Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering
Fondation 2iE

REPUBLIQUE DU SENEGAL
Un Peuple - Un But - Une Foi
Ville de Dakar
www.villededakar.org

EVALUATION DES POTENTIELS D'ECONOMIE D'ENERGIE EN ECLAIRAGE PUBLIC DE LA VILLE DE DAKAR

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT

OPTION : ENERGIE ET GENIE DES PROCEDES INDUSTRIELS

Présenté et soutenu publiquement le 15 Juin 2011

par

M. FALL Sidatte

Travaux dirigés par : Yézouma COULIBALY

Titre : Professeur 2ie

UTER : LESEE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Francis SEMPORE

Membres et correcteurs : Yézouma COULIBALY

Mariam Sido PABYAM

Promotion [2010/2011]

DEDICACES

Ce rapport est spécialement dédié à :

- *Ma mère,* ***Marième Diakhaté*** *pour son soutien, ses prières, son attention particulière, sa compréhension ses sacrifices ainsi que ses encouragements pour toute sa famille.*
- *Tous mes frères et sœurs (**Mor, Bouba, Mintou, Ndèye Marie, Awa, Pape**) qui sont toujours derrière moi pour un soutien moral, un encouragement.*
- *Mes belles sœurs (**Maimouna, Ndèye Anna**) pour la compréhension, leur soutien et leur disponibilité.*
- *Grande sœur feu* ***Sawdiatou FALL****, pour ses années d'encouragement, d'amour et de soutien, que la terre lui soit légère,*
- *Mon grand frère* ***Alassane SALL*** *pour son soutien et ses encouragements. Merci grand frère !*
- *Tous (tes)* ***mes ami (e) s****, je ne vais pas citer de noms, pour leur soutien, leur considération et les moments passés ensemble.*
- *Tous mes* ***compatriotes****, mes* ***camarades*** *de promotion au 2iE.*
- *Toutes les personnes que j'ai perdues, qu'elles reposent en paix.*

Longue vie et Santé de fer à tout le monde.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude et mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce document. Mes remerciement vont principalement à l'endroit de :

- ***Monsieur Serigne Leye THIOUNE,*** Directeur de la Direction de l'Aménagement Urbain de la ville de Dakar de m'avoir accueilli dans sa structure.
- ***Monsieur Yezouma COULIBALY,*** Professeur au 2iE pour son encadrement, sa disponibilité, ces conseils tout au long du stage.
- ***Monsieur Cheikh Ndiaye,*** *Directeur de la ERT, d'avoir mis son matériel à maa disposition pour bien mener mon travail.*
- ***Monsieur Cheikh Diagne,*** Ingénieur à la Direction de l'Aménagement Urbain pour son encadrement, ses conseils, sa disponibilité
- *Tout le* ***personnel*** de la Direction de l'Aménagement Urbain de la ville de Dakar sans exception

Mes remerciements s'adressent également à :

- L'ensemble du personnel de la **Fondation 2iE,** en particulier le corps professoral pour leur formation de qualité.
- A tous les membres de l'**AESO** du Burkina Faso et du Sénégal ainsi qu'à tous les étudiants de la fondation 2iE (Ex EIER / ETSHER).

RESUME

Ce mémoire a pour objectif d'amélioration la qualité de l'éclairage public, de réduire la consommation énergétique et de limiter les gaz à effet de serre pour la ville de Dakar.
Pour se faire, nous avons pu prendre des mesures d'éclairement moyen, les relevés des consommations annuelles et enfin proposer des moyens modernes pour réduire la facture énergétiques de la mairie.
L'analyse des résultats montre que le niveau d'éclairement moyen varie en fonction des types d'implantation, soit de **15 lux à 45 lux**. En plus, les consommations mensuelles en kWh sont trop élevées grâce aux nouvelles interventions faites dans le cadre de l'entretien pour remettre en service des luminaires en panne. Et le diagnostic du réseau nous montre que les câbles souterrains sont hors usages et présentent des défauts d'isolement, des interrupteurs horaires éprouvés par le temps et la majorité des luminaires fonctionnement avec des appareillages ferromagnétiques.

Faire également une rénovation de l'éclairage public de la Corniche Ouest en remplaçant les iodures métalliques de 150 W par des LED de 90 W qui nous permet de faire une économie d'énergie annuelle de **255 704 kWh** soit **40%** de réduction de puissance. Cette rénovation nous a permis également d'éviter **351 tonnes de CO_2**.

En outre, l'utilisation de l'interrupteur crépusculaire astronomique sur tous les postes de la ville nous permettrait de réaliser une économie d'énergie de **3 111 048 kWh/an** soit **373 000 000 FCFA/an** et celle de l'armoire de commande REVERBERI sur la route des Niayes en 2012 ferait une économie d'énergie de **57 488 Wh/an** soit **6 898 500 FCAF/an.**

Mots clés : Economie d'énergie, Economie d'énergie, Eclairage public, Consommation énergétique, Eclairement moyen, Gaz à effet de serre

ABSTRACT

This thesis aims to improve the quality of public lighting, reduce energy consumption and limit greenhouse gas emissions for the city of Dakar.
To do this, we have taken measures illuminance, records of annual consumption and finally propose ways to reduce the modern energy bill from the town hall.
The analysis shows that the average illumination level varies depending on the types of implantation, or 15 lux to 45 lux. In addition, the monthly consumption in kWh is too high thanks to new interventions in the context of the interview to reactivate the lights down. And diagnosis of network shows that underground cables are not in use and have defects of isolation, time switches time-tested and the majority of fixtures operating with ferromagnetic devices.

Also do a renovation of public lighting in the West Corniche replacing metal halide 150 W with 90 W LED that allows us to make an annual energy savings of 255,704 kWh or 40% power reduction. The renovation also allowed us to avoid 351 tonnes of CO2.
In addition, the use of IC Astro on all positions in the city we can achieve energy savings of 3,111,048 kWh / year or 373 million FCFA per year and that of the control panel on REVERBERI Niayes road is an energy saving of 57 be 488kWh/an FCAF 6,898,500 / year.

Keywords: Energy saving, Public lighting, Energy consumption, Greenhouse gas emissions

LISTE DES ABREVIATIONS

SENELEC :	Société Nationale d'Electricité du Sénégal
IC Astro :	Interrupteur Crépusculaire Astronomique
F :	Flux lumineux
S :	Surface (m²)
Nthéo :	Nombre théorique des lampes
W :	Watt
LED :	Diodes Electroluminescentes
Lux :	le flux lumineux reçu par une surface exprime en lumen/m2
Emoy:	éclairement (horizontal) moyen
Emax :	éclairement (horizontal) maximal
Emin :	éclairement (horizontal) minimal
KWh :	kilowatt heure
Lmoy :	luminance moyenne de la chaussée en service
U0 :	uniformité générale
U1 :	uniformité longitudinale
TI :	éblouissement perturbateur
SR :	éclairage des abords
R3 :	revêtement
EP :	Eclairage Public

Sommaire

I. Introduction 10
II. Synthèse bibliographique 12
II.1 Les grandeurs et unités photométriques de base de l'éclairage 12
II.2 Description des différents éléments d'un réseau d'éclairage public 13
II.3 Economiseurs d'énergies 19
II.4 Norme Européenne d'éclairage public EN 13201 22
III. Présentation générales de la ville de Dakar 24
III.1 Localisation…….. 24
III.2 Etat des lieux de l'éclairage public de la ville de Dakar 25
III.2.1 L'éclairage public standard 25
III.2.2 L'éclairage public moderne 25
III.2.3 Les foyers lumineux 25
IV.Matériels et Méthodes 27
V. Résultats-Analyse et Discussion 28
V.1 Présentation des résultats 28
V.2 Analyse et Discussion 31
VI. Propositions de stratégies d'économie d'énergie 34
VI.1 Rénovation de l'éclairage public de la Corniche Ouest 34
VI.1.1 Dimensionnement 35
VI.1.2 Le remplacement des lampes 37
VI.2 Amélioration de la qualité de l'éclairage 37
VI.3 Utilisation de l'interrupteur crépusculaire astronomique (IC Astro) 38
VI.4 Utilisation de l'armoire de commande et de régulation de puissance : REVERBERI…….. 39
VII. Etude économique et impact environnemental de la rénovation Corniche Ouest 41
VII. 1 Etude économique 41
VII.1.1 Investissement 41
VII.1.2 Le gain financier 43
VII.1.3 Le temps de retour sur investissement 43
VII.2 Impact environnemental 43
VIII. Conclusion et recommandations 45
Bibliographie 46

Annexes 47

LISTE DES FIGURES

Figure 1: luminaire 15
Figure 2: Armoire de commande, source: rue Malick SY, Dakar 16
Figure 3: candélabre à crosse et candélabre droit [6] 17
Figure 4: différentes types d'implantation 18
Figure 5: IC Astro 20
Figure 6: vue intérieure N°1 de l'armoire REVERBERI : source VDN, Dakar 21
Figure 7: vue intérieure N°2 armoire REVERBERI, source: VDN Dakar 21
Figure 8: Fonctionnement d'un régulateur-variateur de puissance, source : sitelec 22
Figure 9: Dakar et ses arrondissements, source : colletik 24
Figure 10: Répartition des supports 25
Figure 11: répartition des réseaux 26
Figure 12: Répartition des luminaires 26
Figure 13: Luxmètre, source : Direct Industry 27
Figure 14: consommations énergétiques en MWh 28
Figure 15: mesures d'éclairement moyen, implantation bilatéral alternée 29
Figure 16: mesures d'éclairement moyen, implantation unilatérale 29
Figure 17: mesures d'éclairement moyen, implantation sur terre plein central 30
Figure 18: mesures d'éclairement moyen, implantation bilatéral vis-à-vis 31

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Principaux types de lampes à décharge haute intensité (DHI) [3] 14
Tableau 2: Avantages et inconvénients des LED [7] 15
Tableau 3: Voies urbaines niveau d'éclairement moyen à maintenir en (lux) [11]. 23
Tableau 4: Autres performances minimales à maintenir par repère [11]. 23
Tableau 5: Données de la Corniche Ouest 34
Tableau 6: comparaison des luminaires 37
Tableau 7: économies réalisées avec IC Astro pour tous les postes de la ville 39
Tableau 8: cycle de fonctionnement REVERBERI 40
Tableau 9: résumé du cycle de fonctionnement REVERBERI 40
Tableau 10: économies réalisées avec REVERBERI sur la route des Niayes 41
Tableau 11: cout d'acquisition 42
Tableau 12: cout de maintenance 42

I. Introduction

A. Contexte et problématique

Le Sénégal pays non producteur et dépendant de l'extérieur pour faire face à ses besoins en énergie, subit de pleins fouets les conséquences de la crise pétrolière mondiale, caractérisée par une flambée sans précédent le cout du baril du pétrole. Ceci a une incidence directe sur le cout de l'énergie électrique qui a connu une hausse importante (+27% en moyenne nette), entre 2005 et 2009 [1]. En effet, l'éclairage public, un facteur important de sécurité routière, de lutte contre le vandalisme, d'amélioration du cadre de vie ou de mise en valeur de sites touristiques, représente près de 50 % de la consommation d'électricité d'une commune et environ 20 % de son budget en énergie [2]. Ces proportions sont à peu près constantes quelle que soit la taille de la commune. En 2008, la consommation électrique de la ville de Dakar était de **8 600 MWh** soit **1 milliard de FCFA** la facture énergétique (annexe 5). Comme il participe à la pointe d'appel de puissance, l'éclairage public est aussi émetteur de gaz à effet de serre. Ces consommations d'énergie peuvent être expliquées par plusieurs facteurs :

- Une mauvaise gestion de l'éclairage (variateurs de puissance, détecteurs de luminosité, interrupteurs horaires…)
- Un mauvais dimensionnement de la puissance à installer (hauteur des feux, espacement des candélabres…)
- La non utilisation de lampes adaptées aux besoins (efficacité lumineuse, durée de vie, facteur de dépréciation…)

Cependant, des économies sont envisageables pour alléger la facture, réduire les consommations énergétiques et lutter contre le changement climatique. Les communes de la ville sont donc de plus en plus confrontées à la nécessité d'améliorer le service d'éclairage public, tout en limitant les dépenses et les nuisances.

