République Algérienne Démocratique et Populaire
Premier Ministre
Commissariat aux Energies Renouvelables
et à l'Efficacité Energétique

ECLAIRAGE PUBLIC EN ALGERIE

Référentiel National pour une Lumière de Qualité et Ecoénergétique

Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique

EDITION 2021

CEREFE
المحافظة للطاقات المتجددة و الفعالية الطاقوية

© CEREFE 2021

Tous droits réservés. La reproduction de tout ou partie de ce document sans autorisation préalable est interdite.

CEREFE (2021) : Eclairage Public en Algérie : Référentiel National pour une Lumière de Qualité et Ecoénergétique
(Edition 2021) : Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique, Premier Ministre, Alger.

EISSN/ISSN 2716-8654

Pour information ou commentaire : Report@cerefe.gov.dz
www.cerefe.gov.dz

Editeur

Dr. Messaoud KHELIF - *Secrétaire Général*

Directeur de Publication

Prof. Noureddine YASSAA - *Commissaire*

A propos du CEREFE

Le Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique (CEREFE) est un établissement public doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière. Il est créé auprès du Premier Ministre par décret exécutif n°19-280 du 21 Safar 1441 correspondant au 20 Octobre 2019, modifié et complété par le décret exécutif n° 21-95 du 26 Rajab 1442 correspondant au 10 mars 2021.

Le CEREFE contribue au développement national et sectoriel des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Il est chargé d'évaluer la politique nationale de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, les outils mobilisés pour sa mise en œuvre ainsi que leurs retombées et d'élaborer les rapports d'évaluation annuels y afférents.

CEREFE
المحافظة للطاقات المتجددة و الفعالية الطاقوية

ECLAIRAGE PUBLIC EN ALGERIE

Référentiel National pour une Lumière de Qualité et Ecoénergétique

PREFACE

Une année pratiquement jour pour jour après la publication de son premier rapport 2020 intitulé «Transition Energétique en Algérie: Leçons, Etat des Lieux et Perspectives pour un Développement Accéléré des Energies renouvelables», le Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique (CEREFE) est de nouveau au rendez-vous avec le sujet, à travers le thème de l'éclairage public. En effet, alerté par les factures d'électricité élevées auxquelles font face les collectivités locales, dont la part de l'éclairage représente en moyenne plus de la moitié, le CEREFE s'est assigné le devoir d'analyser objectivement la situation sous tous ses angles, avant de proposer les solutions qui s'imposent. C'est dans cette optique et au vu des premiers éléments recueillis sur le terrain, en plus de discussions franches menées sur le sujet avec de nombreux opérateurs et professionnels du secteur, que l'urgence de la disponibilité d'un document de référence ou « référentiel » dans le domaine, nous est apparue comme un préalable absolu. L'objectif attendu derrière l'élaboration d'un tel document est simple : aider à unifier au moins les connaissances de base nécessaires, pour permettre d'aborder de manière collective et avec le minimum requis de rationalité, un sujet aussi vaste que l'éclairage, dont on oublie souvent que les vrais fondements reposent sur l'interaction lumière-vision. En effet, la modélisation de cette dernière qui n'a cessé d'être réajustée au rythme des progrès accomplis aux confins des sciences fondamentales et développements technologiques, n'a jamais été aussi bien exploitée et mise à profit dans le monde de l'éclairage, comme c'est le cas avec l'avènement assez récent des diodes électroluminescentes (LED) et la quête soutenue d'efficacité énergétique. Ainsi, chercher à tirer le maximum d'avantages liés à une utilisation massive de cette nouvelle technologie comme source de lumière, nécessite manifestement plus que des prescriptions techniques sur un cahier des charges. Ceci est notamment le cas lorsque ces spécifications sont faites sans l'appui d'un minimum d'études préliminaires et de textes réglementaires permettant de les exécuter et évaluer proprement. Dans le même contexte, un projet d'éclairage solaire avec les mêmes prescriptions de qualité et d'efficacité énergétique que celles demandées dans le cas d'utilisation du réseau électrique comme source d'alimentation, devient manifestement encore plus exigeant. En effet, en parallèle avec l'efficacité de la source lumineuse, exclusivement à base de LED, que le concepteur doit assurer en premier, il doit également veiller à l'optimisation de toute la chaîne de production locale d'électricité solaire de jour et son stockage pour une utilisation différée la nuit.

En tout état de cause, s'agissant d'éclairage public, constitué généralement de systèmes déployés en très grands nombres, il y a manifestement intérêt à explorer les moindres recoins pouvant contribuer à un quelconque gain en efficacité, dont la mutualisation peut se traduire par des économies substantielles

sur la consommation électrique globale. Dans cette optique, il faut dire que la facture énergétique de l'éclairage constitue à elle seule 15 à 20 % de la production mondiale d'électricité, alors que la poussée de l'urbanisme ne cesse de demander toujours plus, notamment avec le développement croissant des activités nocturnes.

L'analyse sommaire qui vient d'être présentée quant aux vrais enjeux visés par l'efficacité énergétique telle qu'elle est universellement perçue dans le domaine de l'éclairage public, solaire compris, laisse en effet très peu de place à l'improvisation dans le domaine. En effet, la stratégie d'éclairage visant des économies de l'ordre de 60 à 70% à l'horizon 2030, adoptée et déjà largement entamée dans un grand nombre de pays à travers une introduction massive des LED, ne peut être menée à terme localement avec de vraies chances de succès, sans un cadrage précis de la conduite des projets inscrits dans ce sens. A cet effet, nous pensons que le présent référentiel tel qu'il a été préparé par le Docteur Messaoud KHELIF, Secrétaire Général du CEREFE, constitue une plateforme très riche en enseignements utiles à tout exploitant, désirant s'attaquer à des projets d'éclairage public avec la rigueur requise. La longue expérience de l'auteur comme enseignant-chercheur dans le domaine du génie électrique, notamment appliqué aux ressources renouvelables, y apparaît en effet clairement à travers l'enchaînement très pédagogique qui caractérise le document présenté. Ainsi et malgré le contenu très dense de ce dernier, sa lecture reste agréable et largement facilitée par des illustrations très représentatives de chaque contexte technique abordé, en vue de le rendre accessible à tous.

Concrètement, et compte tenu de la consistance des programmes nationaux d'éclairage public, notamment solaire, tels que ceux initiés en réponse aux instructions de Monsieur le Président de la République lors de la réunion du Conseil des Ministres du 08 Mars 2020 et réitérées le 21 Novembre dernier, ce référentiel constitue à coup sûr un bon support quant à leur exécution avec la rigueur et l'efficacité souhaités. En effet, les collectivités locales et autres maîtres d'ouvrages concernés par l'éclairage public au niveau national, disposent désormais d'une plateforme commune sur laquelle ils peuvent s'appuyer afin d'élaborer des cahiers des charges en la matière, dont les prescriptions expriment de manière claire les besoins au plus près de la demande. Dans cette voie, la quête d'allier qualité, durabilité et efficacité énergétique, à travers des réalisations d'éclairage dignes des grands investissements consentis par les pouvoirs publics, reste l'ultime souhait qu'on puisse exprimer, pour voir ce volet contribuer efficacement à la transition énergétique que le pays s'est fixé.

Nous espérons enfin que cette initiative du CEREFE, puisse se perpétuer à travers la mise à la disposition des divers opérateurs concernés par les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique, d'autres guides utiles à une mise en œuvre efficace des divers programmes nationaux en la matière.

Prof. Noureddine Yassaa
Commissaire aux Energies Renouvelables
et à l'Efficacité Energétique

نور الدين ياسع

SOMMAIRE

Préface	4
Résumé Analytique	14
Chapitre I Lumière, vision et éléments de photométrie	16
I.1. Evolution des connaissances sur la lumière	17
I.1.1. Newton et la naissance de la théorie des couleurs de la lumière	17
I.1.2. Nature de la lumière : Corpusculaire ou ondulatoire	17
I.1.3. Lumière, rayonnement du corps noir et notion de quantum d'énergie	18
I.2. Fondements essentiels de l'éclairage artificiel	19
I.2.1. Sources lumineuses et définitions photométriques essentielles	20
I.2.1.1. Flux lumineux	20
I.2.1.2. Intensité lumineuse	20
I.2.1.3. Eclairement	21
I.2.1.4. Luminance	21
I.2.1.5. Indice de Rendu de Couleur (IRC)	22
I.2.1.6. Efficacité lumineuse	23
I.2.1.7. Température de Couleur	24
I.2.1.8. Le soleil et la définition d'une lumière de référence	25
I.2.1.9. Confort visuel et incidence sur l'efficacité de l'éclairage artificiel	26
I.3. Sources de lumière artificielle et évolutions technologiques	27
I.3.1. Lampes à incandescence	28
I.3.1.1. Lampes à incandescence halogènes	29
I.3.1.2. Lampes à incandescence : Efficacité et qualité de la lumière	30
I.3.2. Lampes à luminescence	31
I.3.2.1. Lampes à décharge et principe de fonctionnement	32
I.3.2.2. Lampes à décharge et éclairage public	32
I.3.2.3. Classification des lampes à décharge	33
I.3.2.4. Lampes à décharge au mercure basse pression	33
I.3.2.5. Lampes fluorescentes à tube	34
I.3.2.6. Lampes fluorescentes compactes (CFL)	37
I.3.2.7. Lampes à induction	39
I.3.2.8. Lampes à décharge au mercure haute pression	40
I.3.2.9. Lampes à décharge aux halogénures métalliques (MH) (ou à iodures)	42
I.3.2.10. Lampes au sodium	44
I.3.2.10.1. Lampes au sodium basse pression	44
I.3.2.10.2. Lampes au sodium à haute pression	46
I.3.3. Lampes à Diodes Electroluminescentes ou LED	49
I.3.3.1. Lumière blanche à base de LED RGB	50
I.3.3.2. LED bleue phosphore et synthèse de la lumière blanche	52

I.3.3.2.1. LED SMD ou 'mid-power'	53
I.3.3.2.2. LED haute puissance ou 'High Power'	55
I.3.3.2.3. LED COB (Chip On Board)	57
I.3.3.3. Vision scotopique et nouveau concept d'efficacité lumineuse	60
Chapitre II Lampes, appareillages associés et premiers éléments d'économie d'énergie	64
II.1. Ballast	65
II.1.1. Ballast magnétique	65
II.1.1.1. Ballast magnétique avec amorceur (Starter)	65
II.1.1.2. Problèmes de mauvaise adaptation Ballasts magnétique-lampe	66
II.1.1.2.1. Risques de défauts liés au démarrage	66
II.1.1.2.2. Risques de défauts en régime établi	67
II.1.2. Ballast électronique	68
II.1.2.1. Ballast électronique pour lampes à LED	70
II.1.2.1.1. Driver de LED à courant constant	70
II.1.2.1.2. Driver de LED à tension constante	71
II.2. Ballasts drivers et énergie réactive	73
II.2.1. Facteur de puissance de l'ensemble lampe-ballast	74
II.2.2. Taux Harmonique de Distorsion (THD)	74
II.3. Contrôle de l'intensité lumineuse (Gradation) et économie d'énergie	75
II.3.1. Gradation du flux lumineux des lampes à décharges (HID)	75
II.3.2. Gradation et économie d'énergie avec les lampes à LED	77
Chapitre III Dispositifs d'éclairage public et éléments de déploiement	78
III.1. Eclairage public et moyens de déploiement	79
III.1.1. Luminaires	79
III.1.1.1. Principaux constituants d'un luminaire	80
III.1.1.2. Rendement du Luminaire	81
III.1.2. Lampadaires et éclairement des espaces publics	82
III.2. Eléments de conception d'un éclairage public	82
III.2.1. Eléments de photométrie et structure appropriée du point lumineux	82
III.2.2. Structure finale d'un dispositif d'éclairage public	84
Chapitre IV Eclairage public, efficacité énergétique et éléments de réglementation	88
IV.1. Sources lumineuses, efficacité énergétique et étiquetage	89
IV.2. Eléments de protection et étiquetage des sources lumineuses	90
IV.2.1. Indices de protection IP et IK	91
IV.2.2. Protection d'isolation	92
Chapitre V Eclairage Solaire	94
V.1. Fondements de l'éclairage solaire	95
V.1.1. Lampadaire solaire d'éclairage public	95
V-1.1.1. Structure globale d'un Lampadaire solaire	97
V.1.1.2. Structure split ou 'all-in three'	98
V.1.1.3. Structure intégrée ou All-in one	101
V.2. Eléments de conception et dimensionnement d'un lampadaire solaire	102

V.2.1. Prescriptions préliminaires	103
V.2.2. Source lumineuse	103
V.2.3. Mode d'éclairage solaire et éléments de dimensionnement	104
V.2.3.1.Luminosité contrôlée, économie d'énergie et autonomie	105
V.2.3.2. Evaluation des besoins quotidiens en électricité solaire	106
V.2.4. Dimensionnement des constituants essentiels	107
V.2.4.1. Champ photovoltaïque	107
V.2.4.1.1. Lieu de déploiement et évaluation de la puissance crête	110
V.2.4.1.2. Eléments de choix des panneaux photovoltaïques	111
V.2.4.2. Batterie de stockage	112
V.2.4.2.1. Stockage électrochimique et batteries solaires	114
V.2.4.2.2. Dimensionnement de la batterie	116
V.2.4.2.3. Contraintes pratiques et choix final des batteries	117
V.2.4.2.4. Régulateur de charge	118
V.2.4.2.5. Eléments de choix du régulateur	120
V.2.5. Kits complets d'éclairage solaire	121
V.2.5.1. Eléments d'assemblage du lampadaire solaire	124
V.2.5.2. Considérations pratiques et évaluation	124
V.2.5.3. Choix initial et autres alternatives	126
V.2.5.4. Configuration adoptée et éléments d'évaluation	128
Chapitre VI. Transition énergétique et éclairage public: Nouveaux projets et/ou rénovation de l'existant	130
VI.1. Efficacité lumineuse et évolution du marché de l'éclairage	131
VI.2. Eclairage public et intégration des LED	132
VI.2.1. Stratégies d'intégration en masse des LED à l'éclairage public	133
VI.2.2. Exemple de projet de remplacement de lampes HPS par des LED	133
VI.2.3. Exemple de projet d'éclairage solaire	134
VI.2.4. Remplacement des lampes HID par des LED (Relamping)	135
VI.3. Eléments pratiques de remplacement des lampes HID par des LED	136
Chapitre VII Eclairage public en Algérie: Etat des lieux et recommandations	138
VII.1. Collectivités locales et éclairage public en Algérie	139
VII.1.1. Systèmes d'éclairage public existant en Algérie	139
VII.1.2. Parc actuel et points lumineux en Algérie	140
VII.2. Recommandations générales	141
VII.2.1. Suivi et évaluation	141
VII.2.2. Etudes préliminaires et cahier des charges	142
VII.2.3. Eclairage public et déficit d'entretien	142
VII.2.4. Eclairage public et déficit réglementaire	142
VII.3. Recommandations particulières	143
VII.3.1. Critères de choix des luminaires LED de remplacement	143
VII.3.2. Critères de choix des systèmes d'éclairage solaire	143
VII.3.3. Eclairage solaire et problématique des grandes chaleurs en Algérie	146
Bibliographie	148
Glossaire et abréviations	164

Liste des Figures

Figure 1. Décomposition de la lumière blanche en couleurs et effet de l'Arc en ciel 17
Figure 2. Spectre global des radiations électromagnétiques et détails de celles visibles 18
Figure 3. Illustration de 'la catastrophe ultraviolette' du modèle de Rayleigh-Jeans, régissant le rayonnement d'un corps noir 19
Figure 4. Flux lumineux 20
Figure 5. Intensité lumineuse 20
Figure 6. Eclairement 21
Figure 7. Effet de la distance et mesure de l'éclairement 21
Figure 8. Luminance et Illustration unifiée des données photométriques 21
Figure 9. L'œil humain et sa perception des rayons lumineux 22
Figure 10. Sensibilité de l'œil aux différentes radiations visibles 22
Figure 11. Illustration de la perception des couleurs 23
Figure 12. Influence de l'indice de rendu de couleur de la source lumineuse 23
Figure 13. Flux lumineux capté par un observateur à partir d'une source lumineuse caractérisée par sa densité de puissance spectrale P(λ) 24
Figure 14. Température de couleur illustrée à travers des sources de lumière artificielles 24
Figure 15. Evolution de la lumière émise par un métal incandescent 25
Figure 16. Exemples de lumières naturelles et températures de couleurs correspondantes 25
Figure 17. Densité spectrale du rayonnement solaire 26
Figure 18. Spectre de référence pour la lumière blanche naturelle 26
Figure 19. Compromis entre éclairement et température de couleur 27
Figure 20. Premières sources artificielles de lumière et leur évolution 27
Figure 21. Couleur de la lumière émise par un filament à tungstène porté à diverses températures croissantes 28
Figure 22. Lampe à incandescence classique 29
Figure 23. Lampe halogène à incandescence et divers modèles 29
Figure 24. Performances énergétiques des lampes à incandescence et halogène 30
Figure 25. Spectres lumineux des principales lampes à incandescence 31
Figure 26. Technologies à la base des sources artificielles de lumière 31
Figure 27. Diverses technologies des lampes à décharge (HID) 33
Figure 28. Structure générale d'une lampe à décharge et divers modèles commercialisés 34
Figure 29. Les deux principaux types de lampes fluorescentes 34
Figure 30. Principe d'une lampe à mercure avec tube fluorescent 35
Figure 31. Spectre de la lumière émise par un tube fluorescent 35
Figure 32. Températures et indices de couleurs des nouvelles lampes fluorescentes 36
Figure 33. Diverses configurations et usages des tubes fluorescents 36
Figure 34. Exemple d'éclairage public avec tubes fluorescents (4x36 W) 37
Figure 35. Divers modèles de lampes fluocompactes (CFL) 37
Figure 36. Lampes fluocompactes (CFL) pour éclairage intérieur et extérieur 38
Figure 37. Lampe fluocompacte (CFL) et ballast électronique 38
Figure 38. Spectres lumineux de deux lampes fluocompactes de 15 W ayant des températures de couleur différentes 38
Figure 39. Diverses structures d'une lampe à induction 39
Figure 40. Divers modèles commercialisés de lampes à induction 39
Figure 41. Divers supports adaptés aux lampes à induction 40
Figure 42. Effet de la pression sur l'efficacité lumineuse des lampes à mercure 41
Figure 43. Effets de la pression de vapeur de mercure sur la distribution spectrale de la lumière émise 41

Figure 44. Première lampe à vapeur de mercure haute pression et spectre de la lumière émise 41
Figure 45. Eléments constitutifs d'une lampe à vapeur de mercure 42
Figure 46. Lampe aux Halogénures Métalliques (MH) avec bruleur céramique 43
Figure 47. Divers modèles de lampes aux halogénures métalliques 43
Figure 48. Spectre des radiations visibles d'une lampe aux iodures métalliques (MH) 43
Figure 49. Lampe au sodium basse pression (LPS) 44
Figure 50. Spectre à raie unique de la lumière émise par la lampe au sodium basse pression (LPS) 45
Figure 51. Exemples d'éclairage de rue avec des lampes au sodium basse pression (LPS) 45
Figure 52. Exemple d'éclairage de tunnel avec des lampes au sodium basse pression (LPS) 45
Figure 53. Structure standard et premiers modèles commercialisés de lampes à décharge utilisant la vapeur de sodium sous pression (HPS) 46
Figure 54. Spectre de la lumière émise par une lampe au sodium haute pression (HPS) 47
Figure 55. Gamme assez complète de lampes HPS actuellement disponibles 47
Figure 56. Détails du Bilan de puissance pour une lampe standard au Sodium Haute Pression (HPS) de puissance 400 W 48
Figure 57. Lampes au sodium à haute pression (HPS) et à induction dans l'éclairage public 48
Figure 58. Lampes au sodium haute pression (HPS) et exemple d'utilisation (tunnel) 49
Figure 59. Premières LED à boîtier DIP 49
Figure 60. Illustration de la synthèse de lumières de diverses couleurs (spectres), à base de celles monochromatiques générées par la trilogie des LED (RGB) 50
Figure 61. Synthèse de la lumière blanche à base de LED RGB et illustration de son spectre final 50
Figure 62. LED RGB de 3 W avec contrôle de la couleur et composants essentiels 51
Figure 63. Modèle de LED RGB et ruban d'éclairage décoratif 51
Figure 64. Structure de base de l'association LED bleue-phosphore jaune et émission de lumière blanche 52
Figure 65. Principe de synthèse spectrale de la lumière blanche émise par l'association LED bleue-phosphore avec diverses températures de couleur 52
Figure 66. Principaux types de LED utilisés dans les systèmes d'éclairage 53
Figure 67. Les modèles de LED SMD les plus utilisés et leurs dimensions 53
Figure 68. Lampe à LED SMD et divers modèles de circuits pour différentes puissances 54
Figure 69. Lampe à LED SMD de 60 W (160 LED SMD 5630) adaptée au système d'éclairage public 54
Figure 70. Accessoires optiques développés pour élargir le champ d'application des LED SMD comme sources lumineuses répondant aux spécificités de l'éclairage public 55
Figure 71. Modules LED pouvant servir dans un luminaire de l'éclairage public 55
Figure 72. Exemples de luminaires constitués de modules LED prêts à l'emploi dans divers dispositifs d'éclairage public 55
Figure 73. Structure d'une LED de type 'High power' 55
Figure 74. Divers LED de puissance, présentées seules et montées sur un circuit MCPCB 56
Figure 75. Présentation de LED 'high power' pour les puissance de 3, 5 et 10 W 56
Figure 76. Divers spots et projecteur à base de LED 'High Power' 56
Figure 77. Infrastructure sportive de proximité, éclairée avec des projecteurs LED 57
Figure 78. Illustration de l'évolution de la densité de puissance avec les techniques d'encapsulation des puces LED 57
Figure 79. Diverses ampoules à LED 'High Power' de 3 W, offrant un flux lumineux de 6000 lumens et plus, pour luminaire d'éclairage public (avec culot E40) 57
Figure 80. Luminaires et projecteurs à base de LED 'High power' 57
Figure 81. Modèles de LED COB et quelques données dimensionnelles 58
Figure 82. LED COB à surface d'émission (LES) de lumière circulaire 58
Figure 83. Luminaires et autres sources lumineuses à base de LED COB pour éclairage public et industriel 59
Figure 84. LED COB à filament et divers modèles de lampes 59
Figure 85. Lampe LED Philips (210 lm/W), ayant battu le record d'efficacité lumineuse 60

Figure 86. Distribution spectrale de la sensibilité des cônes photorécepteurs 60
Figure 87. Caractéristiques des divers types de sensibilité visuelle de l'œil humain 61
Figure 88. Circuits ballasts simples 65
Figure 89. Principe des circuits auxiliaires dédiés à l'allumage des lampes au mercure (Ballons et tubes fluorescents) 66
Figure 90. Principe des circuits auxiliaires dédiés à l'allumage des lampes à décharge au sodium (LPS et HPS) et halogénures métalliques(MH) 67
Figure 91. Configuration du ballast électronique associé aux lampes à décharge 69
Figure 92. Modèle de générateur (ballast) associé aux lampes à induction de basse fréquence (140 KHz à 250 KHz) 69
Figure 93. Circuit reflétant le principe de base d'un ballast électronique associé aux lampes à induction de basse fréquence (140 KHz à 250 KHz) 70
Figure 94. Caractéristique courant-tension I_D (U_D) typique d'une LED 70
Figure 95. Divers montages des LED pour constituer une lampe avec un flux lumineux désiré 71
Figure 96. Driver à courant constant (1500 mA) pour lampe LED de 60 W 71
Figure 97. Exemple d'un circuit intégré, assurant la fonction de driver multi-sorties à courant constant pour LED 72
Figure 98. Driver à tension constante associé à un module à LED pré équipé de drivers à courant constant assurant une intensité identique pour toutes les LED 72
Figure 99. Driver à tension constante 12 V, pour lampe LED de 60 W 73
Figure 100. Divers modèles d'armoire de commande de l'éclairage public 73
Figure 101. Tension réseau et courants de charge inductive ($\cos \phi < 1$) ou purement résistive ($\cos\phi = 1$) 74
Figure 102. Allures des courants et tensions alimentant une lampe au Sodium Haute Pression (HPS) avec ballasts magnétique et électronique 74
Figure 103. Armoire d'éclairage public avec économiseur d'énergie (Variateur stabilisateur de tension AC pour la gradation de lampes HPS) 76
Figure 104. Illustration d'un profil d'éclairage avec trois niveaux de luminosité 76
Figure 105. Driver LED dimmable 50-200 W (42-58 Vdc) avec option de commande 0-10 v, dédiée au contrôle de l'intensité lumineuse 77
Figure 106. Faisceaux lumineux typiques d'une lampe classique avec réflecteur et LED 79
Figure 107. Type de vasque de protection et pollution lumineuse 80
Figure 108. Luminaires classiques et à LED adaptés à l'éclairage public 80
Figure 109. Lampadaires d'éclairage public et composants intégrés dans les cas classique et à LED 81
Figure 110. Distribution de la lumière diffusée par un luminaire et définitions 82
Figure 111. Distribution de la lumière diffusée par un luminaire 83
Figure 112. Les cinq principaux types de distribution pour l'éclairage extérieur 83
Figure 113. Exemples de diagrammes photométriques caractéristiques de luminaires spécifiques à l'éclairage public 84
Figure 114. Exemple de dispositif d'éclairage d'une voie de circulation et empreinte lumineuse 84
Figure 115. Résultats de simulation numérique relatifs à l'éclairage d'un tronçon routier 85
Figure 116. Divers modes de déploiement des lampadaires 85
Figure 117. Cas de distribution unilatérale des points lumineux 86
Figure 118. Efficacité et classification des sources lumineuses artificielles 89
Figure 119. Etiquetage reflétant l'efficacité énergétique, appliqué aux sources lumineuses selon la norme européenne (avant le 1er Septembre 2021) 89
Figure 120. Nouvelle étiquette pour les ampoules et les LED, applicable à partir du 1er Septembre 2021. 90
Figure 121. Synoptique d'un système d'éclairage solaire non commandé 96
Figure 122. Synoptique complet d'un système d'éclairage solaire commandé (avec gradation) 96
Figure 123. Montage réel d'un système d'éclairage solaire sans contrôle de l'intensité lumineuse émise par la lampe LED 97
Figure 124. Montage réel d'un système d'éclairage solaire avec contrôle de l'intensité lumineuse (gradation) émise par la lampe LED 98
Figure 125. Structure et agencement des divers composants d'un lampadaire solaire 99
Figure 126. Blocs définissant la configuration split (All in three) d'un lampadaire solaire 99

