios photographiques. Hans Spinner, Friedrich Meyer et Edmund Germer ont ensuite apporté l'avancée technologique pour arriver au produit que l'on connaît aujourd'hui.

Ils déposèrent un brevet en 1926 pour une lampe à haute pression de mercure, qui consistait à placer une couche d'un matériau fluorescent sur la face interne de l'ampoule. Ce qui permettait finalement de modifier la couleur de la lumière et d'obtenir une lumière blanche.

Plus concrètement dans notre cas, elles sont idéales pour la croissance des jeunes plantules ainsi que pour l'enracinement des boutures. Elles offrent l'avantage d'avoir une faible consommation d'énergie et d'avoir un prix plus accessible. Elles génèrent également peu de chaleur. De plus, elles ont une longue durée de vie (23 000 heures environ), en comparaison avec la plupart des lampes disponibles sur le marché. Pour obtenir de bons résultats, il est préconisé le remplacement des ampoules CFL après environ 18000 heures de fonctionnement, car au-delà elles perdent de leur efficacité

### I.4.3 Les lampes LED

Ce sont les lampes de dernière génération. Une diode électroluminescente ou Light Emitting Diode (LED) est un composant électronique permettant la transformation de l'électricité en lumière. Son principe de fonctionnement est basé sur le fait que sous l'effet de la différence de potentiel appliquée entre les deux couches de la diode semi-conductrice P-N, des électrons pénètrent dans la couche de type N, et des trous dans la couche de type P. A l'interface de ces deux zones, les électrons et les trous se recombinent en donnant naissance à un photon, donc à de la lumière.

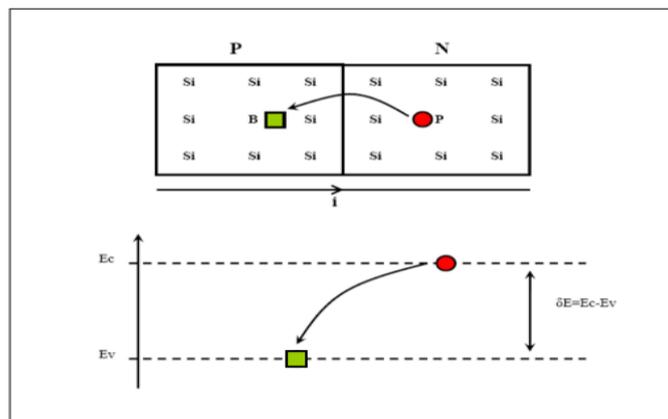


Figure 1.6: Création d'énergie par recombinaison de couples électrons/trous dans une jonction PN [9].

Ses principales applications, par ordre d'importance de marché, sont l'électronique mobile, les écrans, le secteur de l'automobile, l'éclairage et la signalisation [9].

Pour l'éclairage, on utilise des lampes constituées de plusieurs LED de forte puissance accolées, puisqu'à l'unité leur flux lumineux (mesuré en lumen ou lm) est encore trop faible.

Ce n'est qu'en 2000 que les LED de forte puissance et les LED blanches sont apparues, grâce à d'importants efforts de R&D, avec l'ambition de concurrencer les technologies existantes pour l'éclairage des particuliers, sur les lieux de travail ou en éclairage extérieur.

<b>LED</b>	<b>Fluorescent</b>	<b>Incandescent</b>
1 Watt	= 3Watt	= 15Watt
3 Watt	= 7Watt	= 35Watt
5 Watt	= 11Watt	= 50Watt
7 Watt	= 15Watt	= 70Watt
9 Watt	= 19Watt	= 90Watt
12 Watt	= 25Watt	= 120Watt
15 Watt	= 31Watt	= 150Watt
18 Watt	= 36Watt	= 180Watt

Figure 1.7: Equivalent en termes de rendement lumineux par rapport à la puissance électrique pour les lampes LED, fluorescente et à incandescence [9].



Figure 1.8: Exemple de lampe LED, [9].

Tableau 1.1– Récapitulatifs des avantages et inconvénients pour différents types de lampes [7], [8],[10].

Type de lampe	Avantages	Inconvénients
<b>Lampe incandescente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-peu chère</li> <li>-Elles ont un excellent rendu des couleurs</li> <li>-Elles ont un impact limité sur l'environnement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-une durée de vie faible (1000 h).</li> <li>-sensible aux chocs.</li> <li>- Le rendement est très mauvais</li> <li>-elle s'avère dangereuse car elle chauffe beaucoup</li> </ul>
<b>Lampe CFL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Peu chère</li> <li>-Faible production de chaleur</li> <li>-Faible consommation électrique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Faible rendement</li> <li>-Uniquement adapter aux petits espaces (espace de culture, ...)</li> </ul>
<b>Lampe LED</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-une durée de vie impressionnante (jusqu'à 40000h) [10]</li> <li>- Bonne efficacité énergétique</li> <li>-un éclairage maximal instantané</li> <li>- Fonctionnent en très basse tension et même sous de basses températures</li> <li>- ne contiennent pas de mercure et sont en grande partie recyclables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les lampes LED contribuent à la pollution lumineuse</li> <li>- Les LED mal adaptées à l'éclairage de forte puissance (en raison de la surchauffe que peut entraîner l'utilisation de nombreuses LED accolées) [10]</li> </ul>

Bien que plus chères à l'achat, les lampes LED se révèlent plus économiques à l'usage que leurs concurrentes. De plus, leur confort d'utilisation est très bon puisque la lampe s'allume instantanément, nous pouvons aussi, contrairement aux autres lampes, faire varier l'intensité et donc leur flux lumineux en utilisant des variateurs et leur durée de vie est garanti pour plus de 20 000h.

## 1.5 Les lampes LED

Fortes de leurs petites dimensions, de leur efficacité, d'une qualité d'éclairage d'un nouveau genre et de l'innovation constante en matière d'applications – les LED dominent l'univers de la lumière. Depuis les diodes lumineuses à l'éclairage général de grande qualité en passant par les instruments d'affichage, leur développement est exponentiel. La LED est devenue un élément incontournable [11].

Depuis l'invention de l'ampoule à incandescence par Edison, la LED est l'invention la plus significative de l'histoire de la technologie d'éclairage. La lumière du futur éclaire désormais notre présent et elle est partout, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur. Les LED améliorent l'éclairage public la nuit, les phares à LED augmentent la sécurité routière et l'éclairage intérieur à LED expérimente une véritable révolution grâce aux nouveaux systèmes proposés, à leur longue durée de vie et au degré élevé d'efficacité.

### 1.5.1 Fonctionnement d'une lampe LED

On appelle lampe à diode électroluminescente, lampe à DEL, lampe à LED ou tout simplement LED (abréviation de l'appellation anglophone Light-Emitting Diode) un composant semi-conducteur électronique utilisé pour éclairer. Cette technologie représente la 4<sup>e</sup> génération d'éclairage grand public après l'ampoule à incandescence classique, l'ampoule halogène et la fluo compacte [12].

Comment fonctionne la LED ? La lumière ne vient plus de la chaleur, mais des composants de l'ampoule elle-même. Le mode de fonctionnement est basé sur la physique quantique des semi-conducteurs. Dans la théorie des bandes d'énergie les semi-conducteurs sont des matériaux situés entre les conducteurs métalliques et les isolants (comme le plastique). Ils disposent de deux bandes d'énergie proches mais qui ne se chevauchent pas : une bande de conduction et une bande de valence. En appliquant une tension suffisante, se produisent les évènements suivants [12] :

1. La bande de valence perd un électron qui passe dans la bande de conduction. La première a donc un « vide », la seconde un électron en plus qui va transporter le courant.
2. Cette configuration étant instable, l'électron finira par retourner à sa place, dans la bande de valence.

3. Répétée à l'infini, cette séquence permet des allers-retours d'électrons entre les deux bandes de façon continue.
4. Chaque échange libère un photon qui est source de la lumière.

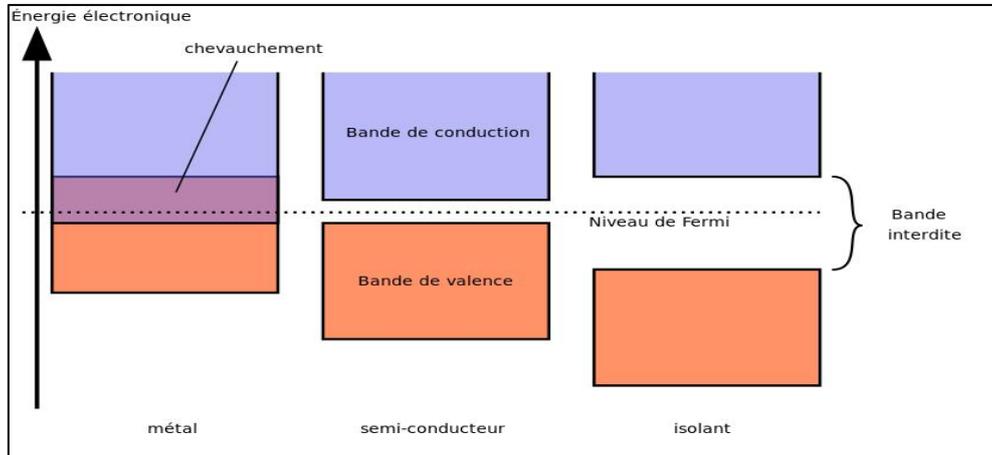


Figure 1.9: Niveaux énergétiques des différents types de matériaux [13].

### I.5.2 Efficacité de la technologie LED

Extrêmement efficaces, les luminaires LED impressionnent par leur remarquable bilan énergétique. Peu gourmands en électricité, les LED ont un rendement lumineux supérieur à celui de luminaires similaires dotés de sources lumineuses conventionnelles [14].

Le rendement lumineux indique la puissance électrique (watt) transformée en lumière (lumen) par une source lumineuse. Les lampes halogènes courantes fournissent jusqu'à 30 lm/watt, les lampes fluorescentes entre 60 et 110 lm/watt et les LED, actuellement, atteignent 200 lm/watt. Les LED font l'objet de perfectionnements constants [14].

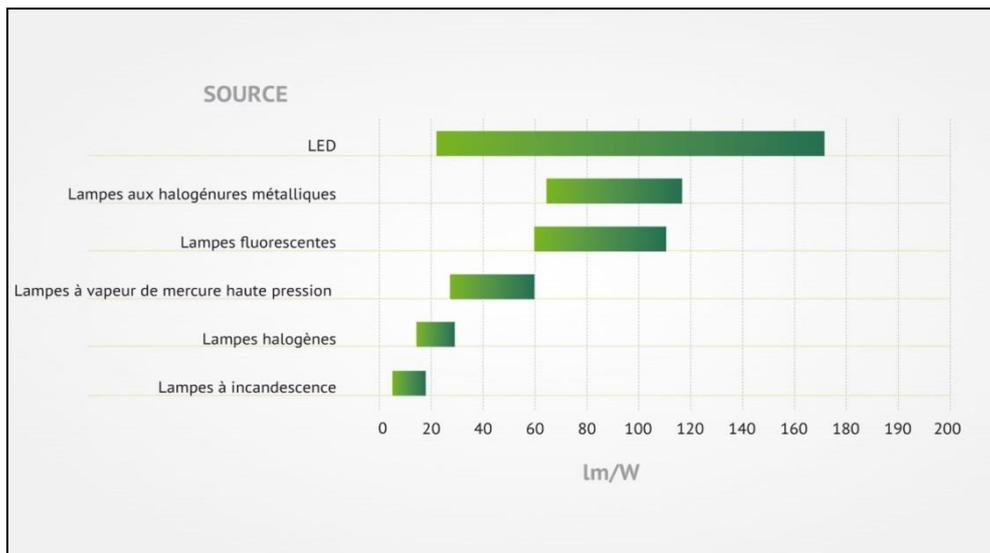


Figure 1.10: Valeurs typiques de l'efficacité énergétique de différentes sources lumineuses [14]

Par rapport à une ancienne installation dotée de sources lumineuses classiques (ampoule incandescence), une installation neuve avec des luminaires LED permet de dégager une économie d'énergie pouvant aller jusqu'à 65 %. Cet excellent bilan est un plaidoyer en faveur de l'utilisation des LED [14]. Conjuguées à une gestion de pointe de l'éclairage, elles permettent d'économiser jusqu'à 85 % d'énergie. Un facteur coût convaincant ! [14].

Les utilisateurs bénéficieront de factures d'électricité réduites : pour une plus faible consommation d'électricité, un luminaire LED fournit un rendement lumineux supérieur à celui d'un luminaire similaire avec des sources lumineuses conventionnelles – sans aucun compromis sur la performance et la fiabilité.

### **I.5.3 Durée De Vie**

En comparaison avec les sources lumineuses conventionnelles, les LED ont une durée de vie extrêmement longue de plus de 50 000 heures. L'extrapolation des données de consommation met en évidence une durée de vie de 18 ans pour les LED sur la base d'une durée d'éclairage de 250 jours ouvrables par an et de 11 heures de fonctionnement par jour [14].

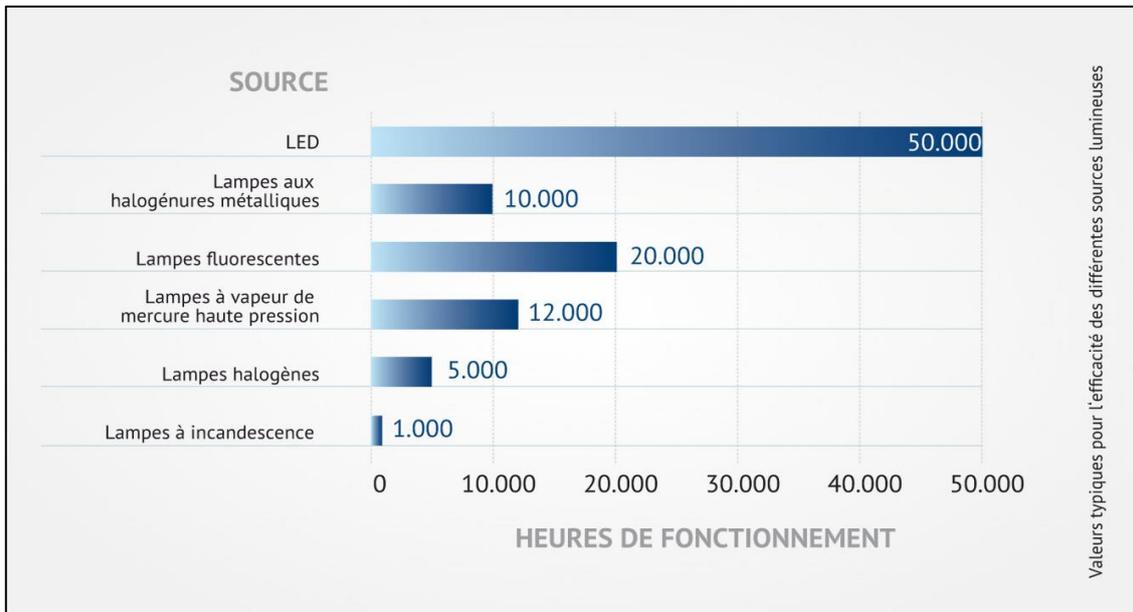


Figure 1.11: Comparaison de la durée de vie de plusieurs lampes [14].

Contrairement aux sources lumineuses conventionnelles, les modules LED ne s'éteignent pas immédiatement, c'est leur luminosité qui faiblit progressivement. Le flux lumineux et par conséquent l'intensité lumineuse diminuent légèrement au fil de la période de fonctionnement.

Leur durée de vie exceptionnelle se traduit par une chute des coûts d'équipement mais aussi de maintenance pour changer les ampoules en fin de vie. Moderniser son éclairage tout en réduisant votre consommation électrique permet de réduire les dépenses énergétiques.

#### I.5.4 Eclairage LED et Ecosystème

L'éclairage représente 10 à 15% de la consommation électrique d'un foyer [15]. Le type de lampes utilisé peut avoir une influence sur la consommation d'électricité c'est pour cela que l'on privilégiera le recours aux lampes LED qui sont plus économiques et donc plus écologiques car préservant plus les sources conventionnelles car ne dit-on pas que moins on consomme moins on pollue. [15].

Les avantages écologiques de la LED sont proportionnels à son utilisation, cela signifie que plus les ampoules LED vont être utilisées en remplacement des ampoules traditionnelles, plus elles auront un impact positif sur l'environnement. En effet, si tous les secteurs décidaient massivement de passer à l'éclairage LED, la consommation électrique générale baisserait ce qui permettrait aux centrales électriques de moins produire et donc de réduire les rejets en CO<sub>2</sub>. Suivant cette logique, plus les ampoules LED seront utilisées pour éclairer notre quotidien, plus la production électrique nécessaire sera moindre et plus les rejets de CO<sub>2</sub>

seront réduits. Durant ces dernières années, l'utilisation des lampes LED a augmenté de manière exponentielle depuis que la communauté mondiale a décidé d'adopter les ampoules LED [16].

Si en plus l'éclairage LED est alimenté avec de l'électricité d'origine renouvelable comme le photovoltaïque, qui est la technologie la plus répandue dans le domaine des énergies renouvelables, nous aurons un éclairage le plus écologiste possible.

### **I.5.5 Technologie LED et le Photovoltaïque**

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) a estimé en 2010 que 1,4 milliard de personnes (soit 2 % de la population mondiale) n'ont toujours pas accès à l'électricité, de nos jours le nombre est de 940 millions de personnes. Par exemple, 42 % de la population actuellement vivant en Asie du Sud n'a pas accès à l'électricité, tandis que seulement 31 % des Africains subsahariens ont accès à l'électricité. Dans ces régions, l'accès à l'électricité est surtout concentré dans les zones urbaines.