B. Objectifs

Les objectifs visés par ce projet de fin d'étude sont de :

- Renouveler l'éclairage public en réalisant maximum d'économies d'énergie afin de réduire la facture énergétique.
- améliorer la qualité de l'éclairage public,
- Limiter la pollution lumineuse en économisant des tonnes de CO_2,

C. Méthodologie

Ce travail est scindé en six parties

- Revue bibliographique approfondie afin de mieux connaitre l'évolution de l'éclairage public.
- Faire une présentation générale de la ville de Dakar en parlant également la situation de l'éclairage public.
- Présenter la méthode et les matériels pour les mesures d'éclairement
- Analyse et critiques des résultats obtenus sur les mesures d'éclairements moyens, les relevés des consommations annuelles et le diagnostic du réseau
- Proposer des stratégies d'économie d'énergie
- Effectuer éventuellement l'étude économique et l'impact environnemental de la rénovation pour le scénario choisi.

II. Synthèse bibliographique

II.1 Les grandeurs et unités photométriques de base de l'éclairage

a. Le flux lumineux

On appelle flux lumineux la quantité totale de lumière émise par une lampe exprimée en lumen (lm). Le terme flux est souvent utilise pour décrire l'émission lumineuse totale [3].

1 lumen = 1,5 10^{-3} Watts symbole : Φ

b. Intensité lumineuse

C'est le rapport du flux émis (d Φ) par une source dans un cône infiniment petit entourant la direction, à la valeur de l'angle solide du cône (dΩ) [4]. Elle est exprimée en candela (cd)

Symbole : I

$I=d\,\Phi/d\Omega$

c. L'éclairement

C'est la densité de flux (dΦ) tombant sur une surface (dS). Il s'exprime en lumen/m^2 ou lux et se mesure à l'aide d'un luxmètre [5].

Symbole : E $E= d\Phi/ dS$

L'éclairement E diminue proportionnellement au carré de la distance de la source.

$E \times d^2$ = constante

d. La luminance

La luminance en un point d'une surface dans une direction donnée est égale au quotient de l'intensité lumineuse dans la direction donnée d'un élément infiniment petit de la surface entourant le point, par l'air de la projection orthogonale de cet élément sur un plan perpendiculaire à cette direction [4].

Symbole : L unité : cd/m^2

$L=dI/dS\cos$

e. L'indice de rendu des couleurs (IRC)

C'est l'évaluation de la qualité de restitution des couleurs d'une source lumineuse par comparaison a une source de référence d'indice 100 (le corps noir). Plus le IRC est élevé, meilleur est le rendu de la couleur.

Il est essentiel de comprendre que la valeur de l'indice IRC n'a aucun rapport avec la lumière "naturelle", même si les couleurs éclairées par une source de lumière à IRC élevé apparaitront comme davantage naturelles.

f. Température des couleurs

Les lumières sont également classées suivant leurs capacités à émettre dans le bleu ou dans le rouge. Cette capacité est donnée par la température de couleur [3].

Les lampes de couleur dite froide sont riches en bleu et T > 4000 K

Les lampes de couleur chaude sont riches en rouge et T < 3000 K

g. L'efficacité lumineuse

Le choix d'une lampe à efficacité lumineuse élevée garantit une puissance installée optimale et des coûts maîtrisés [6].

Efficacité lumineuse : FLUX LUMINEUX (lumens) / PUISSANCE DE LA LAMPE (watts)

Le flux lumineux émis par les lampes diminue avec le temps. Cette baisse, différente d'un type de lampe à l'autre, est un critère important qui permet au fabricant de conseiller une durée de vie économique, et au concepteur de calculer le facteur de maintenance de l'installation.

h. Durée de vie économique

C'est la durée de vie, indiquée par le fabricant, au bout de laquelle l'utilisation de la lampe peut être considérée comme non rentable [6].

II.2 Description des différents éléments d'un réseau d'éclairage public

D'une façon générale un réseau d'éclairage public est constitué par :

- Des armoires ou coffret de commande
- Des supports
- Du système d'appareillage
- Des sources lumineuses
- Câbles
- Luminaires

- Types d'implantation

a. Différents types de lampes utilisées pour l'éclairage public

En éclairage public, les lampes les plus utilisées sont les lampes à décharge.

Tableau 1: Principaux types de lampes à décharge haute intensité (DHI) [3]

Type de source	Efficacité lumineuse (lm/W)	Dure de vie(h)	Température de couleur (K)	Indice de Rendu des Couleurs	Utilisation Principale
lampes a incandescence	15	1000	2700	100	intérieur
ballons fluorescents (BF)	50	8000	3300 à 4200	50 à 70	voiries espace piétons et plantes
lampes fluo compactes	60	8000	2700 à 4000	85	circulation piétonne
iodures métalliques (IM)	90	10000	3000 à 5000	80 à 90	illuminations parcs et jardins
sodium haute pression (SHP)	65 à 130	12000	2000	20	circulation et grands espaces
sodium basse pression (SBP)	180	10000	1900 à 21000	<25	tunnels
sodium blanc	50	6000	2500	85	sites historiques
Lampes à Vapeur de mercure	20 à 60	24 000	3200 à 4500	52	terrains de sport, les voies de circulation et les usines

b. Les lampes à LED : Une technologie en plein développement

Il existe aujourd'hui sur le marché des diodes électroluminescentes (LED) pour de nombreuses applications. En effet, les LED présentent l'avantage d'une diffusion ciblée de la lumière, si bien qu'elles ne génèrent quasiment pas de dispersion lumineuse [7].

Tableau 2: Avantages et inconvénients des LED [7]

avantages des LED	inconvénients des LED
1. Grande efficacité énergétique 2. Longue durée de vie 3. Bonne réfutabilité (lumière immédiate, bon réglage du flux) 4. Lumière blanche avec un bon rendu des couleurs 5. Lumière dirigée avec une faible dispersion	1. Technique coûteuse, investissements élevés 2. Disponibilité des pièces détachées pas toujours assurée 3. Composants non standardisés (dépendance d'un produit) 4. Inexpérience sur la longue durée 5. Evolution technique non encore aboutie

c. Le luminaire

C'est un ensemble optique, mécanique et électrique qui comprend une ou plusieurs lampes qui doit répondre aux objectifs suivants [6] :

- Distribuer le flux lumineux en assurant aux lampes conservation des caractéristiques et durée de vie
- Contrôler le flux en évitant toute gêne d'éblouissement.

Un luminaire doit être choisi en fonction de l'adéquation entre sa performance photométrique, le projet et le contrôle des nuisances lumineuses. Les luminaires à indice de protection élevé (IP 65 minimum) [8] sont conçus pour empêcher l'encrassement du bloc optique et ainsi maintenir les performances photométriques dans le temps.

Figure 1: luminaire

d. Les armoires

Les armoires de EP se présentent sous formes deux modèles, le standard et le moderne. Les premiers sont également placés à l'intérieur des postes de transformations et les seconds à l'extérieur. Une armoire comporte les éléments suivants :

- Coupe-circuit
- Compteur
- Contacteurs
- Interrupteur horaire ou crépusculaire
- Connecteurs
- Filerie de câblage

Figure 2: Armoire de commande, source: rue Malick SY, Dakar

e. Supports

La fixation des luminaires peut être assurée par divers moyens. Il peut être adapté à une console fixée sur un immeuble ou accroché à des câbles. La manière privilégiée consiste cependant à utiliser des candélabres.

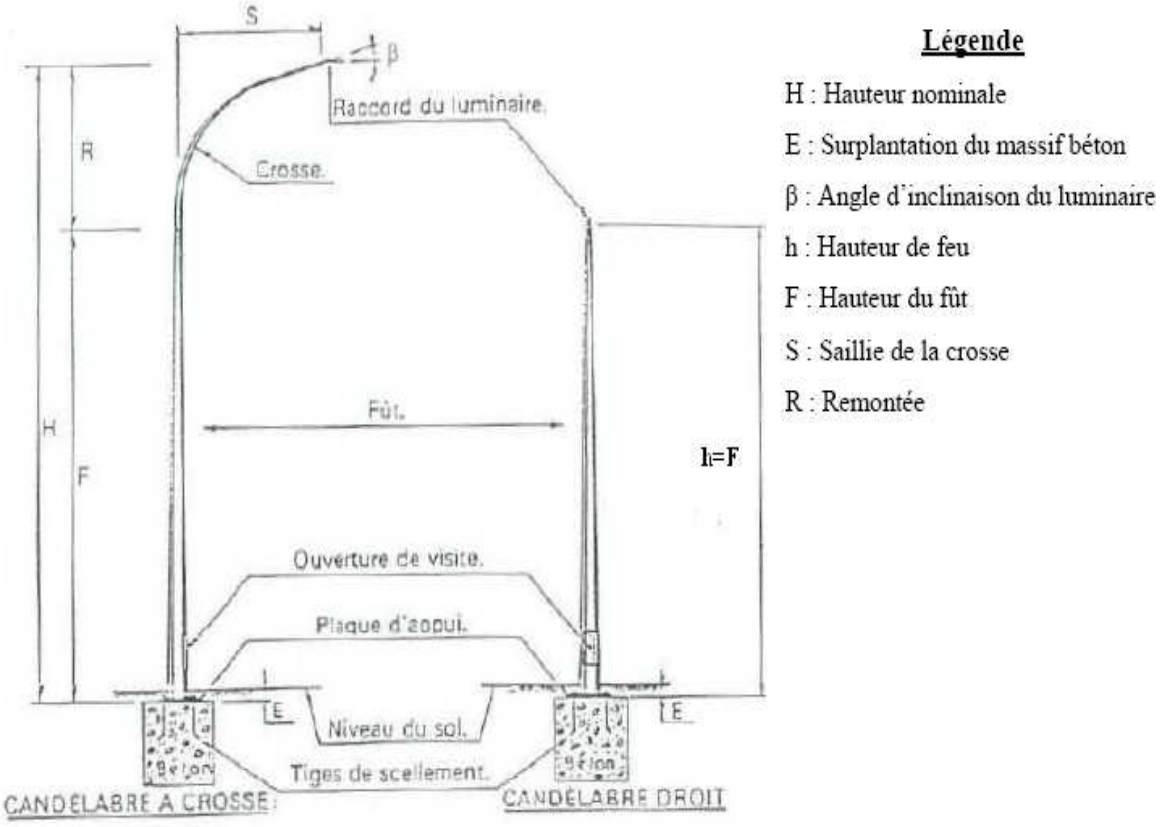


Figure 3: candélabre à crosse et candélabre droit [6]

f. Types d'implantations

- Implantation unilatérale : n'est recommandée que le cas ou la largeur de la chaussée est voisine ou inférieur à la hauteur du feu
- Implantation bilatérale en quiconque : dans le cas ou la largeur de la chaussée reste inférieur à une fois et demie la hauteur du feu. Il faut veiller à éviter l'effet désagréable de serpentement. Ce type d'implantation devra donc éviter dans les courbes.
- Implantation bilatérale vis-à-vis lorsque la largeur de la chaussée est supérieure à une fois et demie la hauteur du feu
- Implantation axiale pour des cas particuliers
- Implantation sur terre-plein central : conseiller si la largeur du terre-plein centrale n'excède pas six mètres.
- Implantation sur accotement : solution généralement employée pour les autoroutes urbaines.