Figure 127. Divers modes d'emplacement en fonction du poids du pack de batteries de stockage associé à un lampadaire solaire 100
Figure 128. Divers exemples de lampadaires solaires de type split All in two 100
Figure 129. Structure globale d'un lampadaire solaire intégré (All-in-one) 101
Figure 130. Vue éclatée d'un lampadaire solaire intégré (All-in-one) 101
Figure 131. Dispositif d'éclairage à base de lampadaires solaires et Illustration du dilemme d'optimisation des orientations que pose la configuration All in one 102
Figure 132. Illustration des deux modes d'éclairage adoptés 105
(a)- Non dimmable (100 % du flux nominal pendant 13 heures)
(b)- Dimmable (100 % pendant 4 h + 1h et 50 % pendant 8h)
Figure 133. Illustration d'un contrôle de l'éclairage par détecteur de présence 106
Figure 134. Carte d'ensoleillement mensuel moyen en Algérie 108
Figure 135. Illustration des trajectoires quotidiennes du soleil selon les saisons, vues notamment par un observateur localisé à l'hémisphère nord 109
Figure 136. Aperçu du taux de perte d'énergie solaire incidente sur un champ photovoltaïque non idéalement orienté vers la direction optimale (100%) 109
Figure 137. Illustration de l'énergie issue d'une radiation journalière quelconque et sa moyenne captée durant un nombre d'heures équivalentes en présence d'une radiation solaire standard (1000 W/m2, 25°C, AM=1,5) 110
Figure 138. Illustration des divers états d'une batterie. 114
Figure 139. Illustration des diverses technologies de batteries et leurs performances 116
Figure 140. Illustration de l'efficacité des régulateurs MPPT et PWM 119
Figure 141. Diverses phases du cycle de charge de la batterie 120
Figure 142. Exemples de variateurs de lumière pour éclairage à LED (Dimmer) 123
Figure 143. Exemple de régulateur de charge adapté aux lampadaires solaires étudiés, avec possibilité de programmation de la lumière émise par la lampe à LED de 80W 123
Figure 144. Exemple de régulateur de charge adapté aux lampadaires solaires étudiés avec programmation de la lumière émise par la lampe à LED et Gestion centralisée 124
Figure 145. Configuration finale du lampadaire sans dimming (Cas-1) 125
Figure 146. Configuration finale du lampadaire avec dimming (Cas-2) 125
Figure 147. Lampadaire solaire dimensionné et illustration de l'éclairage résultant 128
Figure 148. Lampadaires solaires et illustration d'une distribution typique de la lumière 129
Figure 149. Evolution du marché mondial de l'éclairage 2010-2020 et scénarios pour 2030 131
Figure 150. Consommation électrique de l'éclairage dans le monde en 2018 132
Figure 151. Taux de pénétration des sources lumineuses à LED au niveau de l'éclairage des rues et routes aux Etats Unis, de 2016 à 2018 133
Figure 152. Taux de pénétration des sources lumineuses à LED au niveau des Parcs de stationnement (Parkings) aux Etats Unis, de 2016 à 2018 134
Figure 153. Luminaire à LED adopté pour équiper 400000 points lumineux à Bangkok, en remplacement de ceux à base de sodium (HPS) 134
Figure 154. Exemples de réalisations du projet de 50000 lampadaires solaires, lancé pour éclairer 30% du réseau routier au Sénégal 135
Figure 155. Modèles de lampes LED pour remplacement standard de celles HID (HPS, MH et mercure) 136
Figure 156. Illustration d'échanges standards de lampes MH et Mercure par des LED 136
Figure 157. Illustration des nuances d'éclairage suite au remplacement des anciennes lampes par des LED 137
Figure 158. Consommation d'énergie électrique (GWh) par activité pour les communes de l'ensemble des 48 wilayas en 2018. 139
Figure 159. Luminaire solaire d'éclairage public, installé assez récemment 142
Figure 160. Luminaire LED de 200 W, en remplacement du précédent à base de lampe HPS de 250 W et excés de luminosité 144
Figure 161. Illustration de situations typiques où la structure 'All in One' ne peut convenir 145
Figure 162. Illustration d'installations d'éclairage solaire efficace réalisées en Algérie 145

Liste des Tableaux

Tableau 1. Lumière naturelle et luminances typiques. 22

Tableau 2. Données caractéristiques des lampes LBC. 39

Tableau 3. Résumé des caractéristiques typiques aux principaux modèles de lampes à induction. 40

Tableau 4. Performances de quelques modèles de lampes aux halogénures métalliques (HM) disponibles sur le marché. 44

Tableau 5. Comparatif des performances entre lampes HPS standards et améliorées. 47

Tableau 6. Valeurs du rapport S/P pour divers types de lampes. 62

Tableau 7. Caractéristiques de l'efficacité lumineuse maximale théorique de diverses lampes, définies sur la base de la distribution spectrale de la lumière émise. 62

Tableau 8. Diverses lampes HID et données de fonctionnement correct avec ballast. 68

Tableau 9. Hauteur du luminaire et étendue de la zone éclairée au sol. 83

Tableau 10. Voies de circulation et éléments d'implantation des lampadaires. 86

Tableau 11. Voies urbaines et ordre de grandeur du niveau d'éclairement moyen en lux selon la norme Européenne 13201. 87

Tableau 12. Voies rurales et ordre de grandeur du niveau d'éclairement moyen en lux selon la norme Européenne 13201. 87

Tableau 13. Détails des protections contre les intrusions externes renseignés par IP. 91

Tableau 14. Détails des protections contre les impacts externes renseignés par IK. 92

Tableau 15. Quatre classes d'isolation électriques selon la norme NF C 71000. 93

Tableau 16. Lampes HPS standards utilisées en Algérie et LED équivalentes. 104

Tableau 17. Consommation quotidienne du luminaire. 106

Tableau 18. Moyennes mensuelles de l'irradiation solaire journalière globale sur un plan incliné à 32° en (Wh/m^2/jour), sur la base des données de 2016 (PVGIS). 108

Tableau 19. Résumé des données nécessaires au dimensionnement du champ PV. 111

Tableau 20. Diverses présentations de la capacité d'une batterie et rapports caractéristiques. 113

Tableau 21. Durée de vie en nombre de cycles de diverses batteries et énergie massique. 115

Tableau 22. Données nécessaires et dimensionnement de la batterie. 118

Tableau 23. Divers composants choisis pour équiper le lampadaire solaire d'intérêt. 121

Tableau 24. Autres combinaisons de choix possibles de composants pouvant servir dans les deux lampadaires solaires d'intérêt (Sans et avec gradation). 126

Tableau 25. Lampadaire solaire dimensionné et illustration de l'éclairage résultant. 129

Tableau 26. Parc d'éclairage public et points lumineux en Algérie (2018). 140

Tableau 27. Données représentatives de l'éclairage public déployé à Alger (Selon ERMA). 141

RESUME ANALYTIQUE

Le concept de transition énergétique qui se dessine de nos jours à travers le monde, s'est manifestement imposé comme le seul élément de réponse crédible face aux soucis liés à la raréfaction prévisible des ressources énergétiques classiques et leurs effets de plus en plus apparents sur l'environnement. Si les stratégies élaborées dans ce sens sont, à l'évidence, spécifiques à chaque société dans le détail, elles peuvent cependant toutes être résumées dans deux plans d'actions essentiels: promouvoir l'efficacité énergétique et accentuer le recours aux ressources énergétiques propres, telles que celles renouvelables. Sur ce plan, il faut dire que les progrès technologiques accomplis à ce jour dans des domaines clefs, permettent déjà d'explorer avec beaucoup de succès une multitude de niches insoupçonnées il n'y a pas si longtemps, où des évolutions notables vers les objectifs assignés deviennent assez palpables. Dans cette optique, le secteur de l'éclairage dont la facture énergétique est tombée à moins de 15% de la production électrique mondiale en 2015, alors qu'elle représentait près de 19% en 2009, constitue une bonne illustration des progrès accomplis. En effet, malgré que les besoins d'éclairage aient à l'évidence beaucoup progressé avec les inhérentes expansions urbaines, la consommation énergétique globale du secteur a par contre notablement diminué avec l'adoption de nouveaux luminaires plus efficaces, tels que ceux à base de diodes électroluminescentes ou LED (Light Emitting Diode). Ces composants ont par ailleurs ouvert de nouveaux horizons en la matière, dans la mesure où ils ont permis un élargissement remarquable des applications de l'éclairage autonome à base d'électricité solaire photovoltaïque. En effet, 130 millions de dispositifs d'éclairage solaire hors réseau, utilisant principalement des LED, ont été déployés dans le monde durant la période 2010-2017, notamment en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud. Plus encore, ce moyen qui s'adressait initialement aux populations vivant dans des zones enclavées et dépourvues de réseau électrique de distribution, est entrain de conquérir des parts de marché même dans les zones urbaines qui n'en manquent pas. Les récents et très nombreux exemples de grands projets initiés dans ce sens à travers le monde, en sont une bonne illustration.

Concernant l'Algérie et quoique des directives claires qui incitent à l'usage des énergies renouvelables et encouragent à une modération accrue quant à la consommation énergétique, ont été promulguées par les autorités publiques, il faut dire que sur le terrain, les progrès dans ce sens restent mitigés. Les raisons à cela étant souvent liées à l'absence d'une maîtrise rigoureuse des nouvelles techniques dont la connaissance des moindres détails, reste un élément fondamental pour optimiser les choix en fonction des potentialités locales. Plus encore, l'absence d'une réglementation nationale précise dans le domaine de l'éclairage en général et public en particulier, laisse une grande marge à l'improvisation de la part des services en charge de l'élaboration des cahiers des charges pour répondre à la demande. Si celle-ci se résume en apparence à un éclairage adapté et performant, il y a lieu de ne pas oublier que le domaine en question (éclairage public) exige des compromis subtiles et souvent difficiles à entrevoir par un profane dans le secteur. Cela est surtout le cas si l'éclairage artificiel en question, vise également un confort visuel palpable pour les usagers des infrastructures publiques, qu'elles soient urbaines ou rurales. Toutefois et dans le cas présent, la motivation essentielle du présent référentiel est toute autre, dans la mesure où celui-ci s'adresse plutôt aux services des collectivités locales en charge de l'éclairage public, notamment pour les aider à mieux intégrer les aspects efficacité énergétique et électricité solaire dans le domaine. En fait cela répond à une certaine urgence, notamment suite à la multiplication ces derniers temps d'appels d'offre spécifiques, visant la dotation de nombreuses communes au niveau national de systèmes d'éclairage public à base d'énergie solaire photovoltaïque. Sur ce plan, il a été relevé que les cahiers des charges émis à cet effet, suite aux directives publiques adressées aux collectivités locales dans ce sens, mettent en avant des prescriptions techniques qui orientent plus vers des configurations précises de matériels, que celles traduisant les vrais besoins et garantissant les objectifs attendus. Face à ce constat, il y a donc nécessité à les accompagner afin qu'ils puissent mieux caractériser leurs choix en matière d'éclairage public, en corrélation avec des objectifs d'efficacité énergétique et implication des installations génératrices d'électricité solaire photovoltaïque comme source potentielle d'alimentation.

Quoique l'objectif central derrière l'élaboration de ce document vise exclusivement les volets efficacité énergétique dans l'éclairage public ainsi que la possibilité d'opter pour une alimentation électrique à base d'énergie solaire photovoltaïque, comme indiqué précédemment, une évaluation sommaire des données photométriques s'impose. Ces dernières sont en effet nécessaires pour ajuster au plus près les besoins effectifs en termes d'éclairage, lesquels permettent de s'attaquer à la source du problème posé d'optimisation en matière d'efficacité énergétique. Avant cela, il est également jugé utile et opportun de présenter un aperçu sur l'évolution des connaissances liées à la lumière et son rôle dans le processus de la vision, afin d'intégrer graduellement le lecteur aux divers concepts qui se sont naturellement succédés dans le domaine et ont permis d'en comprendre les fondements qui ont conduit à son développement.

Toutefois, sachant qu'il s'agit d'un domaine éminemment pratique au regard des opérateurs concernés par l'éclairage public sur le terrain, une grande partie du document est consacrée à des notions techniques concrètes et en lien direct avec l'ensemble des composants impliqués dans le domaine, ainsi que les moyens permettant leur déploiement au niveau des espaces communs visés. Ainsi, les définitions et données de base jugées utiles, pour bien cerner le sujet dans sa globalité, sont toutes passées en revues et présentées dans le but de rendre fonctionnel par soi-même le contenu du document d'intérêt, du moins comme support à une analyse préliminaire crédible sur certains aspects de l'éclairage public et leur mise en application. Dans cette optique, les priorités fixées étant d'aller vers des réalisations répondant aux besoins réels d'éclairage, sans négliger la moindre possibilité d'un gain durable sur le volet énergétique, de nombreux aspects à la fois techniques et organiques du domaine sont considérés. Sur ce plan, plusieurs niches sont d'abord identifiées au plus près de la source lumineuse et sa technologie (lampe, circuits auxiliaires, luminaires…), avant de s'attaquer aux déperditions inhérentes au déploiement extérieur, notamment en termes d'éclairement jugé peu utile ou carrément indésirable (pollution lumineuse, éblouissement…). Toutefois et afin d'accompagner proprement l'application de tels concepts dans le monde réel, le volet réglementaire régissant l'ensemble des activités en lien avec l'éclairage en général et public en particulier, est également abordé avec insistance. Ainsi, la notion d'étiquetage garantissant la qualité et l'efficacité énergétique des produits dédiés au secteur et échangés sur le marché national, est vue comme un outil de régulation incontournable, face à la multiplication exceptionnelle des prestataires (fabricants, distributeurs….), notamment suite à l'avènement des LED. En effet et comme partout ailleurs, la pression sur la demande dans le domaine étant également perceptible localement, surtout suite à la limitation des échanges internationaux durant ces deux dernières années, occasionnée par la pandémie Covid-19, l'exécution des programmes nationaux d'éclairage public, s'est trouvée confrontée à des problèmes majeurs liés aux mauvaises appréciations sur la qualité et l'efficacité énergétique du matériel utilisé. C'est justement dans cette perspective qu'un certain nombre de recommandations, formulées suite à des constats réels et dénués de toute subjectivité, ont été présentées à la fin du document de manière à bénéficier de l'appui rendu nécessaire à travers toutes les analyses précédentes et ce, dans le seul but d'aider à corriger ce qui peut l'être et tracer la voie vers des réalisations futures d'éclairage public, porteuses de qualité, durabilité et efficacité énergétique.

CHAPITRE I

Lumière, vision et éléments de photométrie

I.1. Evolution des connaissances sur la lumière

La lumière, a soulevé depuis l'antiquité de grandes questions pour l'homme, notamment celles liées à ses caractéristiques optiques remarquables mais surtout sa relation avec le principe de la vision [1]. Ainsi, les toutes premières interprétations se sont en gros orientées vers l'hypothèse stipulant que c'est l'œil lui-même qui émettait la lumière sous forme d'un flux de particules [2-3]. Cette approche n'a évidemment pas tardé à être rejetée car cela signifiait que la vision reste possible, même dans l'obscurité totale, ce qui va à l'encontre de la réalité des faits. Le scénario inverse formulé suite à cela et consistant à dire que c'est l'objet qui émettait la lumière, n'a également pas résisté face au fait qu'il n'y aurait jamais d'obscurité dans ce cas. Cela étant, ce sont plutôt des travaux exclusivement orientés vers l'optique géométrique liée aux rayons de la lumière, qui ont émergé de l'époque de l'antiquité, notamment ceux redevables à Euclide (IIIème Siècle av. JC). Ces derniers ont par ailleurs étés enrichis durant l'ère de la civilisation arabo musulmane, notamment par Al-Kindi (fin du VIIIème siècle-866) [3], puis Ibn Sahl (940-1000) [4]. Toutefois, c'est Ibn al-Haytham (965-1039), qui y apporta une contribution majeure, en posant les bases de l'optique moderne avec son approche expérimentale à l'étude de la propagation de la lumière, dont il a radicalement transformé la compréhension en combinant observations et analyses scientifiques rationnelles [5]. Il a également été le premier à réfuter les idées reçues sur la vision qui prévalaient depuis l'antiquité et démontré que la lumière était une partie cruciale et indépendante du processus visuel [6]. Ce dernier ne pouvant être concrétisé qu'à travers un rayon lumineux issu d'une source, dont la réflexion sur l'objet est captée et analysé par l'œil comme instrument optique, hypothèse très pertinente sur la perception visuelle, telle qu'elle est connue aujourd'hui [7]. A ce titre, le traité d'optique (Kitab al Manazer) en 7 volumes, d'Ibn al-Haytham, œuvre transmise en occident au début du 13e siècle, est considéré à juste titre comme une référence dans le domaine et a grandement inspiré les travaux ultérieurs sur l'optique, menés durant la période dite de Renaissance en Europe (XIV au XVIe Siècle) [5-9]. Ainsi, ce n'est qu'à la fin de cette période et comme le prédisait Ibn al-Haytham, que la séparation des domaines de la perception visuelle de celui de l'optique, considérée dorénavant comme science à part entière de la physique a été définitivement admise.

I.1.1. Newton et la naissance de la théorie des couleurs de la lumière

Faisant suite aux progrès sur la connaissance de sa nature, la lumière a été au centre de nombreux débats scientifiques assez contradictoires mais aux fondements crédibles et riches en enseignements. En effet, ils reposaient presque tous, notamment au début, sur des résultats empiriques formulés suite à des observations et analyses menées avec rigueur, puis validées à travers des expériences très pertinentes. La plus en vue entre ces dernières, est celle conduite par Isaac Newton en 1666, où il a montré que la lumière blanche est constituée d'un mélange de rayons de lumière de couleurs ou 'spectre' allant du violet au rouge [10]. Ainsi, il a pu fournir la première explication scientifique au phénomène de l'arc-en-ciel, où ce sont les gouttes d'eau qui jouent le rôle du prisme utilisé dans l'expérience (Figure 1).

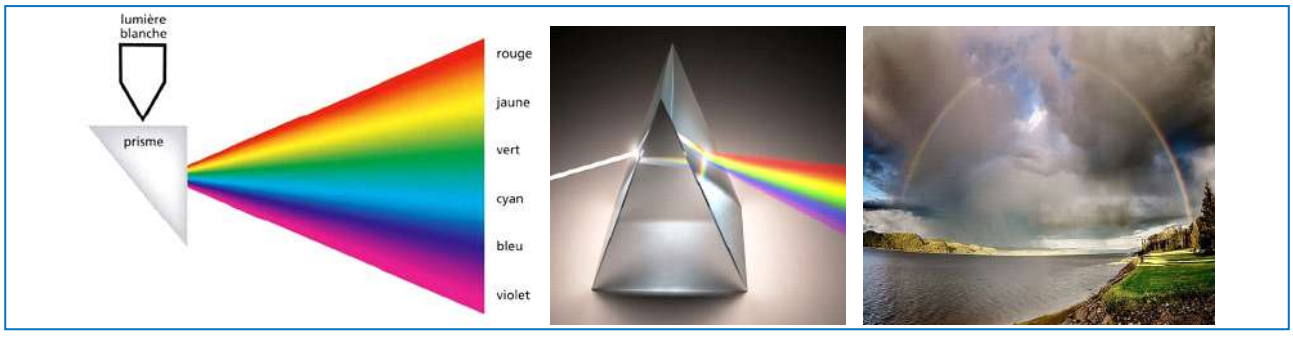


Figure 1. Décomposition de la lumière blanche en couleurs et effet de l'Arc en ciel.

I.1.2. Nature de la lumière: Corpusculaire ou ondulatoire

La nature corpusculaire qu'attribue Newton à la lumière (flot de particules) au titre des composants ultimes de l'univers, dictés par la mécanique rationnelle dont il est l'auteur, est rapidement contrariée par une autre théorie assimilant la lumière à une vibration (onde) qui se propage selon un aspect ondulatoire. Cette nouvelle approche, a été élaborée pour la première fois

en 1678 et publiée en 1690 par Huygens pour mieux interpréter les lois de la réflexion et de la réfraction des rayons lumineux [11]. Cependant, comme à l'époque aucun instrument ne permettait de valider la nature corpusculaire (discontinue) ou ondulatoire (continue) de la lumière, cela a déclenché un débat qui va durer plus de deux siècles, où les aspects purement ondulatoires et corpusculaires ont été tour à tour privilégiés, avant que la réalité des choses donne finalement raison aux deux [12]. Les travaux théoriques et expérimentaux qui ont été menés peu de temps après, notamment par Young et Fresnel dès le début du XIX siècle, ont toutefois donné plus de crédibilité à la théorie ondulatoire, du fait qu'ils aient permis d'expliquer de manière simple et très convaincante les phénomènes d'interférences et de diffraction de la lumière [13-14]. Un appui supplémentaire à l'aspect continu de la lumière est apporté par Foucault en 1850, lorsqu'il a réalisé l'expérience permettant de comparer les vitesses de la lumière dans l'air et l'eau [15]. Toutefois, l'ultime validation de l'approche ondulatoire est cependant venue en 1873, date à laquelle James Maxwell a synthétisé sa théorie des ondes électromagnétiques, englobant la lumière [16-17]. En effet, l'interprétation des équations de Maxwell laissait supposer qu'il devait exister dans la nature des ondes électromagnétiques autres que la lumière, ce qui ne tarda pas à être prouvé grâce aux travaux d'Heinrich Hertz qui a démontré l'existence des ondes radio en 1888. Juste après ce fut le tour des rayons X par Röntgen en 1895, puis les rayons gamma par Paul Villard en 1900, lorsqu'il étudiait le rayonnement émis par le radium. Ainsi, l'ensemble du spectre des ondes électromagnétiques obéissant aux équations de Maxwell, y compris les bandes de lumière invisibles pour l'œil humain, soit les radiations ultraviolettes et infrarouges [18], est établi (Figure 2).

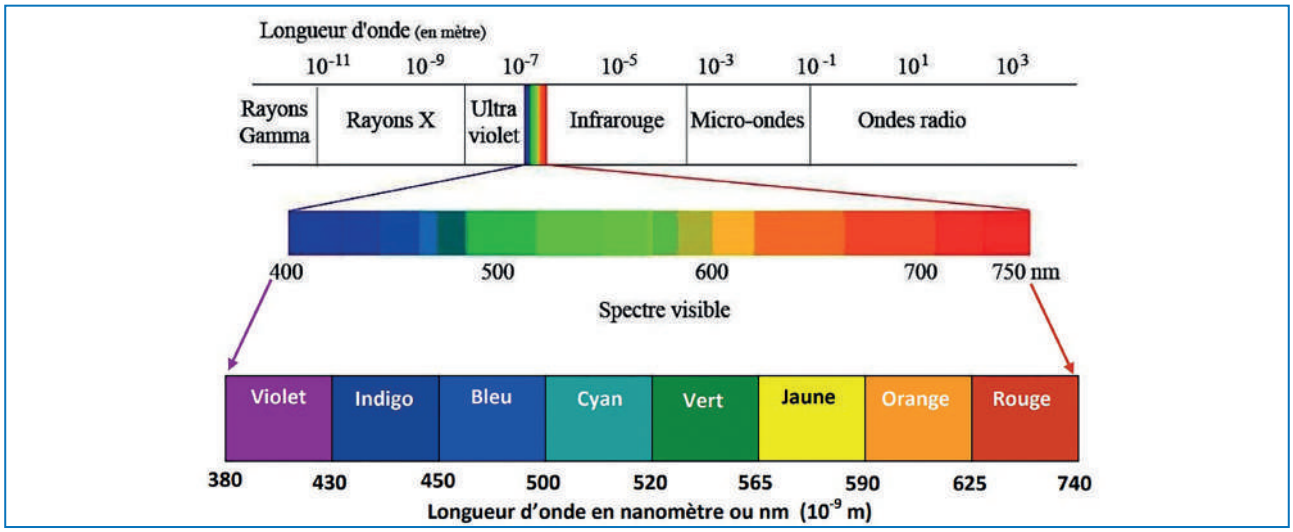


Figure 2. Spectre global des radiations électromagnétiques et détails de celles visibles.