Par exemple, le pourcentage de personnes ayant accès à l'électricité en Afrique subsaharienne est le plus faible parmi les pays en développement : environ 6 % dans les zones urbaines et seulement 14 % dans les zones rurales.

Des programmes d'électrification des zones hors réseau sont mis en marche dans la plupart des pays en développement. Cependant, les efforts visant à électrifier les zones rurales sont confrontés à plusieurs obstacles, tels que l'éloignement géographique, l'éparpillement de la population et le revenu limité des consommateurs. Ainsi, l'extension du réseau électrique à ces zones se caractérise par des coûts initiaux et de maintenance élevée. Malgré tous ces défis, l'électricité peut devenir un élément stratégique majeur pour promouvoir la création d'opportunités économiques locales et contribuer à satisfaire les besoins fondamentaux des populations.

Les habitants des zones rurales des pays en développement utilisent du bois de chauffage et des lampes à pétrole pour l'éclairage. Les lampes à pétrole ont un débit lumineux très faible d'environ 4 à 10 lumens, par rapport aux 900 lumens d'une lampe à incandescence de 60 (W). Le monoxyde de carbone (CO), l'oxyde de soufre (Sox), l'oxyde d'azote (Nox) et le dioxyde de carbone (CO) sont des gaz émis par le bois de chauffage et les lampes à pétrole. Ces gaz sont nocifs pour la santé et causent des problèmes respiratoires chroniques. Par conséquent, le bois de chauffage et les lampes à pétrole doivent être remplacés par des sources lumineuses

efficaces comme les diodes électroluminescentes (LED). L'éclairage à LED combiné aux panneaux solaires peut offrir une solution pour fournir des systèmes d'éclairage propres et adéquats à 1,4 milliard de personnes en Asie, en Afrique et en Amérique latine. Actuellement, il existe de nombreux projets en cours dans ces régions combinant LED et panneaux solaires. Ces projets sont généralement menés par des organisations non gouvernementales (ONG) internationales ou locales.

L'éclairage LED pour les pays en développement a été introduit pour la première fois en 2000 par la fondation Light Up The World (LUTW). Le premier pays en développement à bénéficier de ce service a été le Népal. Depuis 2000, la fondation LUTW a illuminé avec des LED les maisons d'environ 40000 personnes.

En Algérie, le taux d'électrification selon les chiffres avancés par la Sonelgaz régulièrement est très élevé (98%) [17], la disponibilité de l'électricité est en principe réelle à travers tout le pays, mais toujours est-il qu'il subsiste encore des zones non desservies par le réseau électrique. Par ailleurs, la consommation électrique, de manière générale, est en hausse continue d'année en année. Sa réduction est une priorité. Une des niches d'économie est l'éclairage public qui est devenu un véritable casse-tête pour les communes car il grève une partie non négligeable de leur budget. Les autorités publiques exhortent chaque année les Walis et les maires à faire des efforts pour diminuer leurs dépenses d'énergie surtout en prenant des mesures favorisant les économies d'énergie et en particulier installer un éclairage public à LED et utilisant le solaire photovoltaïque.

## **1.6 Contexte du Projet de Fin d'Etudes**

En 2018, l'éclairage public en Algérie représentait 56% de la consommation globale d'électricité [4]. Les pouvoirs publics ont depuis tiré la sonnette d'alarme afin que des mesures énergétiques soient prises pour réduire cette consommation. Afin de s'inscrire dans cet effort national, l'UDES a décidé d'apporter sa contribution en expérimentant une solution économique et durable pour l'éclairage périphérique de l'unité et d'en évaluer sa viabilité et son efficacité.

L'Unité de Développement des Energies Renouvelables (UDES), qui a pour mission de développer des équipements et des solutions utilisant les Energies Renouvelables, a concernant l'aspect éclairage, doté le site de l'UDES à Bou Ismaïl d'un éclairage périphérique qui, dans un premier temps, était à base de lampes CFL alimenté par le réseau conventionnel,

qui a ensuite été modifié en substituant les lampes CFL par des lampes LED et en intégrant une alimentation solaire photovoltaïque avec stockage d'énergie.

Pour être en phase avec la transition énergétique, il nous a été proposé dans le cadre du PFE d'effectuer le dimensionnement d'un lampadaire à LED alimenté par énergie solaire photovoltaïque destiné à l'éclairage périphérique du site de l'UDES. Pour ce faire nous utiliserons une méthode analytique et le logiciel PVSYST pour aboutir à une configuration optimale du lampadaire qui permette de satisfaire les besoins en éclairage quelque soient les conditions considérées. Nous aurons recours au logiciel Dialux pour s'assurer de la conformité de l'éclairage obtenu par rapport aux normes requises dans ce domaine. Des mesures (illuminance, durée d'autonomie, ...) viendront valider les simulations. Ce lampadaire 'optimal' sera utilisé pour déterminer le nombre de lampadaires à mettre en place pour réaliser un éclairage périphérique efficace 'écologique' aux normes. Enfin, une étude sera conduite pour montrer, quel est, d'une part, l'apport des différentes modifications introduites sur l'éclairage périphérique existant pour améliorer son efficacité notamment pour éliminer les zones d'ombre et réduire la consommation d'électricité et, d'autre part, quel sera le coût engendré par ces modifications.

## **1.7 Conclusion**

Après avoir décrit le contexte énergétique dans le monde et en Algérie, et précisé les priorités ainsi que les mesures à adopter pour améliorer la situation notamment en diversifiant les sources d'énergie et en réduisant la consommation, nous nous sommes focalisés sur le domaine de l'éclairage.

Un bref historique nous a permis de présenter l'évolution de l'éclairage à travers le développement des lampes. Nous nous sommes plus appesantis sur les lampes LED car constituant la technologie de l'heure en matière d'éclairage en mettant en relief ses multiples avantages. Nous terminons le chapitre par la présentation de l'objet de notre PFE tout en affichant les objectifs qui nous ont été fixés.

# **CHAPITRE II**

## **Dimensionnement du lampadaire solaire pour le site de l'UDES**

# **Chapitre II – Dimensionnement du lampadaire solaire pour le site de l’UDES.**

## **2.1 Introduction**

Dans ce chapitre nous exposerons la démarche que nous avons adoptée pour déterminer la configuration optimale du lampadaire solaire destiné au site de l’UDES à Bou Ismail. Pour ce faire, une méthode analytique et un logiciel de calcul PVSYST sont utilisés pour effectuer le dimensionnement du lampadaire. Les résultats obtenus par ces deux moyens seront confrontés. Au terme de ce chapitre, une configuration optimale du lampadaire à LED solaire sera proposée.

## **2.2 Eléments à considérer pour le dimensionnement**

Il s’agit, dans le cadre de la présente étude, de déterminer la configuration optimale de l’éclairage périphérique pour l’Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES) à Bou Ismaïl en utilisant des lampadaires solaires à LED pour une autonomie de trois jours.

Afin de déterminer la configuration du lampadaire solaire, il est nécessaire d’effectuer son dimensionnement. Pour ce faire, un certain nombre de paramètres doivent d’abord être déterminés ou fixés, à savoir :

- L’irradiation solaire et la température prévalant au niveau du site,
- La consommation énergétique pour l’application considérée,
- Le nombre de jours d’autonomie durant lesquels l’installation photovoltaïque à elle seule doit pouvoir satisfaire les besoins électriques de l’éclairage périphérique du site.

L’éclairage périphérique objet de cette étude est implanté sur le site de l’UDES situé à Bou Ismaïl à environ une quarantaine de kilomètres à l’Ouest d’Alger, Latitude :  $36^{\circ}38'33''$  Nord, Longitude :  $2^{\circ}41'24''$  Est et une altitude de quelques mètres environ au-dessus du niveau de la mer.

### **2.2.1 Irradiation solaire**

L’irradiation solaire est une des données importantes pour le dimensionnement. Plusieurs sources peuvent être utilisées pour les obtenir. Nous citons quelques-unes dans ce qui suit :

Le moyen le plus courant pour estimer le rayonnement solaire arrivant à la surface de la terre est l'utilisation des données satellitaires. La plupart du temps, ces méthodes utilisent des données de satellites météorologiques géostationnaires [21]. Parmi les avantages d'avoir recours à ces données nous citerons :

- La disponibilité des données du rayonnement solaire dans toute la zone couverte par les images satellites, par exemple, les satellites METEOSAT couvrent l'Afrique, l'Europe et la majeure partie de l'Asie avec une résolution d'image de quelques kilomètres [21]
- Habituellement de longues séries chronologiques de données sont disponibles, couvrant jusqu'à 30 ans ou plus.

Par contre, l'inconvénient majeur de l'utilisation des données satellitaires réside dans le fait que le rayonnement solaire au niveau du sol doit être calculé à l'aide d'un certain nombre d'algorithmes mathématiques assez compliqués qui utilisent non seulement des données satellites mais aussi des données sur la vapeur d'eau atmosphérique, les aérosols (poussières, particules) et l'ozone. Certaines conditions peuvent entraîner une perte de précision des calculs, par exemple, la neige qui pourrait être confondue avec des nuages, les tempêtes de poussière qui peuvent être difficiles à détecter sur les images satellites, etc. [21].

Parmi les logiciels les plus couramment utilisés pour évaluer le rayonnement solaire au sol, nous avons eu recours à deux d'entre eux à savoir Meteonorm et PVgis que nous présentons dans ce qui suit.

### **Meteonorm**

C'est un logiciel qui fournit des données météorologiques pour les applications solaires et énergétiques pour la conception d'un système photovoltaïque destiné à être installé à n'importe quel endroit dans le monde [22]. Pour de nombreuses régions, les données mesurées ne peuvent être appliquées, que dans un rayon situé au plus à 50 km des stations météorologiques. Pour des sites situés entre les stations, il est souvent nécessaire d'interpoler les paramètres. Ce logiciel s'adresse aux ingénieurs, architectes et toute personne intéressée par l'énergie solaire et la climatologie.

### **PVgis**

PVgis est un calculateur d'énergie solaire photovoltaïque en ligne gratuit pour les systèmes photovoltaïques autonomes ou connectés au réseau situé en Europe, en Afrique, en Amérique ou en Asie [23]. Les données sont collectées de la base de données HelioClim-1, représentant

la moyenne de l'irradiation solaire captée par le satellite METOSAT pendant 20 ans (une image / heure) (période de 1985-2004).

Il est à remarquer que l'estimation du rayonnement à partir de données satellitaires engendre une augmentation significative de l'incertitude ce qui conduit à des calculs ou bien à une étude plus ou moins précise du gisement solaire, [23] compte tenu du fait que l'estimation qui effectuée à l'aide d'algorithmes et de méthodes de calculs bien définie mais tributaires des conditions environnementales très variables au cours du temps.

### Base de données Mesurées à l'UDES

Il va s'en dire que pour effectuer un bon dimensionnement rien ne vaut les mesures de d'irradiation (G) et de température (T) effectuées au niveau du site où l'installation sera implantée pour peu que l'on dispose de moyens de mesures précis, bien entretenus et régulièrement étalonnés. Par ailleurs, le relevé des mesures doit être effectué à intervalle régulier, au moins toutes les heures. Pour que les mesures soient plus crédibles et pour avoir une meilleure précision, il est recommandé qu'elles soient disponibles, si possible, pour une longue période (10 ans et plus).

Concernant le site de l'UDES, l'Unité dispose d'une station radiométrique et météorologique. Les mesures d'irradiation  $G(W/m^2)$  sont effectuées par le biais de pyranomètres pour le rayonnement global horizontal et pour le rayonnement global incliné, tandis que le rayonnement diffus est mesuré par un dispositif centré sur la thermopile du pyranomètre et parallèle au plan équatorial, occulte le pyranomètre du rayonnement solaire directe pour permettre la mesure du diffus. La température ambiante quant à elle est mesurée grâce à un thermomètre à résistance PT100.



Figure 2.1- Vue de la station radiométrique et météorologique de l'UDES

Dans ce qui suit nous présentons, à titre de comparaison, les valeurs du rayonnement global horizontal et global incliné à la latitude du site obtenus respectivement avec Meteonorm, PVgis et les mesures UDES pour le site de l'UDES à Bou Ismaïl, (Cf. Tableau 1).

Tableau 2.1– Irradiation globale sur le plan horizontal et incliné obtenues pour l'année 2016

Mois	Meteonorm		PVgis		Mesures UDES	
	Global Horizontal (KWh/m <sup>2</sup> )	Global incliné à 36,64° (KWh/m <sup>2</sup> )	Global horizontal (KWh/m <sup>2</sup> )	Global incliné 36,64° (KWh/m <sup>2</sup> )	Global horizontal (KWh/m <sup>2</sup> )	Global incline 36,64° (KWh/m <sup>2</sup> )
Jan	80	134	83,45	138,33	92,29	160,15
Feb	89	126	87,06	119,92	111,79	160,73
Mar	140	169	146,77	179,07	179,28	211,77
Apr	165	174	168,46	175,68	207,56	197,2
May	197	187	204,17	191,76	250,52	217,53
Jun	220	199	217,74	193,74	281,61	217,64
Jul	236	218	229,67	210,82	275,38	224,22
Aug	201	205	217,02	218,87	257,47	237,85
Sep	156	181	164,27	190,35	198,1	224,16
Oct	125	170	121,97	164,34	150,77	207,21
Nov	86	137	71,27	107,14	88,84	144,46
Dec	71	125	74,42	127,76	85,78	161,22

A la lecture des données consignées dans le tableau 2.1 nous constatons qu'il y a des écarts entre les valeurs données par les différentes sources de données pour le rayonnement global horizontal ou le rayonnement global incliné. Les données fournies par Meteonorm et PVgis sont très proches mais plus faibles que celles mesurées à l'UDES (cf. Figure 2.2 a et 2.2 b).

De manière générale et comme on s'y attendait, les valeurs du rayonnement global incliné sont plus élevées que celles du rayonnement global horizontal durant toute l'année pour toutes les sources de données utilisées mis à part pour la période Mai à juillet (Source Meteonorm,

PVgis), Juillet à Août pour les données mesurées UDES. Pour ces périodes la hauteur du soleil est de 23°.

Dans le cas des valeurs du rayonnement mesurées, sur l'année, l'inclinaison apporte un gain de rayonnement cumulé de 184.72KWh/m<sup>2</sup> par rapport à la position horizontale d'où l'intérêt d'adopter cette configuration pour la disposition du champ photovoltaïque.

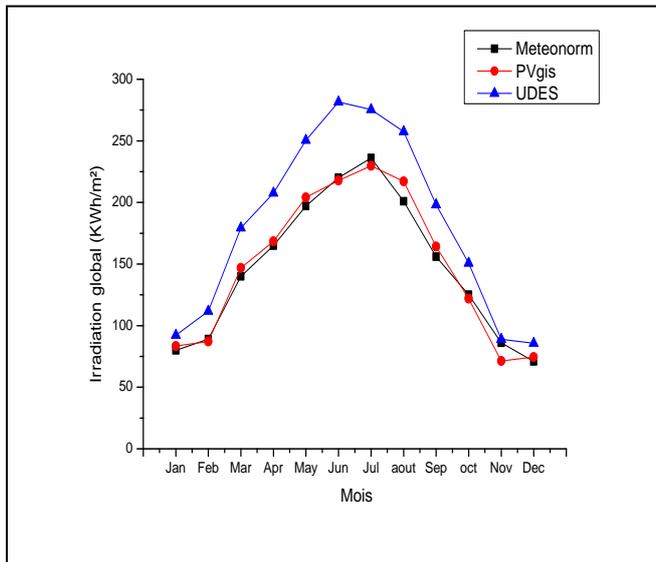


Figure 2.2.a- Irradiation globale horizontale pour le site de l'UDES durant l'année 2016 obtenues à partir de Meteonorm, PVgis et mesures UDES

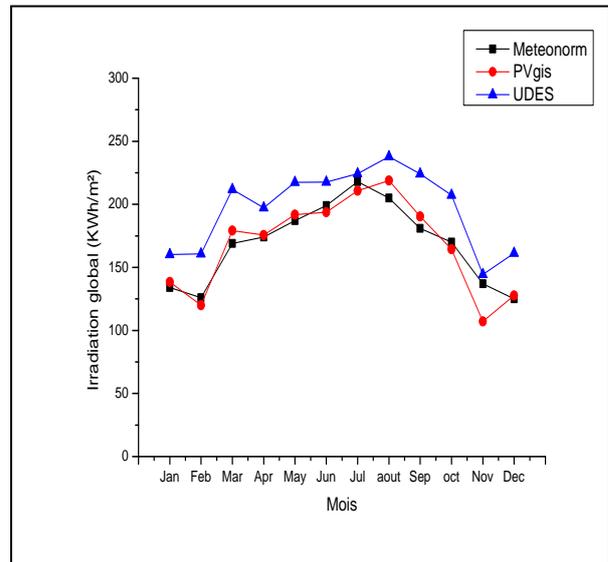


Figure 2.2.b- Irradiation globale inclinée pour le site de l'UDES durant l'année 2016 obtenues à partir de Meteonorm, PVgis et mesures UDES

Les figures 2.2 a et 2.2 b montrent que les deux graphes tracés à partir des valeurs issues de (Meteonorm et PVgis) sont plus ou moins identiques et ont la même allure. Pour le graphe obtenu à partir des données mesurées par la station météorologique de l'UDES, l'allure est semblable à celle des graphes précédents à la seule différence que les valeurs mesurées pour un mois donné sont plus élevées que celles issues de Meteonorm et PVgis.