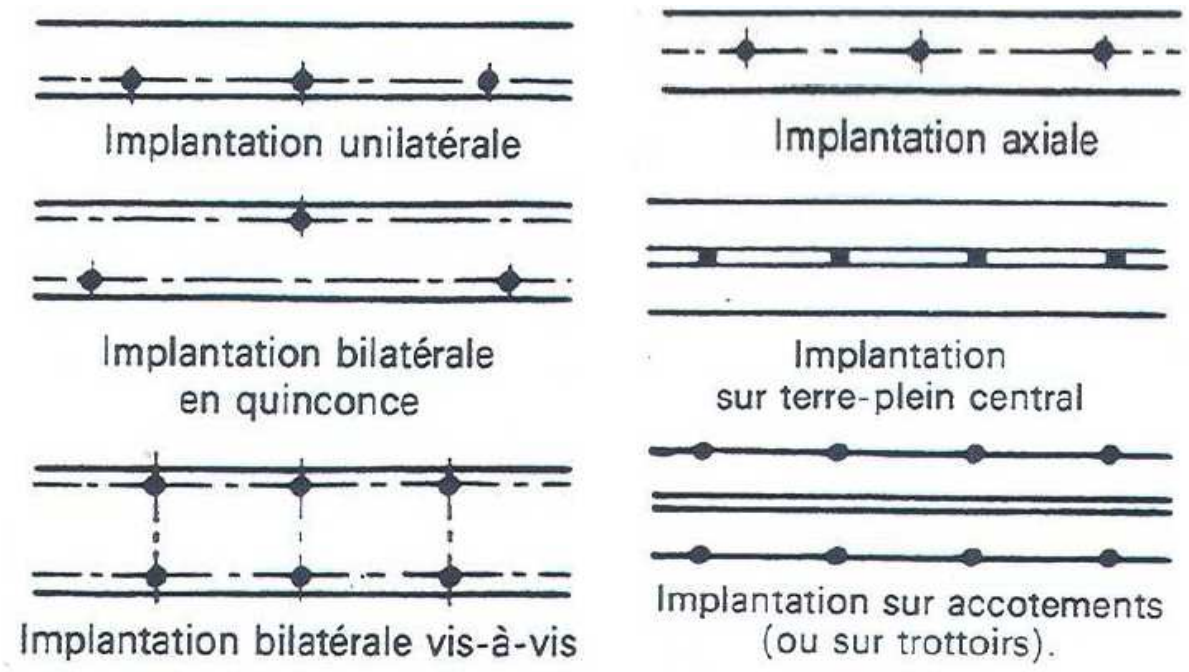


Figure 4: différentes types d'implantation

g. Système d'appareillage

Les lampes à décharge utilisées en éclairage public ont besoin d'appareillage auxiliaire pour fonctionner.

- **Appareillage ferromagnétique**

  (ballast + amorceur + condensateur)

  - Le ballast stabilise et limite l'intensité de la lampe à sa valeur nominale.
  - L'amorceur assure l'allumage des lampes.
  - Le condensateur sert à augmenter le facteur de puissance (cos ϕ).

- **Appareillage électronique**

  Cet appareil assure les mêmes fonctions que l'appareillage ferromagnétique mais en un seul élément :

  - maîtrise des surtensions de réseau
  - de 10 à 50% [8] de réduction de consommation,
  - augmentation de la durée de vie des lampes,

II.3 Economiseurs d'énergies

a. Les systèmes de commandes

- **L'interrupteur crépusculaire**

L'interrupteur crépusculaire mesure la quantité de lumière naturelle environnante et commute l'éclairage en fonction d'un seuil de luminosité prédéfini. En moyenne, l'interrupteur crépusculaire utilisé seul représente un temps de fonctionnement d'environ 4 400 heures par an [8]. Toutefois, un interrupteur défaillant entraîne l'augmentation de la durée d'allumage à plus de 5000 heures par an.

- **Le calculateur astronomique**

L'horloge astronomique calcule, à partir d'informations géographiques et temporelles, la position du soleil et détermine les instants de commutation de l'éclairage public :

- Ce matériel prend en compte les changements d'heure.
- La durée d'éclairage annuelle est maîtrisée.
- Les horloges peuvent être synchronisées.
- La programmation est hebdomadaire ou annelle.

- **L'interrupteur crépusculaire astronomique (IC Astro)**

L'interrupteur crépusculaire astronomique modulaire IC Astro commande la mise en marche ou l'arrêt de l'éclairage (ou d'un autre charge électrique) en fonction des heures de coucher et de lever du soleil, sans l'utilisation d'un détecteur de luminosité [9].

Fonctionnement (voir annexe 6) :

Les heures de coucher et de lever du soleil sont calculées automatiquement par l'IC Astro, en fonction des paramètres géographiques configurés par l'utilisateur:

- Soit par la sélection du pays et de la ville.
- Soit par ses coordonnées géographiques (latitude, longitude).

L'IC Astro permet:

- L'ajout ou la suppression d'une commutation extinction/allumage (OFF-ON) entre les heures de coucher et de lever du soleil.
- Des programmes différents chaque jour.
- Le décalage des heures de coucher et/ou lever du soleil, réglable indépendamment de ± 120 minutes

Avantage :

- Pas de cellule photoélectrique:

Les contraintes liées au câblage de la cellule et à son entretien (encrassement) sont supprimées, le coût d'installation et de maintenance est réduit.

- Programmation simple et intuitive, par touches impulsionnelles.
- Programmation à la minute près (intervalle de commutation: 1 minute).

Figure 5: IC Astro

b. Variateurs-régulateurs de tension

Dans l'éclairage public, il existe plusieurs solutions de variation-régulation de tension, en voici les principales

- **le LUBIO** (régule et fait varier la tension du réseau)
- **la LUCIOLE** (régule et contrôle la puissance d'alimentation des lampes)
- **le REVALUX** (régule et fait varier la tension du réseau)
- **REVERBERI**

La technologie REVERBERI est basée sur un principe simple et efficace ayant plus de vingt ans. Il s'agit du principe de variation de la tension du réseau électrique aval au système. Effectuer des cycles de réduction de la tension, qui induit une réduction de la puissance et donc de la consommation d'énergie, est alors une solution recevable. Se présentent alors des paliers de puissance d'éclairage pouvant se superposer à la fréquentation du site. En outre, le système introduit aussi une régulation de la tension, c'est-à-dire une limitation de la tension fournie au réseau aval à une valeur préalablement demandée. Ainsi, cela réduit les surtensions, donc les surconsommation induites, et le risque de raccourcissement de la durée de vie des appareils électriques. Le système est très flexible sur le fonctionnement et le paramétrage, et permet de multiples programmes et tout un suivi de l'éclairage:

résultats énergétiques, durées de fonctionnement, alarmes mémorises, etc. (voir ces caractéristiques annexe 6). Les armoires de commande sont solides et nécessitent peu d'entretien. Elles sont évidemment aux normes européennes de sécurité électrique et ont de nombreuses protections permettant de limiter les dégâts en cas de défauts [10].

Figure 6: vue intérieure N°1 de l'armoire REVERBERI : source VDN, Dakar

Figure 7: vue intérieure N°2 armoire REVERBERI, source: VDN Dakar

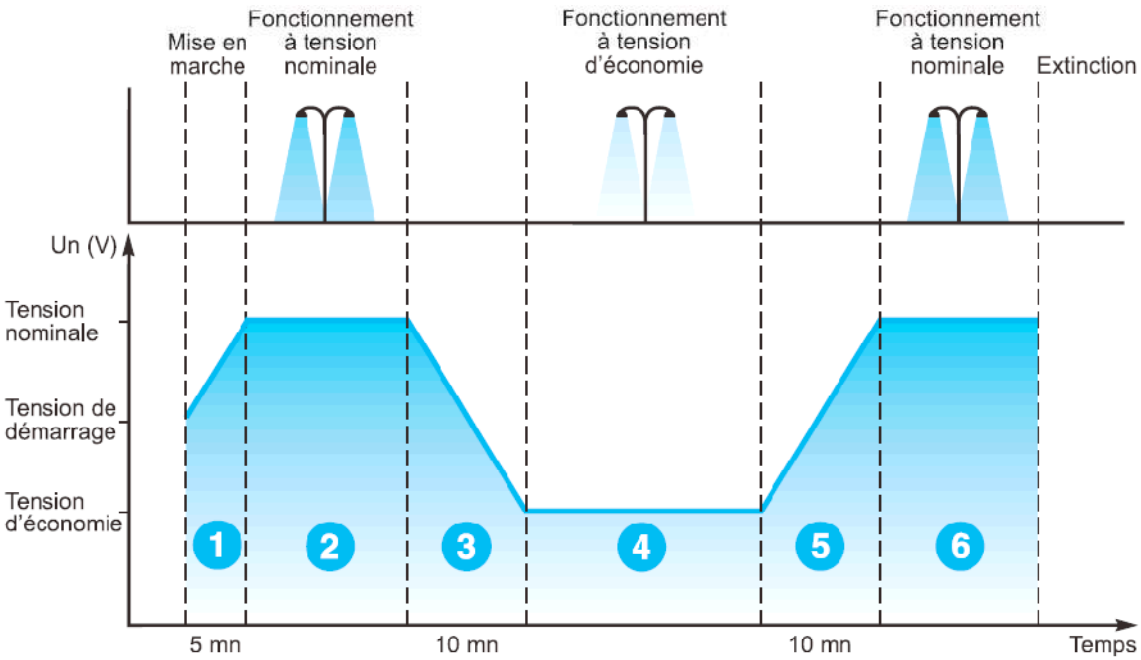


Figure 8: Fonctionnement d'un régulateur-variateur de puissance, source : sitelec

1. Démarrage progressive de l'éclairage jusqu'à la tension nominale
- L'ordre de démarrage peut être donné : Horloge astronomique, interrupteur crépusculaire ou interrupteur crépusculaire astronomique
2. Régulation à la tension nominale jusqu'à une heure fixe paramétrable.
3. Passage à la tension d'économie de façon continue et linéaire sur une durée fixe de 10 mn
4. Régulation à la tension d'économie pendant une durée fixe paramétrable.
5. Retour à la tension nominale de façon continue et linéaire sur une durée de 10 mn
6. Régulation à la tension nominale jusqu'à l'extinction.
- L'ordre de l'extinction peut être donné : Horloge astronomique, interrupteur crépusculaire ou interrupteur crépusculaire astronomique

II.4 Norme Européenne d'éclairage public EN 13201

L'éclairage public doit apporter beaucoup plus aux usagers que le seul sentiment de « confort », encore faut-il que ses performances photométriques permettent d'accéder de nuit aux exigences indispensables à l'accomplissement des différentes tâches visuelles de chaque catégorie d'usagers. C'est la raison pour laquelle la notion « d'éclairer juste » s'impose et se décline au travers de valeurs d'éclairements et de luminances minimales à maintenir. La norme européenne EN 13201 comprend quatre documents [11] :

– RT 13201-1 Éclairage public – Rapport technique sélection des classes d'éclairage ;

– EN 13201-2 Éclairage public – Exigence des performances ;

– EN 13201-3 Éclairage public – Calcul des performances ;

– EN 13201-4 Éclairage public – Méthode de mesures des performances photométriques.