I.1.3. Lumière, rayonnement du corps noir et notion de quantum d'énergie

Pour résumer, le concept de corps noir a été introduit au XIX siècle pour servir, entre autres, de support à la caractérisation du rayonnement émis par un corps chauffé, dont on sait que la partie visible passe du rouge au blanc au fur et à mesure que sa température augmente [19-21]. Cet indice observable (lumière émise), servait en fait de moyen permettant de faciliter la mise en évidence des lois universelles régissant le domaine, notamment par voie expérimentale, tout en simplifiant leur validation. C'est ainsi, que toute une série de lois avaient été élaborées, dont celle énoncée par Kirchhoff en 1860 était la première, suivie par celles de Stefan-Boltzmann (1879), Wien (1893) et Rayleigh-Jeans (1900) [22]. Toutefois, les deux dernières qui modélisaient l'intensité du rayonnement émis par un corps noir, porté à une température donnée, en fonction de sa longueur d'onde, ont montré certaines limites à rendre compte des observations expérimentales sur l'ensemble du spectre. Ainsi, la loi de Wien qui donnait de bons résultats pour les courtes longueurs d'onde (hautes fréquences) a été assez défaillante à reproduire correctement l'intensité du rayonnement vers les basses fréquences (infrarouge). A l'inverse, celle de Rayleigh-Jeans présentait une grande divergence avec l'expérience vers les ondes courtes, notamment à partir de celles caractéristiques du bleu et surtout l'ultraviolet, d'où la qualification connue de ce constat comme 'catastrophe ultraviolette' (Figure 3), qui a le plus alerté les physiciens de l'époque.

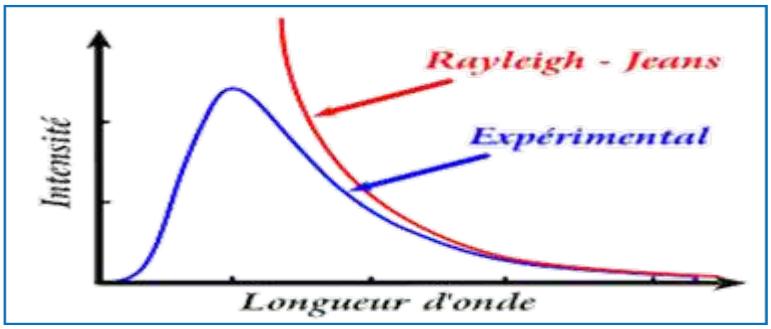


Figure 3. Illustration de 'la catastrophe ultraviolette' du modèle de Rayleigh-Jeans, régissant le rayonnement d'un corps noir.

C'est Max Planck qui a apporté la réponse au problème ainsi soulevé dans la même année (1900), en proposant une loi de rayonnement complètement en accord avec les résultats expérimentaux qui de surcroit, est considérée comme une interpolation judicieuse entre les lois de Rayleigh-Jeans et Wien, d'où elles peuvent en être déduites [23]. Toutefois, cela n'a été possible que sous la contrainte originale introduite par Planck, qui consiste à admettre que les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement ne pouvaient se faire qu'à travers un flot discontinu, dont l'intensité est un multiple entier d'une quantité discrète minimale ou quantum d'énergie. La valeur ε de cette dernière, étant simplement définie comme étant liée à la fréquence ν à travers une constante universelle h de proportionnalité ($\varepsilon = h\nu$) [24]. Ainsi, et malgré le fait que Planck lui-même a admis que la discrétisation du rayonnement qu'il a introduite, se limitait à un simple artifice de calcul qui ne remet pas en cause fondamentalement la physique classique, il vient en fait de remettre sur le tapis la théorie de la nature corpusculaire de la lumière qui a été mise de côté pendant pratiquement un siècle, face à la consistance observée jusqu'ici de son aspect ondulatoire. Ce changement de paradigme, ne va d'ailleurs pas tarder à s'imposer de manière encore plus concrète, à travers les travaux d'Einstein, présentés en 1905 sur l'effet photoélectrique [25]. En effet, ce phénomène qui a été concrètement visualisé en 1887, à travers l'expérience des «Rayons cathodiques» d'Heinrich Hertz, dont les travaux ont été complétés par Philipp Lenard entre 1899 et 1902, n'a pas pu trouver une explication simple selon la théorie ondulatoire. C'est dans ce contexte et en s'appuyant sur la découverte toute récente de Planck, qu'Einstein fut le premier à proposer une explication qui n'a pas tardé à être vérifiée et ce, en introduisant le concept de particule de lumière ou quantum, appelé aujourd'hui photon. C'est l'énergie caractéristique de ce dernier, proportionnelle à la fréquence du rayon de lumière porteur qui interagit avec le matériau et peut ainsi provoquer l'éjection d'électrons par absorption, si elle est suffisamment grande.

Le concept ainsi introduit, fait partie des fondements de la mécanique quantique, laquelle vient se superposer à la physique classique qui a jusqu'ici parfaitement décrit l'environnement macroscopique de l'homme, alors qu'elle est devenue inopérante à expliquer les phénomènes observés à l'échelle microscopique des atomes et autres particules constituant la matière. Ainsi, la dualité onde-corpuscule s'est imposée au terme d'une longue histoire où les aspects purement ondulatoires (continu) et corpusculaires (discret), ont été tour à tour privilégiés pour répondre à la question de la nature ultime des constituants essentiels de la matière que l'homme a jusqu'ici appréhendé [26]. Dans ce contexte, la lumière a manifestement joué un rôle décisif quant à l'évolution des connaissances, puisqu'elle a souvent servi de cas d'école et continuera probablement de l'être pour longtemps encore. L'application de cela au domaine de l'éclairage artificiel qui va être abordé, permet déjà de dire que la théorie ondulatoire qui met en jeu des fonctions d'espace continues, reste parfaite pour traiter des problèmes optiques liés au déploiement des sources de lumière, alors que la production et la transformation de cette dernière (la lumière), fera largement appel à son aspect corpusculaire.

I.2. Fondements essentiels de l'éclairage artificiel

L'éclairage artificiel au niveau des villes, villages et autres infrastructures collectives, est un service public de grande importance destiné à sécuriser la vie nocturne ainsi que toutes les activités humaines qui lui sont liées (travail, déplacement, loisirs….), en permettant de voir et d'être vu en l'absence d'une lumière naturelle suffisante. A ce titre et pratiquement partout dans le monde, l'éclai-

rage public est entièrement à la charge des collectivités locales, pour lesquelles il représente une part importante du budget énergie. Ceci étant, sans parler des dépenses liées aux services requis de maintenance et autres investissements qu'occasionnent les inhérentes extensions, caractéristiques du développement des agglomérations urbaines modernes, appelé à s'accentuer davantage sous l'effet de l'exode rural qui se perpétue.

Essentiellement destiné à équiper des espaces ouverts (routes, ruelles, places publiques, lieux de récréation…), l'éclairage public fait appel à des luminaires répondant à des critères assez bien définis, que ce soit en termes de robustesse vis-à-vis des divers aléas inhérents à leur déploiement à l'extérieur (étanchéité, rigidité…), ou leurs performances lumineuses intrinsèques (efficacité lumineuse, qualité de la lumière…). Dans cette optique et au regard de leur fonction centrale qu'est l'éclairage proprement dit, ils doivent entre autres générer un niveau suffisant de luminosité afin d'assurer convenablement la visibilité requise, selon les usagers des lieux (piétons, voitures…), sans pour autant verser dans l'excès qui en plus d'être coûteux, peut être également préjudiciable (éblouissement, pollution lumineuse…). Ce sont ces exigences qui déterminent en grande partie le type de lampes à utiliser, la technologie appropriée, la puissance électrique nécessaire, ainsi que d'autres fonctionnalités liées aux particularités du mode d'alimentation adéquat (ballast, gradateur, driver,...). L'optimisation de tous ces choix techniques, en présence d'objectifs supplémentaires d'efficacité énergétique et confort visuel à assurer, nécessite manifestement un minimum de connaissances intrinsèques au vaste domaine de l'éclairage artificiel, dont un volet essentiel se résume aux mécanismes de génération de radiations visibles (lumière) et leur perception par l'œil humain. C'est dans cette optique qu'un aperçu illustrant au mieux les définitions courantes des paramètres caractéristiques de la lumière (photométrie), dont le discernement est jugé fondamental pour mener tout débat utile et efficace sur le sujet [27-29].

I.2.1. Sources lumineuses et définitions photométriques essentielles

Il n'y a pas si longtemps, la capacité d'éclairage d'une ampoule, notamment celle à incandescence, était presque exclusivement indiquée par la puissance électrique qu'elle consomme en Watt (W). Cependant et suite à l'apparition de la nouvelle génération des ampoules dites de Basse Consommation (LBC), notamment celles des technologies fluocompactes et LED, cette seule caractérisation est devenue insuffisante pour bien orienter le choix des utilisateurs [30-32]. En effet, les mêmes besoins en éclairage peuvent désormais être réalisés avec des rendements bien supérieurs de la conversion de l'énergie électrique d'alimentation en énergie lumineuse utile.

I.2.1.1. Flux lumineux

Le flux lumineux (φ) dont l'unité de mesure selon le Système International (SI) est le Lumen (de symbole **lm**), a été introduit pour évaluer la quantité de lumière émise par une source dans toutes les directions (Figure 4), devenant ainsi l'indicateur le plus significatif quant à la capacité à éclairer d'une ampoule donnée [33-34].

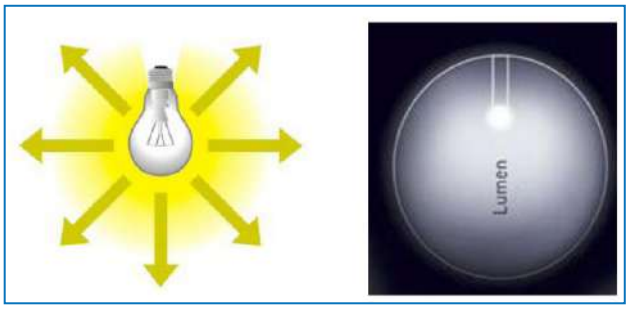


Figure 4. Flux lumineux.

I.2.1.2. Intensité lumineuse

La grandeur de base de la photométrie (flux lumineux) n'étant pas représentative de la distribution spatiale de la lumière émise (dans toutes les directions), une caractérisation de la directivité (flux canalisé dans un angle solide donné) de celle-ci est introduite à travers la notion d'intensité lumineuse (Figure 5), dont l'unité de mesure est la Candela (symbole cd) [35-36]. Cette dernière mesure finalement l'intensité lumineuse issue d'une source donnée, telle qu'elle est perçue par l'œil humain. C'est à ce titre que la candela (chandelle en latin), est considérée comme une des sept unités de base dans le Système International (SI) de mesure.

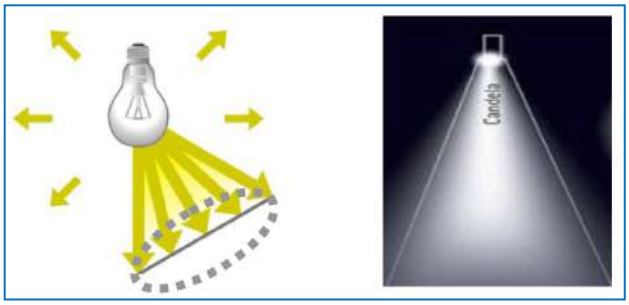


Figure 5. Intensité lumineuse.

A ce stade, il faut dire que les éléments définissant la lumière (flux, intensité) présentés jusqu'ici, concernent plutôt des quantités qui restent assez abstraites pour une évaluation directe par le récepteur le plus concerné qu'est l'œil humain. Afin de parer à cela, un troisième élément d'appréciation plus concret cette fois-ci, est mis en avant en faisant intervenir la notion d'éclairement.

I.2.1.3. Eclairement

L'Eclairement, qui permet de quantifier la lumière reçue par l'objet éclairé lui-même (Figure 6) a pour unité de mesure le Lux (de symbole lx). Sous un autre angle, le Lux décrirait la même notion de pouvoir éclairant comme la Candela, mais vu du côté de l'objet éclairé lui-même. Concrètement, si la lumière est uniformément distribuée sur une surface S définie en m^2, l'éclairement serait égal au rapport du flux (ϕ) lumineux reçu sur la surface éclairée S (ϕ/S), dont la valeur en Lux serait la quantité de Lumens au mètre carré (lm/m^2), mesurable à l'aide d'un instrument dédié: le Luxmètre [37].

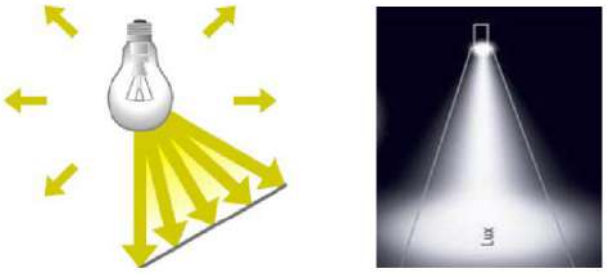


Figure 6. Eclairement.

Ainsi, un lien assez significatif peut être établi entre les trois caractéristiques photométriques préalablement définies, soit le flux lumineux, l'intensité lumineuse et l'éclairement, dont les unités respectives de mesure sont le Lumen (lm), Candela (cd) et Lux (lx). En effet on peut résumer ce lien en retenant le fait qu'une source dont l'intensité est de 1 Candela, produit un éclairement d'1 Lumen par mètre carré, soit 1 Lux et ce, à une distance d'1 mètre par rapport au foyer de la source [38]. Il est utile de noter que l'éclairement au sol varie comme l'inverse du carré de la distance à la source (Loi des carrés inverse de la distance). Il se mesure avec un luxmètre, qui utilise généralement une cellule photoélectrique pour convertir le rayonnement incident de lumière en énergie électrique directement mesurable (Figure 7).

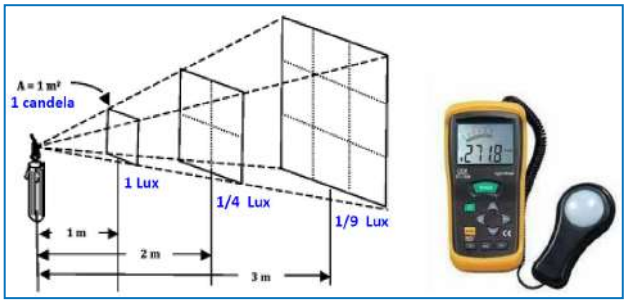


Figure 7. Effet de la distance et mesure de l'éclairement.

A titre d'exemple, on peut se référer à certaines évaluations de l'éclairement naturel extérieur comme celles illustrant des situations typiques bien connues telles qu'une nuit de pleine lune (0,2 Lx), sol extérieur par ciel clair (7000 à 24000 lx) et surface perpendiculaire à un soleil d'été (100000 Lx). Comparativement à ces valeurs extrêmes, on peut situer les niveaux d'éclairement générés par des sources artificielles de lumière pouvant satisfaire certains besoins courants tels qu'un niveau d'éclairement convenable pour une route (8 à 50 lx), un bureau de travail (300 à 1000 lx) ou un Atelier dédié au travail de précision (1500 à 2000 lx).

I.2.1.4. Luminance

Jusqu'ici, seuls des paramètres caractéristiques de la lumière émise par une source lumineuse donnée ont été définis (lm, cd, lx), sans faire appel à aucun élément d'appréciation de l'information que celle-ci véhicule et destinée à être décodée par le récepteur dédié qu'est l'œil humain. C'est justement à cet effet, que la notion de luminance est également introduite pour exprimer la sensation visuelle [29,39] que provoque le stimulus de la lumière émise directement par une source ou réfléchie par toute surface éclairée (Figure 8), sur les cellules de la membrane sensorielle qu'est la rétine de l'œil humain (Figure 9).

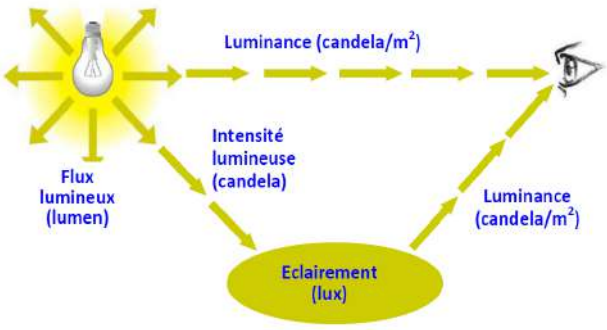


Figure 8. Luminance et Illustration unifiée des données photométriques.

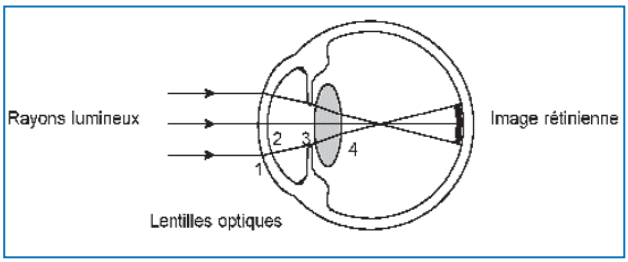


Figure 9. L'œil humain et sa perception des rayons lumineux.

La luminance reste en fait la seule grandeur permettant d'évaluer l'énergie lumineuse perceptible par l'œil humain et représente le rapport entre l'intensité de la source dans une direction donnée et la surface apparente de celle-ci [40]. Elle s'exprime ainsi en Candelas par mètre carré (cd/m^2) et l'œil humain peut percevoir des valeurs allant de 0.001 à 100000 cd/m^2. Une telle sensibilité peut être testée et validée à travers des situations représentatives connues (Tableau 1).

Tableau 1. Lumière naturelle et luminances typiques.

Paysage	Nocturne	Lune	Ciel couvert	Plein soleil
Luminance (Cd/m^2)	0.001	0.01 à 0.1	300 à 5000	1,5 x 10^9

I.2.1.5. Indice de Rendu de Couleur (IRC)

Les éléments précités de mesures photométriques (W, lm, cd, lx), interviennent essentiellement dans l'évaluation des performances énergétiques d'une source lumineuse donnée, notamment en matière de consommation d'énergie électrique (W) ou capacité d'énergie lumineuse émise (lm, cd, lx). Toutefois, d'autres aspects souvent liés à la qualité même de la lumière produite et la sensation de confort qu'elle procure, peuvent manifestement concourir à améliorer l'acuité visuelle recherchée à travers un éclairage public adapté à des besoins précis.

Une caractérisation significative de ces derniers, repose justement et en grande partie sur la perception de l'œil humain, liée à la distribution énergétique de la lumière (de nature ondulatoire) sur une bande étroite de longueurs d'ondes (380 nm à 770 nm environ), située entre les ultraviolets (UV) et celles infrarouges (IR) du spectre électromagnétique visible (Figure 2). Cette plage indique en effet la partie visible de ce dernier, caractérisée par les radiations lumineuses dont les composantes représentent toutes les nuances de couleurs allant du violet (380 nm) au rouge (780 nm). Cependant, la sensibilité de l'œil humain à une lumière d'une intensité donnée, varie fortement en fonction de la longueur d'onde de celle-ci, autrement dit sa couleur [41-43]. C'est à ce sujet que la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) a introduit en 1924 la fonction d'efficacité lumineuse spectrale V(λ) permettant d'évaluer la sensibilité de l'œil humain moyen sur tout le spectre visible (Figure 10) et ce dans des conditions de lumière du jour (vision photopique) [44-46]. Cette dernière résume en effet assez bien l'ensemble des observations connues et dûment validées sur la vision diurne (photopique ou à la lumière du jour). Ainsi, la sensibilité de l'œil humain présente un maximum pratiquement au milieu du spectre visible pour une longueur d'onde de 555 nm, soit entre le jaune et le vert et décroit vers les rouges et les bleus. Le flux lumineux perçu dans ce cas à partir d'une source lumineuse rayonnant 1 W, serait de 683 lm (Figure 10). Cette discrimination de l'intensité lumineuse selon les longueurs d'onde, peut justement être exploitée dans le choix de la source lumineuse en fonction de besoins précis.

Comme conclusion à ce niveau, on peut déduire que l'information visuelle véhiculée par les couleurs des objets éclairés, qui peut être très significative selon le cas, dépendrait également de la richesse spectrale de la source éclairante (Figure 11). Un tel critère devient

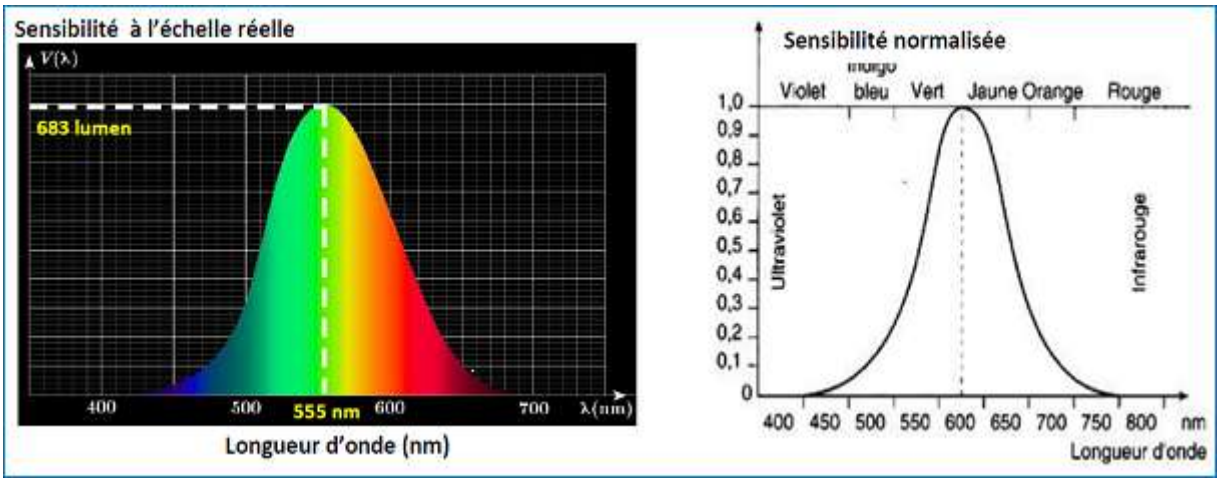


Figure 10. Sensibilité de l'œil aux différentes radiations visibles.

donc un élément essentiel quant à l'orientation du choix des sources d'éclairage artificielles, au même titre que l'aspect purement énergétique.

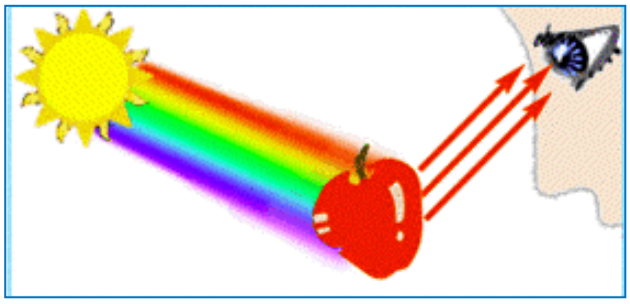


Figure 11. Illustration de la perception des couleurs.

L'indicateur de performance utilisé à cet effet est l'Indice de Rendu des Couleurs (IRC) ou CRI (Colour Rendering Index en anglais) [47-49], qui indique la capacité d'une source lumineuse telle qu'une lampe, à restituer la couleur des objets éclairés (Figure 12). Il peut prendre des valeurs allant de 20 à 100, cette dernière étant attribuée au meilleur rendu de couleur pris comme référence et qui correspond à celui assuré par la lumière blanche du jour. En d'autres termes, l'indice de rendement des couleurs indique si la couleur sera plus ou moins naturelle et de ce fait, plus l'IRC est proche de l'unité (100 %), plus les couleurs perçues se rapprocheront de celles en plein jour.

Figure 12. Influence de l'indice de rendu de couleur de la source lumineuse.