Afin de tirer profit le mieux possible de l'irradiation solaire reçue par le module photovoltaïque il faut toujours exposer ce dernier face Nord pour le cas de l'hémisphère Sud et face Sud si l'on est dans l'hémisphère Nord (ce qui est précisément le cas du site de l'UDES). Par ailleurs, il faut toujours faire en sorte que les rayons du soleil soient perpendiculaires au module. Dans le cas idéal, cela revient à équiper le module d'un système de suivi ou 'Tracking' mais cela augmenterait le coût d'investissement et aussi sa maintenance pour un gain de production d'électricité pas très intéressant dans le cas des

modules photovoltaïques courants c.à.d. sans concentration. Une autre solution utilisée parfois c'est celle qui consiste à adopter une inclinaison du module en hiver et une autre en été compte tenu de la course du soleil qui est différente selon les saisons, mais tous les professionnels du photovoltaïque recommandent pour des questions de commodités pratiques et de coût d'utiliser un angle d'inclinaison unique pour toute l'année et qui est celui de la latitude du site d'implantation de l'installation qui dans le cas de Bou Ismaïl est de 36,64°N.

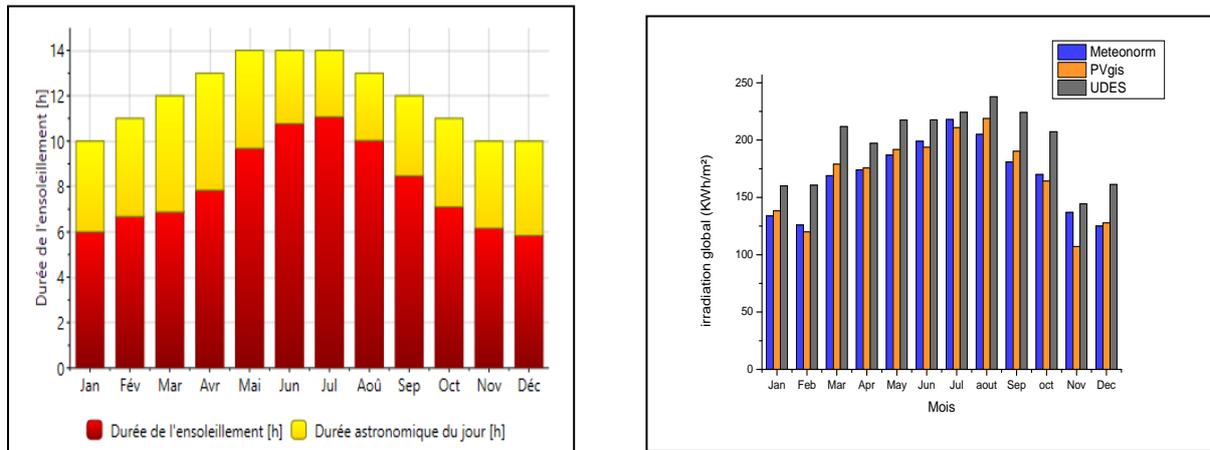


Figure 2.3 – (a) Durée d'ensoleillement sur une année (source Meteonom), (b) Rayonnement global incliné reçu sur site de l'UDES sur une année (Sources Meteonom, PVGIS, UDES).

Pour avoir une idée sur la quantité d'irradiation reçue par le site de l'UDES durant toute l'année, nous avons représenté sur la figure 2.3 (a) la durée d'ensoleillement pour chaque mois de l'année 2016 (Source Meteonom) et sur la figure 2.3 (b) le rayonnement Global reçu sur un plan incliné à la latitude du site de l'UDES durant l'année 2016 (données obtenues avec les logiciels et les mesures UDES). A partir de ces données nous pouvons déterminer le mois le plus favorable et le mois le plus défavorable de l'année en termes d'irradiation reçue. En se basant sur les données mesurées UDES le mois le plus favorable est le mois d'Août et le mois le plus défavorable est le mois de Novembre.

## 2.2.2 Evaluation de la consommation électrique du lampadaire

Le deuxième élément important à considérer pour le dimensionnement est la consommation électrique du lampadaire. Habituellement il est recommandé pour le dimensionnement d'un système photovoltaïque de considérer le cas plus défavorable. Pour notre cas en matière de durée d'ensoleillement (cf. figure 2.3) ce sont les mois de Novembre, Décembre et Janvier qui présentent une durée d'ensoleillement la plus faible qui est de 10h

pour une journée et donc il va falloir solliciter l'éclairage pour une durée de 14h environ pour ces mois. En considérant, par exemple, les données mesurées à l'UDES, il apparaît que c'est le mois de novembre qui est le plus défavorable car c'est le mois pour lequel nous recevons une irradiation la moins élevée de toute l'année (144,46kWh/m<sup>2</sup>), c'est donc lui, pour lequel il va falloir satisfaire un éclairage pour environ quatorze heures pour une irradiation reçue qui est la plus faible comparativement aux autres mois.

### **Le calcul de la consommation**

Pour effectuer le calcul de la consommation d'énergie électrique du lampadaire nous considérons qu'une lampe LED de 25W est suffisante pour avoir un éclairage conforme aux normes. Par ailleurs, en se référant au graphe (a) de la figure 2.3, nous retiendrons que la durée d'éclairage la plus longue sera de 14 heures et la plus courte de 10 heures. Pour calculer le besoin journalier en énergie pour le lampadaire nous utilisons la formule suivante :

$$E = P * \Delta t \quad (2.1)$$

Le besoin journalier en énergie E (Wh) du lampadaire est donc égal au produit de la puissance P(W) consommée par l'application, par le temps  $\Delta t$ (h) d'utilisation par jour c.à.d. 14h pour la période la plus longue et 11h pour la période la plus courte. Pour le calcul du besoin énergétique journalier nous avons choisi les journées typiques connues pour les mois considérés et qui sont respectivement le 14 Novembre et le 16 Août pour les données mesurées de l'UDES et les données PVgis et le 10 Décembre et le 17 Juillet pour les données Meteonorm. Les besoins quotidiens en énergie pour les deux journées considérées calculés à partir des données issues des trois sources sont consignés dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2- Evaluation de la consommation du lampadaire en se basant sur les données issues des trois sources (Meteonorm, PVgis, données mesurées UDES).

<b>Données mesurées UDES</b>					
Jour	Nombre de lampes	Puissance (W)	Durée du jour (h)	Nb d'heures de fonctionnement/jour	Energie Consommée Wh/jour
14 Novembre	1	25	10	14	350
16 Août	1	25	13	11	275

Données PVgis					
Jour	Nombre de lampes	Puissance (W)	Durée du jour (h)	Nb d'heures de fonctionnement/jour	Energie Consommée Wh/jour
14 Novembre	1	25	9	15	375
16 Août	1	25	13	11	275

Données Meteonorm					
Jour	Nombre de lampes	Puissance (W)	Durée du jour (h)	Nb d'heures de fonctionnement/jour	Energie Consommée Wh/jour
10 Décembre	1	25	10	14	420
17 Juillet	1	25	15	9	270

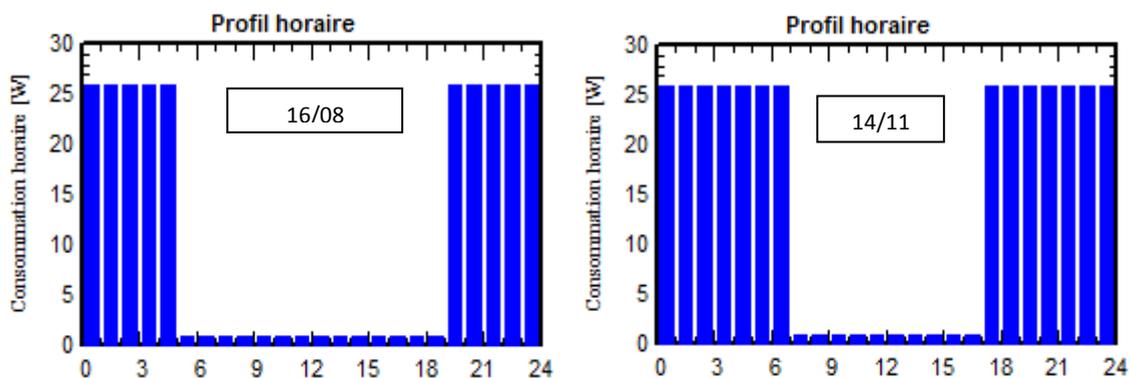


Figure 2.4 : Profil de charge du lampadaire solaire pour le jour le plus défavorable et le plus favorable de l'année et qui sont respectivement (le 14 Novembre et le 16 Août), données UDES.

Cette consommation est un paramètre important lors de la détermination de la taille du champ photovoltaïque et de la capacité de la batterie.

## 2.3 Dimensionnement du kit d'éclairage solaire



Figure 2.5- Vue générale d'un lampadaire solaire

Le kit solaire que nous concevons sera constitué, comme le montre la figure 2.4, d'un poteau sur lequel sera installé à son extrémité supérieure un module photovoltaïque qui sera orienté plein Sud. Il sera muni d'un luminaire à LED, d'une armoire électrique sécurisée qui sera fixée à son extrémité inférieure à quelques dizaines de centimètres du sol (60 cm), elle comprendra une batterie et un régulateur qui seront protégés contre toutes agressions extérieures qui risquent de les endommager tels que pluie, vent, grêle, rayonnement solaire intense, etc, en utilisant un boîtier type IP65.

Nous procédons, dans ce qui suit, à la détermination de la configuration optimale du lampadaire solaire qui réponde au cahier des charges.

## 2.3.1 Dimensionnement par une méthode paramétrique

### 2.3.1.1 Dimensionnement du module photovoltaïque

Le dimensionnement du module ou champ photovoltaïque revient à déterminer la taille du module ou champ photovoltaïque à utiliser. Cela revient à calculer la puissance crête  $P_c$  ( $W_c$ ) du champ PV qui dépend du profil de consommation (demande d'énergie), de l'irradiation globale journalière moyenne du site ainsi que du rapport de performance ou Performance Ratio (PR) du système. La puissance crête du générateur photovoltaïque est donnée par l'expression suivante [24] :

$$P_c = \frac{DE}{PR \times Ne} \quad (2.2)$$

$DE$  : Demande énergétique par jour (Wh/j)

$PR$ : Indice de performance du système PV

$Ne$ : Nombre d'heure équivalent à un éclairage de  $1000W/m^2$ ,

Pour le cas de notre application, la demande énergétique à satisfaire est évaluée à  $350 \text{ Wh/J}$  dans le cas le plus défavorable.

Afin de calculer ce que produit un module photovoltaïque pendant une journée d'ensoleillement qui a un certain profil et une énergie solaire intégrée en  $Wh/m^2$ , on va assimiler cette énergie solaire au produit du rayonnement instantané  $1000 \text{ W/m}^2$  par un certain nombre d'heures que l'on appelle 'nombre d'heures équivalentes' (NE). Grâce à la valeur de  $1000W/m^2$  de ce rayonnement de référence, le nombre d'heures équivalentes se retrouve exactement égal à l'énergie solaire intégrée si on l'exprime en  $kWh/m^2$  /jour.

Ainsi, en considérant les données mesurées, nous obtenons pour le mois de Novembre  $Ne = 4.32h$  et pour le mois d'Août  $Ne = 7.57h$ .

Par ailleurs, la qualité d'une installation photovoltaïque est évaluée par le biais de l'indice de performance ou Performance Ratio (PR) qui est indépendant du lieu. Il est aussi souvent appelé facteur de qualité. L'indice de performance (PR) est indiqué en pourcentage et désigne le rapport entre le rendement réel et le rendement théorique de l'installation photovoltaïque [25]. Il tient compte implicitement des différentes pertes d'une installation photovoltaïques (pertes thermiques, pertes par captation, ...)

Le ratio de performance est donc un nombre compris entre 0 et 1 (ou 0 et 100%). Plus il est proche de 1 (ou de 100%), plus l'installation est performante d'un point de vue électrique.

Toute installation photovoltaïque étant unique, le ratio de performance est spécifique à chaque installation. Néanmoins, il est possible d'avoir un ordre de grandeur de la valeur du ratio de performance PR en tenant compte [26] :

- Du coefficient de température de la puissance  $K_T(P)$  qui est semblable d'un module à un autre (ordre de grandeur :  $-0.4 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ ).
- Du rendement du régulateur qui est sensiblement d'un même ordre de grandeur d'un régulateur à un autre (97%).
- De la chute de tension dans les câbles qui est limitée à 3%.
- Du rendement des batteries qui est environ de 85%
- Du rendement de l'onduleur qui est sensiblement d'un même ordre de grandeur d'un onduleur à un autre, environ 95 à 97%.
- Des autres pertes diverses qui sont semblables d'une installation à une autre (ordre de grandeur : 2 %).

En considérant un luminaire à LED de 25W, nous avons calculé la puissance crête du champ PV nécessaire pour alimenter ce luminaire pendant toute la nuit aussi bien pour le cas le plus défavorable que pour le cas favorable (le cas le plus favorable a été étudié uniquement à titre de comparaison) en choisissant les journées typiques des mois favorables et défavorables sur la base des données issues des trois sources de données (Meteonorm, PVgis, mesures UDES). Nous avons consigné les résultats obtenus dans le tableau suivant :

Tableau 2.3- Récapitulatif des calculs du dimensionnement de la puissance du champ PV

<b>Sources de données</b>	<b>Demande Energétique Wh/j</b>	<b>Irradiation solaire KW/m<sup>2</sup>.j</b>	<b>Ratio de performance PR</b>	<b>Puissance crête Pc (Wc) du module à utiliser</b>
<b>Mesures UDES</b>	350 (14 Novembre)	4.32	0.6	135.03
			0.65	124.64
			0.7	115.74
	270 (16 Août)	7.57	0.6	59.44
			0.65	54.87
			0.7	50.95
<b>Meteonorm</b>	420 (10 Décembre)	4.16	0.6	168.26
			0.65	155.32
			0.7	144.23
	270 (17 Juillet)	7.26	0.6	61.98
			0.65	57.21
			0.7	53.12
<b>PVgis</b>	375 (14 Novembre)	3.57	0.6	175.07
			0.65	161.6
			0.7	150.06
	275 (16 Août)	7.29	0.6	62.87
			0.65	58.03
			0.7	53.88

Si l'on compare les résultats du dimensionnement concernant la puissance du module photovoltaïque à utiliser pour le kit solaire, nous nous rendons compte que pour un PR=0.7, nous obtenons une puissance crête de 115.74Wc, 144.23Wc et 150.06Wc respectivement en utilisant les données météorologiques et radiométriques mesurées UDES, de Meteonorm et de PVgis. Nous privilégierons, dans notre cas, le résultat de dimensionnement issu de l'utilisation des données météorologiques obtenues par la station de mesure de l'UDES que l'on considère comme plus fiables.

### 2.3.1.2 Dimensionnement de la batterie

La batterie est un élément important pour le lampadaire solaire car c'est d'elle que dépendra le fonctionnement de l'éclairage durant la nuit. Pour calculer la capacité de la batterie nécessaire pour notre application, nous utilisons l'équation suivante [25]

$$C_u = \frac{E_{nec\u00e9ssaire} \times N_j}{V_b \times D_{mb}} \quad (2.3)$$

$E_{nec\u00e9ssaire}$  : Consommation journalière requise en Ah par jour.

$N_j$  : Nombre de jours d'autonomie.

$V_b$  : Tension nominale de la batterie

$D_{mb}$  : Profondeur de décharge de la batterie.

Le nombre de jours d'autonomie et la tension nominale de la batterie étant fixées respectivement à trois jours et 12V, nous faisons varier la profondeur de décharge pour voir son incidence sur la capacité de la batterie et ce pour les deux journées considérées.

Tableau 2.4 – Récapitulatif des calculs de la capacité de batterie nécessaire pour le luminaire pour une autonomie de 3 jours, pour une tension de batterie de 12V pour les journées favorables et défavorables pour les trois sources de données

<b>Sources de données</b>	<b>Demande Energétique Wh/j</b>	<b>Profondeur de la décharge de la batterie (%)</b>	<b>Capacité de la batterie Cu (Ah)</b>
<b>Mesures UDES</b>	350 (14 Novembre)	60	145.83
		70	125
		80	109.37
	270 (16 Août)	60	112.5
		70	95.43
		80	84.37
<b>Meteonorm</b>	420 (10 Décembre)	60	175
		70	150
		80	131.25
	270 (17 Juillet)	60	112.5
		70	95.43
		80	84.37
<b>PVgis</b>	375 (14 Novembre)	60	156.25
		70	133.92
		80	117.18
	275 (16 Août)	60	114.58
		70	98.21
		80	85.93

Les résultats du dimensionnement de la batterie consignés dans le tableau 2.4 montrent que pour une décharge de la batterie allant jusqu'à 80%, nous obtenons une capacité de batterie de 109.37Ah, 131.25Ah et 117.18Ah respectivement pour les données UDES, Meteonorm et PVgis. Nous retiendrons la capacité de 109.37Ah issue de l'utilisation des données mesurées de l'UDES qui sont les plus réalistes à notre point de vue.