Tableau 3: Voies urbaines niveau d'éclairement moyen à maintenir en (lux) [11].

Repères	Définition de la voie	Contraintes	Niveau lumineux ambiant		Eclairement à retenir pour contraintes maxi	Norme en 13201.1	
			Faible à moyen	Elevé		Classes d'éclairage	Situations
7	**Voie urbaine importante (Boulevard, Avenue)** Vitesse ≤ 50 km/h Motorisés Véhicules lents Cyclistes Piétons	Complexité : élevée Véhicules en stationnement : oui Trafic cycliste : normal Intersection : ≤3 par km Tache navigation : élevée	Cas peu probable	20	20	CE_2 $CE_2=ME_2$	B_2
8	**Voie urbaine secondaire (Rue, Avenue)** Vitesse ≤50 km/h Motorisés Véhicules lents Cyclistes Piétons	Complexité : normal à élevée Véhicules en stationnement : oui Trafic cycliste : normal Intersection : ≤ 3 par km Tache navigation : normal	10	15	20 (zone de conflit)	CE_4 – $CE_3=CE_2$	B_2
9	**Voie de desserte (Rue)** Vitesse ≤30 km/h Motorisés Véhicules lents Cyclistes Piétons	Complexité : normal ou élevée Véhicules en stationnement : oui Trafic cycliste ou piéton : normal ou élevée Intersection : ≤ 3 par km Tache navigation : normal ou élevée Risque d'agression : normal ou élevé Reconnaissance visage : nécessaire	10	15	15 (zone de conflit)	CE_4 – CE_3	D_1 D_2 D_3 D_4

Tableau 4: Autres performances minimales à maintenir par repère [11].

	Luminance				Eclairements
	uniformité mini		éblouissement	éclairage abords	uniformité générale mini
Repère	générale	longitudinale	TI% maxi	SR% mini	
1	0,4	0,7	10	50	
2	0,4	0,7	10	50	
3	0,4	0,7	10	50	
4	0,4	0,7	15	50	
5	0,4	0,7	15		
6	0,4	0,7	10	50	
7					0,4
8					0,4
9					0,4

III. Présentation générales de la ville de Dakar

III.1 Localisation

Etendue sur une superficie de 104.5 km², la ville de Dakar occupe la partie occidentale de la presqu'ile du Cap-Vert. Elle est délimitée par deux caps, à l'ouest par la pointe des Almadies avec au nord par les plages de Ngor, Yoff, Cambérène et au Sud par le Cap Manuel à l'est duquel commence la ville. Elle est administrativement divisée en 19 communes d'arrondissement comme la montre la carte ci-après.

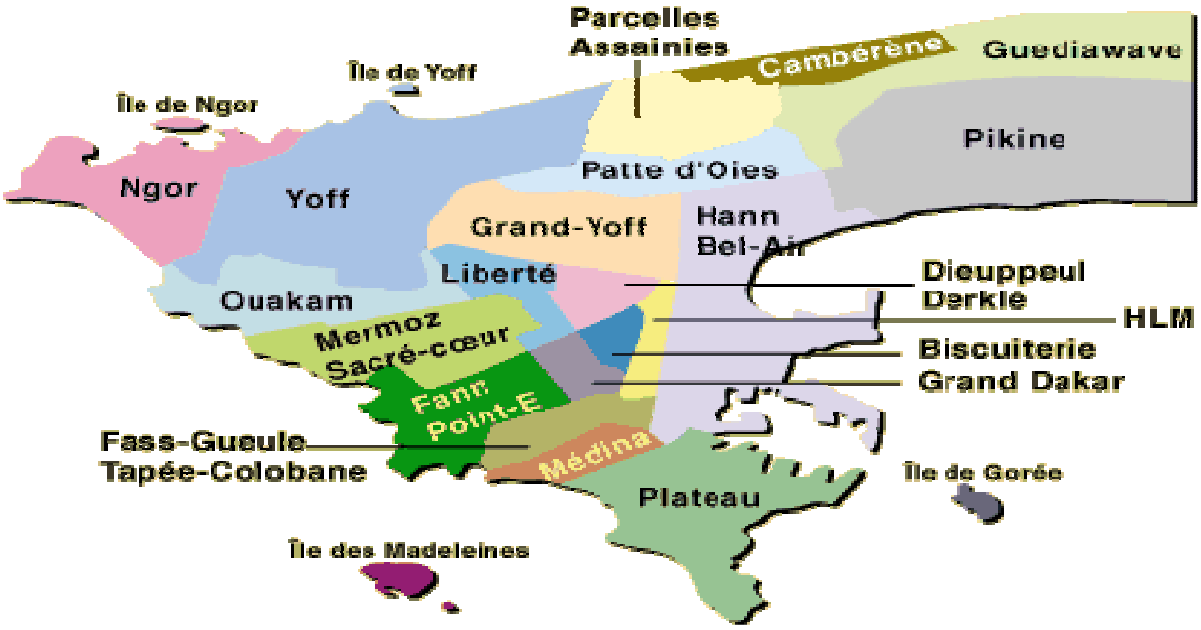


Figure 9: Dakar et ses arrondissements, source : colletik

En ce qui concerne EP la ville est partagée en six (6) lots confiés à des entreprises.

III.2 Etat des lieux de l'éclairage public de la ville de Dakar

L'éclairage public de la ville de Dakar est constitué de deux types :

III.2.1 L'éclairage public standard

Localisé à l'intérieur des quartiers, est caractérisé par des consoles murales de luminaires posées sur des poteaux de bois, de fer ou en béton. La puissance utilisée varie de 70 à 150W. La majeure partie des installations standards sont hors services à cause de leur âge avancé.

III.2.2 L'éclairage public moderne

Pour les grandes artères, est constitué de candélabres avec luminaire (sodium, iodure métallique ou LED) dont la puissance varie 100 à 250W. Les installations visitées sont faites de sorte que chaque candélabre est mis à la terre individuellement mais y'en a qui présentent des défauts d'isolement. Les candélabres ont une hauteur de 5, 8, 9, 10, 11 ou 12 m avec une saillie de 2 m pour certains.

III.2.3 Les foyers lumineux

c. Supports

Le réseau de la ville de DAKAR est constitué de 15 809 supports [6].

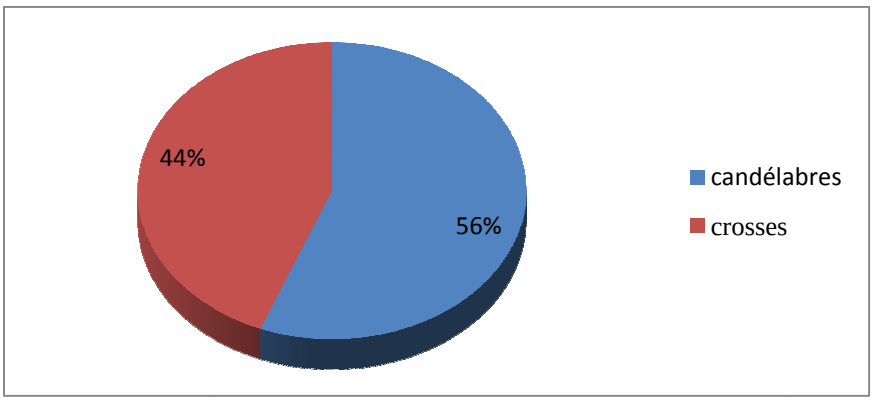


Figure 10: Répartition des supports

d. Réseaux

Les conducteurs d'alimentation du réseau d'éclairage public de la ville de DAKAR sont de trois types : aérien nu, aérien isolé (dit en PRC) et souterrain dont la longueur totale est estimée à 712 Kilomètres [6].

- Souterrain : 370 km
- Aérien isolé : 292 km
- Aérien nu : 50 km

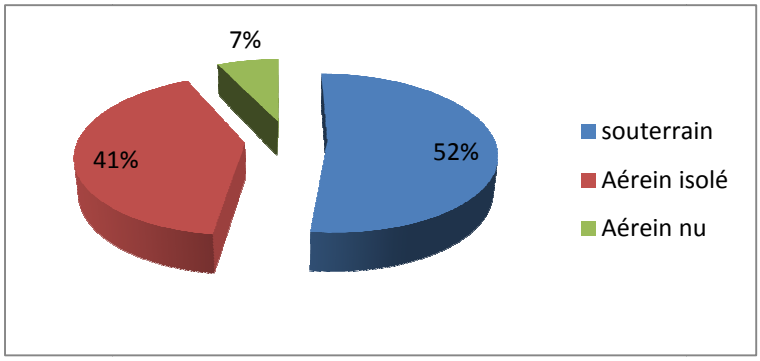


Figure 11: répartition des réseaux

e. Luminaire

Sur la ville de DAKAR, 16 860 luminaires [6] sont installés qui se répartissent de la manière suivante :

- Résidentiels : 3 106
- Projecteurs : 202
- Luminaires urbains : 13 552

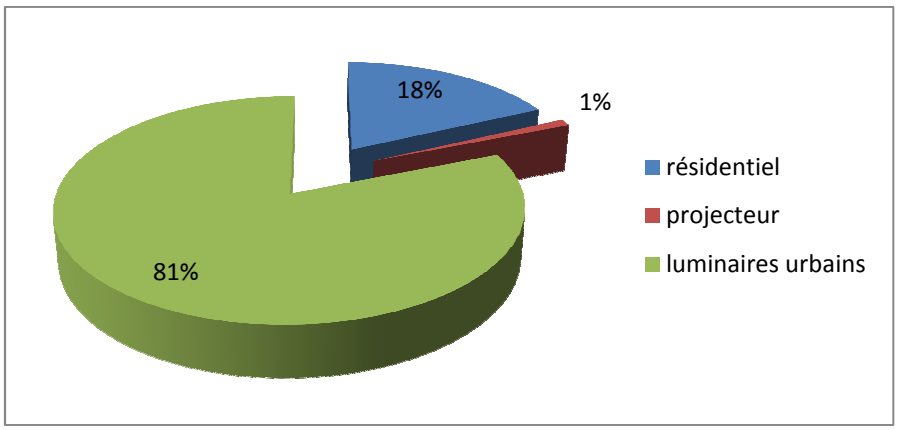


Figure 12: Répartition des luminaires

D'après un inventaire global des récepteurs du réseau EP, il faut noter l'existence des lampes de diverses puissances :

- Iodure métallique
- vapeur de sodium haute pression
- LED

Remarque : il est important de retenir que de 2004 à 2008, l'éclairage public de la ville de Dakar a subi une extension de 7 526 points lumineux jalonnés sur une distance de 270 km[1].