I.2.1.6. Efficacité lumineuse

Ayant défini les éléments essentiels quant à l'évaluation des caractéristiques photométriques (sortie) d'une source lumineuse donnée, il reste à déterminer les performances énergétiques de cette dernière, notamment lorsqu'il s'agit d'un éclairage artificiel comme c'est le cas ici. En effet, l'ampoule peut à juste titre être considérée comme un dispositif de conversion d'énergie dont l'entrée est l'apport d'une source extérieure d'électricité et la sortie en est la lumière produite. Ainsi, on peut définir le rendement énergétique de l'ensemble ou efficacité lumineuse comme étant le rapport du flux lumineux obtenu en sortie (exprimé en lumens), sur la puissance électrique consommée en entrée (exprimée en Watts). En termes clairs, le résultat obtenu en lm/W, reflète bien la notion d'efficacité lumineuse pour une ampoule donnée, du fait que sa valeur rend compte directement des performances énergétiques de celle-ci, en relation avec sa fonction centrale de source lumineuse.

Remarque: En fait, il existe deux définitions de l'efficacité lumineuse (exprimées toutes deux en lm/W), dont celle donnée plus haut est la plus couramment utilisée dans l'évaluation des sources lumineuses car elle établit un lien direct avec l'efficacité énergétique, telle qu'elle est présentée dans le contexte actuel, où il est question de développement durable. Cependant, concernant les sources lumineuses, une autre approche de l'efficacité peut également être formulée en considérant comme entrée le flux rayonné au lieu de la puissance image de l'énergie consommée. Dans ce cas, le résultat ne dépend que de la forme du spectre P(λ) de la source lumineuse et la fonction d'efficacité lumineuse spectrale V(λ) [50-51], définie précédemment (Figure 10). Ainsi, le flux considéré en sortie n'est plus celui global généré par la source lumineuse (Figure 4), mais celui utile, parvenant à un observateur type après 'filtrage' par la fonction d'efficacité lumineuse spectrale V(λ) d'un œil humain standard (Figure 13).

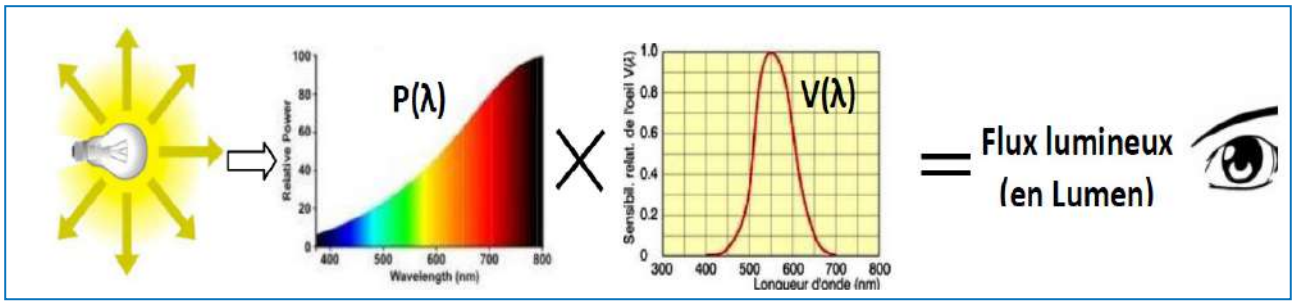


Figure 13. Flux lumineux capté par un observateur à partir d'une source lumineuse caractérisée par sa densité de puissance spectrale P(λ).

I.2.1.7. Température de Couleur

En plus de l'IRC, un second paramètre est également adopté comme indicateur de performance de confort visuel pour renseigner sur la teinte générale de la lumière que produit une lampe. Ainsi, une lumière est dite chaude lorsque sa teinte est à dominante rouge et qualifiée à l'inverse de froide si c'est le bleu. C'est en fait la température à laquelle il faut élever celle d'un corps noir afin qu'il puisse émettre une lumière de couleur similaire, d'où la qualification de température de couleur qui est exprimée en Kelvin (K) [52-54] et peut prendre des valeurs allant de 1000 à 10000 (Figure 14).

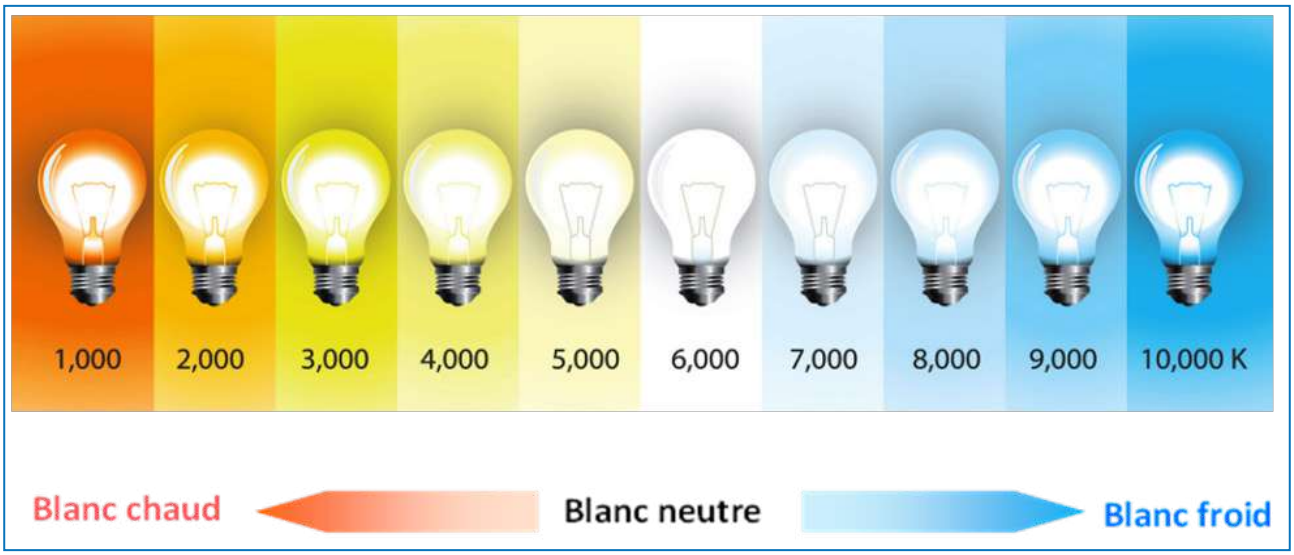


Figure 14. Température de couleur illustrée à travers des sources de lumière artificielles.

La «température de couleur» définit ainsi la teinte générale qu'aura l'ampoule, qui sera à titre d'exemple rougeâtre à 1000 °K, légèrement jaune pour une température de 2 700K, un peu plus blanche avec 3 000K et franchement blanche dès 6 000K, celle du jour étant de l'ordre de 6 400K alors qu'au-delà, elle devient de plus en plus bleuâtre (Figure 14). Ces aspects sont en fait concrètement exploités pour quantifier l'éclairage sur la base de niveaux dits

'd'ambiance' largement admis de nos jours et qui tendent à orienter le choix vers une lumière blanche qualifiée de 'chaude', qui correspond à priori paradoxalement à une température de couleur basse (1000 à 3000°K), pour créer une atmosphère chaleureuse et détendue. Inversement, une lumière blanche de température de couleur élevée (> 3500°K) qui vire vers le bleu (au-delà de 6500 K), est synonyme d'une atmosphère froide qui stimule l'éveil et favorise de ce fait les actions exigeant un niveau assez élevé d'acuité visuelle.

Remarque: La confusion apparente derrière le fait d'attribuer à une lumière chaude une température de couleur moins élevée que celle dite froide et inversement, n'en est pas une en fait. Pour comprendre cela, il y a lieu de rappeler qu'une température de couleur caractérise une source de lumière par comparaison à celle qu'émettrait un matériau idéal (corps noir) uniquement sous l'effet de la chaleur (incandescence). A titre d'exemple, un métal chaud qui peut être assimilé à un corps noir, émet un rayonnement électromagnétique d'abord sous forme de radiation thermique dans le spectre infrarouge, avant de passer dans celui visible (lumière) lorsque sa température augmente. Ainsi, à partir d'une température donnée, le métal incandescent devient rouge et au fur et à mesure qu'il chauffe, sa couleur passe au jaune puis au blanc (Figure 15) avant de finir dans le bleu. Cette propriété montre en fait que toute source lumineuse peut être décrite en se référant à la lumière émise par un corps noir, dont un métal incandescent est une approximation, pour une température donnée. Concrètement, à 1500 °K, le métal émet une lumière de même spectre que celle d'une bougie, à 4000 °K cela correspond à un soleil matinal et à 6500 °K, c'est la lumière du jour ou de grand soleil (Figures 15 et 16).

Figure 15. Evolution de la lumière émise par un métal incandescent.

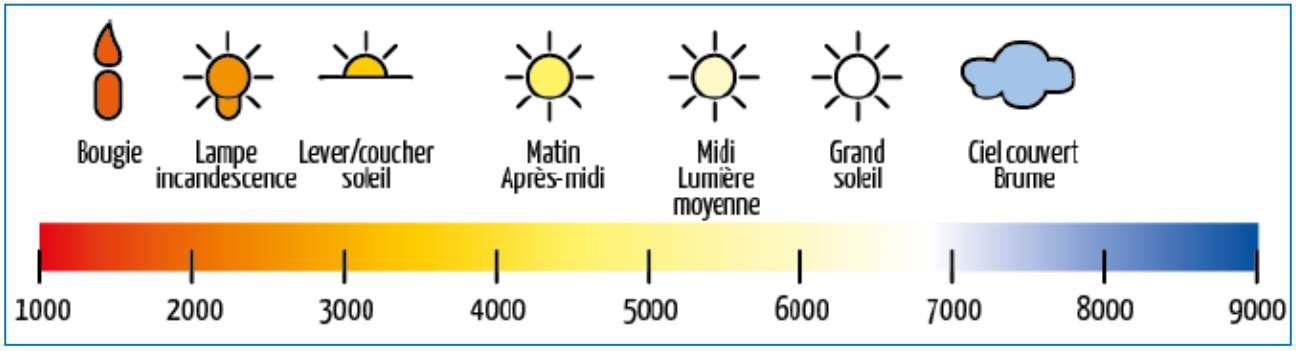


Figure 16. Exemples de lumières naturelles et Températures de couleurs correspondantes.

I.2.1.8. Le soleil et la définition d'une lumière de référence

Depuis l'aube des temps, l'horloge biologique de l'homme s'est bien adaptée aux alternances quotidiennes de la lumière et de l'obscurité. Ainsi, des repères innés ont depuis toujours imposé aux êtres vivants, le cycle naturel de la lumière auquel ils sont devenus réceptifs. Ce dernier étant matérialisé par un ralentissement inhérent de l'activité la nuit, qui s'accompagne du besoin naturel de sommeil, suivi d'éveil et de dynamisme, corrélé d'une manière ou d'une autre avec les premiers rayons du soleil. Cet astre apporte en effet l'énergie nécessaire à cela, sous forme d'un rayonnement électromagnétique dont la répartition spectrale (en fonction des longueurs d'ondes) montre que celle-ci est pratiquement présente pour moitié dans la bande visible (lumière 46 %) et celle infrarouge (chaleur 49 %). Le reste, soit environ 5%, englobe majoritairement des radiations dans le domaine de l'ultraviolet (UV) [55]. C'est justement cet aspect dominant des radiations thermiques,

qui a permis d'approcher le modèle des rayonnements solaires par celui d'un corps noir (loi de Planck en 1900), porté à une température d'environ 5900 °K, supposée être celle régnant à la surface du soleil (Figure 17).

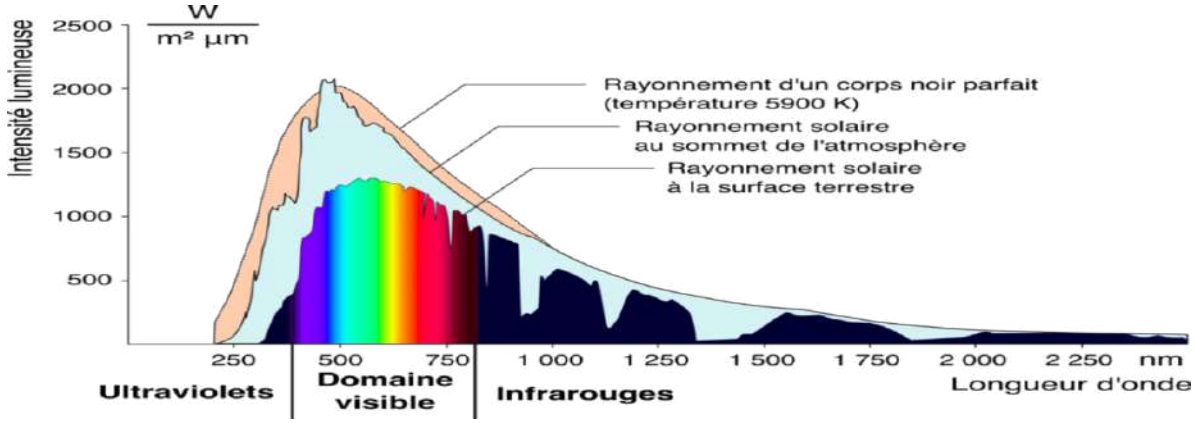


Figure 17. Densité spectrale du rayonnement solaire.

Etant essentiellement opérationnel de nuit et destiné à divers espaces ouverts sur l'extérieur, un éclairage public peut être vu comme un dispositif déployé dans l'objectif de pallier à l'insuffisance de la lumière naturelle, présente uniquement le jour dès que le soleil s'élève au-dessus de l'horizon. Ce dernier assure en effet un éclairement direct pouvant varier entre 5 et 120000 Lux selon l'état du ciel, en dehors des phases du lever et coucher qui présentent une luminosité ne permettant pas une bonne discrimination des couleurs. Ainsi, une lumière (blanche) naturelle représentative du jour (Figure 17), est définie selon des critères techniques précis, qui peuvent servir de référence quant à l'évaluation des sources de lumière artificielles (ampoules).

1- Indice de rendu des couleurs (IRC) : 100.

2-Température de couleur : 5 000 K à 6 500 K.

3- Un spectre continu caractéristique d'une lumière blanche où toutes les couleurs sont représentées de manière assez équilibrée (Figure 18) [56-57].

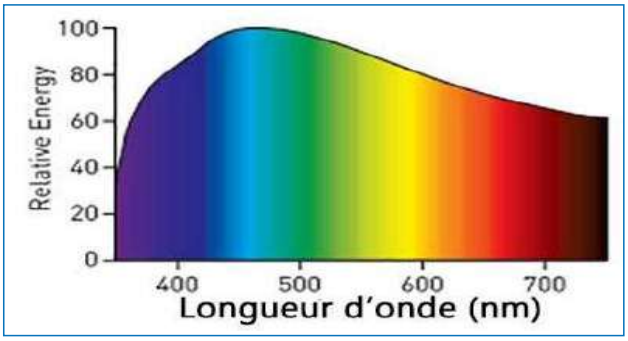


Figure 18. Spectre de référence pour la lumière blanche naturelle.

I.2.1.9. Confort visuel et incidence sur l'efficacité de l'éclairage artificiel

Les notions de température et indice de rendu de couleur (IRC), contribuent en toute logique à quantifier la qualité de la lumière, donc la perception visuelle qui en résulte sans faire intervenir l'aspect énergétique global mais celui lié à sa distribution spectrale. On peut toutefois y entrevoir le fait que la sensation de confort visuel, peut contribuer à une amélioration sensible de la perception de l'espace environnant, en amplifiant subtilement les contrastes et autoriser de fait un éclairement plus faible donc moins énergétique, sans pour autant affaiblir l'efficacité globale en termes d'appréciation visuelle [58-59]. Contrairement à cela, une lumière trop intense peut engendrer des éblouissements dont l'effet d'aveuglement peut rendre difficile toute appréciation de l'environnement tout en induisant une perte inutile d'énergie. En général, un bon compromis quant à l'efficacité énergétique d'un éclairage fonctionnel devrait, en plus de l'éclairement final, reposer également sur certains effets dont les retombées en matière de confort visuel (rendu des couleurs, température de couleur, uniformité, éblouissement, ombres gênantes…) peuvent indirectement y contribuer [60-61]. A titre d'exemple, une quantification de ces effets, illustrant bien les subtilités des choix entre l'éclairement et la température de couleur de la lumière, est formulée à travers un diagramme dédié dit de Kruithoff (Figure 19) [62]. Le lien avec la notion de confort viendrait du fait qu'une lumière chaude telle que celle jaune ou rougeâtre par exemple (<3000 K), est supposée avoir un effet reposant sur les personnes, alors qu'une lumière bleuâtre, dite froide (>4500 K), serait plus stimulante. D'une manière générale, on peut dire qu'une lumière chaude convient mieux pour des faibles niveaux d'éclairage, alors que celle froide serait plus adaptée pour les niveaux élevés.

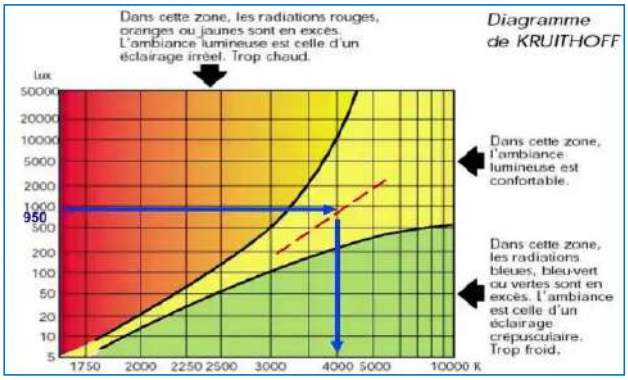


Figure 19. Compromis entre éclairement et température de couleur.

Un système d'éclairage bien conçu doit au final offrir des conditions optimales de confort visuel au bénéficiaire, selon les particularités de chaque environnement [59]. Pour cela, il est indispensable que dès sa conception, un dispositif d'éclairage intègre l'ensemble des paramètres ayant un impact dans ce sens, tels que le type de lampe qui sera utilisée, la structure prévue pour le système d'éclairage, la distribution résultante de la lumière, son efficacité et sa composition spectrale. Au final, les facteurs déterminants du confort visuel peuvent être résumés à ce qui suit :

- Eclairage uniforme;
- Luminance optimale;
- Absence d'éblouissement;
- Contrastes appropriés;
- Rendu correct des couleurs;
- Absence de fluctuations de la lumière ou effet stroboscopique.

Pour conclure sur les définitions photométriques essentielles et leur application quant aux divers choix à faire lorsqu'il s'agit de concevoir de nouveaux dispositifs d'éclairage public ou rénover ceux existants, on peut dire que les notions abordées quant à la caractérisation de la lumière, résument en fait le seuil minimum du large éventail de connaissances en la matière. Cela permet toutefois d'assurer une plateforme commune aux débats à entreprendre sur le sujet entre tous les intervenants dans l'élaboration préliminaire des besoins réels en termes d'éclairage public, répondant à la juste mesure des objectifs d'efficacité requis sans verser dans les excès inutiles et parfois même gênants.

I.3. Sources de lumière artificielle et évolutions technologiques

En dehors du soleil comme source primaire naturelle génératrice de lumière, l'homme a vite fait de mettre à son service des moyens artificiels pour s'éclairer en cas de besoin (Figure 20), notamment après avoir apprivoisé le feu (torche, lampe à huile, bougie, lampe à gaz….) [63-64].

Figure 20. Premières sources artificielles de lumière et leur évolution.

Ainsi, c'est le rayonnement thermique émis par la flamme qui a été à l'origine des toutes premières sources d'éclairage artificielles exploitées à grande échelle par l'homme, dont les dernières ont été les lampes à pétrole ou gaz, apparues vers le milieu du 19 è siècle (Figure 20). La première rupture avec la flamme comme source artificielle de lumière, reste liée à l'apparition de l'ampoule électrique de Thomas Edison en (1879) et sa large diffusion qui a accompagné le développement des premiers réseaux de distribution d'énergie électrique dès la fin du 19ème siècle.

Il faut cependant dire que la génération de la lumière émise par cette première ampoule électrique, reposait en fait sur le phénomène bien connu de l'incandescence, qui se manifeste par une émission de lumière d'un corps chauffé à des températures plus ou moins élevées [64]. Pour des valeurs plus basses, le rayonnement thermique émis (décrit par le modèle du corps noir) est initialement non visible pour l'être humain (infrarouge) puis le devient à travers une lumière de couleur rougeâtre lorsque l'on chauffe au-delà d'un certain seuil. A partir de ce point et au fur et à mesure que la température du corps chauffé continue d'augmenter, la lumière émise va décrire le spectre complet des couleurs perçues par l'homme [65], en commençant par le rouge pour arriver au violet, en passant de manière continue par toutes les teintes intermédiaires. Toutefois, si ces phénomènes sont bien apparents et ont été modélisés selon la théorie ondulatoire comme indiqué précédemment, ils ne permettent cependant pas de pénétrer à l'intérieur des phénomènes exclusivement liés à la production et la transformation de la lumière, qui eux relèvent en grande partie de son aspect corpusculaire. En effet, comprendre les principes de fabrication et fonctionnement des sources artificielles de lumière, au moins dans le but de pouvoir évaluer correctement leurs performances et optimiser les choix en tant qu'utilisateurs, passe manifestement par la prise en compte de la structure des matériaux impliqués [66-67]. De fait donc, on est obligés de mettre en application la dualité onde-corpuscule à la lumière, telle qu'elle a été introduite précédemment, en considérant également sa nature discrète (photons), afin d'appréhender les mécanismes à l'échelle atomique qui en sont générateurs. En appliquant cela à l'émission de lumière par incandescence comme développé auparavant, on peut simplement dire que les électrons des atomes constituant les corps chauffés en question, vont s'éloigner du noyau de ces derniers en absorbant une quantité importante d'énergie. Lorsque les électrons perdent cette énergie, ils retournent sur leur couche électronique initiale en émettant le surplus d'énergie sous forme de photons matérialisant le rayonnement visible (production de lumière) ou de rayonnement infrarouge (émission de chaleur).

I.3.1. Lampes à incandescence

Le principe général des lampes à incandescence, consiste à chauffer un filament conducteur de résistance R en le faisant parcourir par un courant électrique I. La puissance P qui y est dissipée par effet Joule ($P= R.I^2$) doit ainsi être suffisante pour élever la température de ce dernier jusqu'au point d'incandescence spécifique au matériau utilisé (généralement métallique). Celui adopté le plus souvent dans ce cas est le tungstène du fait qu'il est caractérisé par une température de fusion élevée (3422 °C) [68-69]. Ainsi, un filament en tungstène peut être amené à des températures d'incandescence pouvant aller à 2500°C, tout en restant rigide pour émettre en continu une lumière à large spectre proche de celle blanche (Figure 21).

Figure 21. Couleur de la lumière émise par un filament à tungstène porté à diverses températures croissantes.

Le problème qui se pose est qu'à l'air libre, le filament porté à de hautes températures brulerait en contact avec l'oxygène. La première solution a justement consisté à l'isoler en le confinant à l'intérieur d'une ampoule en verre étanche dans laquelle règne le vide, d'où la structure connue de lampe à incandescence. Dans ce cas, le filament de tungstène s'évapore peu à peu et se dépose sur la face interne de l'ampoule. Sous l'effet du noircissement résultant, l'échange du rayonnement lumineux avec l'extérieur est réduit graduellement jusqu'à rupture du filament au bout d'environ un millier d'heure de fonctionnement. Afin d'empêcher une telle dégradation de

Figure 22. Lampe à incandescence classique.

l'efficacité lumineuse de la lampe à incandescence ainsi constituée, une solution alternative a été de remplacer le vide dans l'ampoule par un gaz inerte, dont le plus utilisé a été l'argon et à un degré moindre le krypton ou le xénon (Figure 22). Ces derniers servent essentiellement comme écran au transit des atomes de tungstène vaporisé, empêchant ainsi le noircissement qui rendait l'ampoule ordinaire (à vide) de plus en plus opaque durant sa durée de vie, d'où une meilleure efficacité lumineuse. Comme retombée positive, il y a également le fait que l'écran formé par le gaz rare, contribue à ramener par chocs successifs les atomes de tungstène sublimé vers le filament, d'où un rallongement de la durée de vie de la lampe [70-71].

I.3.1.1. Lampes à incandescence halogènes

Afin d'augmenter l'efficacité de la lampe à incandescence classique ainsi que sa durée de vie, un composé halogène tel que le fluor, l'iode ou le brome, est simplement ajouté à l'environnement neutre typique de la configuration classique, afin d'améliorer encore plus la tenue du filament de tungstène en le régénérant aux hautes températures. Ainsi, l'efficacité énergétique obtenue est 20 à 30 % supérieure à celle de la lampe à incandescence classique, avec une durée de vie pratiquement double. Il y a lieu de noter également que de telles améliorations, ont logiquement permis la mise sur le marché de lampes à incandescence halogènes, pour des puissances maximales beaucoup plus importantes que celles classiques.

Concrètement, une lampe halogène se différencie par rapport à celle à incandescence classique, du fait qu'elle soit dotée d'une ampoule en verre de quartz, supportant de hautes températures, dans laquelle a été introduit un gaz halogéné (iode ou bromure généralement) à haute pression (Figure 23) [72]. Ce procédé permet en effet d'éviter le transfert des atomes de tungstène du filament vers la paroi interne de l'ampoule, qui au final vont se déposer à nouveau sur le filament, contribuant ainsi à sa régénération. Conclusion, ce dernier peut être porté à des températures plus importantes et produire ainsi une lumière plus éclatante, tout en assurant une durée de vie plus longue.