### 2.3.2 Dimensionnement par le logiciel PVSYSY

La deuxième méthode utilisée pour effectuer le dimensionnement du module et de la batterie est celle où nous avons eu recours au logiciel PVSYSY. Ce logiciel a été conçu à l'Ecole Polytechnique de Genève par l'équipe de Mr Mermoud, Mr Roecker, Mr bonvin. Son rôle est d'étudier et simuler toute sorte de système photovoltaïques il propose des fonctionnalités très poussées telle que son application 3D qui permet de simuler la course du soleil et les ombres portées afin d'optimiser l'implantation des panneaux

Après avoir introduit les données telles que la localisation géographique du site, l'année, la durée de l'autonomie, les résultats affichés par PVSYSY sont indiqués dans la figure 2.6

PVSYSY V6.81		19/08/20		Page 1/1	
<b>Pré-dimensionnement système isolé</b>					
<b>Site géographique</b>		<b>UDES</b>		<b>Pays Algeria</b>	
<b>Situation</b>		Latitude 36.66° N		Longitude 2.72° E	
Temps défini comme		Temps légal Fus. horaire TU+1		Altitude 21 m	
<b>Orientation plan capteurs</b>		Inclinaison 37°		Azimut 0°	
<b>System pre-sizing evaluation</b>					
Average use of energy		Daily 0.4 kWh/day		Yearly 137 kWh	
Autonomy		3.0 days			
Loss-of-Load		Time fraction 5.0 %		Missing energy 10 kWh	
Battery system		Voltage 12 V		Capacity 110 Ah	
PV array		Nominal power 94 Wc		Nominal Current 6 A	
Economic gross evaluation		Investment 1396 EUR		Energy price 0.95 EUR/kWh	

Figure 2.6 : Pré-dimensionnement du lampadaire solaire par PVSYSY

Nous remarquons que la puissance crête (94Wc) obtenue par le logiciel PVSYSY est inférieure à celle obtenue par la méthode paramétrique (115.74Wc), cela incombe aux données utilisées par PVSYSY qui ne sont pas aussi précises que celles mesurées à l'UDES.

### 2.3.3 Choix du régulateur de charge/décharge

Dans un système photovoltaïque autonome, le régulateur de charge a une fonction primordiale. Son rôle est de réguler l'énergie accumulée dans la batterie pour éviter des charges ou des décharges trop importantes. Une décharge trop profonde provoque une sulfatation des électrodes. Ainsi, dès que le régulateur détecte la tension d'arrêt préalablement fixée, il déconnecte la batterie ce qui permet d'éviter la décharge profonde et les conséquences néfastes sur la durée de vie de la batterie. C'est ce qu'on appelle le délestage. Il s'agit d'une procédure de sécurité permettant de protéger la batterie. Il est donc essentiel de choisir un bon régulateur car ce composant influence grandement la durée de vie du système, [27].

Le choix d'un régulateur se fait en tenant compte des éléments suivants [28] :

- **La tension entre le module ou le champ PV et la batterie** : le régulateur doit pouvoir accepter la plage de tensions suivantes (12V, 24V, 48V).
- **L'intensité maximale du régulateur** : elle doit être supérieure à l'intensité de court-circuit du module ou du champ PV auquel il est relié. Il est recommandé d'observer une marge de sécurité de 10 à 20 %.
- **Précision des seuils** : Les seuils de coupure et de décalage du régulateur doivent rester stables à plus ou moins 2% de leur valeur nominale durant la vie du système
- **Facilité de montage** : Les bornes de connexion doivent être facilement accessibles et permettre un câblage avec des sections suffisantes.
- **Garantie** : Les régulateurs sont garantis pour un an en général.

### 2.3.4 Dimensionnement du câblage

Toute installation solaire photovoltaïque comporte des câbles permettant le passage de l'électricité du module ou du champ PV à la batterie puis aux charges (les lampes).

La section du câble qui relie le module ou champ PV au régulateur est différente par rapport à la section du câble qui relie le régulateur et la batterie et celle de la charge, par ce qu'il faut prendre en considération :

- la longueur du câble (Pour déterminer la longueur totale et le type de câble requis, il faut évaluer chaque parcours de câble entre toutes les composantes de l'installation).
- le courant qui passe dans le câble.

### 2.3.4.1 Calcul de la chute de tension dans le câble électrique

Pour conserver une efficacité optimale de l'installation, il faut limiter la chute de tension dans les câbles électriques de l'installation solaire. Pour ce faire, il suffit d'augmenter la section du câble électrique. Nous pouvons ainsi calculer la chute de tension ' $\varepsilon$ ' tel que [29] :

$$\varepsilon = \frac{\rho \times L \times I \times 2}{S} \quad (2.4)$$

Avec :

$\varepsilon$  : chute de tension dans les câbles (V)

$S$ =section de câble (mm<sup>2</sup>)

$L$ =longueur de câble(m)

$I$ =courant max utilisé(A)

$\rho$ = résistivité du cuivre ( $\Omega^2/m$ )

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

#### Remarques :

Pour que la transmission d'énergie soit efficace, il faut que les câbles et appareillages soient bien adaptés en termes de section et caractéristiques [29] :

-Les installations photovoltaïques doivent utiliser au moins du 2.5 mm<sup>2</sup> de section de câble.

-Les câbles en tresse souple à deux brins de 2.5 mm<sup>2</sup>, sont idéaux pour des nombreux circuits de distribution en 12V.

-Les installations AC ou DC de plus forte puissance utilisent des câbles à trois fils comportant un fil de terre.

### 2.3.4.2 Exemple de calcul de la section de câble

A titre d'exemple nous traitons dans ce qui suit le dimensionnement du câblage en utilisant des modules de type ENIE SOLAR-100-36-M ( $V_{co}=22.7V$ ,  $I_{sc}=6.8A$ ). Nous supposons que les longueurs de câbles à utiliser sont celles indiquées dans le tableau suivant.

Tableau 2.5- Exemple de longueurs de câbles utilisées pour un lampadaire

Partie	Module PV-régulateur	Lampe LED-régulateur	Régulateur-batteries
Longueur du câble	10m	9m	1m

Le calcul de la section de câble nécessaire se fait selon la formule suivante (obtenue à partir de la relation précédente (2.4)) [29] :

$$S = \frac{\rho \times L \times I \times 2}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

Pour une chute de tension au maximum de 3% (selon la norme NF C 15-100) [29] :

$$\varepsilon = V \times 3\% \quad (2.6)$$

Les sections de câble à utiliser seront donc :

Tableau 2.6 -Les sections des câbles calculées pour un lampadaire

Partie	Module PV-régulateur	Régulateur-lampe LED	Régulateur-batteries
Longueur du câble (m)	10	9	1
Section de câble (mm <sup>2</sup> )	2.89	1.76	1.88
Section de câble normalisée (mm <sup>2</sup> )	4	2.5	2.5

## 2.4 Choix des éléments constitutifs du kit d'éclairage solaire

Le choix des éléments constitutifs du lampadaire d'éclairage solaire se font sur la base des résultats du dimensionnement et ensuite selon la disponibilité des équipements sur le marché algérien. Il faut aussi tenir compte des aspects de fonctionnalité et fiabilité sans pour autant négliger l'esthétique, l'encombrement et le coût. Par ailleurs, nous privilégierons, lorsque cela est possible, les équipements fabriqués localement pour peu qu'ils répondent aux normes universelles.

### 2.4.1 Module Photovoltaïque

Dans le tableau suivant, nous présentons les caractéristiques de quelque modules solaires qui existent sur le marché national :

Tableau 2.7- Différents types de modules photovoltaïques disponibles sur le marché national

Modèle	ENIE	CONDOR			AURES
	ENIESOLAR-100-36-M	CEM90M-36	CEM100M-36	CEM145P-36	AS R04-270P
Puissance (W <sub>c</sub> )	100	90	100	145	270
Type de cellule	Monocristallin			Polycristallin	
Tension circuit ouvert V <sub>co</sub>	22.7	22.3	22.3	22.6	37.72
Courant court-circuit I <sub>sc</sub>	6.8	5.84	5.84	8.75	9.04
Dimensions (mm)	1196 x546 x35	1200x553x35	1200x553x35	1482x674x45	1675x996x40
Poids (Kg)	9	8	8	12	25
Prix DA	12 400,00	10.003,50	11.115,00	15.268,50	22 015,00

Compte tenu de la puissance du module à utiliser pour le lampadaire qui est de 115Wc, et de la disponibilité sur le marché, le modèle qui est le plus approprié en termes de puissance et de coût est celui proposé par CONDOR CEM145P-36.

#### 2.4.2 Batterie

De même que pour le module PV, la batterie sera choisie pour une capacité proche de celle obtenue par le calcul de dimensionnement et pour les mêmes considérations de disponibilité et de coût.

Tableau 2.8- Divers modèles de batteries disponibles sur le marché et pouvant répondre au résultat du calcul de dimensionnement

Modèle	SOLAR TECHNOLOGY 100Ah	CONDOR CGB 12-100Ah	DIMEL AGM 120Ah	DIMEL AGM 150Ah
Tension nominal (V)	12			
Capacité nominal (A)	100		120	150
Durée de vie (ans)	5			
Dimensions	304 x 175 x 220	304 x 175 x 220	406 x 173 x 237	482 x 171 x 240
Poids $\pm 3\%$ (Kg)	27.7	25.2	35.4	44.6
Garantie (ans)	1			
Prix (DA)	24900.00	16 614.00	31 500.00	39 585.00

La capacité de la batterie nécessaire pour notre application est de 109.37Ah. La batterie solaire disponible sur le marché algérien qui satisfait les exigences techniques et qui est la plus économique du point de vue coût est le modèle AGM 120Ah du fournisseur DIMEL.

### 2.4.3 Régulateur

Comme Il n'y a pas de producteurs algériens pour les régulateurs, seuls sont disponibles sur le marché des produits importés

Tableau 2.9- Caractéristiques des régulateurs pouvant être utilisés pour le lampadaire solaire

Modèle	STEACA SOLARIX PRS 2020	MORNINGSTAR Sunlight SL-10 10A 12V	VICTRON Blue Solarlight 10A	MORNINGSTAR Sunlight SL-20 20A 12V
Tension du système (V)	12			
Tension du module PV $V_{co}$ (V)	47	30	28 à 55	30
Courant du module PV (A)	20	10		20
Protection de la batterie contre les décharges profondes et surcharge	$11,2 \geq 12,7$	$11,8 \geq 12,8$		
Degré de protection	IP31	IP 30	IP20	IP30
Dimensions (L*l*h) (mm)	187 x 96 x 45	168 x 55 x 34	70 x 133 x 33,5	168 x 55 x 34
Poids (Kg)	0.345	0.26	0.13	0.26
Prix (DA)	7500.00	7500.00	4434.00	8500.00

D'après le tableau, le modèle « STEACA SOLARIX PRS 2020 » est le mieux adapté pour notre lampadaire vue son degré de protection et sa disponibilité sur le marché national.



Figure 2.7 : STEACA SOLARIX PRS 2020

## 2.4.4 Lampes

Concernant le luminaire du lampadaire, le choix s'est porté naturellement vers un luminaire à LED car pour une intensité lumineuse donnée, les LED consomment moins d'énergie, présentent une meilleure durée de vie de fonctionnement et sont moins polluantes.

Tableau 2.10- Luminaires à LED disponibles sur le marché national

Modèle	Lightingboct	DIMEL		
	LB-RS530-W025	ST-30	TH-30	SYD-30
Hauteur	3-6			
Puissance (W)	25	30		
Quantité de LED	1	30	16	
Tension (V) DC	12	9-30		
Durée de vie (h)	50.000			
Diamètre d'éclairage (m)	10-20	15-25		
Garantie (an)	1			
Prix (DA)	10 000 ,00	11.000,00	7. 350,00	12.500,00

Les caractéristiques des luminaires présentés dans le tableau ci-dessus sont presque les mêmes mis à part le nombre de LED qui composent le luminaire. Donc notre choix va se baser sur la disponibilité du produit au niveau national et son prix. C'est ainsi que l'on a opté pour le (LB-RS530-W025), disponible au niveau de l'UDES.



Figure 2.8: luminaire LB-RS530-W025

## 2.5 Fiche technique du lampadaire obtenu

Au terme de ce chapitre sur le dimensionnement du lampadaire à LED, nous présentons dans ce qui suit la fiche technique du lampadaire que nous avons obtenu pour avoir un éclairage optimal pour le site de l'UDES.

Tableau 2.11- Fiche signalétique du lampadaire à LED destiné à l'éclairage périphérique de l'UDES

Items	Caractéristiques
Hauteur Mât du lampadaire (m)	04 m
Type de Luminaire	LED
Puissance du luminaire (W)	25W
Puissance lumineuse (lumens)	250lm
Batterie	
Type	Plomb Acide à gel
Capacité (Ah)	120Ah
Régulateur	STEACA SOLARIX PRS 2020
Type	Crépusculaire
Qq caractéristiques	-sélection automatique de la tension -fonction crépuscule et éclairage nocturne d'origine - affichage de l'état de charge, et les messages de dysfonctionnements
Boîtier	LCT 5005
Dimensions	400 x 600 x 200
Type de protection	IP 65

## **2.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre 2, nous avons présenté les différentes étapes nécessaires pour effectuer le dimensionnement d'un lampadaire tout en indiquant la manière de procéder pour déterminer les caractéristiques de chacun de ses constituants principalement le module PV, la batterie, le régulateur qui nous permettent de respecter les exigences du cahier des charges. Pour le choix des composants, nous nous sommes efforcés, d'une part, d'adopter des éléments répondant au dimensionnement, et d'autre part, de tenir compte de leur disponibilité sur le marché mais aussi de leur prix. Ainsi, le lampadaire qui semble satisfaire les exigences du cahier des charges serait composé d'un mât de 4m, d'un luminaire de 25W, d'un module PV de 145W, d'une batterie plomb acide à gel d'une capacité de 120Ah et d'un régulateur crépusculaire STECA SOLARIX PRS 2020.

# CHAPITRE III

## Résultats et Analyses

# Chapitre III – Résultats et Analyses

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons, d'abord, une étude comparative basée sur les mesures 'indoor' de l'éclairage au sol obtenu en utilisant une lampe CFL (33W) et une lampe LED (25W). Ces mesures serviront à identifier les lampes CFL et LED de la bibliothèque du logiciel Dialux avec lesquelles nous ferons la simulation de l'éclairage externe existant de l'UDES. Nous relèverons l'avantage de l'éclairage à LED par rapport à celui utilisant les lampes CFL tout en notant, pour les deux cas, les carences engendrées par la distribution actuelle des lampadaires de l'éclairage externe de l'UDES qui se manifeste notamment par des zones d'ombre. Enfin, nous proposerons les modifications à apporter pour améliorer l'éclairage actuel tout en évaluant leur coût.

## 3.2 Procédures de mesures et de simulation de la répartition de l'intensité lumineuse au sol des luminaires à LED et CFL

Afin d'évaluer l'efficacité de l'éclairage obtenu avec une lampe CFL ou à LED nous avons mené des mesures 'indoor' basées sur la mesure de l'éclairage au sol pour chacun de ces types de lampes. Ces mesures nous permettent aussi bien d'avoir l'étendue de la surface éclairée que l'évolution de l'intensité lumineuse en partant du centre de la tache vers l'extérieur.

### 3.2.1 Conditions opératoires et procédure de mesures

Moyens utilisés :

- ✓ Luminaire à LED (25W) du type BS-RS530-W025
- ✓ Luminaire CFL (33W) constitué de trois Lampes CFL-DC de 11W de marque phocos
- ✓ Un mât d'une hauteur de 3m.
- ✓ Un luxmètre 'Chauvin Arnoux CA 811'.



Figure 3.1-Vue d'un lampadaire et du luxmètre



Figure 3.2-Vue d'un lampadaire CFL



Figure 3.3-Vue d'un lampadaire à LED

### 3.2.2 Procédure de mesures

Nous avons relevé à l'aide d'un luxmètre la mesure de l'intensité lumineuse reçue au niveau de la tache lumineuse projetée par le luminaire sur le sol. Les mesures ont été effectuées aux points d'intersection d'une grille dessinée sur le sol et qui sont espacés de 15cm. Les mesures ont été réalisées pour un luminaire à LED du type LB-RS530-W025 et un luminaire CFL du type Phocos CL1211C-22.

### 3.2.3 Procédure de simulation

Pour simuler la tache lumineuse projetée par les luminaires sur le sol, nous avons eu recours au logiciel DIALUX qui est un logiciel de conception d'éclairage pour planifier et visualiser la lumière pour les espaces intérieurs et extérieurs tels que les bâtiments, les chambres individuelles, les parkings, l'éclairage public, ..... [30].

Une fois les mesures d'intensité lumineuse pour un luminaire effectuées, nous avons recherché dans la bibliothèque de Dialux une lampe qui donne une répartition lumineuse au sol du même ordre que celle mesurée. Cette lampe servira à faire la simulation pour l'éclairage externe de l'UDES en gardant la répartition déjà existante des lampadaires sur le site.

Nous indiquons dans le tableau 3.1 la référence des lampes de la bibliothèque du logiciel Dialux qui ont des caractéristiques lumineuses et une répartition géométrique qui s'apparente à celles des luminaires utilisés à l'UDES.

Tableau 3.1 – Types de luminaires à LED et CFL utilisés à l’UDES et ceux qui leur correspondent dans la bibliothèque de Dialux

Type de lampe	Expérimentation	Simulation
LED25W	LB-RS530-W025	PHILIPS LED BGS441
CFL 33W	Phocos CL1211C-2.2	XSP-E-2SH-L

### **3.3 Présentation des résultats de mesures indoor et de simulation de la répartition de l’intensité lumineuse au sol pour les luminaires à LED et CFL utilisés à l’UDES et de leurs équivalents sous Dialux dans le cas d’un mât de lampadaire de 3m.**

Nous présentons dans ce qui suit les intensités lumineuses simulées et mesurées reçues au sol respectivement par le luminaire à LED de 25W et le luminaire CFL de 33W.

#### **1<sup>er</sup> Cas : Luminaire à LED**

Nous présentons sur la figure 3.4 les résultats des mesures de l’intensité lumineuse et sa distribution au sol du lampadaire à LED (25W) type LED LB-RS530-W025 figure 3.4 (a) ainsi que les résultats de simulation, figure 3.4 (b), pour son équivalent (PHILIPS LED BGS441) identifié dans la bibliothèque de Dialux et ce pour une hauteur de mât de 3m pour les deux cas.