IV. Matériels et Méthodes

- Mesures d'éclairement moyen

Matériels utilisés :

- Voiture 4 x 4
- Luxmètre KIMO
- Bloc note
- Un bic bleu
- Méthode

Pour effectuer les mesures d'éclairement moyen, on a procédé comme suit pour chaque foyer lumineux :

- mesurer l'éclairement maximal d'un foyer à l'aide d'un luxmètre en le posant horizontalement au niveau de la chaussée.
- mesurer son éclairement minimal en tendant vers l'autre foyer.
- Enfin, faire la moyenne des deux éclairements pour avoir l'éclairement moyen.

Figure 13: Luxmètre, source : Direct Industry

Ces mesures ont été prises durant la nuit à partir de 20 h.

[1] Direction de l'Aménagement Urbain de la ville de Dakar : dossier d'extension éclairage public

V. Résultats-Analyse et Discussion

V.1 Présentation des résultats

a. Consommations énergétiques

Relevés des consommations EP de la ville de Dakar 2004-2008 (voir annexe5).

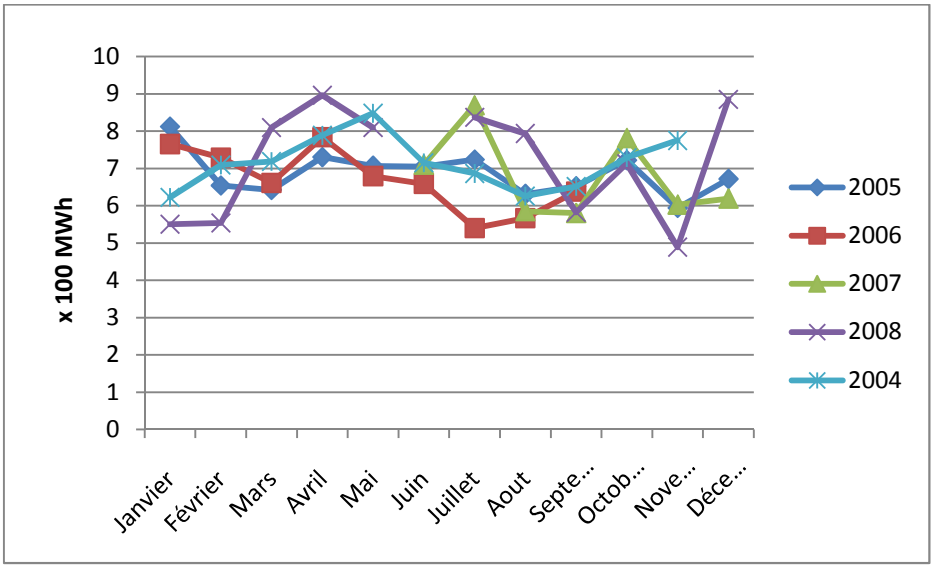


Figure 14: consommations énergétiques en MWh

b. Niveaux d'éclairement moyen

- Implantation bilatérale alternée (annexe 1)

Avenue Bourguiba :

- Candélabre : 10 m
- Lampes : SHP 250W
- Espacement : 59 m

Route des Niayes

- Candélabre : 10 m
- Lampes : 250 W
- Espacement : 25 m

Boulevard Dial Diop

- Candélabre : 10 m
- Lampes : SHP 250 W
- Espacement : 49.66 m

Rue 6

- Candélabre : 8 m
- Lampes : 250 W
- Espacement : 46.29 m

Méridien Président

- Candélabre : 9 m
- Lampes : SHP 250 W
- Espacement : 49.24 m

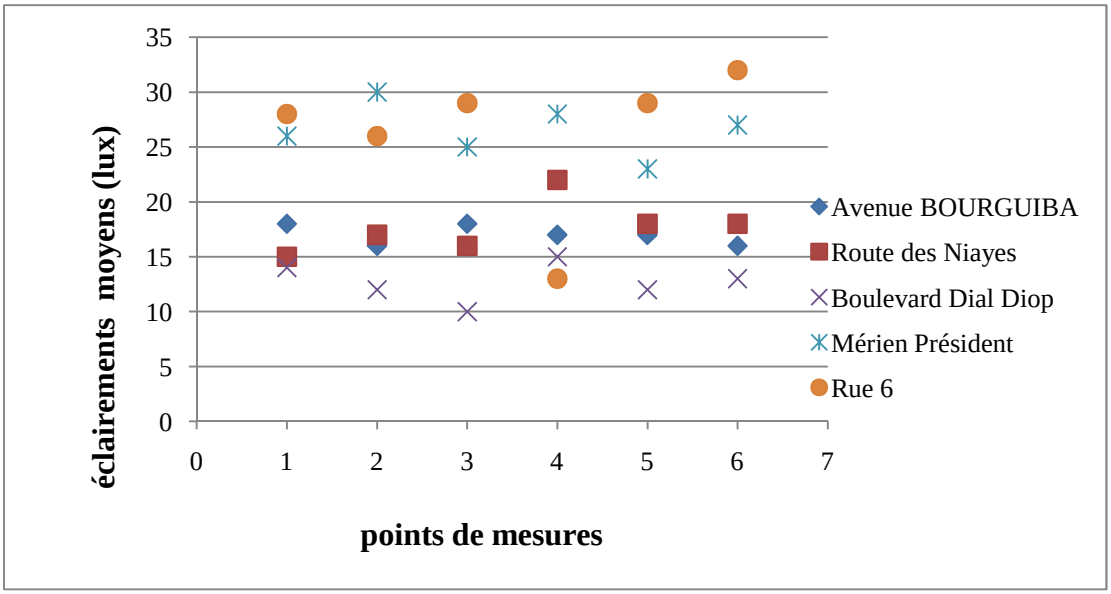


Figure 15: mesures d'éclairement moyen, implantation bilatéral alternée

.

- Implantation unilatérale (annexe 2)

Point E rue de Louga, Patte d'oie rue,

- Candélabre : 8 m
- Lampes : SHP 250W
- Espacement : 53 m, 40 m

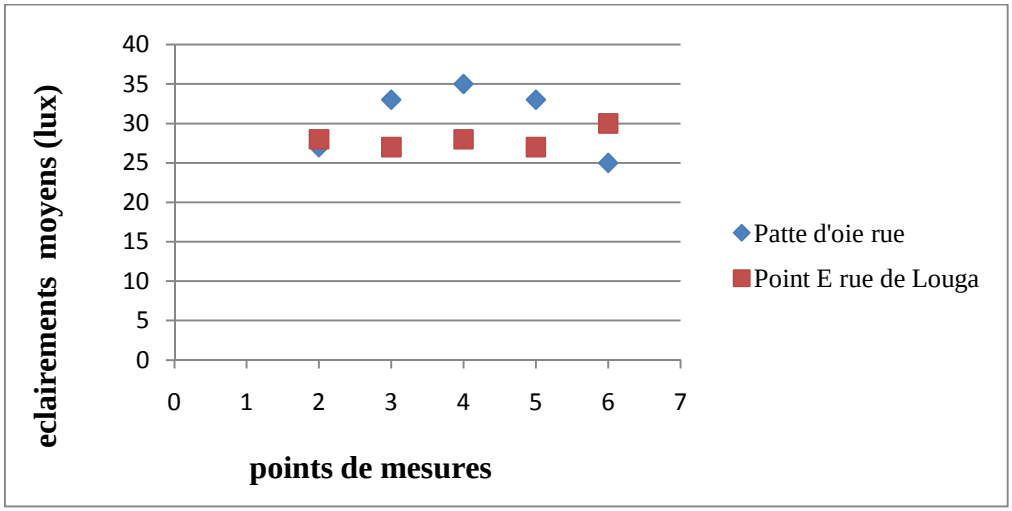


Figure 16: mesures d'éclairement moyen, implantation unilatérale

- Implantation sur terre plein central (annexe 3)

Corniche Ouest :

- Candélabre : 8 m
- Lampes : IM 150W
- Espacement : 22.66

Aéroport LSS

-Candélabre : 12 m

-Lampes : SHP 250 W

-Espacement : 40 m

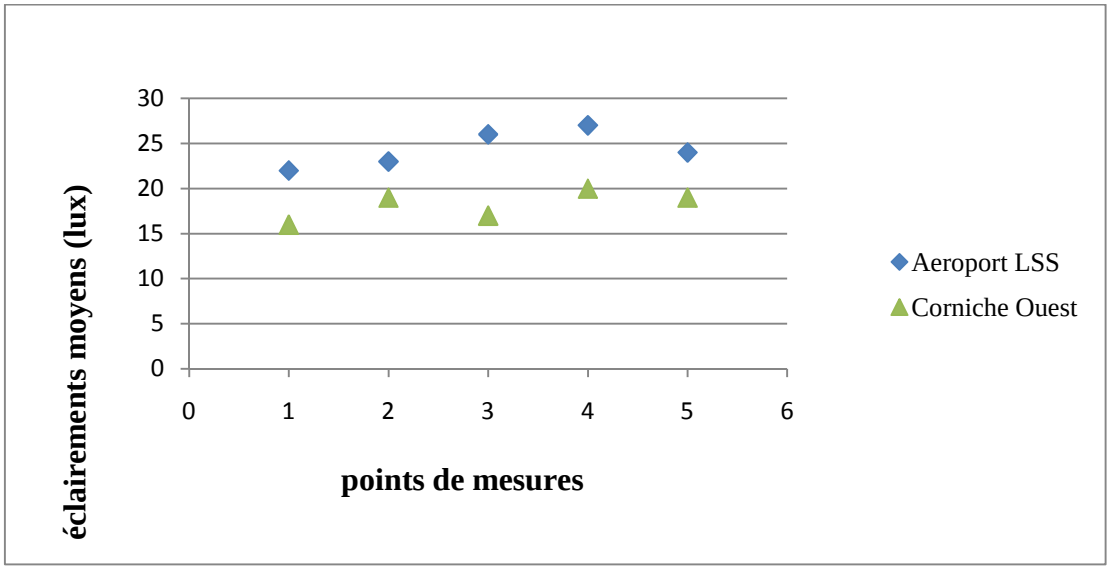


Figure 17: mesures d'éclairement moyen, implantation sur terre plein central

- Implantation bilatérale vis-à-vis (annexe 4)

UCAD, Avenue Faidherbe:

- Candélabre : 5.3 m
- Lampes : SHP 100W
- Espacement : 36 m

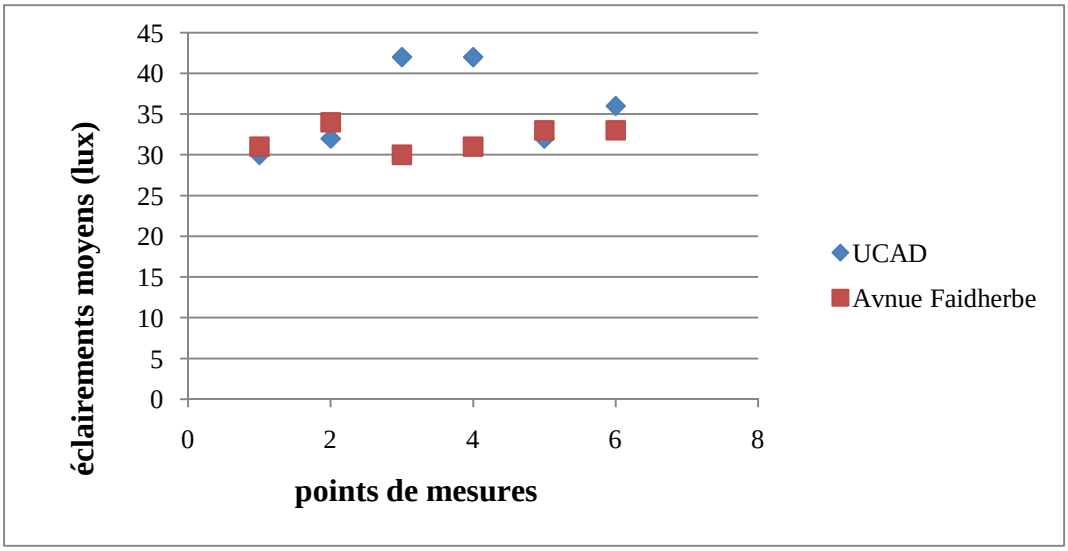


Figure 18: mesures d'éclairement moyen, implantation bilatéral vis-à-vis

V.2 Analyse et Discussion

a. Consommations énergétiques

En 2003 avant le projet de réhabilitation et de l'extension d'EP, la consommation mensuelle la plus élevée était en mois d'avril : 639 030 kWh soit 76 millions FCFA. De l'année de 2004, les consommations mensuelles étaient très importantes, soit une moyenne de 715 000 kWh. Par contre, de 2005 à 2006 il y a une baisse des consommations environ 678 000 kWh par mois. Tandis que pour l'année 2008, il y a une hausse importante des kWh avec un pic de 896 000 kWh en avril. Ces hausses de consommations correspondent aux nouvelles interventions faites dans le cadre de l'entretien pour remettre en service des luminaires en panne. C'est pourquoi, il faut s'attendre à une augmentation de consommation d'énergie pour les années à venir puisque l'effort sur l'entretien se poursuive. A contrario, si le taux de panne ne diminuait pas sensiblement après les travaux d'entretien entrepris, ceci voudrais dire que l'ensemble de l'installation ne permet plus d'obtenir un éclairage public satisfaisant malgré les dépenses consenties. En plus, il a été fréquemment constaté des luminaires allumés dans la journée. Ce phénomène peut être du à :

- des horloges mal réglées
- un problème mécanique du contact de l'horloge
- une horloge en panne (système d'avance)
- une action volontaire (service d'entretiens, malveillance etc.)

Au total, ces consommations énergétiques anormalement élevées nécessitent un contrôle qui peut conduire à la mairie à envisager au moins une modernisation de l'installation avec changement du type de lampes et éventuellement des équipements électriques. En plus ces consommations en énergie électrique et l'efficacité de l'éclairage public de la ville de Dakar dépendront de la conception choisie pour les luminaires, du niveau d'entretien et du contrat négocié avec le fournisseur d'énergie.

b. Niveaux d'éclairement moyen

Implantation bilatérale alternée : A ce niveau, il existe une disparité de niveaux d'éclairement. En effet, certaines rues comme rue 6 et celle du Méridien Président sont bien éclairées avec un éclairement moyen sensiblement égale à 27 lux. Par contre, Route des Niayes et celle du Boulevard Dial Diop ont un niveau d'éclairement trop faible. Cela peut être expliqué par la présence des zones d'ombre dues aux feuillages des arbres et l'espacement trop grand des candélabres environ 50 m surtout au Boulevard Dial Diop. En plus, l'état actuel de ces luminaires entraine un rendement détérioré de l'éclairement du fait que :

- d'ampoules ayant largement dépassées leur quota d'heures de fonctionnement
- d'optiques encrassées, détériorées ou absentes
- de vasque encrassées ou détériorées

Implantation unilatérale : Pour ce type d'implantation, le niveau d'éclairement est trop élevé dès fois supérieur à 35 lux comme c'est le cas de la rue de Louga au Point E. En plus, Pour les rues, cette implantation est plus employée, ce qui pourrait engendrer un surdimensionnement de la puissance à installer d'où une augmentation inutile de la consommation énergétique. Il serait préférable de diminuer la puissance des lampes pour avoir le niveau d'éclairement souhaité.

Implantation sur terre plein central : Ici, les résultats obtenus au niveau de l'aéroport sont acceptables, un éclairement moyen qui tourne autour de 25 lux. Par contre au niveau de la corniche, l'éclairement est très faible. Peut être, les lampes ont dépassé leur durée de vie car les règles de l'art sont bien respectées c'est-à-dire l'espacement des candélabres et la hauteur de feu. Cette disposition est beaucoup adoptée au niveau des autoroutes car elle offre une meilleure uniformité dans la répartition de la lumière sur la chaussée.

Implantation bilatérale vis-à-vis : Ce type d'implantation n'est pas économique et offre des niveaux d'éclairement trop élevés environ supérieur ou égale à 40 lux, c'est le cas de

l'université Cheikh Anta Diop de Dakar. Ce qui rend l'éclairement de très mauvaise qualité. Il serait plus intéressant d'augmenter l'espacement des candélabres ou diminuer la puissance des lampes pour faire des économies ou bien également choisir un autre type d'implantation plus économique.

En somme, les résultats des mesures amènent à constater un éclairement moyen très faible et une uniformité inférieure aux recommandations. En fait, au droit des luminaires, l'éclairement est maximal avec une tache de lumière ; au-delà, le niveau d'éclairement diminue très fortement, le plus souvent jusqu'à un niveau quasi nul entre deux candélabres à l'exception des dispositions bilatérales vis-à-vis. Il serait nécessaire, lors du renouvellement des luminaires, que ceux-ci soient choisis après un calcul d'éclairement conforme aux souhaits de la ville et aux recommandations de l'Association Française de l'Eclairage (A.F.E). En effet, le niveau d'éclairement agit directement sur la sécurité des personnes et des biens, sur la sécurité et la fluidité des circulations et sur la perception et la valorisation du cadre de vie. D'autre part, sur le plan strict de la circulation, il est préférable d'éviter le phénomène de tache de lumières. Ce phénomène est du à un manque d'uniformité de l'éclairement provoqué par la forme des optiques. Plus le niveau d'éclairement au sol augmente, plus la perception d'objets, d'obstacles ou de personnes augmente :

- diminution des accidents mettant en cause des automobiles,

- diminution des accidents des piétons sur les trottoirs.

c. Diagnostic du réseau d'éclairage public de la ville

Les travaux d'entretien et de réhabilitation permettent de veiller sur les installations qui sont très vétustes et dégradées. Dès fois, il arrive que quelques lampes ou tout un secteur ne s'allume pas (quartier Baobab). Cela peut être s'expliqué par :

- ampoules grillées
- un ou des départs en défaut au niveau du coffret de commande
- un déréglage de l'horloge

Lors de l'entretien, on a remarqué que tous éléments du réseau ont eu à subir des actions correctives dans l'ensemble des secteurs. Il y a certains composants dont les remplacements sont récurrents :

- des ampoules qui ont une durée de vie limitée

- des luminaires obsolètes
- des câbles de connexion pour corriger les défauts de continuité entre candélabre surtout dans les anciens quartiers de la ville(Cambérène). A ce niveau, de la vétusté des installations dont certains datent de l'époque coloniale, les câbles souterrains initialement posés sont hors d'usage et présentent des défauts d'isolement. Cependant les interrupteurs horaires, les appareillages (contacteurs) sont éprouvés par le temps. Certains d'entre eux sont déréglés ou hors service ce qui induit un gaspillage d'énergie, un surcout puisque certains secteurs sont éclairés en plein jour. En plus, la majorité des luminaires installés ont des appareillages ferromagnétiques, ce qui augmente également la consommation énergétique. En outre, des points lumineux ont parfois été ajoutés sans tenir compte de la capacité des armoires.

VI. Propositions de stratégies d'économie d'énergie

VI.1 Rénovation de l'éclairage public de la Corniche Ouest

Tableau 5: Données de la Corniche Ouest

Nombre de points lumineux	973
Hauteur des candélabres	8
Longueur réseau (km)	11
Date de réalisation	2008
Lampe (IM)	CDO-TT 150w PHLIPS
Entreprise	ETDE
Montant (FCFA)	2 053 995 804

Pour cette étude, les contraintes à respecter au niveau de la norme sont les suivantes voir (annexe 8):

- Voies urbaines
- Vitesse ≤ 50 km/h
- Motorisation avec véhicules lents
- Présence de cyclistes, piétons
- Complexité normale
- Présence de parking
- Trafic de cycliste normal
- Intersection ≤ 3 par Km

- Tache navigation normale

VI.1.1 Dimensionnement

a. Scénario 1 : SHP 100 W

- Longueur du tronçon : $L = 11\ 000\ m$
- Largeur du tronçon : $l = 14.5\ m$

La surface éclairée devient ainsi : $\boldsymbol{S = L \times l}$ Équation 1

$$\boldsymbol{S = 159\ 500\ m^2}$$

Avec un niveau d'éclairement moyen, $Emoy = 25\ lux$ nous pouvons calculer le flux lumineux

$$\boldsymbol{F = S \times E}$$ Équation 2

$$\boldsymbol{F = 3\ 987\ 500\ lumens}$$

Le flux lumineux des lampes (Fla) étant $Fla = 10\ 700\ lumens$, nous pouvons déduire le nombre théorique de lampes devant jalonner sur le tronçon :

$$\boldsymbol{Nthéo = \frac{F}{u \times v \times Fla}}$$ Équation 3

$$\boldsymbol{Nthéo = 908\ lampes}$$

Avec $u = 0.5$ comme coefficient d'utilisation et $v = 0.82$ comme facteur de dépréciation [4].

Jalonner en double crosse sur la longueur du tronçon, la distance entre deux candélabres est de :

$$\boldsymbol{e = \frac{L \times 2}{Nthéo}}$$ Équation 4

$$\boldsymbol{e = 24.2\ m}$$

Il convient de vérifier si la distance e satisfait aux règles de l'art. En effet :

- La hauteur de feu adoptée sur ce tronçon est $h = 8\ m$ et est inférieur à la largeur de la voie
- La distance $e = 24.2\ m$ est inférieure à 3.5 x h (28 m)
  Ce qui est convenable

b. Scénario 2 : LED 90 W

- Longueur du tronçon : $L = 11\ 000\ m$
- Largeur du tronçon : $l = 14.5\ m$
- La surface éclairée devient ainsi **:** $\boldsymbol{S = L \times l}$

$$\boldsymbol{S = 159\ 500\ m^2}$$

Avec un niveau d'éclairement moyen, $Emoy = 25\ lux$, nous pouvons calculer le flux lumineux

- $\boldsymbol{F = S \times E}$

$$\boldsymbol{F = 3\ 987\ 500\ lumens}$$

Le flux lumineux des lampes (Fla) étant $Fla = 9\ 750\ lumens$, nous pouvons déduire le nombre théorique de lampes devant jalonner sur le tronçon :

$$\boldsymbol{Nthéo = \frac{F}{u \times v \times Fla}} \qquad \text{Équation 5}$$

$$\boldsymbol{Nthéo = 973\ lampes}$$

Avec $u = 0.5$ comme coefficient d'utilisation et $v = 0.82$ comme facteur de dépréciation [4].