Figure 23. Lampe halogène à incandescence et divers modèles.

I.3.1.2. Lampes à incandescence : Efficacité et qualité de la lumière

Le concept de l'incandescence dans l'éclairage artificiel, continue d'être appliqué à ce jour, du fait que les lampes qui en résultent sont bon marché et restent assez largement utilisées par les particuliers, notamment comme source d'éclairage intérieur en Algérie. Cependant, cela est de moins en moins le cas, essentiellement à cause d'un rendement énergétique très faible du fait que seulement 5 à 10 % de l'énergie électrique consommée est convertie en lumière, le reste étant perdu sous forme de rayonnement invisible infrarouge (90%) et dissipation locale de chaleur (Figure 24a). Ainsi, leur efficacité lumineuse très médiocre (<15 lm/W), conjuguée à une durée de vie qui reste la plus courte de toutes les lampes électriques avec 1000 heures environ, ont conduit à interdire petit à petit leur utilisation avec des calendriers de bannissement qui évoluent régulièrement, notamment sous la pression des politiques actuelles de transition énergétique. Exemple, dans l'Union Européenne, cela a commencé en 2009 avec les ampoules les plus puissantes (>100 W), avant un bannissement total des lampes à incandescences en 2012 avec les 25 W.

Comparée à la lampe classique à incandescence, celle halogène a principalement une durée de vie plus longue (2000 à 5000 heures) [73], un rendement lumineux plus élevé (10 à 30 lm/W), pas de noircissement prématuré de la paroi interne et enfin, une lumière de même qualité mais à distribution spectrale nettement différente (Figure 24b-25). Elle présente toutefois une certaine limitation que celle classique n'a pas, concernant la variation de l'intensité lumineuse par gradation, qui empêche le fonctionnement du cycle régénérateur.

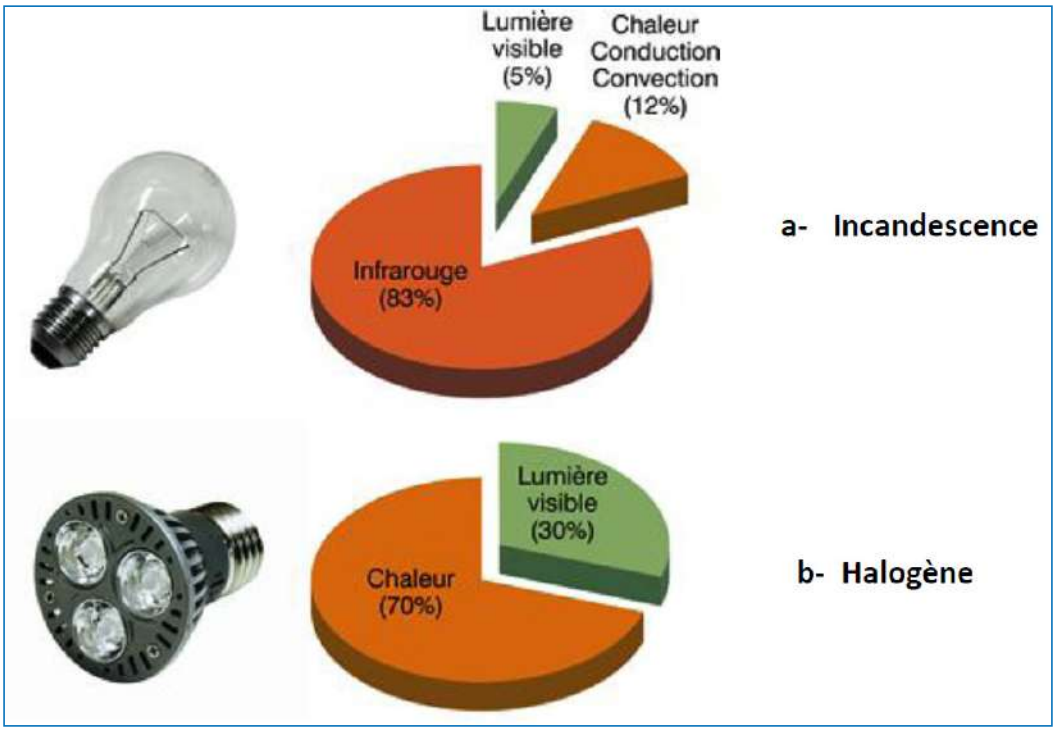


Figure 24. Performances énergétiques des lampes à incandescence et halogène.

Quant à la lumière émise par les lampes à incandescence, elle est de grande qualité (proche de celle naturelle), avec un spectre continu et un excellent indice de rendu de couleur (Figure 25). En effet, son spectre d'émission s'apparente à celui de la lumière blanche, avec une couleur dite chaude « blanc chaud » et un IRC proche de 100. La composition spectrale de la lumière ainsi produite, comprend toutes les longueurs d'ondes visibles. Ce sont ces caractéristiques photométriques avantageuses et leur simplicité d'utilisation, qui ont fait que les lampes à incandescence, après avoir initialement remplacé les installations d'éclairage public au gaz, étant produites et commercialisées selon un large éventail de puissances normalisées allant de 25 à 2000 W, aient continué à être largement utilisées dans ce secteur entre les deux-guerres. Cela étant avant de décliner au profit des tubes et surtout des ballons fluorescents à partir des années 1950, pour cause essentielle de rendement énergétique meilleur, malgré une qualité d'éclairage, peu appréciée par rapport à celle des lampes à incandescence. .

Bien qu'elles aient été les premières sources lumineuses qui ont ouvert la voie à l'éclairage artificiel à base d'énergie électrique, les lampes à incandescence continuent d'être utilisées dans divers pays et ce, plus d'un siècle après leur mise sur le marché, du fait de leur simplicité et qualité de lumière caractérisée par un spectre continu (Figure 25), mais surtout leur faible coût qui est resté à la portée de tous. Toutefois, vu le contexte économique mondial actuel, dont l'efficacité énergétique est devenue une contrainte majeure pour diverses raisons, motivées

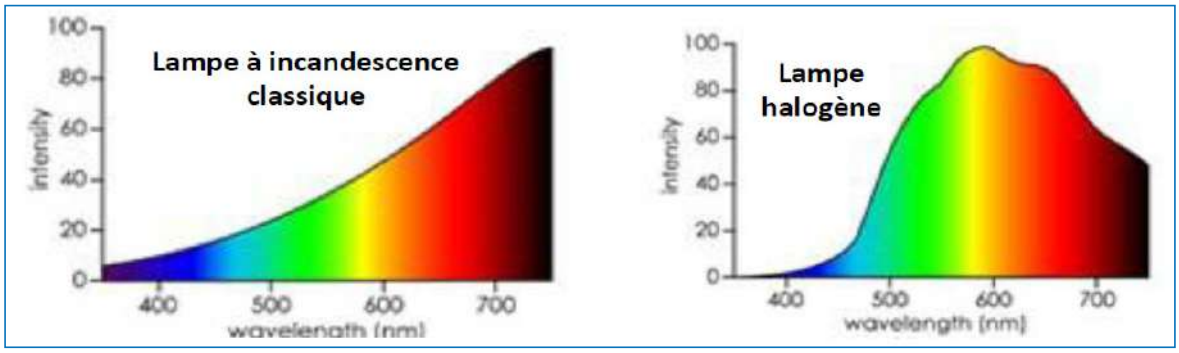


Figure 25. Spectres lumineux des principales lampes à incandescence.

notamment par des considérations environnementales, il est évident que les ampoules à incandescence et halogènes, sont devenues obsolètes sur ce plan. C'est sur cette base que les lampes à incandescence classiques, sauf quelques modèles spéciaux, ont fait l'objet de réglementations d'interdiction et retrait des marchés dans plusieurs pays dès 2005 (Cuba et Venezuela), 2009 (UE), 2012 (USA) [74]. Concernant les lampes halogènes, cela a débuté vers 2018 [75] dans l'union européenne, pour les modèles les moins performants en termes d'efficacité énergétique, comme celles faisant parties des classes C et D, la Grande Bretagne ayant suivi en 2021.

I.3.2. Lampes à luminescence

La luminescence est à la base de toutes les radiations visibles autres que thermiques, d'où une lumière qualifiée de froide contrairement à celle chaude obtenue par incandescence (Figure 26). Les solutions d'éclairage à base de cette technologie, exploitent le phénomène d'émission d'une radiation lumineuse par la matière, qui peut être gazeuse, liquide ou solide, lorsqu'elle est soumise à un mode d'excitation particulier [76-77]. Ainsi et à titre d'exemple, un gaz (ou vapeur) émet de la lumière sous l'effet d'une décharge électrique comme c'est illustré à travers l'effet de l'éclair, qui en est une manifestation naturelle.

Toutes les sources lumineuses à base de luminescence, sont caractérisées par une radiation électromagnétique visible à spectre discret, ce qui implique une qualité de lumière moindre que celles des lampes à incandescence dont le spectre continu assure une meilleure qualité, notamment à travers un Indice de Rendu de Couleur optimal (IRC > 90). Pourtant, malgré cela ainsi qu'un prix plus élevé, les lampes à décharge se sont imposées dans l'éclairage public par rapport à celles à incandescence, notamment vers les années 50 du siècle dernier, car elles proposent une efficacité énergétique de loin meilleure, ainsi qu'une durée de vie beaucoup plus longue. Suite aux nombreux travaux expérimentaux visant la mise au point de lampes à décharge qui ont eu lieu en laboratoire vers la seconde moitié du XIXe siècle, le premier prototype réellement fonctionnel n'est apparu qu'au tout début du siècle suivant (1901). Depuis, des développements majeurs ont permis aux lampes à décharge à haute intensité ou HID (High Intensity Discharge) [76,78] de s'imposer dans divers domaines de l'éclairage artificiel, notamment les nombreuses applications ayant besoin de fortes intensité lumineuses, comme celles visant un éclairage extérieur d'assez grands espaces, comme ceux publics

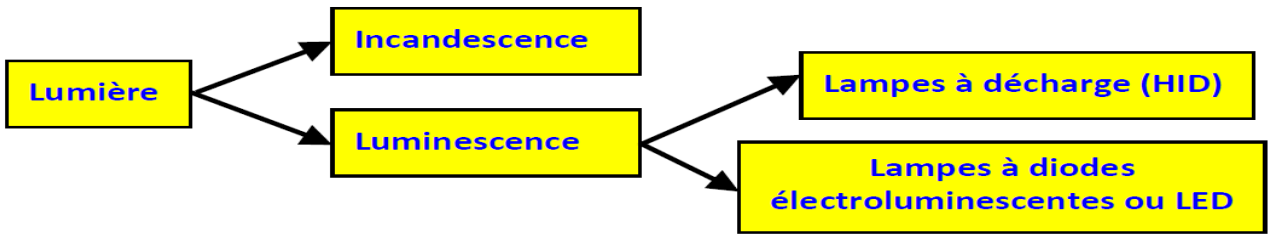


Figure 26. Technologies à la base des sources artificielles de lumière.

(voies de circulation automobile, rues piétonnes, places publiques…). Les diodes électroluminescentes ou LED sont venues compléter celles à base de luminescence beaucoup plus tard, soit au début du siècle présent.

I.3.2.1. Lampes à décharge et principe de fonctionnement

Le principe physique des lampes à décharges, consiste à ioniser un gaz ou vapeur métallique, confiné au préalable dans une enveloppe étanche (ampoule), en lui imposant dans un premier temps une différence de potentiel (tension) électrique suffisamment élevée pour y initier un arc électrique, puis assurer le maintien de celui-ci en limitant l'intensité du courant électrique. Ainsi, toutes les lampes à décharge sont toujours accompagnées de deux circuits auxiliaires dont le premier assure l'ionisation initiale du gaz (starter) et le second a pour rôle de l'entretenir (ballast), ce dernier pouvant être à base de circuits magnétique ou électronique.

Les lampes à décharge destinées à l'éclairage public, utilisent principalement comme gaz le mercure et le sodium [79-80]. Ces derniers sont le plus souvent confinés à haute pression, pour assurer au mieux une lumière blanche (spectre riche en couleurs). Dans le cas de la basse pression, le mercure émet une lumière blanche bleuâtre, tandis que le sodium génère une lumière jaune vive avec cependant une efficacité lumineuse très élevée. Toutefois et dans les deux cas, la restitution des couleurs reste assez médiocre, du fait que la richesse spectrale des rayonnements visibles ainsi émis, est très réduite. Pour corriger cette situation, une des approches consiste justement à adopter une pression plus importante [81], dont l'effet est d'augmenter les interactions entre atomes, d'où une meilleure diversification des niveaux énergétiques sollicités qui se répercute sur celle des photons constituant le rayonnement émis.

Avec des indices de rendu de couleur devenus ainsi acceptables, avec des niveaux d'efficacité lumineuse et des seuils d'éclairage satisfaisants, les lampes à décharge haute pression à base de mercure ont commencé à être utilisées dans l'éclairage public à partir des années 30 du siècle passé.

I.3.2.2. Lampes à décharge et éclairage public

A côté des lampes à incandescence qui étaient largement utilisées dans l'éclairage public durant la première moitié du siècle passé, où elles ont remplacé les installations d'éclairage au gaz, des lampes à décharge, notamment à vapeur de mercure et vapeur de sodium, étaient également commercialisées, sans beaucoup de succès à cause de leur éclairage à faible rendu de couleur. Vers la fin de cette période, les tubes utilisant de la vapeur de mercure combinée à une poudre fluorescente sur la paroi pour produire une lumière blanche, sont apparus. Ces derniers sont suivis dès le début des années 50 par les lampes dites «ballons fluorescents», fonctionnant selon un principe similaire, mais avec la vapeur de mercure confinée à haute pression dans un petit tube en quartz, lui-même entouré d'une ampoule recouverte d'une poudre fluorescente [82]. Ces dernières, conçues pour des paliers de puissance significatifs et grâce à leur durée de vie bien plus longue que celle des lampes à incandescence, finissent par prendre une part assez importante de l'éclairage public entre 1950 et 1975 environ. Entretemps, Les lampes à décharge, utilisant la vapeur de sodium sous basse pression, commencent à être de plus en plus utilisées, notamment dans des situations spécifiques comme l'éclairage des tunnels par exemple, du fait qu'elles émettent une lumière jaunâtre monochromatique, les rendant peu éblouissantes. A cela s'ajoute une efficacité lumineuse, restée inégalée pendant très longtemps (180 lm/W). Toutefois, à cause de leur rendu de couleur très médiocre, essentiellement dû à leur spectre limité à une seule raie, leur utilisation n'a pas pu se généraliser en dehors de certaines applications. En réponse à cela et connaissant l'effet de la pression du gaz utilisé quant à l'amélioration du rendu de couleur, un nouveau type de lampe, dite «à vapeur de sodium sous haute pression», a intégré le marché de l'éclairage public dès le début des années 60. La lumière ainsi produite a un spectre bien plus riche en couleurs que celle des lampes à sodium basse pression de la génération précédente et ce au détriment d'une diminution prévisible de l'efficacité lumineuse. Malgré cela, elle reste bien au-dessus de celle des ballons fluorescents, qui ont de ce fait, progressivement cédé la place à ce nouvel arrivant dès les années 70. Ainsi, les lampes à vapeur de sodium haute pression, qui ont atteint une efficacité lumineuse nettement plus intéressante avec des indices et températures de couleurs plus diversifiés, ont pratiquement dominé le marché de l'éclairage public jusqu'au début des années 2000. A leur tour, ces dernières ont commencé à subir la concurrence des lampes aux halogénures (ou iodures) métalliques dès les années 90, qui permettaient une lumière blanche avec un IRC et indice de température de couleur proches de ceux caractéristiques de la lumière du jour. Cependant le coût un peu élevé de celles-ci, a

plus orienté leur utilisation pour des besoins spécifiques, tels que la mise en valeur de certains édifices et espaces publics (stades…) ainsi que l'industrie cinématographique (scènes de tournage…).

I.3.2.3. Classification des lampes à décharge

Ayant établi que la qualité de la lumière émise ainsi que le rendement énergétique des lampes à décharge, dépendent principalement de la nature du gaz utilisé ainsi que la pression avec laquelle il est confiné à l'intérieur de l'ampoule, le classement de celles-ci ne peut pas échapper à ces deux critères [66,79]:

1- Pression (lampes à décharge basse ou haute pression)
2- Nature du gaz utilisé (Lampes à mercure ou au sodium)

Du fait que l'ensemble des données existantes sur les divers types de lampes utilisées dans l'éclairage public en Algérie, semble privilégier la classification selon la nature du gaz utilisé, c'est celle-ci qui sera adoptée dans la présentation des lampes à décharge qui suit (Figure 27).

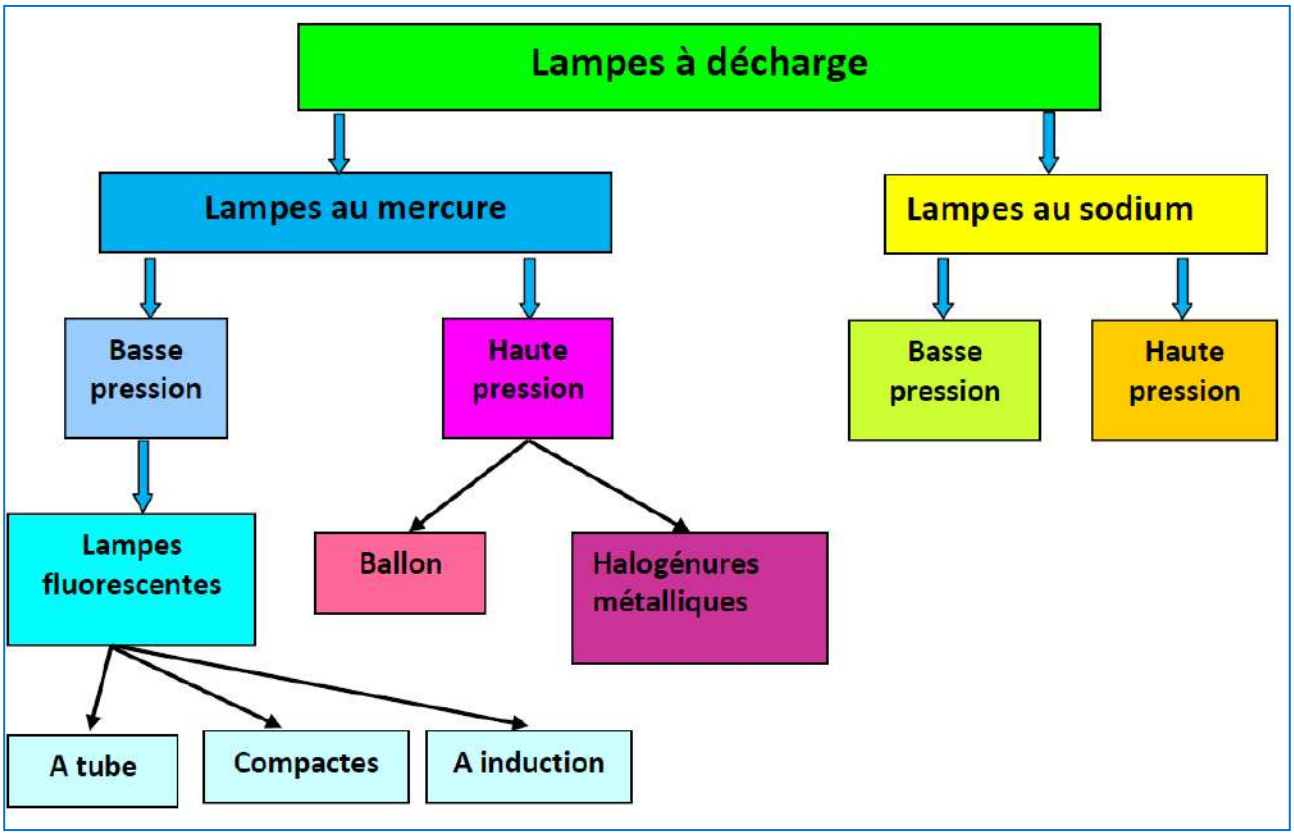
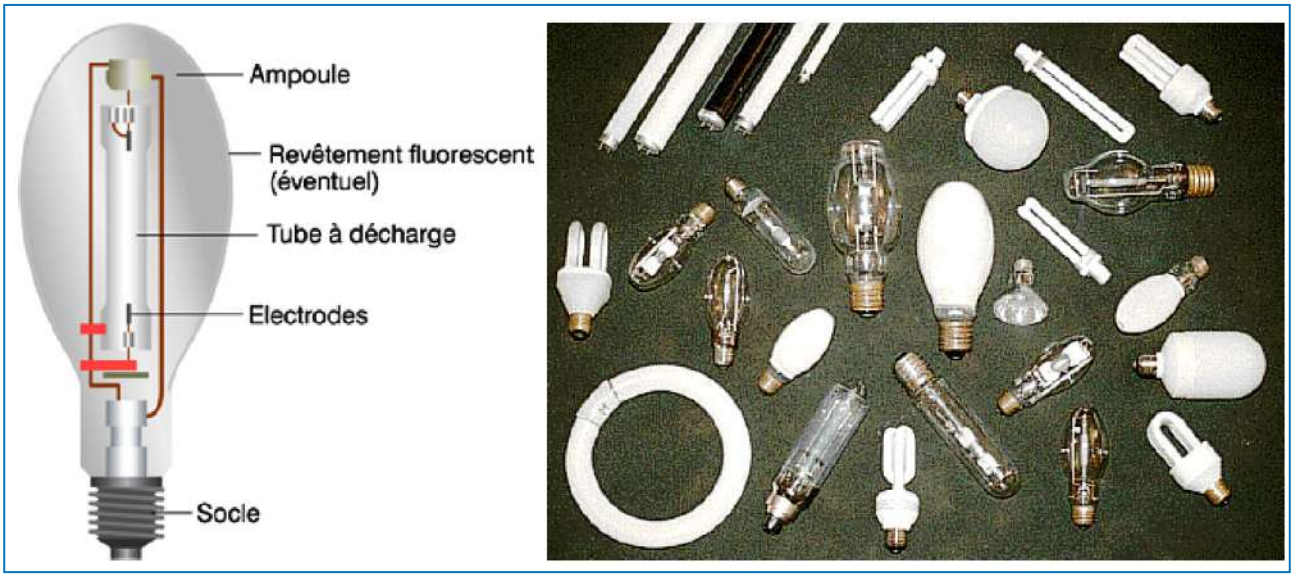


Figure 27. Diverses technologies des lampes à décharge (HID).

Comme indiqué précédemment, plusieurs lampes à décharges fonctionnant selon les diverses technologies énumérées ci-dessus, sont commercialisées à ce jour (Figure 28), alors que certains modèles ont été prohibés dans plusieurs pays pour diverses raisons, telles que faible efficacité lumineuse (lampes à incandescence) et toxicité (mercure..).

I.3.2.4. Lampes à décharge au mercure basse pression

Il s'agit généralement d'un tube de verre dans lequel est confinée une vapeur de mercure sous basse pression, d'où la technologie de lampes à décharge dite «à mercure basse pression», dont la première lampe, a été commercialisée en 1908. Quant à leur principe, il consiste à créer un arc en soumettant à une différence de potentiel électrique (tension d'amplitude suffisante), le gaz contenu à l'intérieur du tube, généralement constitué d'un mélange d'argon et de vapeur de mercure. Une fois ionisé, ce dernier produit alors des ondes électromagnétiques dans l'ultraviolet (non visibles à l'œil humain) qui sont converties à leur tour dans le visible grâce à des poudres fluorescentes (exemple: béryllium) déposées sur les parois de verre d'où l'apparence opale de cette



Figures 28. Structure générale d'une lampe à décharge et divers modèles commercialisés.

famille [82]. L'initiation de l'arc et son maintien dans le but d'entretenir l'émission lumineuse, est assurée par un circuit électrique spécial, assurant à la fois la fonction d'allumage de l'arc «starter» et celle liée à son maintien en limitant son courant après «ballast».

Grâce à leurs bonnes performances en termes de durée de vie, efficacité lumineuse, rendu des couleurs et prix raisonnable, les lampes fluorescentes ont été pendant longtemps la source privilégiée, notamment en éclairage intérieur. Cette famille regroupe essentiellement deux types de lampes (Figure 29):

– **Les lampes fluorescentes tubulaires régulières:** Celles-ci ne peuvent pas se brancher directement sur le 230 V du fait que le ballast associé est placé à l'extérieur de la lampe qui a un culot bien spécifique. C'est à cause de cette configuration que ce type de lampes était plus réservé à un éclairage professionnel (bureaux, magasins, ateliers…). Les premières lampes de ce type ayant été commercialisées en 1938 (Figure 29).