Nous remarquons que la distribution au sol peut être scindée en trois régions où l’intensité lumineuse est comprise dans les gammes suivantes :

$32 \leq \text{Zone1} \leq 78 \text{ lx}$ ,  $52 \leq \text{Zone2} \leq 106 \text{ lx}$  et  $35 \leq \text{Zone3} \leq 85 \text{ lx}$ , cf. Figure 3.4.

(a)

Zone 1_1					Zone 2_1					Zone 3_1							
50	54	55	59	57	65	69	64	58	52	63	41	39	38				
40	44	51	59	57	64	66	67	72	71	61	59	57	54	48	44	44	43
43	45	53	61	61	68	70	73	79	77	71	65	61	58	54	50	50	48
44	49	55	65	66	72	75	79	85	83	77	73	69	63	58	55	53	51
47	51	58	67	69	80	81	86	90	91	85	80	73	70	66	58	56	52
50	55	62	71	76	85	90	97	98	97	96	88	78	72	70	61	57	55
51	57	64	68	78	89	99	103	101	101	101	94	84	76	71	65	59	56
52	58	63	66	78	91	101	106	103	103	105	98	85	78	73	64	61	57
Zone 1_2					Zone 2_2					Zone 3_2							
50	57	62	65		90	100	105	103	101	104	95	85	77	72	64	62	58
49	53	55	65	74	84	97	99	101	100	98	91	80	73	71	64	62	57
45	51	52	64	72	78	85	92	97	98	92	84	78	72	71	64	60	56
43	48	49	61	68	69	80	82	90	92	88	81	76	70	66	61	57	50
38	44	45	55	61	63	71	72	81	85	84	78	73	68	63	58	54	50
36	43	43	51	59	59	65	68	73	77	78	72	71	66	61	58	53	49
33	42	41	50	56	57	63	65	71	72	75	71	69	64	57	51	44	40
Zone 1_2					Zone 2_2					Zone 3_2							
			50	55				71	69	69	68				47	43	39

32lx < Zone1 < 78lx      52lx < Zone2 < 106lx      35lx < Zone3 < 85lx

(b)

Zone 1_1					Zone 2_1					Zone 3_1										
50	+55	+59			58	+52	+50	+48	+46	40	+38	+36	+34							
+38	+48	+55	+61	+66	+67	+68	+63	+57	+54	+52	+50	+47	+45	+42	+40	+38	+36			
+40	+52	+60	+67	+72	+74	+75	+68	+62	+59	+57	+54	+52	+49	+45	+42	+39	+37			
+42	+56	+65	+73	+78	+81	+82	+74	+68	+65	+62	+59	+55	+52	+48	+44	+41	+38			
+43	+59	+70	+79	+84	+88	+88	+79	+73	+70	+67	+63	+59	+54	+50	+46	+42	+39			
+44	+60	+74	+84	+89	+94	+92	+83	+77	+74	+70	+66	+62	+57	+52	+47	+43	+40			
+44	+62	+76	+88	+93	+98	+96	+86	+80	+77	+73	+69	+64	+59	+53	+48	+44	+41			
+37	+64	+78	+89	+94	+100	+99	+88	+82	+78	+74	+70	+65	+60	+54	+49	+45	+41			
Zone 1_2					Zone 2_2					Zone 3_2										
+37	+64	+78	+89	+94	+100	+99	+88	+82	+78	+74	+70	+65	+60	+54	+49	+45	+41			
+44	+62	+76	+88	+93	+98	+96	+86	+80	+77	+73	+69	+64	+59	+53	+48	+44	+41			
+44	+60	+74	+84	+89	+94	+92	+83	+77	+74	+70	+66	+62	+57	+52	+47	+43	+40			
+43	+59	+70	+79	+84	+88	+88	+79	+73	+70	+67	+63	+59	+54	+50	+46	+42	+39			
+42	+56	+65	+73	+78	+81	+82	+74	+68	+65	+62	+59	+56	+52	+48	+44	+41	+38			
+40	+52	+60	+67	+72	+74	+75	+68	+62	+59	+57	+54	+52	+49	+45	+42	+39	+37			
+38	+48	+55	+61	+66	+67	+68	+63	+57	+54	+52	+50	+47	+45	+42	+40	+38	+36			
Zone 1_2					Zone 2_2					Zone 3_2										
			50	+55	+59				58	+52	+50	+48	+46				40	+38	+36	+34

35lx < Zone1 < 94lx      46lx < Zone2 < 101lx      34lx < Zone3 < 65lx

Figure 3.4-Répartition de l'intensité lumineuse mesurée (a) pour le luminaire à LEDLB-RS530-W025 (25W) et simulée (b) pour son équivalent PHILIPS LED BGS441 sous Dialux

Tableau 3.2 – Récapitulatif des paramètres Emax, Emin et Emoy de l'intensité lumineuse par zone pour la lampe LED (25W)

Zone		Mesures d'illuminance LED LB-RS530-W025 (25W)	Simulation d'illuminance PHILIPS LED BGS441 (25W)
Zone 1_1	Emax (lx)	78	94
	Emin (lx)	36	35
	Emoy (lx)	56.77	63.15
Zone 1_2	Emax (lx)	74	94
	Emin (lx)	32	35
	Emoy (lx)	49.97	63.15
Zone 2_1	Emax (lx)	106	101
	Emin (lx)	52	46
	Emoy (lx)	81.73	71.1
Zone 2_2	Emax (lx)	105	101
	Emin (lx)	57	46
	Emoy (lx)	81.01	71.1
Zone 3_1	Emax (lx)	85	65
	Emin (lx)	38	34
	Emoy (lx)	58.54	46.6
Zone 3_2	Emax (lx)	85	65
	Emin (lx)	39	34
	Emoy (lx)	61.72	46.6

#### Analyse du tableau :

Les valeurs présentées dans le tableau 3.2, montre la variation et la distribution de l'illuminance sur la tache lumineuse projetée sur le sol par le luminaire. Les valeurs d'illuminance ont été sous forme de trois zones : zone située derrière le luminaire, zone immédiatement sous le luminaire et zone un peu plus éloignée au-devant du luminaire. Nous avons reporté les trois valeurs principales (Emax, Emin, Emoy) pour chacune des zones.

Nous remarquons que les valeurs min et max pour le cas mesuré et le cas simulé sont plus aux mois proches, ce qui n'est pas le cas valeurs moyennes pour lesquelles la différence pour chaque zone est importante ceci étant dû notamment :

- Aux incertitudes des mesures.
- Au fait que les mesures étant effectuées 'indoor' il faut tenir compte du facteur de réflexion.
- Au fait que les courbes de distribution de l'éclairage de la lampe utilisée pour la simulation n'est pas totalement identique à celles de la lampe utilisée pour les mesures.

## **2<sup>ième</sup> Cas : Luminaire CFL**

Nous présentons sur la figure 3.5 les résultats des mesures de l'intensité lumineuse et sa distribution au sol du lampadaire CFL (33W) type Phocos CL1211C-2.2, figure 3. (a) ainsi que les résultats de simulation, figure 3.2 (b) pour son équivalent (XSP-E-2SH-L) identifié dans la bibliothèque de Dialux et ce pour une hauteur de mât de 3m pour les deux cas.

Nous remarquons que la distribution au sol peut être scindée en trois régions où l'intensité lumineuse est comprise dans les gammes suivantes :

$17 \leq \text{Zone1} \leq 38$  lumens,  $23 \leq \text{Zone2} \leq 49$  lumens et  $85 \leq \text{Zone3} \leq 35$  lumens, cf. Figure 3.2.

(a)

Zone 1_1	24	29	30	Zone 2_1	32	32	25	23	Zone 3_1	19	17	17
23	24	28	30	31	34	35	36	34	35	30	29	25
25	26	29	32	33	37	38	38	36	38	36	33	30
26	28	30	34	35	38	40	41	40	41	38	37	33
26	29	31	35	36	41	44	44	44	44	41	39	36
27	29	33	36	37	43	45	45	45	45	43	42	37
27	29	32	34	37	43	46	47	47	46	44	43	38
26	30	31	32	36	43	46	47	48	48	45	44	42
25	22	25	27		44	45	49	49	49	47	44	43
23	29	31	32	38	44	44	48	49	49	46	44	42
23	28	31	35	37	43	44	46	48	48	45	43	42
22	26	31	33	37	41	44	45	46	47	44	42	41
21	25	30	32	36	39	43	44	45	45	43	41	38
21	24	29	31	36	37	41	40	43	43	42	38	37
18	23	27	28	34	36	38	37	40	40	38	37	36
Zone 1_2	25	27	32	Zone 2_2	36	35	33	31	Zone 3_2	23	22	20

17lx <Zone1< 38lx                      23lx <Zone1< 49lx                      17lx <Zone1< 43lx

(b)

Zone 1_1	27	30	33	Zone 2_1	32	29	27	26	25	Zone 3_1	22	21	20
20	25	30	33	36	37	37	35	31	30	29	28	26	25
21	28	32	36	39	40	40	37	34	33	31	30	28	26
22	29	35	39	42	44	44	40	37	35	34	32	30	28
23	31	37	42	45	47	47	44	40	38	36	34	32	29
23	33	39	45	48	50	50	46	42	40	38	35	33	30
23	33	41	46	50	53	53	48	44	41	39	37	34	31
19	34	42	48	51	59	59	48	44	42	40	37	35	32
19	34	42	48	51	59	59	48	44	42	40	37	35	32
24	33	41	46	50	53	53	48	44	41	39	37	34	31
23	33	39	45	48	50	50	46	42	40	38	35	33	30
23	31	37	42	45	47	47	44	40	38	36	34	32	29
22	29	35	39	42	44	44	40	37	35	34	32	30	28
21	28	32	36	39	40	40	37	34	33	31	30	28	26
20	25	30	33	36	37	37	35	31	30	29	28	26	25
Zone 1_2	27	30	33	Zone 2_2	32	29	27	26	25	Zone 3_2	22	21	20

17lx <Zone1< 38lx                      23lx <Zone1< 49lx                      17lx <Zone1< 43lx

Figure 3.5-Répartition de l'intensité lumineuse mesurée (a) pour le luminaire à CFL Phocos CL1211C-2.2 (33W) et simulée (b) pour son équivalent XSP-E-2SH-L sous Dialux

Tableau 3.3– Récapitulatif des paramètres Emax, Emin et Emoy de l’intensité lumineuse mesurés et simulés par zone pour un luminaire CFL (33W).

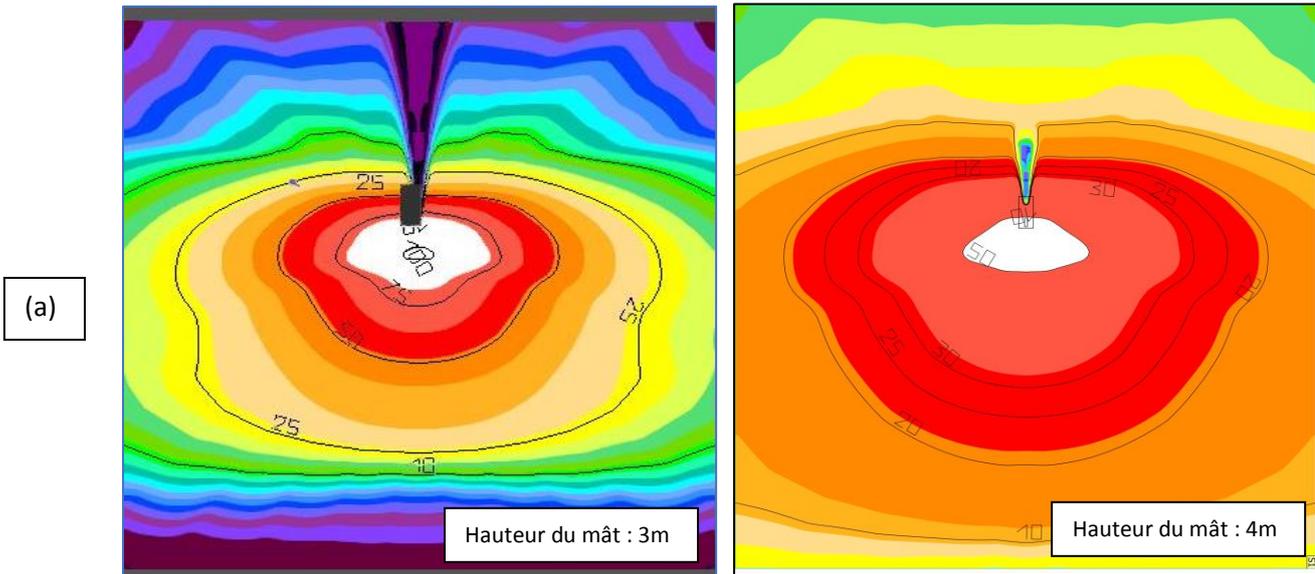
Zone		Mesures d’illuminance CFL Phocos CL1211C- 2.2 (33W)	Simulation d’illuminance XSP-E-2SH-L (33W)
Zone 1_1	E <sub>max</sub> (lx)	37	51
	E <sub>min</sub> (lx)	21	19
	E <sub>moy</sub> (lx)	29.85	33.8
Zone 1_2	E <sub>max</sub> (lx)	38	51
	E <sub>min</sub> (lx)	17	19
	E <sub>moy</sub> (lx)	28.02	33.8
Zone 2_1	E <sub>max</sub> (lx)	48	54
	E <sub>min</sub> (lx)	23	25
	E <sub>moy</sub> (lx)	39.53	38.66
Zone 2_2	E <sub>max</sub> (lx)	49	54
	E <sub>min</sub> (lx)	31	25
	E <sub>moy</sub> (lx)	42.21	38.66
Zone 3_1	E <sub>max</sub> (lx)	42	35
	E <sub>min</sub> (lx)	17	19
	E <sub>moy</sub> (lx)	27.58	25.25
Zone 3_2	E <sub>max</sub> (lx)	43	35
	E <sub>min</sub> (lx)	20	19
	E <sub>moy</sub> (lx)	30.87	25.25

Pour le cas des lampes CFL nous remarquons que, contrairement au cas du luminaire à LED, les valeurs d’illuminance mesurées et simulées ne sont pas très éloignées notamment pour les valeurs moyennes. Les différences constatées nous pouvons les attribuer comme pour le cas précédent aux réflexions induites par les mesures indoor et au fait que la lampe choisie pour les simulations s’apparente à la lampe CFL de l’expérience mais n’est pas tout à fait identique à cette dernière.

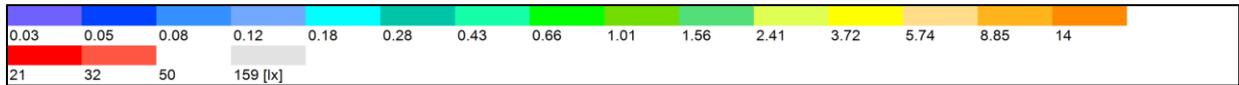
### **3.4 Simulation de l'étendue de la tache lumineuse au sol et répartition des intensités de la lumière pour un lampadaire ayant un mât de 4 m.**

Pour des raisons techniques (hauteur de plafond situé à un peu plus de 3m) nous n'avons pu effectuer les mesures d'illumination qu'avec un lampadaire dont la hauteur du mât est de 3m. Ces mesures nous ayant permis d'identifier les lampes de la bibliothèque de Dialux équivalentes aux lampes réelles disponibles à l'UDES et ainsi de pouvoir simuler la tache lumineuse projetée sur le sol par ces deux types de luminaires. Ceci nous a permis d'effectuer une comparaison entre les deux lampes pour le cas d'une hauteur du mât de 3m. Par la suite nous avons simulé, pour le cas réel, l'incidence de la hauteur d'un mât de 4m sur l'étendue de la tache mais aussi sur la répartition de l'intensité lumineuse au niveau de cette tâche.

Nous avons représenté dans la figure 3.6 les taches et la répartition lumineuse, respectivement, pour la lampe LED (25W) et la lampe CFL (33W) pour une hauteur de mât de 3 et 4m.