Jalonner en double crosse sur la longueur du tronçon, la distance entre deux candélabres est de :

$$\boldsymbol{e = \frac{L \times 2}{Nthéo}} \qquad \text{Équation 6}$$

$$\boldsymbol{e = 22.61\ m}$$

Il convient de vérifier si la distance e satisfait aux règles de l'art. En effet :

- La hauteur de feu adoptée sur ce tronçon est $h = 8\ m$ et est inférieur à la largeur de la voie
- La distance $e = 22.61\ m$ est inférieure à 3.5 x h (28 m)
  Ce qui est convenable
  <u>Remarque</u> : Dialux offre des meilleurs résultats car il tient compte tous les éléments photométriques tels que l'inclinaison des luminaires, les types de revêtements etc. Avec Dialux, l'éclairement moyen est largement supérieur à 25 lux pour les LED 90 W (voir annexes 9 et 10).

VI.1.2 Le remplacement des lampes

Le scénario 2 sera opté car ses performances photométriques sont plus intéressantes et il est conforme aux normes EN13201. En plus, la puissance à installée est plus faible. On obtient, une classe d'éclairage CE2 avec une situation B2 (voir tableau 3).

Tableau 6: comparaison des luminaires

	existant	**Scénario 2**
Type de luminaire	CDO-TT 150w PHILIPS (IM)	LED 90W Disano
Puissance unitaire (w)	150	90
Nombre	973	973
Flux lumineux (lm)	13500	9 750
Durée de vie (h)	12000	50000
Efficacité Lumineuse (lm/w)	90	108
Puissance totale Installée (w)	145950	87 570
Consommation annuelle (kWh)	**639 261**	**383 556**

L'implantation de luminaires des LED 90W sera examinée en conservant le même espacement et la même hauteur de feu. Les candélabres sont conservés et des luminaires de marque Disano seront utilisés.

Economie d'énergie réalisée est de : 255 704 kWh soit 40% de réduction de puissance.

VI.2 Amélioration de la qualité de l'éclairage

Pour mieux améliorer la qualité de l'éclairage de la ville, il est important de diminuer la puissance des lampes de certaines rues dont les valeurs de l'éclairement moyen dépassent 30 lux. Respecter également des règles de l'art pour les types d'implantation c'est-à-dire l'espacement des candélabres et la hauteur de feu. En plus, remplacer systématiquement les lampes dépréciées. Ensuite, utiliser les luminaires LED qui sont intéressants pour des faibles puissances surtout dans les quartiers. En outre, d'employer le logiciel Dialux pour avoir des niveaux d'éclairement souhaités. La maintenance également est indispensable pour conserver un éclairage de qualité et la satisfaction des usagers car l'empoussièrement et le vieillissement des lampes provoquent autant de pertes (jusqu'à 35 % du niveau d'éclairement).

VI.3 Utilisation de l'interrupteur crépusculaire astronomique (IC Astro)

L'une des actions à mener pour réduire la consommation d'énergie concerne le système de commande. Le système interrupteur crépusculaire astronomique de Schneider électrique peut occasionner une baisse de consommation de 30%[2].

a. Appliquons l'IC Astro sur la Corniche Ouest

$$Consommation\ annuelle\ après\ la\ rénovation\ sans\ IC\ Astro\ =\ 383\ 556\ kWh$$

$$consommation\ annuelle\ de\ la\ rénovation\ avec\ IC\ Astro = 383556\ \times\ 0.3$$

$$consommation\ annuelle\ de\ la\ rénovation\ avec\ IC\ Astro = 115\ 067\ kWh$$

Le cout du kWh est de : 120 FCFA pour tous nos calculs.

Tableau 5: économies réalisées avec IC Astro sur la Corniche Ouest

Economiseurs d'énergie	**Energie Economisée sur la Corniche Ouest**			**CO_2 économisée**
	kWh /an	FCFA /an	%	tonne
IC Astro	524 194	62 903 280	30%	351

Remarque : pour plus de détails sur le calcul de la quantité de CO_2 économisé (voir VII.2 Impact environnemental)

b. Appliquons l'IC Astro sur tous les postes de la ville pour l'année 2012

Prenons comme base la consommation moyenne mensuelle de 2008 : 720 150 kWh

- Pour l'année 2012, en considérant un accroissement de 20% de la consommation l'année 2008.

$$La\ consommation\ moyenne\ mensuelle\ en\ 2012 =\ 1.2\ \times\ 720\ 150\ =\ 864\ 180\ kWh$$

$$La\ consommation\ moyenne\ annuelle\ en\ 2012 =\ 864\ 180\ \times\ 12 = 10\ 370\ 160\ kWh$$

[2] Catalogue Schneider Electrique : solutions tertiaires en efficacité énergétique

Tableau 7: économies réalisées avec IC Astro pour tous les postes de la ville

Economiseurs d'énergie	**Energie Economisée en 2012**			**CO_2 économisée**
	kWh	Millions FCFA	%	tonne
IC Astro	3 111 048	373	30%	2 084

VI.4 Utilisation de l'armoire de commande et de régulation de puissance : REVERBERI

a. Appliquons REVERBERI sur la route des Niayes.

Données

- Point lumineux : 140
- Candélabres : 10 m
- Lampes : SHP 250 W
- Longueur du tronçon : 3 500 m

✓ **Cycle de fonctionnement**

Sur cette année, nous pouvons supposer que la mise en marche de l'éclairage public se réalise autour de 19h et son extinction autour de 07h00. Nous pouvons approximer le temps de fonctionnement nocturne moyen à douze heures par jour (12h/jr) soit 4380 h/an.

Les heures d'allumage et d'extinction dépendent directement du signal infrarouge reçu par le capteur à infrarouge. Dans le cycle de variation programmé, nous limitons la tension maximale 220 V, qui sera appliquée en période de trafic important.

Le cycle de fonctionnement[3] réglé sur l'automate du système REVERBERI avec les lampes SHP 250 W lors de la mise en place sera le suivant, les économies étant estimées en prenant une tension SENELEC de référence mesurée de 230 V.

[3] Catalogue France 2002, BH Technologies : Armoires de commande et de régulation de puissance pour l'éclairage public, «REVERBERI »

Tableau 8: cycle de fonctionnement REVERBERI

heures	tension (V)	régime de puissance	puissance nominale
allumage 19h	220	régime élevé	85%
20h			
21h	210	régime moyen	76,9%
22h			
23h	190	régime faible	57,10%
00h			
01h			
02h			
03h			
04h			
05h			
06h	210	régime moyen	76,9%
extinction 07h00			

Tableau 9: résumé du cycle de fonctionnement REVERBERI

de l'allumage 19h-20h	**2h à 15 %** de réduction de puissance
de 21h à 22h	**2h à 23,1 %** de réduction de puissance
de 23h à 05h	**7h à 42,9%** de réduction de puissance
de 06h à 07h	**1h à 23,1%** de réduction de puissance

$$\frac{(2 \times 0.15)+(3 \times 0.231)+(7 \times 0.429)}{12} = 30\% \qquad \text{Équation 7}$$

La variation ainsi programmé permet de réaliser une économie d'énergie 30 % sur une année pour une tension amont de la SENELEC de 230 V.

La consommation effective moyenne de l'installation ne serait alors plus que de 70 % de celle du réseau initial avec système REVERBERI.

$$Consommation\ sans\ REVERBERI\ = 140\ \times\ 250\ \times\ 4380 = \mathbf{191\ 625kWh}$$

$$Consommation\ avec\ REVERBERI\ = 191\ 625\ \times\ 0.7 = \mathbf{134\ 137\ kWh}$$

Tableau 10: économies réalisées avec REVERBERI sur la route des Niayes

Economiseurs d'énergie	**Energie Economisée**			**CO_2 économisée**
	kWh /an	FCFA /an	%	tonne
REVERBERI	57 488	6 898 500	30%	38

VII. Etude économique et impact environnemental de la rénovation Corniche Ouest

La mise en œuvre du scénario 2 avec l'utilisation de l'IC Astro définie précédemment nécessite un investissement que nous déterminerons dans ce chapitre ainsi que le cout de fonctionnement et les gains générés.

L'investissement comprend le cout d'acquisition du matériel à installer et le cout d'exploitation. Or, le cout d'exploitation est constitué des couts de l'énergie et de la maintenance. Nous comparons l'économie d'énergie issue du remplacement des lampes par rapport à la situation existante (iodure métallique de 150 W et LED de 90 W) comme étant le gain de notre projet. La durée de vie de notre installation est de 10 ans. En plus, l'investissement et le gain financier seront calculés sur cette durée de vie.

VII. 1 Etude économique

VII.1.1 Investissement

L'investissement est une somme de coûts direct d'acquisition et des coûts d'exploitation.

a. Le cout d'acquisition

IC Astro : fournisseur ⟶ RadioSpare

Luminaire LED : fournisseur ⟶ frigomarket

Tableau 11: cout d'acquisition

Désignation	Prix unitaire (FCFA)	Unité	Nombre	Prix HTVA(FCFA)
Luminaire LED	347 614	1	973	338 228 422
IC Astro	162 688	1	13	2 114 944
			Total	**340 343 366**

L'acquisition est de : $\boldsymbol{A = 340\ 343\ 366\ FCFA}$

b. Le cout d'exploitation

- ✓ Les couts de maintenance sont inclus le cout du changement des lampes, du nettoyage des luminaires et des réparations probables.
- ✓ Le cout de l'énergie sera déterminé à partir du prix du kWh.

c. Cout de maintenance

Le cout de maintenance est constitué de:

- ✓ Nettoyage des luminaires : 1 000 FCFA par luminaire tous les 3 mois
- ✓ Réparation : 1 000 000 FCFA somme forfaitaire par an

Tableau 12: cout de maintenance

Désignation	Prix unitaire (FCFA)	Unité	Nombre	Prix HTVA(FCFA)
nettoyage des luminaires	1 000	1	38 920	38 902 000
réparation	1 000 000	1	**10**	10 000 000
			Total (H.T)	**48 920 000**
			Total (T.T.C)	**57 725 600**

Nota : TVA à 18 %

Le cout de maintenance est de : **57 725 600 FCFA**

d. Le cout de l'énergie

La consommation annuelle est de : 115 067 kWh

Le prix du kWh est de **:** 120 FCFA

Le cout de l'énergie est de : **138 080 400 FCFA**

<u>En résumé</u> :

Le cout d'exploitation est de : **195 806 000 FCFA**

Le cout d'investissement est de : **536 149 366 FCFA**

VII.1.2 Le gain financier

Il est calculé en fonction du prix du kWh (120 FCFA) avec les économies d'énergie réalisées par rapport à la consommation actuelle.