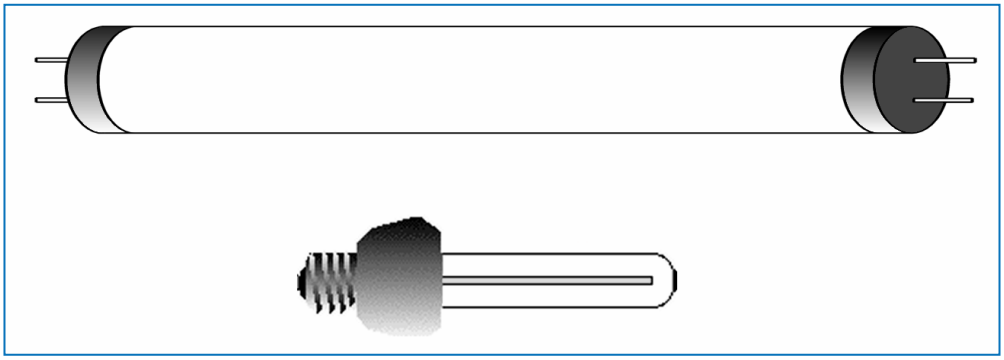


Figure 29. Les deux principaux types de lampes fluorescentes.

– **Les lampes fluorescentes compactes:** Contrairement à celles à tube, elles peuvent être directement alimentées à partir du réseau basse tension (230 V). Le culot classique à vis (type E27) ou à baïonnette (B22) de celles-ci, ayant été aménagé pour intégrer le ballast associé (Figure 29). C'est pour cela que ces dernières étaient très largement utilisées par les particuliers et sont connues sous le nom de "fluo compacte" ou Lampe Basse Consommation (LBC). En effet, conçues avec le même culot standard que celles précédentes à incandescence, elles ont été massivement adoptées pour remplacer celles-ci, nettement moins efficaces.

I.3.2.5. Lampes fluorescentes à tube

Les tubes fluorescents linéaires (Figure 30), très souvent improprement appelés "néon", sont utilisés de manière courante depuis les années 30 du siècle passé et se présentent avec une longueur qui varie

de quelques centimètres à plus de deux mètres selon la puissance [83]. Il s'agit de lampes à vapeur de mercure basse pression qui existent en deux versions: à «cathodes chaudes» et à «cathodes froides». Le tube fluorescent classique utilisé dans les bureaux et les usines correspond à la première version; le terme «cathode chaude» se rapporte à l'amorçage de la lampe par préchauffage des électrodes pour créer une ionisation suffisante du gaz et des vapeurs de mercure afin de stabiliser la décharge. Les lampes à cathodes froides sont principalement utilisées pour les enseignes et la publicité.

La basse pression du mercure provoque une décharge à émission lumineuse dans le bleu pâle. La majeure partie du rayonnement se trouve dans la zone ultraviolette, précisément à 254 nm, fréquence de rayonnement caractéristique du mercure. La paroi intérieure du tube

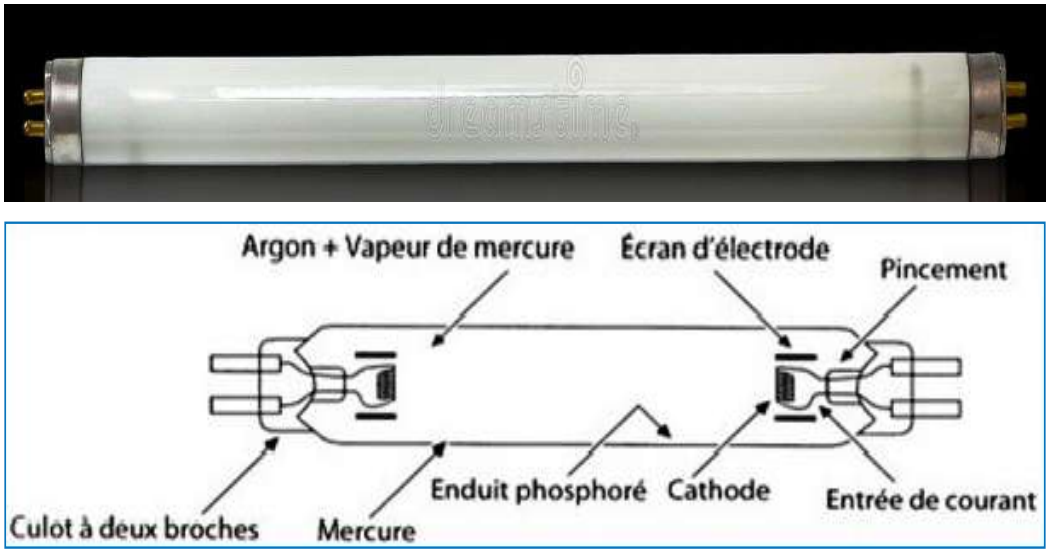


Figure 30. Principe d'une lampe à mercure avec tube fluorescent.

comporte une fine couche de substance fluorescente, qui absorbe les ultraviolets (UV) et rayonne l'énergie sous forme de lumière visible. La qualité de la couleur de la lumière est justement déterminée par la couche fluorescente, dont il existe différentes substances émettant diverses couleurs et offrant plusieurs rendus des couleurs.

Dans les années cinquante, les substances fluorescentes existantes offraient le choix entre une efficacité lumineuse raisonnable (60 lumens/watt) avec une moins bonne lumière dans les rouges et les bleus, ou un meilleur rendu des couleurs avec des substances fluorescentes «de luxe», mais d'un moindre rendement (40 lumens/watt).

De nouvelles substances fluorescentes à bande étroite furent développées dans les années soixante-dix. Elles émettaient séparément dans le rouge, le bleu et le vert mais, combinées, elles produisaient une lumière blanche (Figure 31). Un dosage des proportions permettait d'obtenir une gamme d'appa-

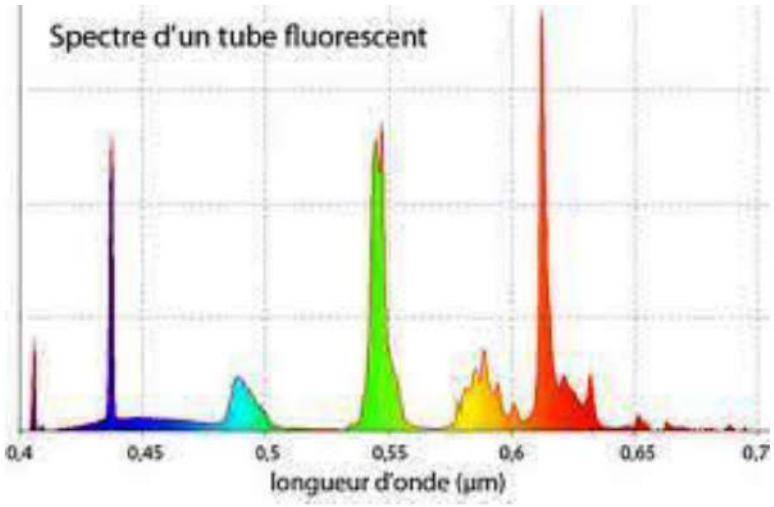


Figure 31. Spectre de la lumière émise par un tube fluorescent.

rences colorées offrant toutes un excellent rendu des couleurs.

La lumière des tubes fluorescents est souvent considérée comme froide et peu agréable. Cette remarque, valable pour les tubes d'ancienne génération qui ont un indice de couleur faible (IRC = 65), n'est plus applicable aux tubes actuels qui présentent, une large gamme de températures de couleur (2700° à 6500°) et d'IRC (50 à 90) (Figure 32). Il est donc possible de choisir un tube ayant des caractéristiques presque semblables aux lampes à incandescence. Pour cela, il suffit de se référer au marquage standard des tubes fluorescents indiqué par un code à trois chiffres, dont le premier désigne l'IRC (en dizaines de %) et les deux derniers la température de couleur (en centaines de Kelvin) (Figure 32).

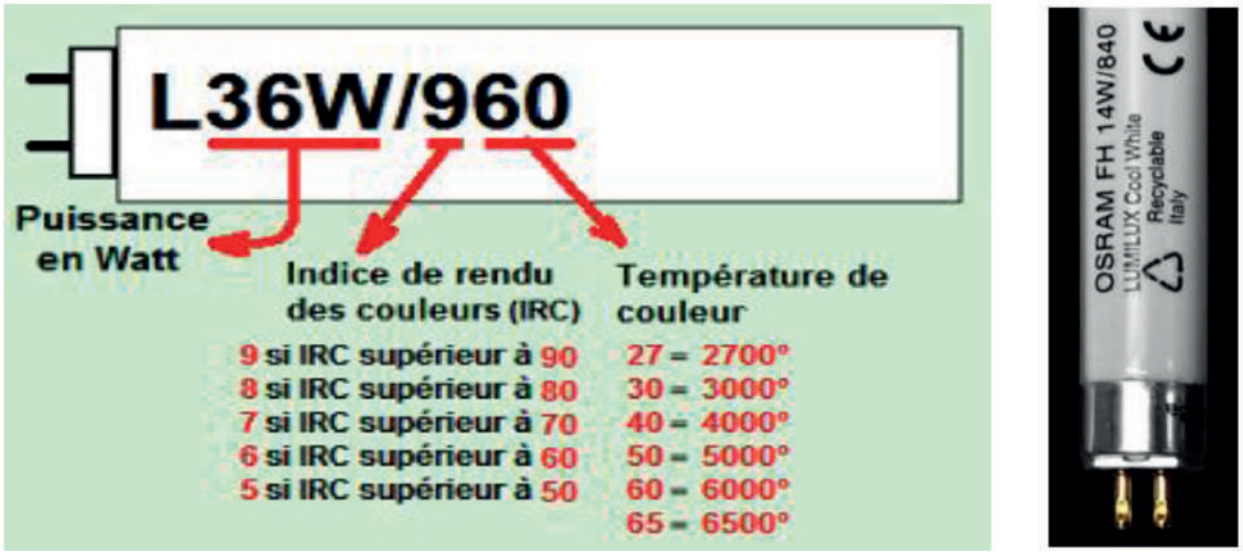


Figure 32. Températures et indices de couleurs des nouvelles lampes fluorescentes.

Peu adaptés aux installations domestiques (les tubes fluorescents nécessitent un système de fixation encombrant et appareillage dédié pour fonctionner), ils sont en revanche très utilisés pour éclairer les locaux grand public, tels que les espaces de travail, les hôpitaux, centres commerciaux (Figure 33).

A l'extérieur, ils sont également très utilisés dans les lieux semi-abrités tels que les stations-service, abribus (Figure 34) et autres. Ainsi le tube fluorescent était de très loin la source lumineuse la plus vendue parmi toutes celles existantes au début du 21ème siècle.

La durée de vie des tubes fluorescents courants, dépend du type de ballast qui leur est associé et à moindre mesure du nombre d'allumages. Elle avoisine ainsi 10 000 h avec un ballast électromagnétique ou électronique simple et peut aller jusqu'à 16 000 heures avec ce dernier lorsqu'il est associé à un dispositif de préchauffage des électrodes.

Figure 33. Diverses configurations et usage des tubes fluorescents.

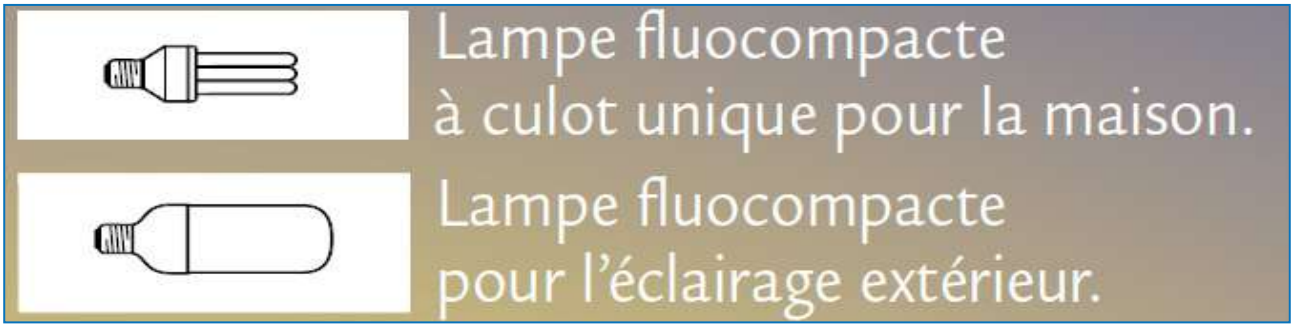
Figure 34. Exemple d'éclairage public avec tubes fluorescents (4x36 W).

I.3.2.6. Lampes fluorescentes compactes (CFL)

Du fait de sa forme linéaire, le tube fluorescent n'est pas destiné dans la pratique à remplacer la lampe à incandescence. Les progrès technologiques ont toutefois permis de passer à des tubes étroits et de petite taille, qui peuvent être configurés pour avoir à peu près la même dimension que la lampe à incandescence. C'est ce qui est justement réalisé dans les lampes fluocompactes ou CFL (Compact Fluorescent Lamp), apparues sur le marché au début des années 80 du siècle passé, qui fonctionnent selon le même principe de base que les tubes habituels, avec cependant une densité superficielle de puissance beaucoup plus importante sur les substances fluorescentes [84]. L'encombrement qui posait problème a donc pu être réduit en repliant le tube plusieurs fois (2, 3, 4 ou 6 fois) de manière à rendre l'ensemble plus compact (Figure 35). Ainsi, les lampes fluocompactes ou LBC (Lampes Basse Consommation), ont plus une vocation de lampes de rénovation ou de remplacement de celles à incandescence. Avec des culots adaptés, elles peuvent en effet les remplacer (échange standard), tout en assurant une efficacité énergétique de loin meilleure (rendement lumineux 5 fois supérieur) ainsi qu'une durée de vie beaucoup plus longue (10000 heures environ). C'est ce qui fait que les lampes dites "économiques" à culot à visser sont devenues les lampes les plus répandues dans le commerce grand public et ont en général un rapport qualité-prix très avantageux.

Les lampes fluocompactes ont toute leur électronique intégrée au culot et proposent des niveaux de puissance qui vont de 5W à 120W, avec des configurations adaptées selon l'environnement à éclairer : intérieur ou extérieur (Figure 36).

Figure 35. Divers modèles de lampes fluocompactes (CFL).



Figures 36. Lampes fluocompactes (CFL) pour éclairage intérieur et extérieur.

Le retard à l'allumage qui leur était reproché, a pu être résolu au niveau des ballasts associés, généralement électroniques (Figure 37), dont certains modèles peuvent autoriser également une variation graduelle du flux lumineux (gradation).

Un bon rendu de couleur est assuré par les lampes fluorescentes dont le spectre est discontinu (Figure 38) et les pics correspondent aux différentes poudres fluorescentes.

Pour résumer, vu la grande diversité des modèles de lampes fluocompactes ou LBC, (Figure 35) ainsi que leurs performances en termes d'efficacité lumineuse et la qualité de la lumière émise (Tableau 2), elles ont été largement adoptées pour des besoins d'éclairage intérieur ou extérieurs.

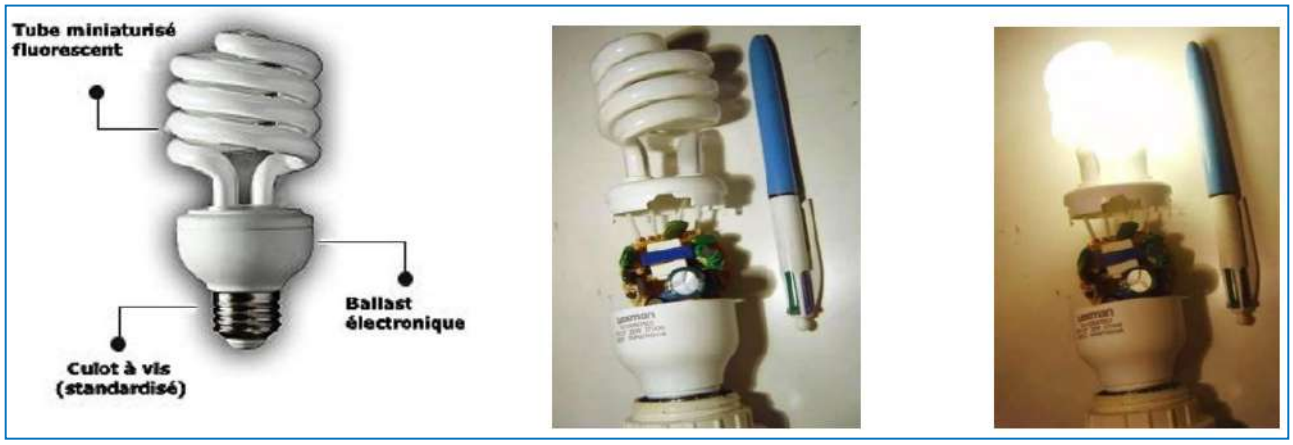


Figure 37. Lampe fluocompacte (CFL) et ballast électronique.

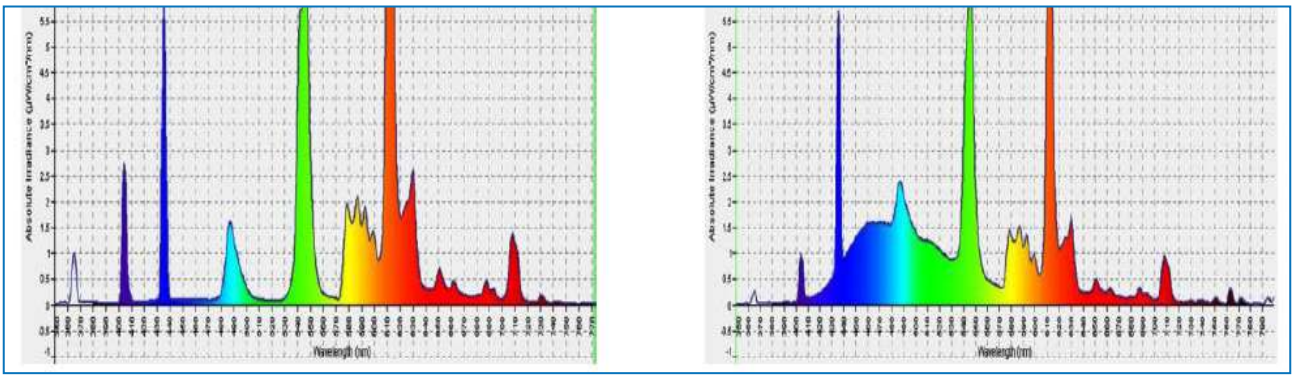


Figure 38. Spectres lumineux de deux lampes fluocompactes de 15 W ayant des températures de couleur différentes.

Fonctionnant selon le même principe des lampes fluorescentes, la lampe à induction n'a toutefois pas d'électrode. L'ionisation du gaz dans ce cas est réalisée par un champ électromagnétique crée par un courant à haute fréquence (Tableau 3), produit par un générateur extérieur, alimentant une bobine appelée

antenne, placée au centre de l'ampoule (Figure 39) [85-86].

Sans électrodes en contact direct avec le gaz, les lampes à induction ont un démarrage instantané avec une durée de vie exceptionnelle, pouvant largement dépasser les 50 000 heures. Malgré cela, la lampe à induction, peu commercialisée initialement à cause, entre autres, de son coût relativement élevé, est restée longtemps réservée aux seules applications requérant de longues périodes de fonctionnement avec une maintenance difficile à assurer où suffisamment coûteuse.

Tableau 2. Données caractéristiques des lampes LBC.

Propriétés	Données indicatives
Efficacité lumineuse	40 à 100 lm/w (faible dépréciation)
Température de couleur	3000 à 6500 K (blanc chaud au froid)
Temps d'allumage	Instantané (allumage et rallumage < 1s)
Durée de vie	15000 à 24000 h
Indice de rendu de couleur	65 à 95 (bonne stabilité des couleurs)
Gradation	0 à 100 % avec ballast dédié

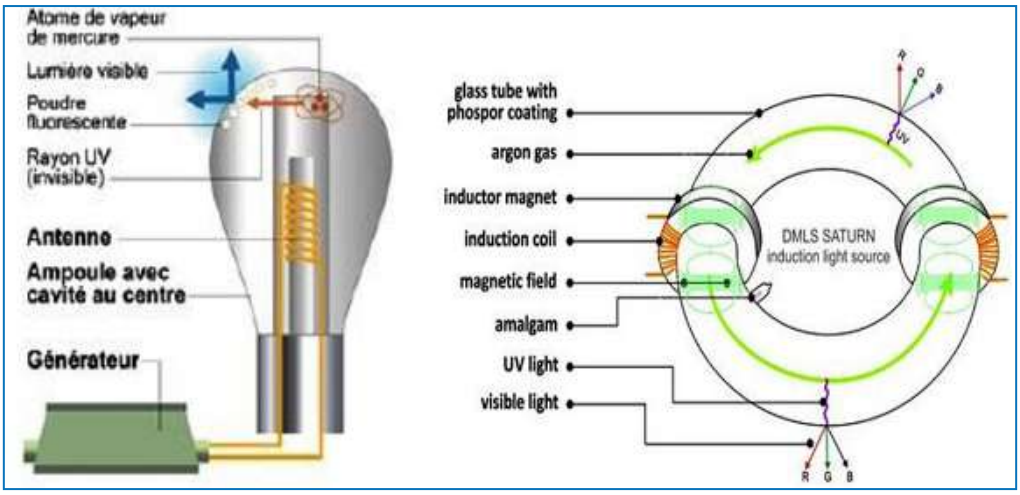


Figure 39. Diverses structures d'une lampe à induction.

I.3.2.7. Lampes à induction

Toutefois et bien après la première lampe à induction (sans électrodes), mise sur le marché vers la fin des années 80 du siècle passé par Matsushita Electric Works, cela est en train de changer car son introduction dans l'éclairage public est devenue une réalité au cours des dernières années. Cela fait essentiellement suite aux développements technologiques qui ont conduit à une réduction notable des coûts de sa fabrication tout en renforçant ses performances photométriques. Ces dernières, en plus d'une durée de vie inégalée, pouvant aller à 100000 heures et des coûts induits de maintenance très bas, ont de fait constitué une plateforme argumentaire très favorable à un éclairage public écoénergétique, apte à répondre aux engagements d'efficacité dictés par le concept de transition énergétique, dont les contours ont commencé à se préciser il y a au moins une vingtaine d'années. En effet des études récentes sur l'usage des lampes à induction, disponibles selon plusieurs modèles (Figure 40), comme source lumineuse dans un dispositif d'éclairage public correctement mis en œuvre (Figure 41), peut réduire la consommation d'énergie de plus de 50 % et les coûts de maintenance de 70 %.

Figure 40. Divers modèles commercialisés de lampes à induction.

Figure 41. Divers supports adaptés aux lampes à induction.

Ces seuils d'efficacité restent toutefois également assujettis à l'étage d'alimentation particulier aux lampes à induction qui se résume à un rôle de transformateur dont le primaire est constitué d'un enroulement classique parcouru par le courant alternatif primaire. Ce dernier induit directement un champ magnétique dans le gaz siège de la décharge électrique, qui joue ainsi de fait le rôle d'un enroulement secondaire. Le couplage entre les deux (primaire et secondaire) étant essentiel pour la capacité de transfert d'énergie, l'ensemble du circuit électromagnétique impliqué serait d'autant moins encombrant à puissance égale que la fréquence de travail est importante. C'est cela qui justifie en grande partie de voir des générateurs de puissance à fréquences élevées, généralement dans la bande RF (Tableau 3), associés aux lampes à induction comme alimentation ou 'ballast' de dimensions réduites et pouvant générer des puissances compatibles avec les besoins visés. Soit dans ce cas des seuils allant à 400 W pour les lampes à induction à circuit magnétiques fermé, dites à basses fréquences, et 165 W pour celles à circuit magnétique ouvert, ou à hautes fréquences (Tableau 3).

Tableau 3. Résumé des caractéristiques typiques aux principaux modèles de lampes à induction.

Type de Lampe à induction		
Fréquence de travail	Basse fréquence 140 KHz à 250 KHz	Haute fréquence 2650 KHz
Efficacité lumineuse	70 à 85 lm/W	60 à 65 lm/W
Puissance unitaire	40 à 400 W	18 à 165 W
Dépréciation de la lumière émise	< 5%	Jusqu'à 30 %
Emission de chaleur	faible	élevée
Indice de rendu de couleur (IRC)	IRC> 80 avec un facteur de puissance proche de 1 (0,98);	
Température de couleur	2700 à 5000 °K	
Flicker et effet stroboscopiques	Très peu perceptible vu les fréquences élevées de travail	

I.3.2.8. Lampes à décharge au mercure haute pression

La lampe à mercure a été la première source lumineuse à vapeurs métalliques massivement utilisée dans les applications d'éclairage, notamment extérieur. L'amélioration de l'efficacité lumineuse recherchée dans ce cas, fortement corrélée avec la pression [81] de confinement de la vapeur de mercure, siège de l'arc électrique (Figure 42), s'accompagne également de modifications notables sur le spectre de la lumière émise (Figure 43).