1<sup>er</sup> cas lampe LED (25W)



2<sup>ème</sup> cas : lampe CFL (33W)

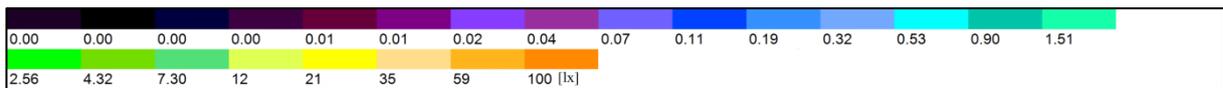
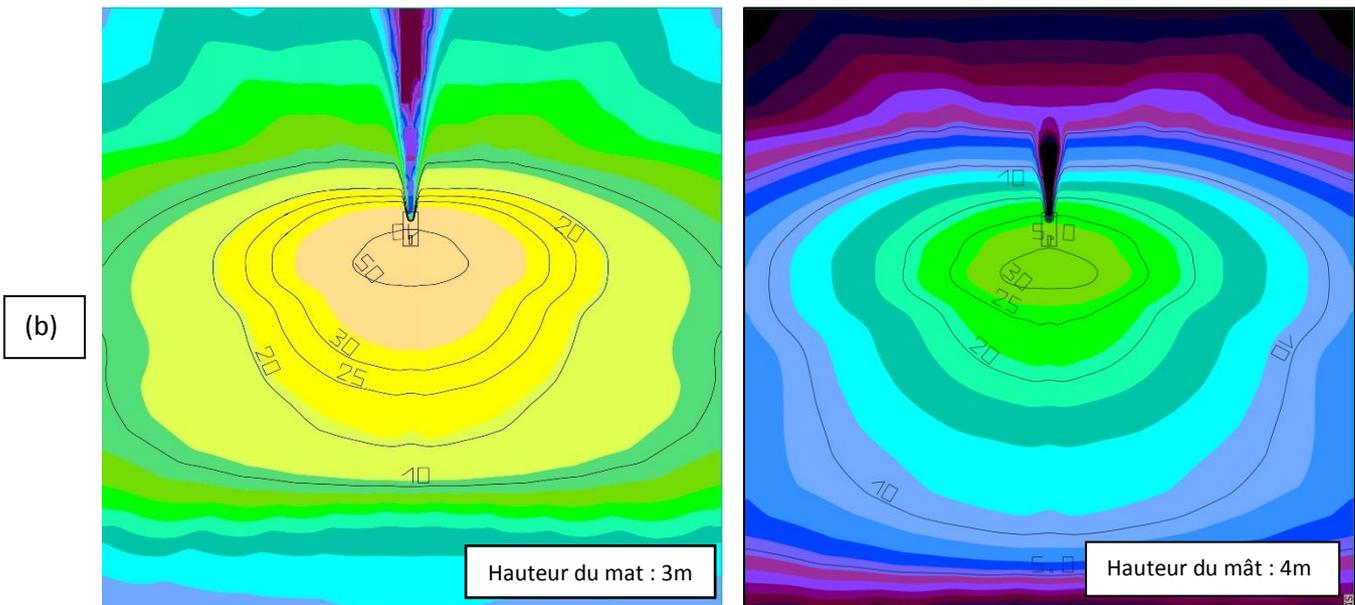


Figure 3.6-Vue de la tache lumineuse et répartition de l'intensité lumineuse : (a) mesurée pour le luminaire à LED 25W et simulée pour son équivalent (PHILIPS LED BGS441) dans Dialux(b) mesurée pour le luminaire à CFL (33W) et simulée pour son équivalent (XSP-E-2SH-L) dans Dialux.

Tableau 3.4-Caractéristiques principales de l'éclairage obtenu par une lampe LED (25W) et une lampe CFL (33W) pour un mât de 3 et 4m.

Hauteur de mât	Illuminance (lx)	LED (25w)	CFL (33w)
3m	E <sub>max</sub>	102	59.1
	E <sub>min</sub>	0.017	0.008
	E <sub>moy</sub>	21	11.9
4m	E <sub>max</sub>	55.9	32.3
	E <sub>min</sub>	0.031	0.017
	E <sub>moy</sub>	17.7	10

En analysant les résultats des simulations consignées dans le tableau 3.4, il apparaît d'abord que pour un même type de lampe la valeur de l'illuminance diminue lorsque la hauteur du mât augmente. Cette diminution est plus prononcée pour la quantité E<sub>max</sub> de la LED (46.1 lx) et de la lampe CFL (26,8 lx) que pour la quantité E<sub>moy</sub> pour ces deux lampes.

Par ailleurs, l'illuminance produite par le luminaire à LED est plus importante que pour le luminaire CFL quel que soit la hauteur du mât. La différence en faveur du luminaire à LED étant respectivement de 42.9 et 23.6 pour E<sub>max</sub>, 3.3 et 1.9 pour E<sub>moy</sub> et ce pour un mât de 3 et 4m.

La surface couverte par la tache lumineuse est aussi plus importante dans le cas de la LED. Si l'on se réfère à la norme d'éclairage internationale (NF EN 12665) [31] cf Tableau 3.7

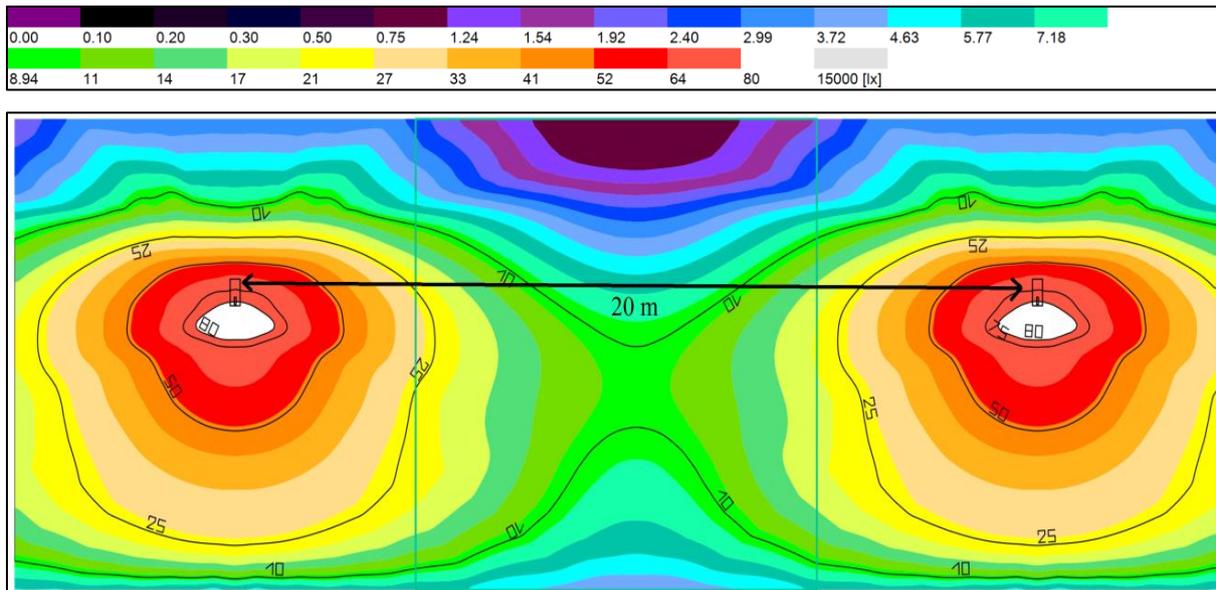


Figure 3.7-Distance optimale entre deux lampadaires 4 m (LED)

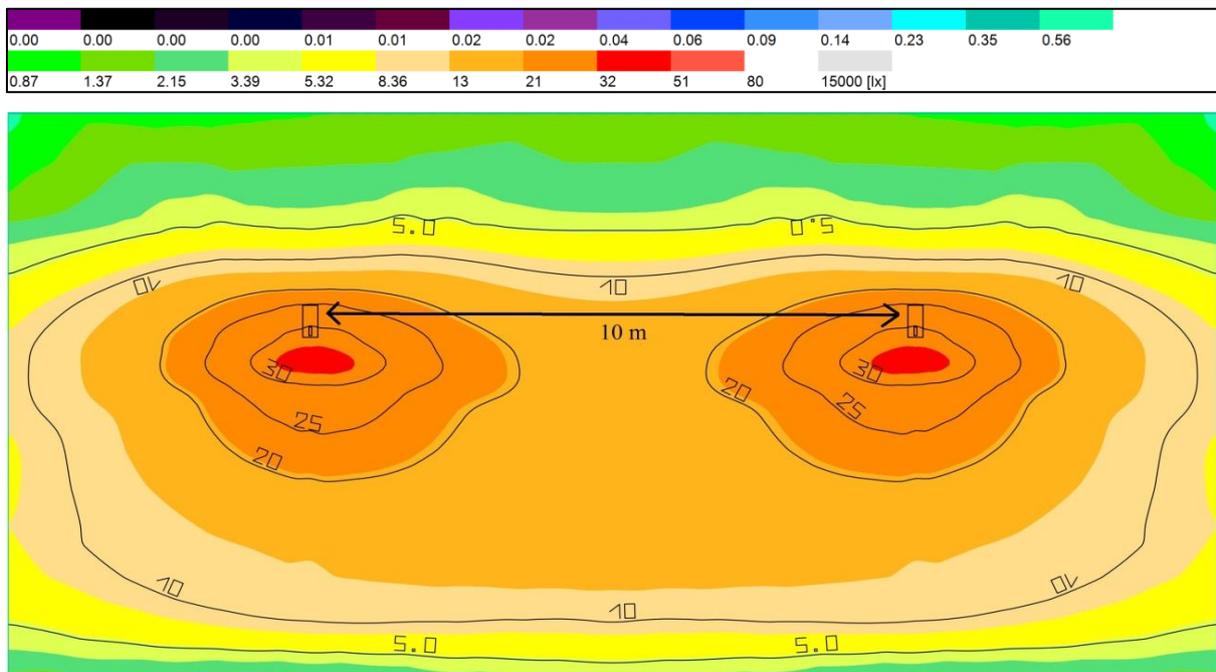


Figure 3.8-Distance optimale entre deux lampadaires 4 m (CFL)

La valeur minimale acceptable concernant l'éclairage d'une zone extérieure est de 10 lx. La distance séparant le point central de la tache lumineuse et le point où l'intensité lumineuse est de 10 lx définit ainsi la zone éclairée selon la norme. Dans le cas des luminaires étudiés, l'étendue de cette tache lumineuse est de 20m pour la LED et 10m pour la CFL dans le cas d'un mât de 4m.

Tableau 3.5-Normes d'éclairage (NF EN 12665) [31] pour différents lieux

Espaces extérieurs	Valeurs minimales d'éclairage
-Zones et voies de circulation extérieures	10 lux
- Espaces extérieurs (outdoor) où sont effectués des travaux à caractère permanent	40 lux

### **3.5 Simulation de l'éclairage externe actuel de l'UDES avec Dialux pour les deux types de lampes CFL et LED.**

L'implantation actuelle de l'éclairage externe de l'UDES, est indiqué par la figure 3.8. Il est constitué de 33 lampadaires espacés d'une distance de 20 à 30m, l'espacement n'étant pas régulier comme le montre la figure 3.9. Ces lampadaires sont constitués d'un module ENIE en silicium monocristallin de 100Wc, d'une batterie de 100Ah et d'un régulateur crépusculaire MORNING SUNLIGHT 10A. Au départ, les luminaires installés étaient des CFL (33W), qui ont été ensuite remplacées par les luminaires à LED (25W).

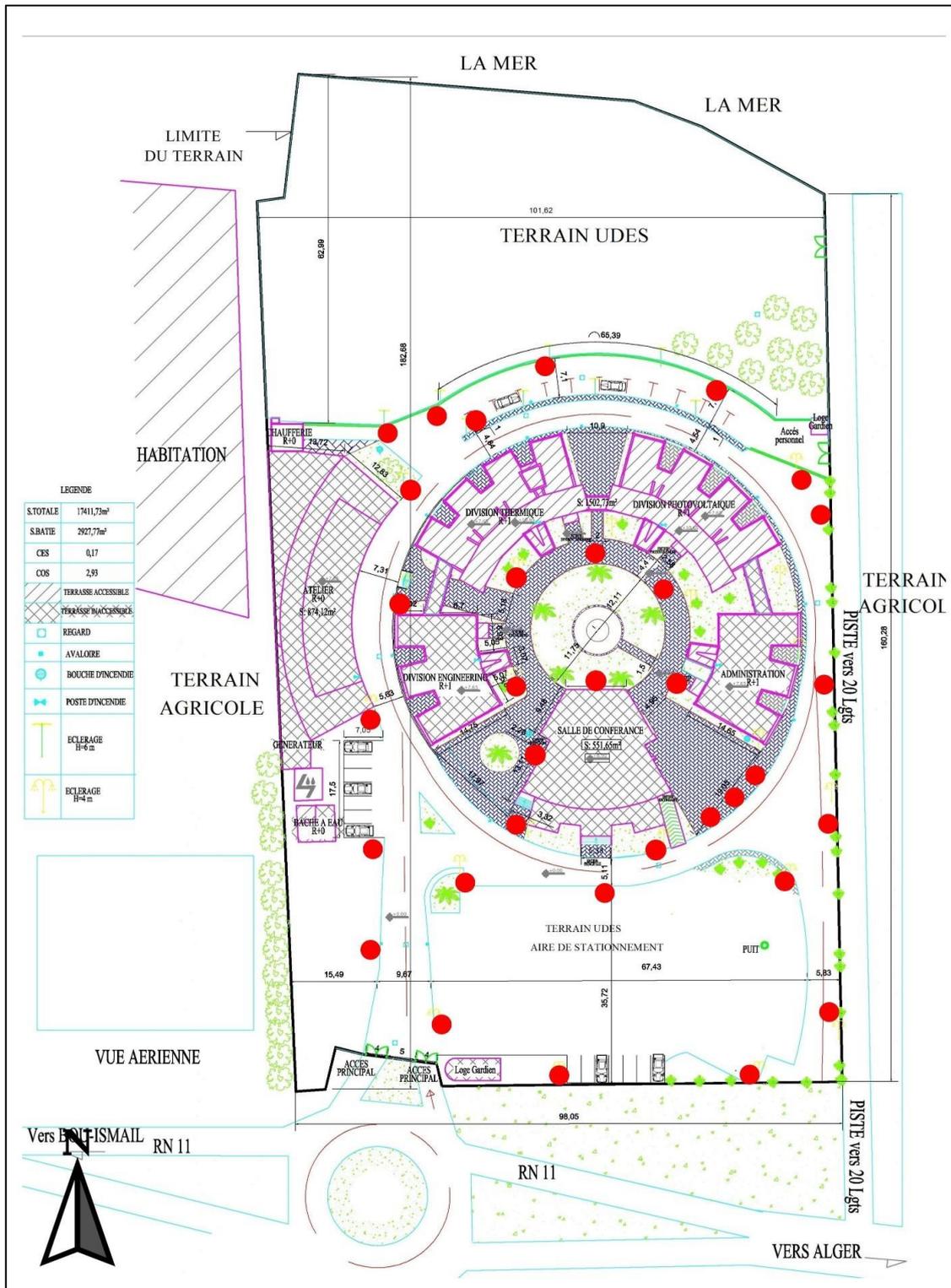


Figure 3.9- Emplacement des lampadaires (points rouges) au niveau de l'éclairage externe actuel du site de l'UDES.

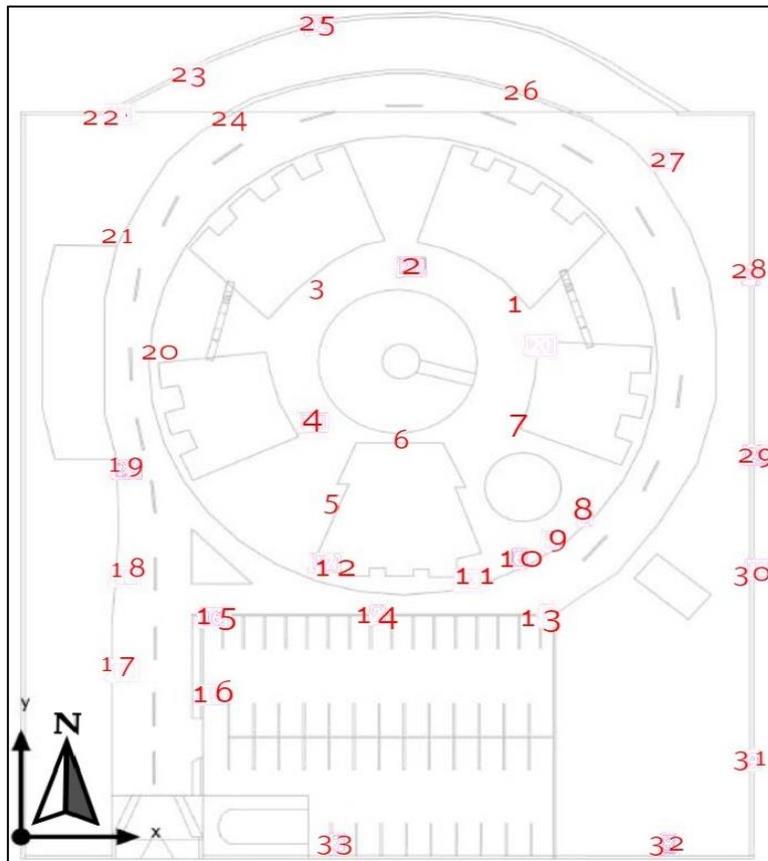


Figure 3.10- Schéma d'implantation des luminaires de l'éclairage externe actuel de l'UDES utilisé avec Dialux.

A l'aide de Dialux nous avons simulé l'éclairage externe obtenu en utilisant les lampadaires mis en place actuellement sur le site de l'UDES, pour le cas des luminaires CFL et le cas des luminaires à LED. Nous présentons dans ce qui suit les résultats obtenus pour les deux cas considérés.

### 1<sup>er</sup> cas : lampe CFL 33W :

Cas d'étude :

- Luminaire ayant un mât d'une hauteur de 4m.
- Une distance inter-lampadaire comprise entre 20 et 30m selon la position des lampadaires sur le site.
- Des lampes CFL (3x 11W).
- Flux lumineux : 1980 lm [le flux lumineux a été calculé par rapport aux caractéristiques de chaque lampe (puissance et type)]

Les résultats de simulation de la luminosité pour ce cas sont représentés sur la figure 3.11 selon une échelle de couleur chacune d'elle représentant une valeur en lx (lumen/m<sup>2</sup>) dans la gamme (0.001-80 lx)

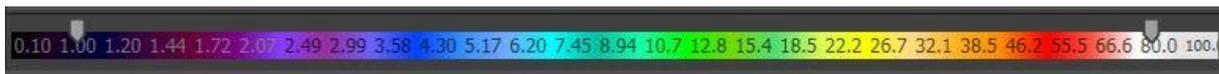


Figure 3.11 - Taches d'illumination au sol pour l'éclairage externe actuel de l'UDES en utilisant des lampes CFL (33W).