Economie d'énergie annuelle : 524 194 kWh

Le gain financier est de : **629 032 800 FCFA**

VII.1.3 Le temps de retour sur investissement

Le temps de retour sur investissement se calcule avec la formule suivante :

$$Temps\ de\ retour\ sur\ investissement = \frac{Investissement}{Gain\ financier} \qquad \text{Équation 8}$$

Le temps de retour sur investissement est de : **9 mois**

VII.2 Impact environnemental

a. Evaluation de la quantité de CO2 évitée

T out projet qui économise de l'énergie permet de réduire les rejets dans l'atmosphère du gaz carbonique ($C0_2$). Au Sénégal un kWh produit émet en moyenne **0,67 kg $C0_2$**[4]. Ainsi nous avons :

$$\boldsymbol{Q_{CO2}(tonnes\ CO_2) = Quantité\ d'énergie\ économisée\ \times\ 0,67 \times (1/1000)} \qquad \text{Équation 9}$$

Energie économisée est de: 524 194 kWh

$$\boldsymbol{Q_{CO2}(tonnes\ CO_2) = 351}$$

b. Eligibilité au MDP

En effet le terme MDP signifie Mécanisme pour le développement propre. Il fait partie des deux mécanismes arrêtés au protocole de Kyoto en 1997. Le MDP tout comme le second mécanisme MOC (Mise en œuvre conjointe) vise à encourager tout projet luttant contre

[4] Direction qualité, sécurité et environnement de la SENELEC

les émissions du CO2 dans le monde. La quantité de CO_2 évité peut être vendue sur les marchés : une tonne équivaut à un crédit carbone qui coûte **10 €.**

$$\boldsymbol{économie\ susceptible\ (CFA) = Q_{CO2}(tonnes\ CO_2) \times 10 \times 655,5} \qquad \text{Équation 10}$$

$$\boldsymbol{économie\ susceptible\ (CFA) = 2\ 300\ 805}$$

L'un des critères d'éligibilité au MPD est la quantité de CO_2 qu'un projet donné permet d'éviter : tous projets permettant d'éviter environ 5000 tonnes de CO_2 par an est éligible au MDP. Notre projet économisant seulement 351 tonnes de CO_2, n'est donc pas éligible au MDP.

VIII. Conclusion et recommandations

Au terme de notre étude, il convient de noter que l'utilisation de la commande l'IC Astro, de l'armoire REVERBERI et les lampes LED dans l'éclairage public s'inscrive comme une solution essentielle pour la réduction de la consommation énergétique et de la limitation des émissions des gaz à effets de serres. L'application de l'IC Astro pour l'année 2012 dans tous les postes de la ville de Dakar nous permettrait de réaliser une économie de **373 millions de FCFA**. Tandis que l'utilisation de l'armoire REVERBERI sur la route des Niayes ferait une économie de **6 898 500 FCFA** pour l'année 2012. En plus, la rénovation que nous avons effectuée au niveau de la Corniche Ouest en remplaçant les iodures métalliques de 150 W par les LED de 90 W et en utilisant la commande IC Astro dans les armoires, une économie de **62 903 280 FCFA/an** est attendue, ce qui permet d'envisager un retour sur investissement de **9 mois.** En outre, l'impact de cette rénovation est bien entendu environnemental : avec **524 194 kWh** économisés par an, la ville de Dakar évite l'émission de **351 tonnes de CO_2**. En résumé, le système REVERBERI nous permet de programmer intelligemment la maintenance préventive et le remplacement des lampes afin de réduire nos coûts tout en augmentant la sécurité du public sur tout le secteur. Pour terminer, nous recommandons aux responsables de la Direction de l'Aménagement Urbain de la ville de Dakar :

- ✓ D'utiliser l'armoire REVERBERI et l'IC Astro qui peuvent réaliser des économies d'énergie pouvant atteindre jusqu'à 30 ou 50%.
- ✓ De réfléchir sur les nouvelles sources d'éclairage public comme les lampadaires solaires ou éoliens comme la région a un potentiel en énergie renouvelable.
- ✓ De remplacer systématiquement les ballasts ferromagnétiques par ceux d'électroniques qui peuvent faire des économies de plus de 15%.
- ✓ De supprimer les éclairages dont l'éclairement dépasse 30 lux et remplacer systématiquement les lampes dépréciées afin d'améliorer la qualité de l'éclairage.

Bibliographie

1. *Conseil économique et social du Sénégal mandature 2009-2014, Rapport général des travaux de la première session ordinaire de l'année 2010 : p.190.*
2. www.ademe.fr , *visité le 15/05/2011*
3. C. YEZOUMA, *Cours Eclairage, 2IE (ex groupe EIER/ETSHER) : Ouagadougou. P.1*
4. LUX, *Société d'éditions, Recommandations relatives à l'éclairage des voies publiques, rédigées par l'Association française de l'Eclairage, 52 boulevard Malesherbes-75008 Paris*
5. R. BALIMA, *cours EIER tome 7 Eclairage Public, 2IE (ex groupe EIER/ETSHER) : Ouagadougou. P.9*
6. *Rapport diagnostique de la ville de Dakar, 2003 (Direction de l'Aménagement Urbain)*
7. Oerlikon, *journaliste AG, documentation LED et efficacité énergétique, octobre 2010, topten, Hardstrasse 322a, 8005 Zurich*
8. *Réunion du bureau et de la commission de l'éclairage public, samedi 13 décembre 2008. P.8*
9. www.schneider-electric.be , *visité le 25/03/2011*
10. C.MARADON, *expérimentation REVERBERI : système d'économie d'énergie en éclairage public, 2008, P.5*
11. www.afe-eclairage.com.fr , *visité 15/03/2011*

Annexes

Annexe 1

	Implantation bilatérale alternée, (Emoy en lux)				
Points de mesure	Avenue BOURGUIBA	Route des Niayes	Boulevard Dial Diop	Rue 6	Méridien Président
1	18	15	14	28	26
2	16	17	12	26	30
3	18	16	10	29	25
4	17	22	15	13	28
5	17	18	12	29	23
6	16	18	13	32	27

Annexe 2

	Implantation Unilatéral, (Emoy en lux)	
Points de mesure	Patte d'oie rue	Point E rue de Louga
1	26	31
2	27	28
3	33	27
4	35	28
5	33	27
6	25	30

Annexe 3

	Implantation sur terre plein central, (Emoy en lux)	
Points de mesure	Aeroport LSS	Corniche Ouest
1	22	16
2	23	19
3	26	17
4	27	20
5	24	19

Annexe 4

	Implantation Bilatéral vis-à-vis,(Emoy en lux)	
Points de mesure	UCAD	Avenue Faidherbe
1	30	31
2	32	34
3	42	30
4	42	31
5	32	33
6	36	33

Annexe 5

	2004	2005	2006	2007	2008
Mois	**Nombre de kWh**	**Nombre de kWh**	**Nombre de kWh**	**Nombre de kWh**	**Nombre de kWh**
Janvier	622710	812436	765640		550660
Février	709420	654310	729190		553870
Mars	718920	642720	661230		809930
Avril	788920	730630	784090		896260
Mai	848040	707160	679640		809930
Juin	715550	705170	659050	710340	
Juillet	686670	723940	540530	869900	837200
Aout	626190	631500	567010	585340	793922
Septembre	651770	652160	638090	580340	582550
Octobre	728960	722460		781890	712896
Novembre	775110	594390		603040	489108
Décembre		671990		619120	885330

Annexe 6

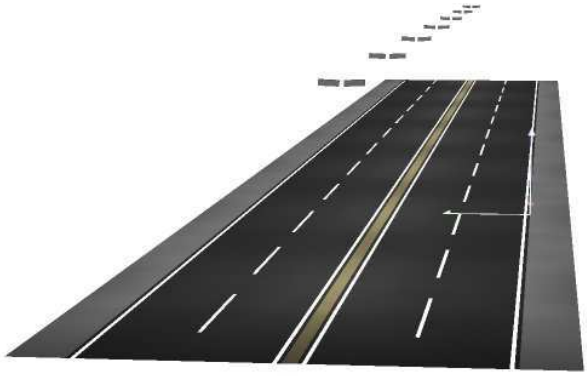
Caractéristiques de fonctionnement de la gamme RIVERBERI	
Tension nominale d'entrée	3 x 400 V + N -50-60 Hz
	230 V - 50-60 Hz (monophasé)
variation de tension en entrée	175-264 V
tension de sortie régime normal	programmable: 200-245V
tension de sortie régime réduit	programmable: 150-230V
tension de sortie régime allumage	programmable: 180-230V
Précision de la tension de sortie	+ ou - 1 % soit + ou - 2 V
variation admissible de la charge	0-100%
vitesse de stabilisation	meilleure que 40ms/Volt
vitesse de régulation de la tension en montée	programmable: 1-50 V/min
vitesse de régulation de la tension en descente	programmable: 1-15 V/min
facteur de puissance de la charge	sans influence sur le fonctionnement
distorsion harmonique introduite	aucune
rendement	meilleure que 98%
Températures extrêmes d'exercice	de -20 à +55 °C
taux d'humidité	de 0% à 97% - sans condensation
système de refroidissement	naturel/pulsé (selon modèle ou version
indice de protection	IP 44
classe d'isolation	Classe I (classe II en optique)
certification de produit	marquage CE/basse tension et CEM)
normes applicables	EN 60 439-1, EI I7-13/1 ET UL 916

Annexe 7

Caractéristiques techniques d'IC Astro
caractéristiques électriques
Alimentation 230V CA + OU - 10% - 50/60 HZ
Mémoire: 14 commutations (hors lever/coucher du soleil)
Précision de commutation: 1 seconde
Précision de l'heure: + ou - 1 seconde/jour
sauvegarde du programme et de l'heure par pile lithium:
durée de 12 ans
autonomie 6 ans
Programmation de la longitude
moins 180°(EST)….plus 180°(OUEST) par pas de 1°
Programmation de la latitude
moins 90°(SUD)….plus 90°(NORD) par pas de 1°
consommation
IC Astro: 18 mA
entrée de forçage: < 0,5 mA
caractéristiques mécaniques
bornes de raccordement
capacité maxi: 6 mm²
encombrement: 2,5 modules de 18 mm (45 mm)
masse: 90g

Annexe 8

Annexe 9

Disano 1668 Brera LED Disano 1668 99 LED
Flux lumineux de(s) lampe(s): 9750 lm
Puissance par luminaire: 90.0 W
Profil de la rue
Trottoir 1 (Largeur: 2.000 m)
Chaussée 2 (Largeur: 7.000 m, Nombre de voies: 2, Revêtement: R3, q0: 0.070
Terre-plein central 1 (Largeur: 0.500 m, Hauteur: 0.000 m)
Trottoir 1 (Largeur: 2.000 m)
Chaussée 2 (Largeur: 7.000 m, Nombre de voies: 2, Revêtement: R3, q0: 0.070)
Facteur de maintenance: 0.80
Disposition des luminaires
Disposition: sur séparateur
Espacement poteau: 22.660 m
Hauteur de montage : 8.000 m
Inclinaison du bras : 2.5 °
Longueur du bras : 0.500 m
Champ d'évaluation Chaussée
Lmoy [cd/m²]: 2.11
U0: 0.4
Ul: 0.7
TI [%]: 9
SR: 0.9
Emoy [lx]: 34
Emin [lx]: 19
Emax [lx]: 61
Emin / Emoy: 0.557
Emin / Emax: 0.316

Annexe 10