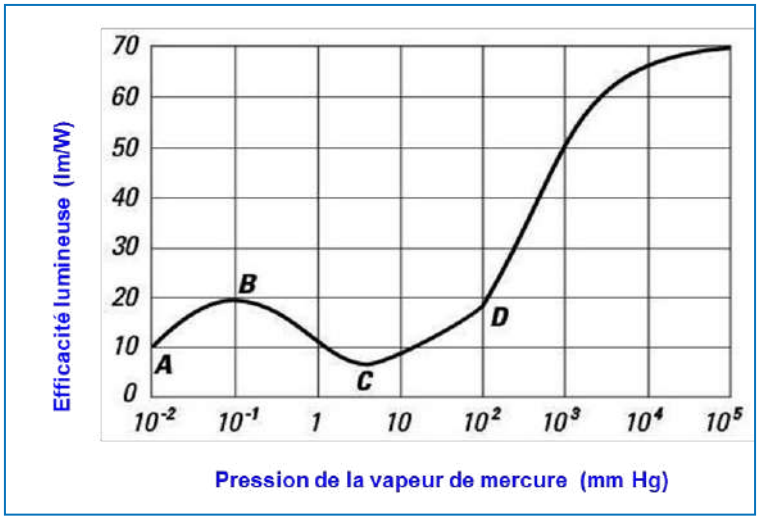


Figure 42. Effet de la pression sur l'efficacité lumineuse des lampes à mercure.

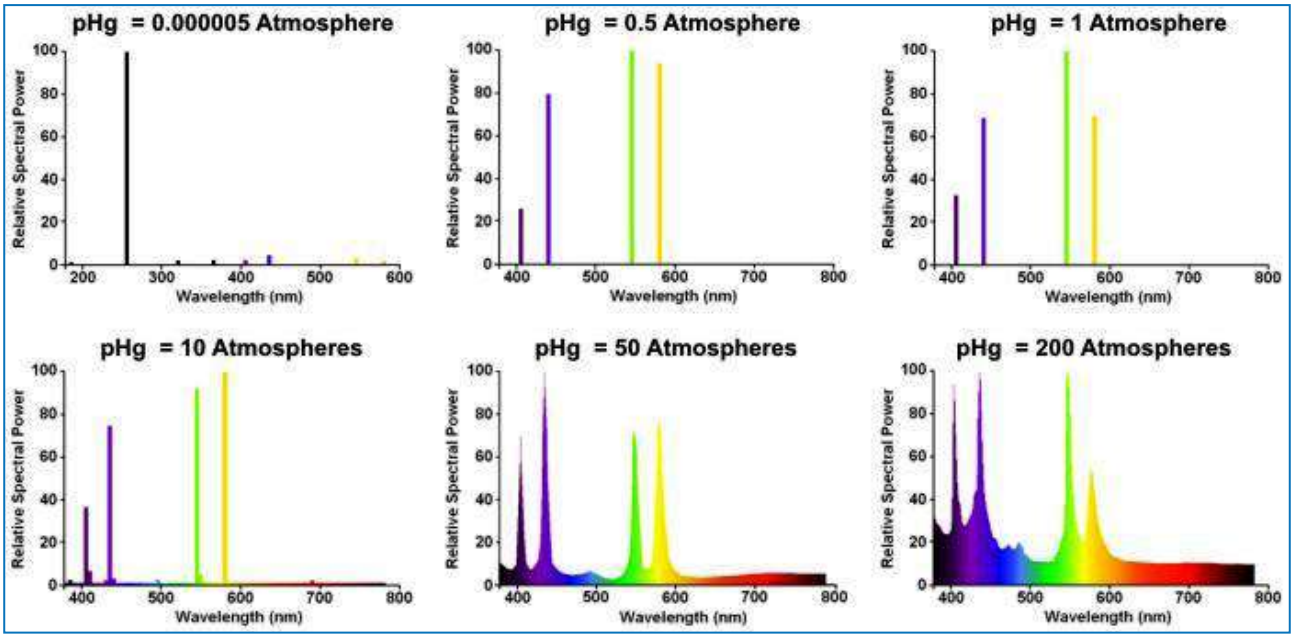


Figure 43. Effets de la pression de vapeur de mercure sur la distribution spectrale de la lumière émise.

En exploitant les propriétés particulières ainsi exposées, la première lampe aux vapeurs de mercure à haute pression (environ 20 atmosphères), a été présentée dès 1936 et avait une puissance de 75 W avec une efficacité lumineuse de (40 lm/W) et un IRC remarquable pour l'époque (Figure 44).

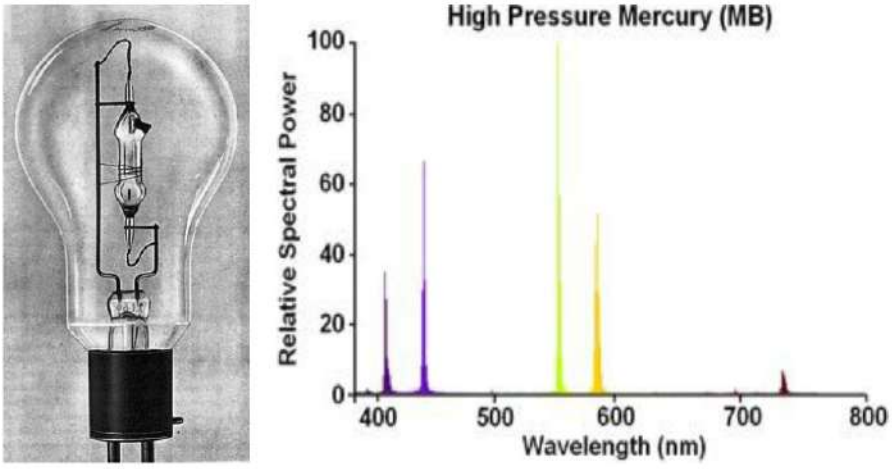


Figure 44. Première lampe à vapeur de mercure haute pression et spectre de la lumière émise.

Cependant, comme une grande partie de la radiation lumineuse émise par ce premier type de lampes à mercure, notamment en présence de pressions élevées, se situe dans l'ultra-violet (Figure 43) invisible, donc ne contribuant pas à l'efficacité lumineuse globale, mais à une lumière bleuâtre qui donne une teinte blafarde. Finalement, c'est tout au début des années 50 qu'une amélioration notable de cette situation a été introduite grâce à l'application de poudres fluorescentes efficaces, notamment le phosphore, comme revêtement à l'intérieur de l'ampoule (Figure 45). Ce dernier, qui constitue en fait une barrière aux radiations UV inutiles, les convertit par fluorescence en une radiation visible, contribuant ainsi à une lumière globale de teinte blanche dont le spectre discontinu est essentiellement dominé par trois à quatre raies, d'où un rendu de couleur qui reste tout de même assez médiocre (IRC< 50). Les lampes aux mercures ainsi constituées, appelées également 'ballons fluorescents' [87] et offrant des températures de couleur également peu diversifiées, avec 3700°K pour les ampoules phosphorées (opales) et 6700°K pour celles claires (Figure 45), ont cependant dominé l'éclairage public durant les années 1960 à 1970.

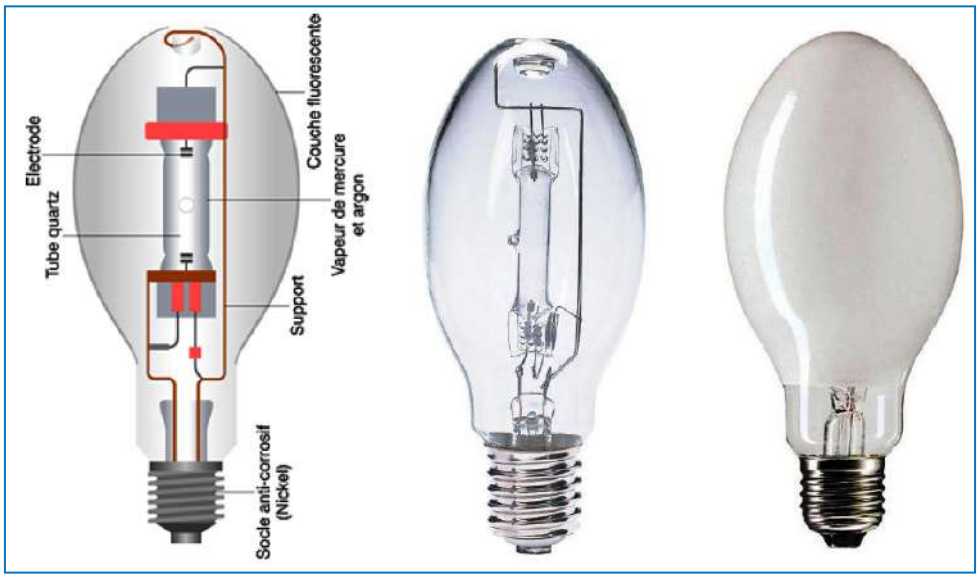


Figure 45. Eléments constitutifs d'une lampe à vapeur de mercure.

Avec une efficacité lumineuse de 20 à 60 lm/W et une durée de vie allant à 24000 heures, les lampes à mercure haute pression qui sont produites avec des seuils de puissances unitaires allant de 50 à 1000 W, ont toujours été commercialisées avec des rapports qualité/prix très concurrentiels. Ce qui n'empêche pas qu'aujourd'hui, elles sont considérées comme des sources lumineuses obsolètes, notamment pour des raisons d'efficacité énergétique, mais surtout environnementales (toxicité du mercure) d'où l'interdiction de leur production dans beaucoup de pays dès 2015. En Algérie, son usage a été interdit en 2019.

I.3.2.9. Lampes à décharge aux halogénures métalliques (MH) (ou à iodures)

Apparues au milieu des années 1960, les lampes à décharge à haute pression aux halogénures métalliques, appelées également à «iodures métalliques» ou MH (Metal Halide), contiennent généralement un mélange gazeux sous haute pression, principalement constitué d'argon et mercure, associés à un amalgame d'halogénures métalliques (métaux combinés à des halogènes) [88-89]. Depuis, elles se sont grandement diversifiées (Figure 46), initialement pour répondre à des applications fonctionnelles nécessitant une bonne distinction des couleurs (scènes de spectacles…). Commercialisées avec des seuils de puissances allant de 20 W à 3500 W pour des utilisations en intérieur ou en extérieur (Figure 47), elles émettent une lumière blanche vive avec une température de couleur très proche de celle du jour (typiquement entre 4 500 et 6000 K) et un spectre où toutes les longueurs d'onde des radiations visibles sont représentées (Figure 48) assurant ainsi un bon rendu de couleurs (70<IRC<95). Avec de telles qualités de lumière et une efficacité lumineuse dépassant 85 lm/W (Tableau 4), les luminaires à base de lampes HID ont été de plus en plus utilisées dans le domaine de l'éclairage public, notamment depuis le début du siècle présent (terrains sportifs, places publiques, routes, ponts, monuments…).

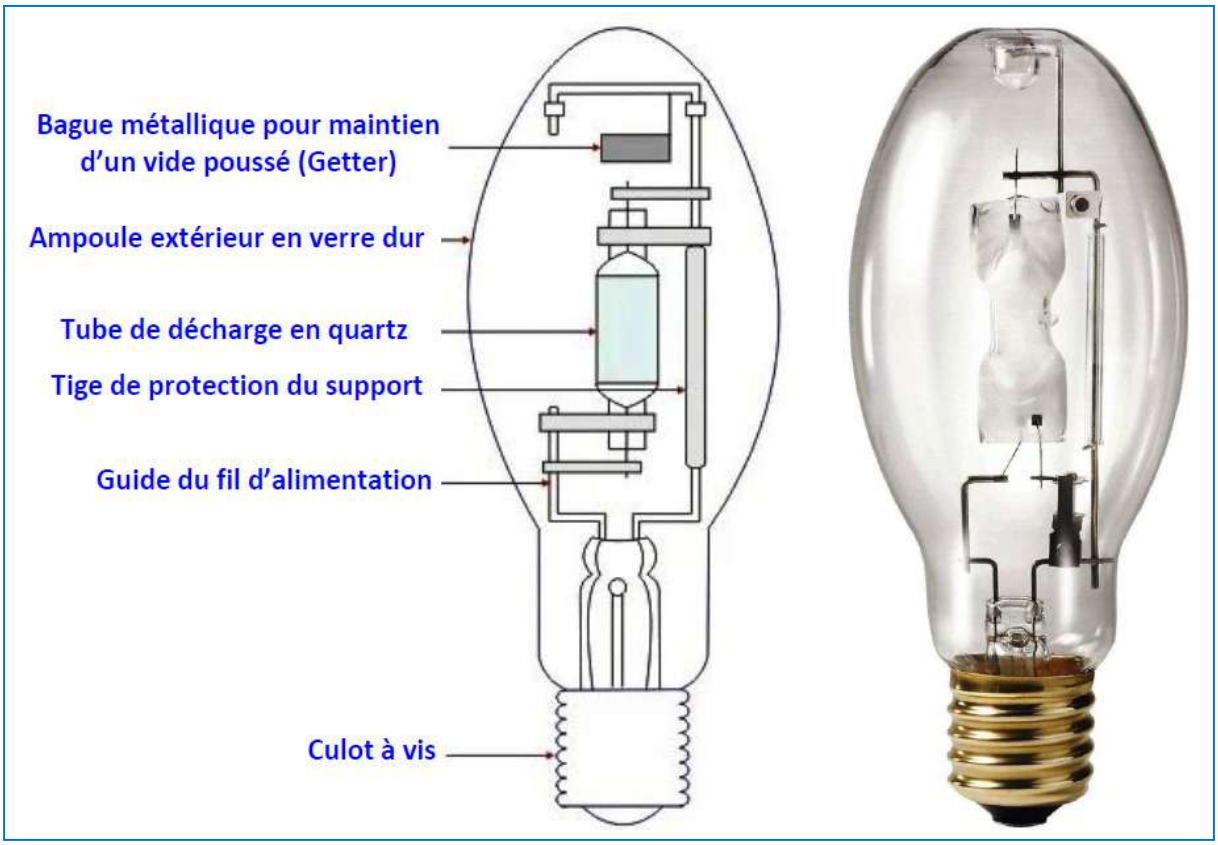


Figure 46. Lampe aux Halogénures Métalliques (MH) avec bruleur céramique.

Figure 47. Divers modèles de lampes aux halogénures métalliques.

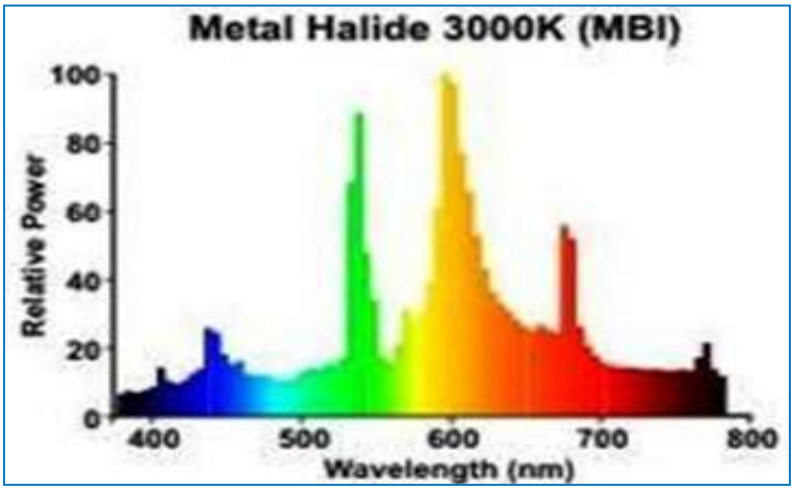


Figure 48. Spectre des radiations visibles d'une lampe aux iodures métalliques (MH).

Tableau 4. Performances de quelques modèles de lampes aux halogénures métalliques (HM) disponibles sur le marché.

Puissance de la lampe (W)	Flux lumineux Initial (lumen)	Efficacité lumineuse initiale (lm/W)	Durée de vie (Heures)	Flux lumineux moyen (lm/W)
175	14000	80	7500	10800
250	20500	82	7500	17000
400	34000	85	15000	20400
1000	115000	115	10000	92000
1500	155000	103	1500	14000

I.3.2.10. Lampes au sodium

Le remplacement du mercure par le sodium comme vapeur métallique dans les lampes à décharge, l'a initialement été afin d'améliorer l'efficacité lumineuse ainsi que la qualité de la lumière. En effet, l'intérêt de l'emploi du sodium était connu depuis les années 1930 et exploité assez tôt pour donner lieu aux premières lampes fonctionnant à cette vapeur sous basse pression, qui ont vu le jour dès 1932 [90].

I.3.2.10.1. Lampes au sodium basse pression

Les lampes à vapeur de sodium sous basse pression ou LPS (Low Pressure Sodium), sont composées d'un tube à arc plié en forme de U, rempli d'un mélange de vapeur de sodium et de gaz tels que le néon (99 %) et l'argon (1 %), l'ensemble étant confiné dans une ampoule externe tirée sous vide (Figure 49) [91]. Une décharge électrique dans le mélange fournit alors une lumière jaune orange monochromatique dont le spectre se limite à une seule raie dont la longueur d'onde est de 589 nm (Figure 50). Le rendu de couleur très médiocre qui en résulte (IRC=0) est toutefois compensé par une excellente efficacité lumineuse d'environ 180 lm/W, soit la plus grande de toutes sortes de lampes à décharge actuellement disponibles. De ce fait, peu utilisées pour les besoins d'éclairages des voieries extérieures (Figure 51), les lampes LPS constituent tout de même le type de lampe idéal lorsque le rendu des couleurs n'est pas important, notamment pour les applications où la sécurité prime sur le reste. Commercialisées avec des seuils de puissance n'excédant pas 200 W, elles sont généralement utilisées dans divers dispositifs d'éclairage public, peu exigeants en termes de qualité de la lumière comme les tunnels (Figure 52).

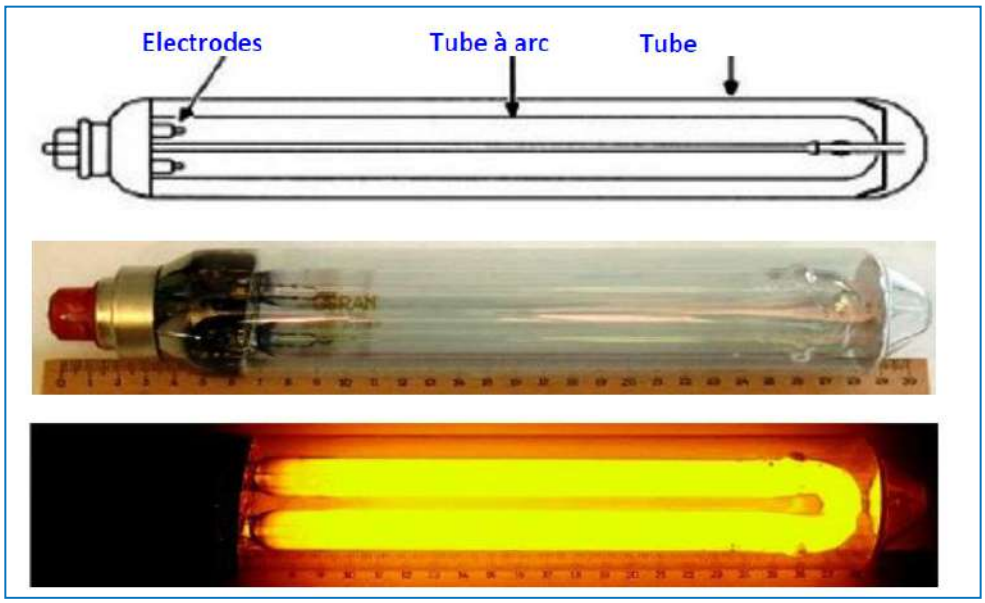


Figure 49. Lampe au sodium basse pression (LPS).

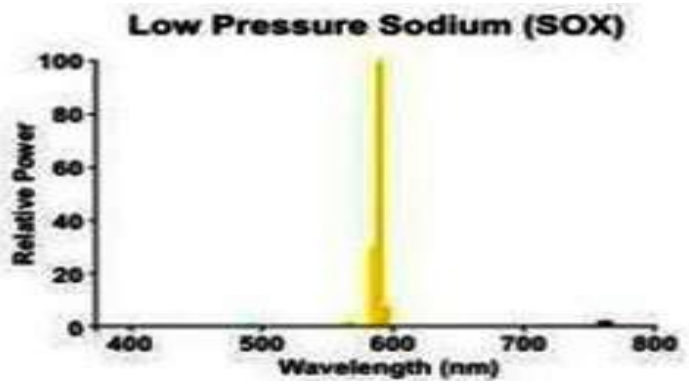


Figure 50. Spectre lumineux à raie unique de la lampe au sodium basse pression (LPS).

Figure 51. Exemples d'éclairage de rue avec lampes au sodium basse pression (LPS).

Figure 52. Exemple d'éclairage de tunnel avec lampes au sodium basse pression (LPS).

I.3.2.10.2. Lampes au sodium à haute pression

Si les lampes LPS ont bien le meilleur rendement envisageable parmi celles à décharge, leur particulièrement mauvais rendu des couleurs (IRC=0) et leurs dimensions assez larges limitent leurs applications à l'éclairage de voies publiques. Par conséquent, il a été assez tôt envisagé d'accroître la pression de vapeur pour dissiper plus de puissance par unité de longueur d'arc et du même coup le spectre émis pour rendre la lumière plus agréable avec un IRC amélioré. Dans cette optique, deux techniques déjà bien maîtrisées depuis les années 1930, soit celle de la décharge dans la vapeur de mercure sous haute pression d'une part et la décharge dans de la vapeur de sodium basse pression d'autre part, ont été profitablement exploitées. Ainsi en reprenant la même configuration que la lampe au mercure haute pression et en remplaçant ce dernier par du sodium, un tube à décharge (bruleur) supportant les contraintes extrêmes de température (environ 1200°C) tout en tenant compte de la réactivité spécifique à la vapeur de sodium sous pression, a pu être mis au point. Comme résultat, une structure standard de lampe HPS dont le principe global va s'imposer pendant longtemps, est mise en avant avec les principaux constituants suivants (Figure 53):

- Une ampoule (enveloppe) en verre qui peut être tubulaire ou ovoïde.
- Un tube à décharge (bruleur) en alumine frittée
- Deux électrodes d'amenée du courant électrique au tube à décharge
- Vapeurs de sodium et mercure sous haute pression, mélangés à un gaz à l'intérieur du bruleur

C'est vers le milieu des années 60 du siècle passé, que les lampes au sodium à haute pression (HPS), fabriquées selon la structure standard exposée ci-dessous (Figure 53), ont été introduites avec des performances en termes d'efficacité lumineuse et qualité de lumière nettement meilleures que celles des lampes à mercure haute pression, qu'elles ont progressivement remplacé dans le domaine de l'éclairage public à partir des années 1970 [92-93]. Comme pour pratiquement l'ensemble des lampes à décharge, le passage de la basse à la haute pression, a donc essentiellement permis de gagner en performances sur les points suivants:

1- A puissance égale, la lampe au sodium haute pression (HPS) est moins encombrante que son homologue en basse pression (LPS).
2- Les lampes HPS proposent des gammes de puissance pouvant aller à des seuils beaucoup plus élevés (3000 W et plus), au lieu de seulement 200 W pour leurs homologues en basse pression.
3- Le spectre limité à une seule raie de longueur d'onde 589 nm (Figure 50) pour les lampes LPS (IRC=0), devient beaucoup plus diversifié pour les HPS (Figure 54), dont l'IRC des versions de base passe à environ 20 avec possibilité d'atteindre 80 et plus, moyennant certaines améliorations (Sodium blanc).

Figure 53. Structure standard et premiers modèles commercialisés de lampes à décharge utilisant la vapeur de sodium sous pression (HPS).

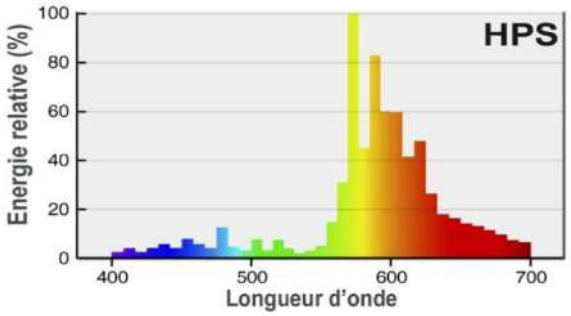


Figure 54. Spectre de la lumière émise par une lampe au sodium haute pression (HPS).

Remarque: Il y a lieu de noter que les avantages ainsi énumérés comme étant le fruit d'une augmentation significative de la pression de travail du sodium, sont à inscrire principalement sur l'aspect qualité de la lumière (IRC meilleur, distribution spectrale plus large...), ainsi qu'un gain en puissance unitaire des lampes HPS. En contrepartie à cela, c'est l'efficacité lumineuse qui présente un net recul, du fait qu'elle passe de 180 lm/W comme signalé pour les lampes LPS à une moyenne de 120 lm/W environ pour les HPS standards et beaucoup moins pour celles proposant une meilleure qualité de lumière.