Dans le cas de l'utilisation des lampes CFL, les résultats obtenus (cf. Figure 3.11), montrent que la couverture de l'éclairage au niveau de l'UDES est, de manière générale, insuffisante, et ce en se référant aux empreintes lumineuses sur le sol, tout en tenant compte de l'échelle d'intensité lumineuse en lux ( $\text{lumen/m}^2$ ) qui dans le meilleur des cas atteint 50lx (dans la zone située juste au-dessous des luminaires) ce qui est insuffisant pour l'éclairage externe qui nécessite une valeurs moyenne de 40 lx distribuée sur la surface éclairée ce qui n'est pas le cas ici vu que la valeurs moyenne est de l'ordre de 20 lx. Par ailleurs, nous constatons un éclairage défaillant surtout au niveau du parking où une surface importante n'est pas éclairée. De plus, de larges surfaces situées à l'extrémité du site ne le sont pas aussi (zone entourée en rouge).

## 2<sup>ème</sup> cas : lampe LED 25W

On utilise dans ce cas des lampadaires à LED ayant les caractéristique suivantes :

- Type de lampe: LED.
- Puissance : 25 W
- flux lumineux : 2250 lm [la valeur du flux lumineux a été calculé par rapport aux caractéristiques de chaque lampe (puissance et type)]

On utilise dans ce cas des lampadaires à LED ayant les caractéristiques ~~sont~~ les suivantes :

- Type de lampe: LED.
- Puissance : 25 W
- flux lumineux : 2250 lm [la valeur du flux lumineux a été calculé par rapport aux caractéristiques de chaque lampe (puissance et type)]

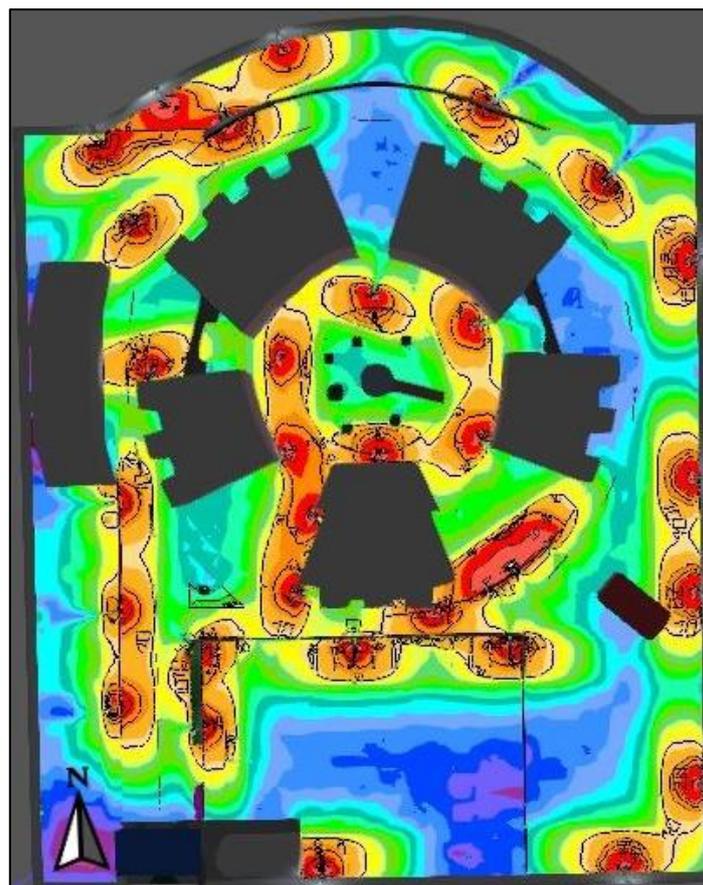


Figure 3.12 - Taches d'illumination au sol pour l'éclairage externe actuel de l'UDES en utilisant des lampes LED (25W).

Comme nous pouvons l'observer sur la figure 3.12, l'éclairage avec des lampadaires à LED apparaît de prime abord comme étant meilleur que celui obtenu avec les lampes CFL de sorte que les taches lumineuses sont plus étendues et l'intensité de la lumière est beaucoup plus

significative atteignant sur l'endroit de déplacement et de mouvement des valeurs de l'ordre de 20-80 lx. Ce qui confirme que l'éclairage à LED bien que ne nécessitant une puissance plus faible est plus efficace en termes de luminosité en plus d'être économe en énergie.

### 3.6 Vérification de l'autonomie du lampadaire

Une exigence importante incluse dans le cahier des charges concerne l'autonomie du lampadaire. En effet, il est stipulé que le lampadaire doit pouvoir assurer un éclairage correct pour trois nuits consécutives quelque soient les conditions climatiques cela sous-entend donc qu'il doit assurer sa fonction d'éclairer même si nous avons trois journées consécutives où l'éclairage est très faible ou inexistant. Pour nous assurer de cela nous avons conduits une série de tests en réalisant l'expérience décrite ci-dessous.

#### 3.6.1 Procédure de test d'autonomie du lampadaire

Pour ce faire, nous avons, pour chacune des expériences décrites dans ce qui suit pris une batterie que nous avons chargée complètement à l'aide d'un module PV. Nous l'avons ensuite branchée via le régulateur sur un luminaire à LED de 25W et nous avons alors suivi son temps de décharge. Le schéma électrique de câblage et une vue d'ensemble du banc de mesure de la décharge de la batterie sont présentés sur la figure 3.13

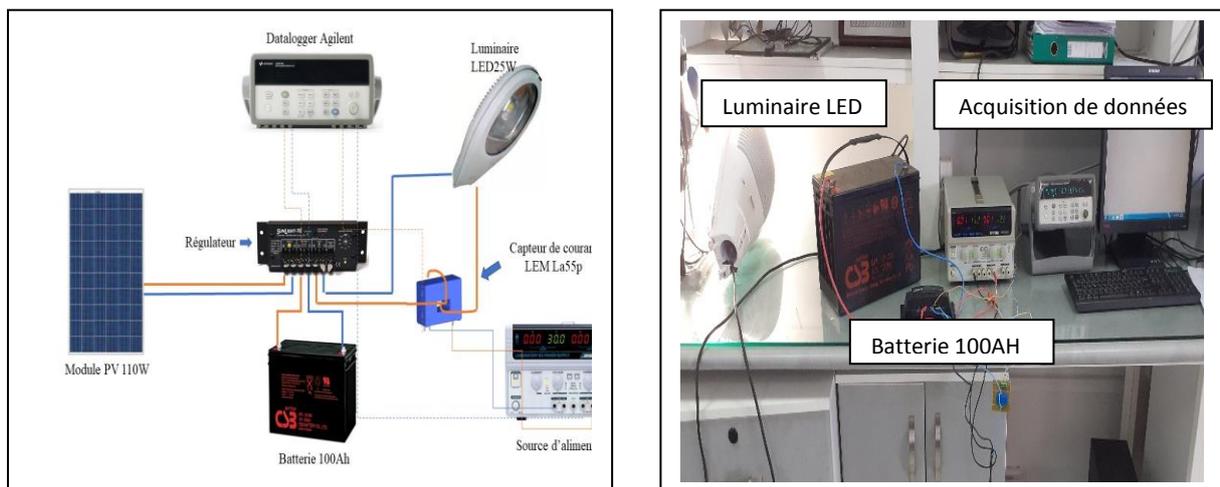


Figure 3.13 – Banc de mesure de la décharge de la batterie du lampadaire à LED (25W) :(a) Schéma électrique de câblage, (b) vue d'ensemble du banc de mesures

### 3.6.2 Tests accomplis

Dans les trois tests décrits ci-dessous, nous avons utilisé la même batterie de 100Ah après avoir pris le soin de charger complètement avant chaque test.

#### 1<sup>er</sup> Test :

Pour ce test nous avons utilisé un régulateur du type MORNING SUNLIGHT 10-10A. Nous avons constaté pour ce cas que le luminaire est resté allumé pendant 7h30 seulement. Cela ne couvre même pas une nuit complète qui compte 14h00 de fonctionnement du luminaire dans le cas le plus défavorable que l'on rencontre en hiver.

#### 2<sup>eme</sup> Test :

Pour ce test nous avons utilisé un régulateur de la même marque. Pour ce cas, le luminaire est resté allumé pendant 25h30, c'est l'équivalent de presque 2 nuits, ça reste encore insuffisant compte tenu des exigences du cahier des charges qui stipule une autonomie de trois jours ce qui nécessite que le luminaire doit rester allumer pendant 42h.

#### 3<sup>eme</sup> Test :

Afin de s'assurer que ce n'est pas les régulateurs que l'on utilisé qui limitent la décharge, nous avons utilisé un régulateur STECA SOLARIX PRS 2020. Le résultat obtenu est du même ordre que dans le deuxième test. c.à.d. environ 25h.

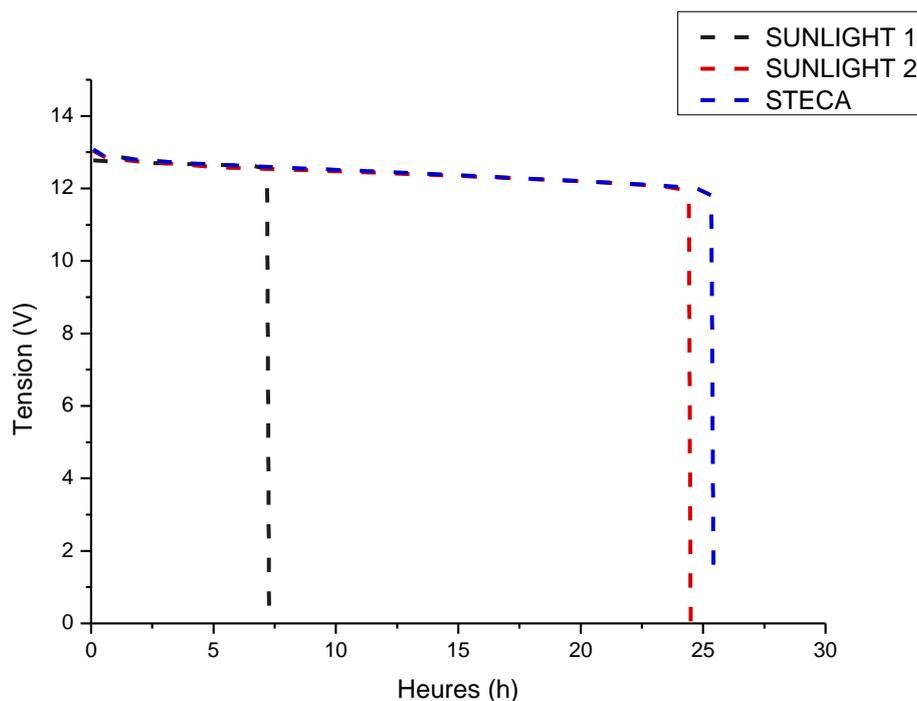


Figure 3.14 : Courbes de décharge de la batterie de 100Ah branché sur un luminaire à LED de 25W via un régulateur MORNING SUNLIGHT 10-10A et un régulateur STECA SOLARIX PRS 2020.

Nous avons donc conclu que la batterie 100AH n'est pas suffisante pour assurer une autonomie de trois jours équivalents à 42h. Le dimensionnement que nous avons fait recommande l'utilisation d'une batterie de 115Ah, comme à notre connaissance elle n'est pas dans les standards que l'on trouve sur le marché, nous avons décidé de faire des tests complémentaires avec des batteries disponibles au niveau de l'UDES mais avec des capacités Respectivement de 150 Ah et 200Ah. L'autonomie du lampadaire obtenue est de 25h, 65h et 109 h respectivement pour une batterie de 100Ah, 150Ah et 200Ah. C'est donc la batterie ayant une capacité de 150Ah qui permet d'assurer une autonomie de trois nuits c.à.d. de 42h. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 3.15.

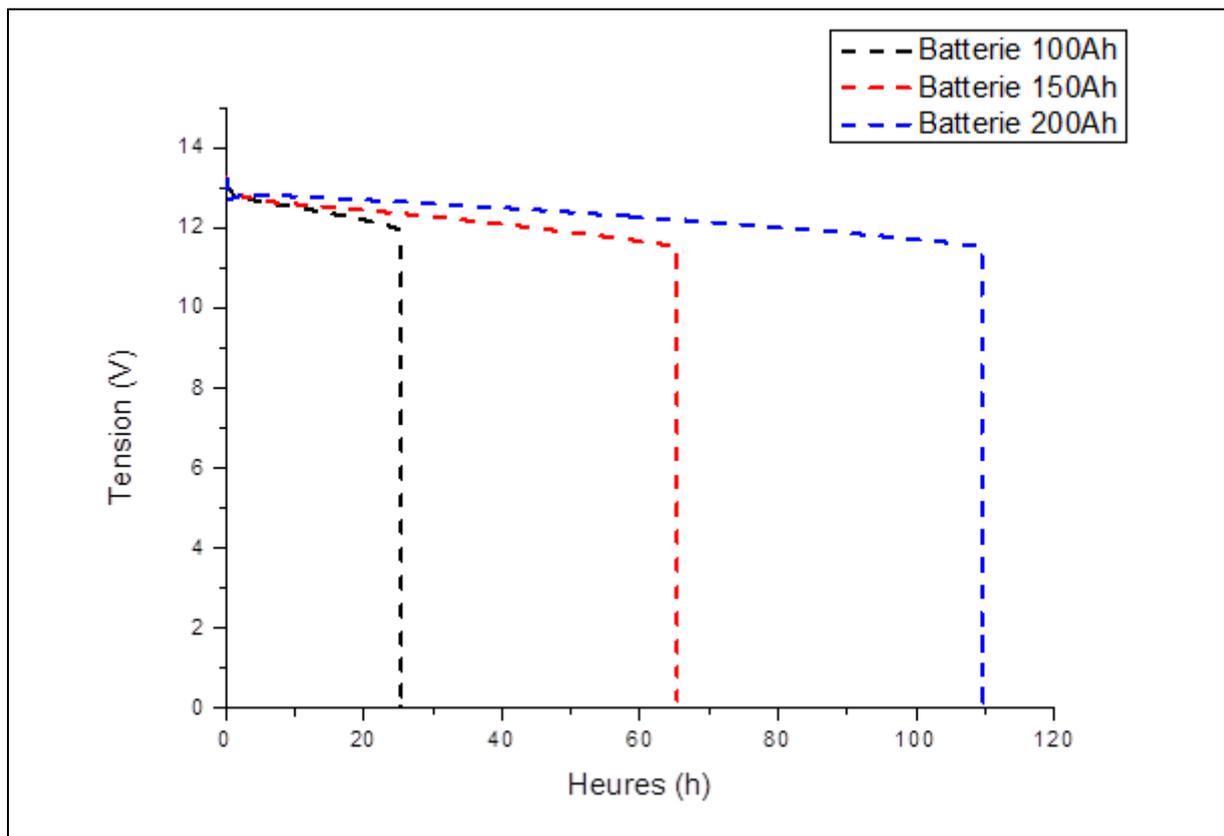


Figure 3.15 – Courbes de décharge de la batterie de 100Ah, 150Ah et 200Ah branché sur un luminaire à LED de 25W via et un régulateur STECA SOLARIX PRS 2020

### 3.7 Recommandations pour améliorer l'éclairage de l'UDES

L'analyse des résultats obtenus ci-dessus nous amène à dire que l'éclairage qui a été mis en place à l'UDES n'a pas été bien conçu, autrement dit, la disposition des lampadaires au niveau de l'UDES comporte quelques carences. Parmi celles-ci nous avons constaté qu'il n'y a pas de distance inter-lampadaire régulière qui a été au préalable calculée et respectée sur le terrain, celle-ci varie, en fait, selon les endroits entre 20 et 30m.

Pour améliorer l'éclairage périphérique utilisant des lampadaires à LED existant à l'UDES, nous proposons d'apporter des modifications sans pour autant engendrer des coûts importants. Il faut ainsi se concentrer sur la distribution des lampadaires à LED pour avoir un éclairage aux normes éliminant les zones d'ombre et les zones saturées tout en ayant une diminution de la consommation d'énergie.

Après avoir étudié le positionnement des lampadaires sur le site il nous apparaît opportun de modifier la position les lampadaires ...5, 9, 10, 12, 16, 20, 23 et éliminer le lampadaire 11. La répartition modifiée des lampadaires de l'éclairage à LED extérieur de l'UDES est représentée sur la figure

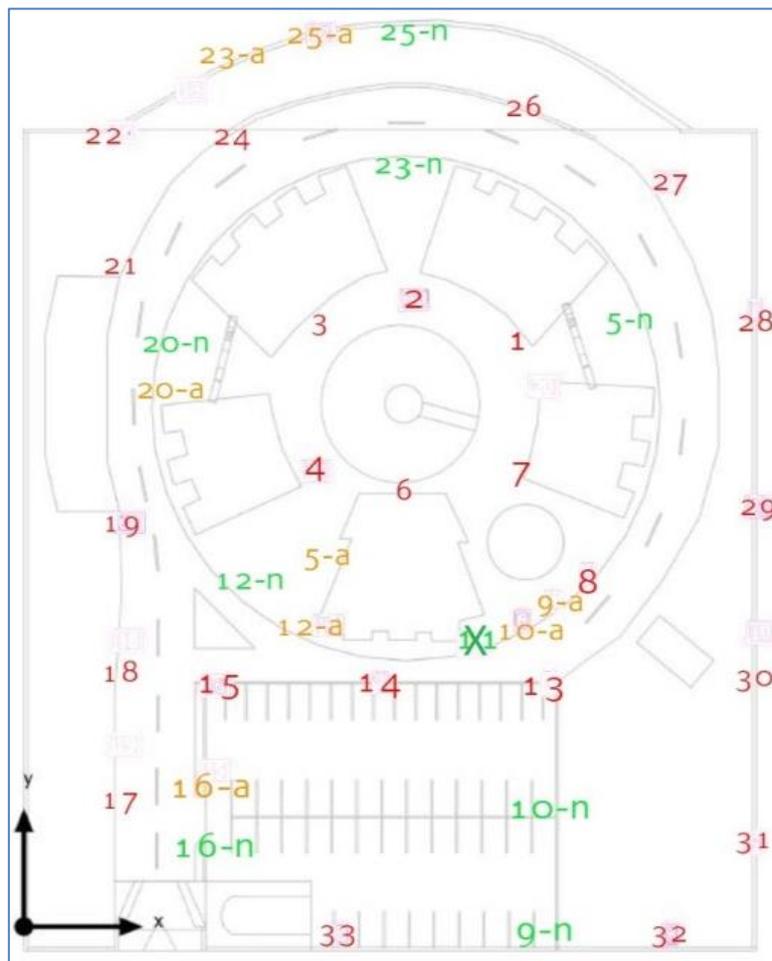


Figure 3.16 – Nouvelle distribution proposée pour les lampadaires à LED afin d'améliorer l'éclairage périphérique de l'UDES.

La position initiale des lampadaires déplacés est notée (a) et le nouvel emplacement est noté (n) enfin les lampadaires qui sont restés fixes sont notés en rouge.

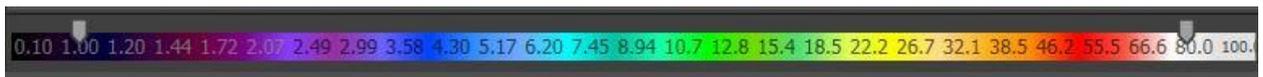
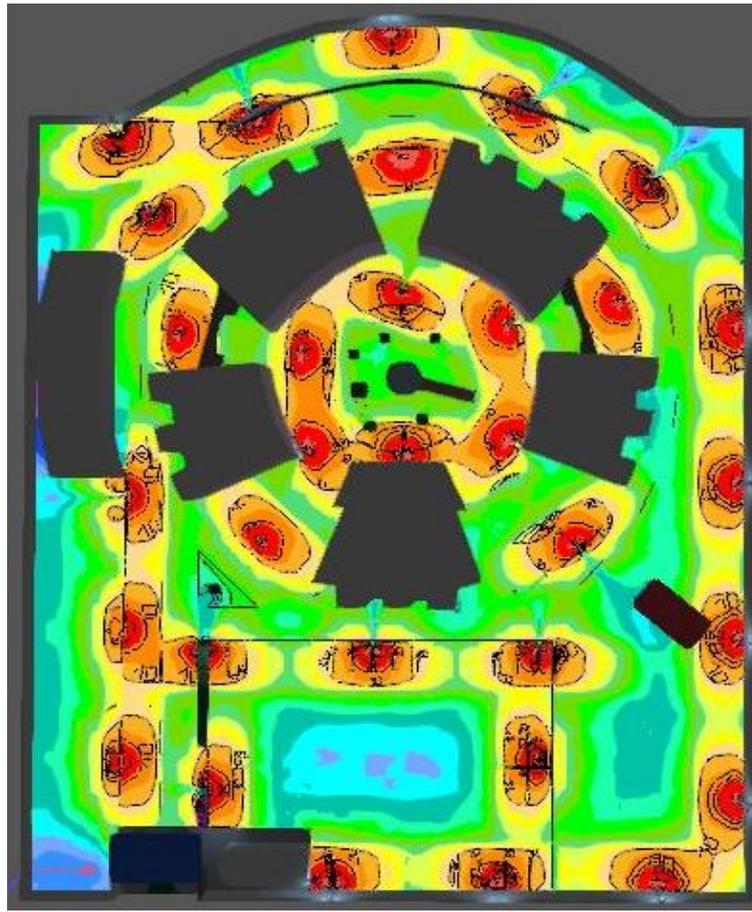


Figure 3.17 – Simulation sous Dialux de la distribution des taches lumineuses au sol de l'éclairage externe de l'UDES après introduction des modifications de la disposition des lampadaires.

La figure 3.16 montre bien que la nouvelle répartition des lampadaires sur le site de l'UDES permet, grâce au respect d'une distance inter-lampadaire moyenne de (20m) et en conformité avec les normes d'éclairage, d'éliminer les zones d'ombre et les zones surexposées tout en assurant un éclairage uniformément réparti.

Dans un souci de réduire encore plus la consommation d'énergie nous avons effectué des simulations en utilisant des luminaires à LED de 20W. Hélas, le résultat obtenu, en gardant la même distance inter-lampadaires utilisée pour les luminaires à LED (25W), comme le montre la figure 3.17, révèle la présence de zones d'ombre car la surface éclairée conformément aux normes d'éclairage pour un luminaire à LED (20W) est plus réduite. Pour éliminer ces zones d'ombre il faudrait ajouter des lampadaires ce qui augmenterait le coût d'investissement et donc pas rentable.

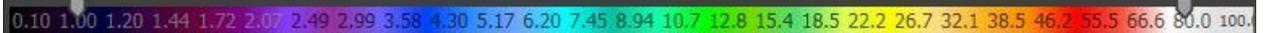
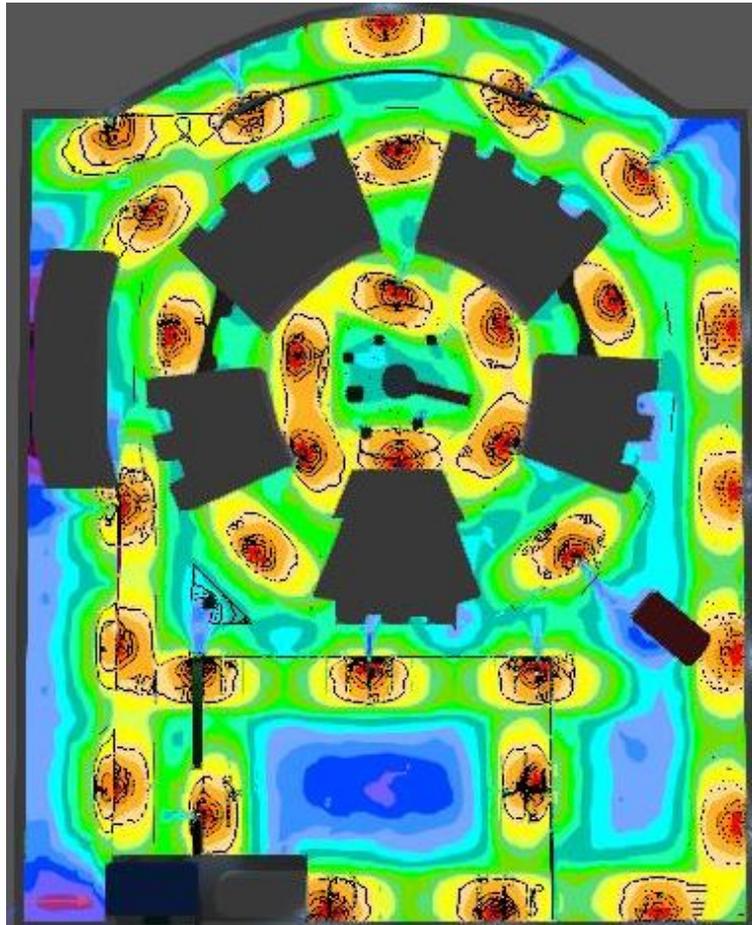


Figure 3.18 – Simulation sous Dialux de la distribution des taches lumineuses au sol de l'éclairage externe de l'UDES après introduction des modifications de la disposition des lampadaires mais en utilisant des luminaires à LED de 20W.

### 3.8 Estimation du coût des modifications pour améliorer l'éclairage de l'UDES

L'amélioration de l'éclairage externe de l'UDES ne nécessite qu'une reconfiguration de la répartition d'une partie des lampadaires à LED et l'élimination d'un lampadaire. Cela induit quelques travaux nécessitant de la main d'œuvre pour déplacer les sept lampadaires et l'élimination d'un lampadaire ainsi que l'achat de câble et accessoires électriques tels que cosses ce qui en fait n'engendrera pas d'énormes frais en comparaison des économies d'énergies et de la réduction de la facture énergétique que l'on obtiendra.

### **3.9 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons d'abord montré, en s'appuyant des mesures d'illuminance relevées au niveau de la tache lumineuse projetée sur le sol par un luminaire CFL (33W) et un luminaire à LED (25W), l'avantage d'utiliser un luminaire à LED comparativement à un luminaire CFL en matière de luminosité, d'étendue de la tache de lumière au sol et d'économie d'énergie. Les lampes de la bibliothèque Dialux équivalentes en performances aux luminaires réels CFL ou LED disponibles à l'UDES nous ont permis grâce à ce logiciel d'avoir une idée exacte sur l'éclairage externe de l'UDES en relevant notamment les carences telles que les zones d'ombre ou de surexposition lumineuse. Par ailleurs, nous avons rapporté les résultats des expériences que nous avons conduites pour déterminer la capacité de la batterie à même d'assurer une autonomie de trois nuits consécutives sans charge de la batterie. Enfin nous avons introduits des modifications sur l'éclairage externe de l'UDES, qui ont porté notamment sur la répartition des lampadaires sur le site de l'UDES, et nous avons évalué leur incidence sur l'amélioration de la qualité de l'éclairage.

## Conclusion générale

Après avoir décrit le contexte énergétique dans le monde et en Algérie, et précisé les priorités ainsi que les mesures à adopter pour améliorer la situation notamment en diversifiant les sources d'énergie et en réduisant la consommation, nous nous sommes focalisés sur le domaine de l'éclairage qui est l'un des secteurs les plus énergivores. Nous avons montré que les tendances de l'heure étaient pour un éclairage à LED peu énergivore, durable et écologique bien que nécessitant au départ un investissement important mais dont le retour sur investissement s'avère très intéressant.

Dans le cadre de notre PFE nous nous sommes vu confié l'étude de l'éclairage externe de l'UDES en traitant d'abord le dimensionnement d'un lampadaire solaire dans le but d'optimiser l'éclairage actuel de l'UDES qui doit permettre à la fois d'avoir un éclairage efficace, écologique tout en réduisant la facture énergétique de l'unité.

C'est ainsi que dans le deuxième chapitre nous avons abordé le dimensionnement du lampadaire solaire en utilisant, d'une part, une méthode paramétrique et, d'autre part, le logiciel PVSYST. Cela nous a conduits à établir une fiche technique du lampadaire solaire à installer pour avoir un éclairage optimal.

Ce lampadaire composé d'un module PV, d'une batterie et d'un régulateur a ensuite servi, dans le troisième chapitre, comme lampadaire de base pour effectuer des simulations de l'éclairage externe de l'UDES en expérimentant tantôt un luminaire CFL, tantôt un luminaire à LED. L'avantage du recours à des lampadaires à LED a été démontré sans équivoque. Néanmoins, la disposition actuelle des lampadaires sur le site de l'UDES présente quelques carences (zones d'ombre et zones saturées de lumière) qui nous ont poussés à proposer des modifications portant, notamment, sur répartition des lampadaires sur le site de l'UDES. La pertinence de notre proposition a été démontrée par le biais de simulations effectuées avec Dialux.

# Bibliographie

- [1] Key World Energy Statistics 2017. Agence internationale de l'énergie (AIE)
- [2] [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_fr](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_fr)
- [3] Consommation énergétique finale 2017, APRUE.
- [4] Opportunité et défis pour les collectivités locales. Salon international des énergies renouvelable, ERA 2018, Oran, 2018. Ministère de l'Intérieur
- [5] L'histoire de l'électricité, (Vidéo). Coordinateur Jim Al-Khalili, prof. Univ. of Surrey, Guildford  
Production: The Open University & BBC, 2011, diff. Arte, 11/2014.
- [6] L'éclairage : histoire et évolution. A. Vautherot. Article, GRALON. 30 mai 2011. <https://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiels-industriels/article-l-eclairage---histoire-et-evolutions-1752.htm>. [Accès le 08 03 2018].
- [7] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe\\_%C3%A0\\_incandescence#cite\\_ref-2](https://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_%C3%A0_incandescence#cite_ref-2)
- [8] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe\\_fluorescente](https://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_fluorescente)
- [9] <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/eclairage-Delorme.xml>
- [10] <https://www.notre-planete.info/actualites/4108-lampes-LED-avantages-inconvenients>
- [11] LED lighting combined with solar panels in developing countries. A.Amogpai, pp 12-15.
- [12] <https://couleur-science.eu/?d=5a2369--comment-fonctionne-une-led>
- [13] Comparaison des structures de bande électroniques des métaux, semiconducteurs et isolants), [www.Isolator-metal.svg](http://www.Isolator-metal.svg)
- [14] <https://www.ridi.fr/fr/limportance-du-passage-a-la-led.html>.
- [15] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/eco-consommation-eclairage-baisser-consommation-energie-1358/>
- [16] <https://www.led-flash.fr/blog/led-ecologique>
- [17] <https://www.sonelgaz.dz/fr>
- [18] <https://www.cnrtl.fr/definition/watt>
- [19] <https://www.millumine.com/blog/2013/07/16/quest-ce-que-le-lumen/>
- [20] <https://www.takethreelighting.com/lumen-watt-comparison.html>

- [21] <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/docs/methods#References>
- [22] METEONORM: handbook part II-theory  
(Aguiar, R. and M. Collares-Pereira (1988): A simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of markov transition matrices. Solar Energy, Vol. 40, No.3, pp. 269-279)
- [23] Huld, T., Šúri, M., Dunlop, E., Albuissou, M., Wald, L., 2005, Integration of HelioClim-1 database into PVGIS to estimate solar electricity potential in Africa. Proceedings from 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [24] PVSST 1.0 sizing and simulation tool for PV systems, Mr Mermoud, 1998
- [25] SMA Solar technologie, indice de performance
- [26] GuidEnR PHOTOVOLTAÏQUE > Le ratio de performance PR pour une installation photovoltaïque autonome
- [27] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Novel Battery Charging Regulation System for Photovoltaic Applications", IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 151 N°2, pp.191 - 197, March 2004
- [28] Blogger, guide photovoltaïque, l'information photovoltaïque, France : Aideau, 2013
- [29] M. HANKINS, installation solaires photovoltaïques autonomes (conception et installation d'unités non raccordées au réseau), France : DUNOD, 2012
- [30] <https://www.dial.de/en/dialux>
- [31] Roger Cadiergues LES BASES DE L'CLAIRAGE RéfCad 2 : nS35.e norme : NF EN 12665 (novembre 2002), Article R4223-4

# ANNEXE

## Liste des Acronymes

Mtep: (mégatonne équivalent pétrole) 1 TWh est équivalent à 0,226 Mtep.

TWh: Térawattheure.

GIEC: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

LED: Light Emitting Diode,

CFL: Compact Fluorescent Light.

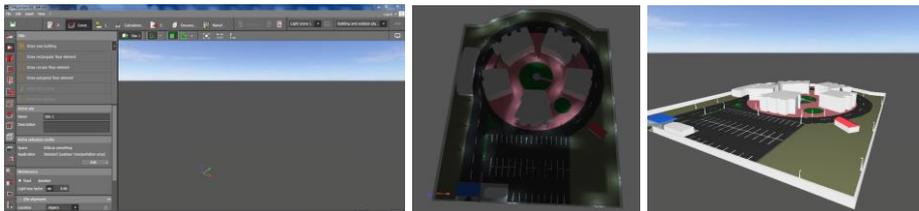
P-N : Positive-Négative (Dopage).

AIE : Agence Internationale de l'Énergie.

## Liste des définitions

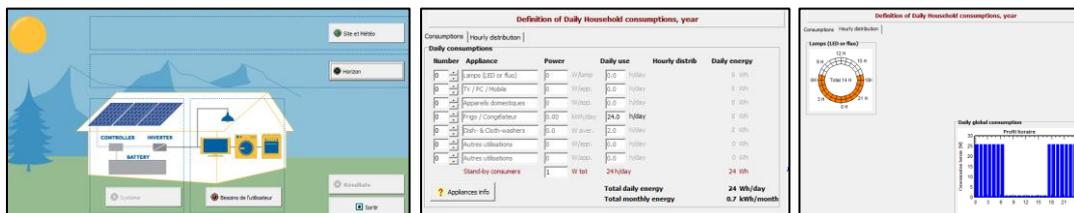
**Dialux**: est un logiciel utile d'informations pour créer les solutions d'éclairage qui répondent aux besoins de l'utilisateur et qui fournissent des conditions de travail efficaces.

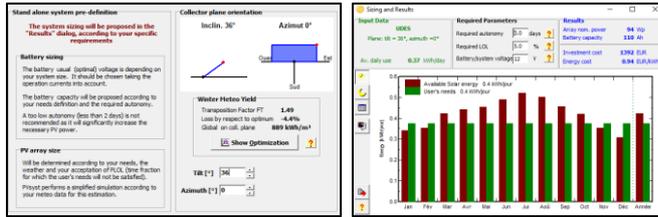
-Quelques Captures du logiciel Dialux :



**Pvsyst** : c'est un logiciel de dimensionnement de panneaux solaires permettant d'obtenir diverse informations telles que la production d'énergie, l'irradiation et le coût de l'installation, la surface nécessaire, ou la production annuelle d'énergie.

-Quelques Captures du logiciel Pvsyst :





## Liste des Symboles

W : (Watt). Unité de mesure de la puissance consommée par la lampe

Lm : (Lumen) unité de mesure du flux lumineux (luminance) émis par la source lumineuse.

Lx : (lux) : Le lux est une unité de mesure de l'éclairement lumineux (illuminance), Il caractérise l'intensité lumineuse reçue par unité de surface.

DA : dinars algériens.

€ : Symbole monétaire représentant l'euro.