En tout état de cause, la famille des lampes HPS standards dont la puissance unitaire s'étend pratiquement aujourd'hui de 35 jusqu'à 1 000 W (Figure 55), est carctérisée par une efficacité lumineuse acceptable. Cela étant avec un IRC de 20 pour la version standard et 65 à 80 pour celles améliorées, une température de couleur entre 2100 et 2500 °K et une durée de vie atteignant 24000 heures (Tableau 5), les HPS restent tout de même une source de choix pour un éclairage public économique.

Figure 55. Gamme assez complète de lampes HPS actuellement disponibles.

Tableau 5. Comparatif des performances entre lampes HPS standards et améliorées.

Modèle HPS	Efficacité lumineuse (lm/W)	Rendu de couleur IRC	Température de couleur (°K)	Durée de vie (heures)
Standard	125	21	2100	24000
Amélioré	94	65	2200	15000
Sodium blanc	52	83	2500	10000

Sur un autre plan, vue la place importante qu'ont occupé les lampes au sodium haute pression (HPS), dans l'éclairage public à travers le monde depuis leur apparition au milieu des années 60 et ce jusqu'à une date assez récente, elles ont été au centre de nombreuses études liées à leur efficacité lumineuse et ce, sous l'effet des politiques de rationalisation des consommations énergétiques globales dictées par des contraintes économiques et environnementales connues de tous. En conséquence, des analyses assez détaillées sur le bilan énergétique des lampes HPS, ont été menées afin d'identifier au mieux les niches permettant de faire augmenter l'efficacité énergétiques de ce type de lampes, sans pour autant altérer leurs performances photométriques. Ainsi, en prenant l'exemple d'une lampe HPS de 400 W, couramment utilisée dans l'éclairage public des grands axes routiers dans le monde (y compris en Algérie), plusieurs types de pertes sont identifiés et évalués (rayonnements, dissipations thermiques…) avant de parvenir à la puissance d'entrée convertie utilement en lumière visible (Figure 56). Cette dernière étant évaluée à seulement 118 W, donne au final un rendement énergétique net inférieur à 0.3 (0.295), pour une efficacité lumineuse compatible avec celle généralement affichée pour la lampe étudiée, soit 120 lm/W [94].

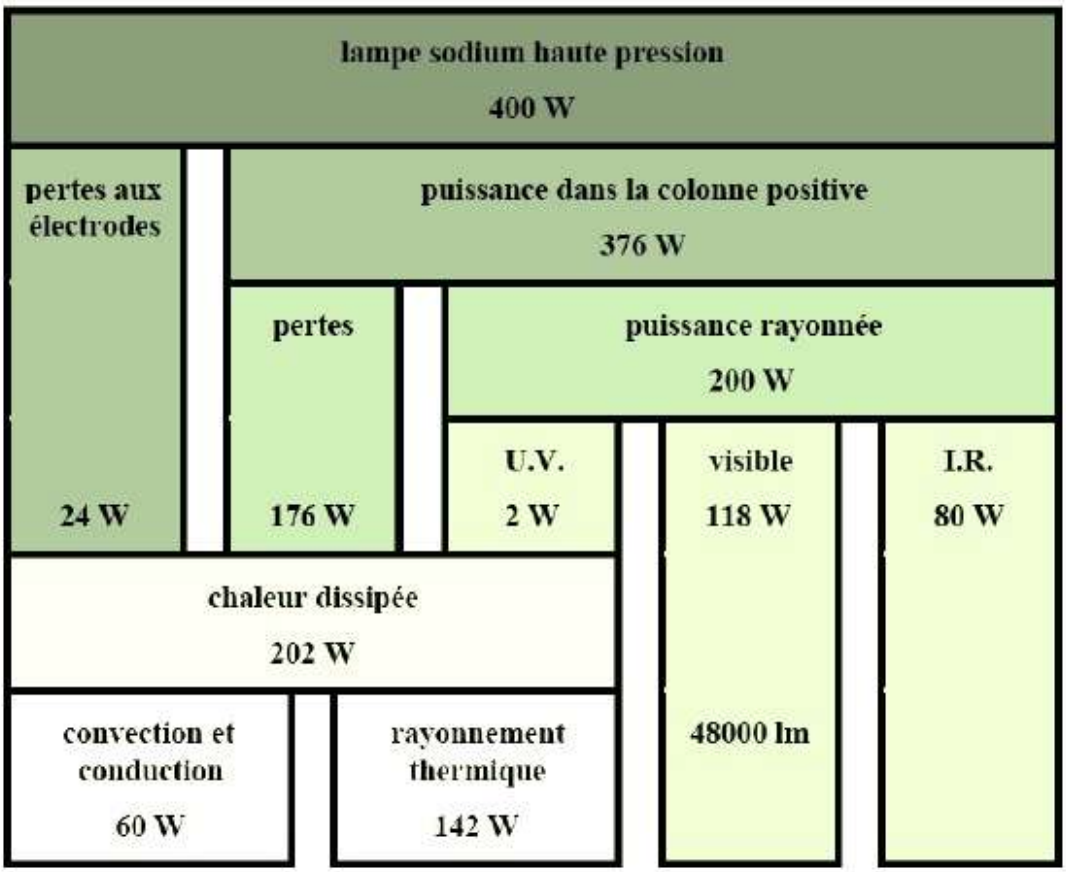


Figure 56. Détails du Bilan de puissance pour une lampe standard au Sodium Haute Pression (HPS) de puissance 400 W.

Figure 57. Lampes au sodium (HPS) et à induction dans l'éclairage public.

Figure 58. Lampes au sodium haute pression (HPS) et exemple d'utilisation (tunnel).

I.3.3. Lampes à Diodes Electroluminescentes ou LED

Bien que le phénomène d'électroluminescence [95] fût connu depuis le début du siècle dernier (1907), ce n'est que beaucoup plus tard, en utilisant divers matériaux semi-conducteurs que la première diode électroluminescente à boîtier DIP (Dual In-Line Package) [96] émettant une couleur rouge a été mise au point (1962), avant de voir apparaître celles rayonnant une lumière orange, jaune (1972) et enfin la verte peu après (Figure 59). Quant à la LED bleue qui était très attendue justement comme maillon important pour synthétiser la lumière blanche, elle n'est apparue qu'en 1991 et a été à la base de l'attribution d'un prix Nobel aux trois chercheurs ayant contribué à son invention [97]. En effet, cette dernière est venue compléter la trilogie des principales couleurs de base, soit le Rouge, Vert et Bleu (RVB) ou RGB (Red, Green, and Blue), déjà largement connue et mise en œuvre dans d'innombrables applications, notamment dans le domaine de l'imagerie couleur (télévision, caméra…).

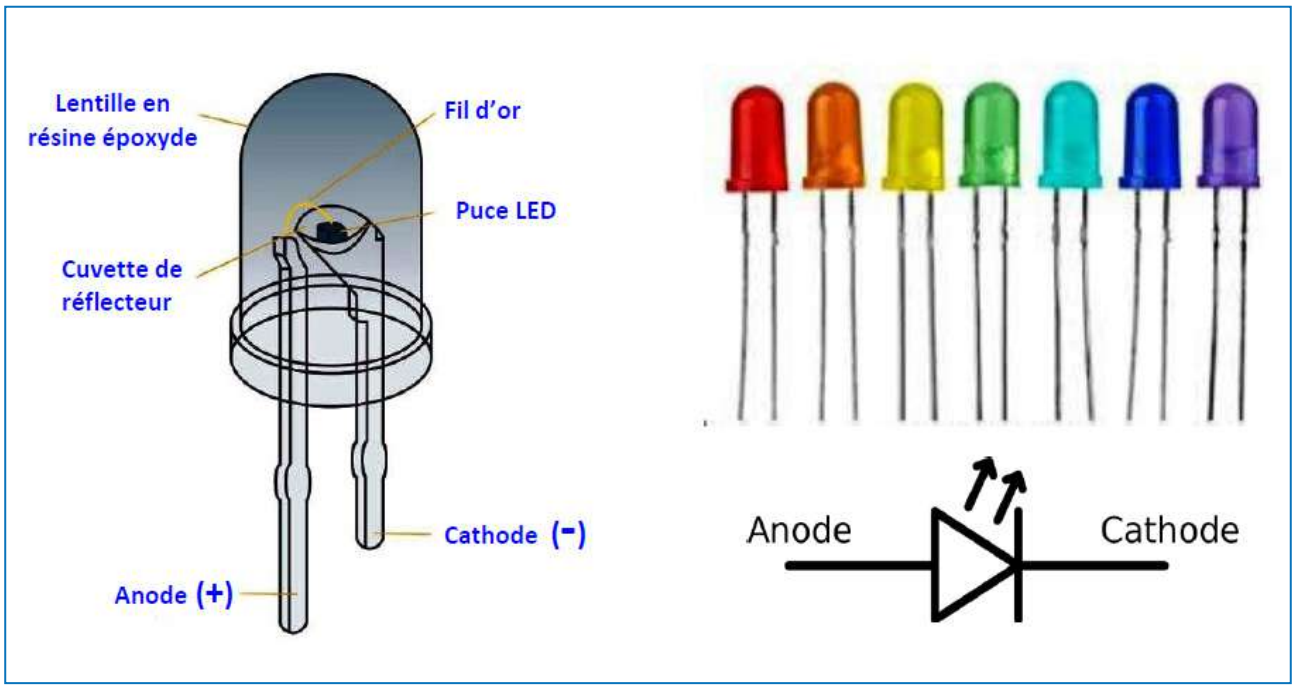


Figure 59. Premières LED à boîtier DIP.

I.3.3.1. Lumière blanche à base de LED RGB

Ayant généralement servi au départ comme simples indicateurs de l'état de fonctionnement dans divers appareils électroniques tels que machines à calculer et autres, vu leur faible intensité lumineuse monochromatique, les LED ont néanmoins contribué peu de temps après, à la génération de la lumière blanche dans des applications limitées. En effet, cette dernière étant à très large spectre (superposition de toutes les couleurs du spectre lumineux visible), la technologie spécifique aux puces LED, ne pouvait produire qu'une lumière monochromatique à bande spectrale très étroite, selon le matériau semi-conducteur utilisé. Toutefois, il faut dire qu'avec l'arrivée sur le marché de la diode bleue, la trilogie de LED ainsi constituée avec celles rouge et verte, pouvait bien servir à générer une lumière avec pratiquement une infinité de couleurs (Figure 60), y compris celle blanche (Figure 61), en combinant divers dosages de chacune des trois composantes de base RGB [98].

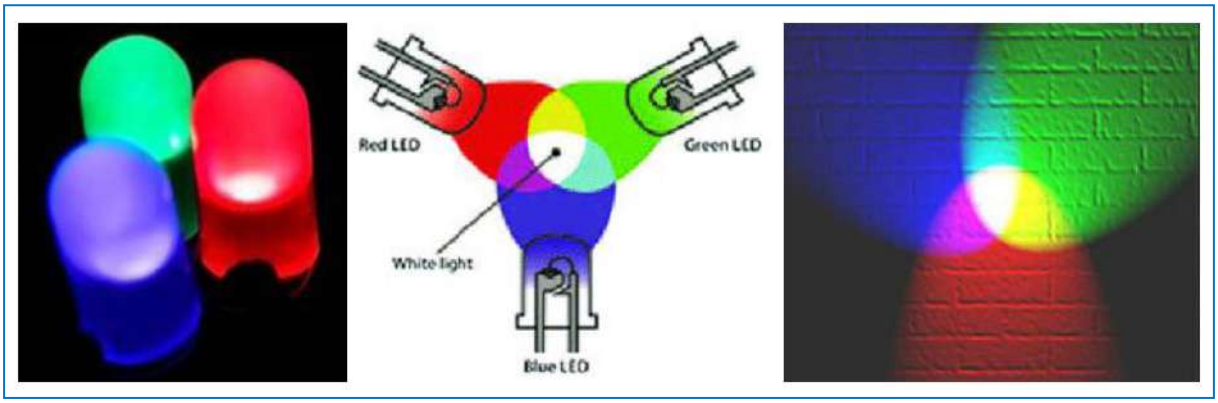


Figure 60. Illustration de la synthèse de lumières de diverses couleurs (spectres), à base de celles monochromatiques générées par la trilogie des LED (RGB).

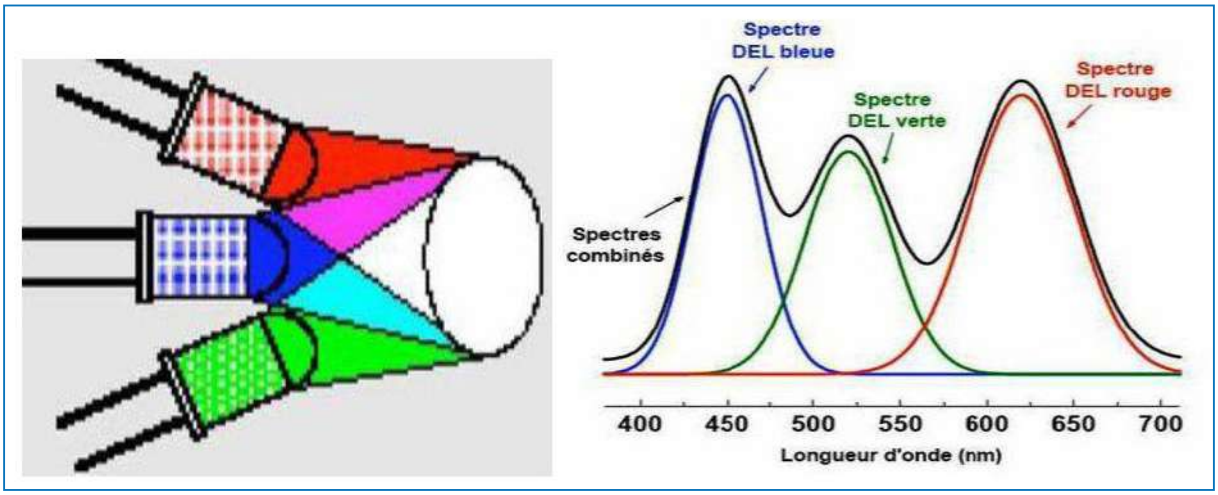


Figure 61. Synthèse de la lumière blanche à base de LED RGB et illustration de son spectre final.

Vu la richesse pratiquement infinie en termes de couleurs de la lumière obtenue par synthèse additive de celles de base (RGB), utiliser cette approche pour générer uniquement de la lumière blanche, même avec des nuances en termes de température (chaude, froide ou neutre) et rendu de couleur (IRC), favorables à un éclairage public de qualité, serait manifestement disproportionné et coûteux, surtout pour les seuils d'intensités et puissances usuels. De ce fait, l'usage des sources de lumière à base de LED RGB, est resté confiné à des applications où l'ensemble des capacités offertes sont pleinement exploitées, comme c'est le cas d'applications visant la valorisation nocturne des espaces et monuments publics, à travers un éclairage dynamique et riche en couleurs. Par contre, c'est comme source de lumière décorative et artistique de faible puissance, que les LED RGB trouvent pleinement leur essor, puisque c'est pour les besoins spécifiques à ces créneaux, qu'une gamme de divers produits à base de LED RGB de petites tailles, sont développés et mis sur le marché. Ces derniers visent

aussi bien certains besoins du monde professionnel de la lumière, tels que le composant regroupant trois LED RGB distinctes, logées dans un même boitier sous une lentille de protection transparente (Figure 62), qu'un large public auquel sont destinés plusieurs produits finis comme les rubans à LED RGB servant d'éclairage décoratif (Figure 63), ou certaines lampes spéciales d'éclairage intérieur (Figure 62d).

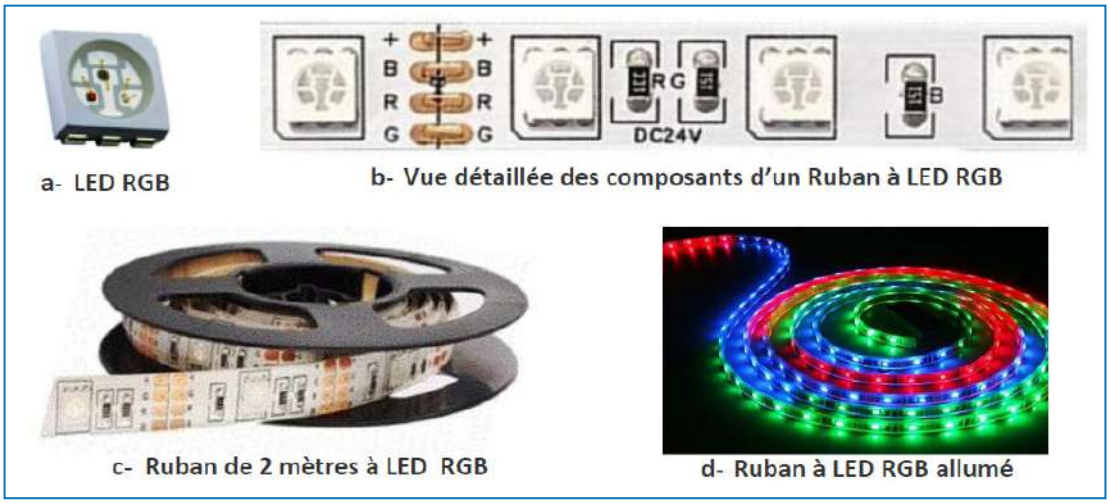
a- LED RGB de 3 W

b- LED RGB de 3 W avec son circuit de commande

c- LED RGB et sources lumineuses de base

d- Lampe à LED RGB de 3 W et sa télécommande

Figure 62. LED RGB de 3 W avec contrôle de la couleur et composants essentiels.



a- LED RGB

b- Vue détaillée des composants d'un Ruban à LED RGB

c- Ruban de 2 mètres à LED RGB

d- Ruban à LED RGB allumé

Figure 63. Modèle de LED RGB et ruban d'éclairage décoratif.

Toutefois et quoique l'ensemble des analyses théoriques prédisent un gain avantageux en efficacité lumineuse du procédé de synthèse de la lumière par mélange d'émissions des LED Rouges, Vertes et Bleues (RGB), il continue cependant à être maintenu à l'écart de l'éclairage en général et public en particulier, dont la demande s'articule essentiellement autour de la lumière blanche. Entre autres raisons à cela, il est bien établi en effet que les LED de différentes couleurs ont des comportements notablement différents en fonction de certaines conditions d'utilisation, notamment la température et ses inhérentes variations, qui s'accompagne également d'effets de vieillissement dont les dérives induites ne sont pas les mêmes. Ainsi, la stabilité de la couleur blanche de la lumière, fixée au départ selon de nombreux critères de qualité assez précis ainsi que d'éventuelles réglementations

d'accompagnement, ne serait plus garantie. Face à cela, c'est un procédé plus simple, mis au point dès 1992 et associant essentiellement une diode bleue et un produit phosphorescent, qui a finalement mené à l'incursion prodigieuse des LED dans le domaine de l'éclairage en général, notamment durant les dix dernières années, sous la pression de l'efficacité lumineuse, inscrite sur l'agenda de la transition énergétique en cours dans le monde.

I.3.3.2. LED bleue, phosphore et synthèse de la lumière blanche

Les premières LED blanches furent produites en 1995 en recouvrant une puce à base de nitrure de Gallium et d'Indium ou InGaN (Indium Gallium Nitride) émettant une lumière bleue, par une mince couche de phosphore jaune (Figure 64a). Dans cette configuration, la lumière bleue à courte longueur d'onde (440 à 475 nm) émise par la LED, est en partie absorbée au niveau de la couche de phosphore jaune et réémise sous forme de lumière jaune à large spectre [98]. Au final, cette dernière se mélange à celle bleue restante pour donner une lumière blanche (Figure 64b), dont diverses propriétés spectrales, telles que la température de couleur et l'indice de rendu des couleurs (CRI), sont déterminées par la nature du revêtement de phosphore, qui devient ainsi un élément fonctionnel de grande importance (Figure 65) [99].

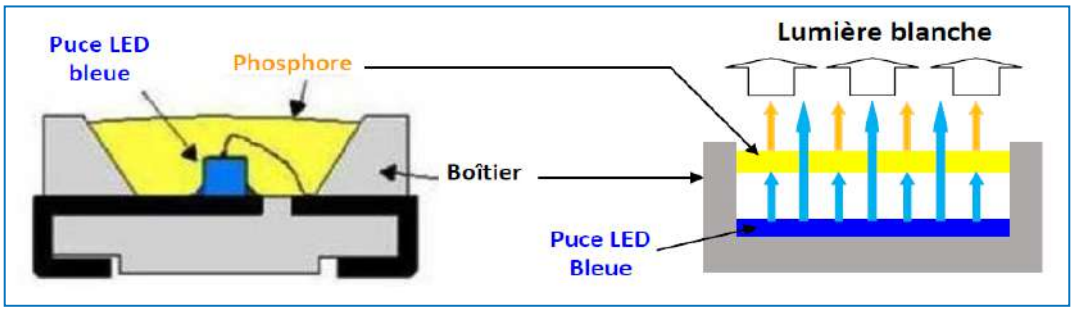


Figure 64. Structure de base de l'association LED bleue-phosphore et émission de lumière blanche.

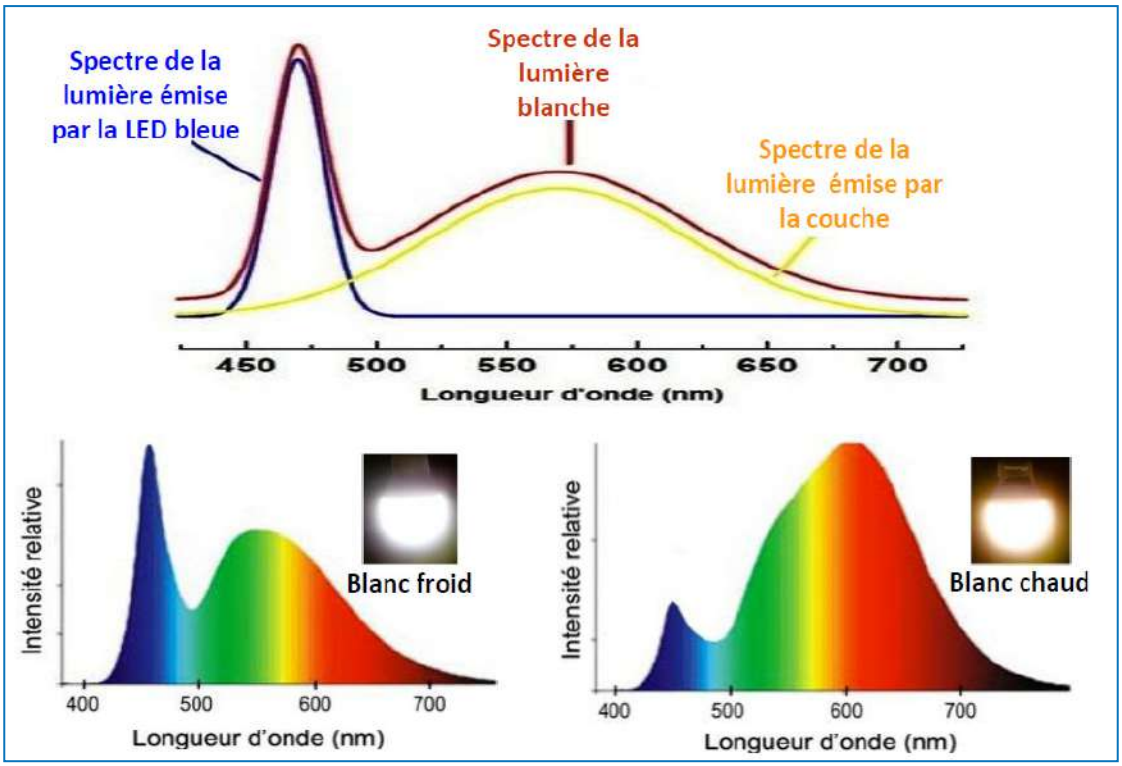


Figure 65. Principe de synthèse spectrale de la lumière blanche émise par l'association LED bleue-phosphore avec diverses températures de couleur.

Le schéma d'émission ainsi décrit, reste au final le plus couramment utilisé à ce jour pour la fabrication à des coûts concurrentiels, de LED à lumière blanche, destinées aux divers besoins d'éclairage, notamment public. A ce propos, il faut dire que la puce LED proprement dite constitue uniquement la partie active de l'ensemble

(Figure 64), encore faut-il bien canaliser la lumière produite et surtout évacuer proprement la chaleur dissipée localement afin de maintenir une température de fonctionnement acceptable pour chaque matériaux impliqué (semi-conducteur, phosphore, soudure,...). En effet, quoiqu'elle soit considérée aujourd'hui comme la source lumineuse la plus efficace, une LED dissipe tout de même 30 à 40% de l'énergie électrique consommée sous forme de chaleur par conduction, le reste (60 à 70%) étant converti en lumière utile (pas d'infrarouge ni d'ultraviolet). Ainsi, la mise en boîtier (packaging) des puces LED orientées vers la fabrication de lampes, notamment celles de puissances compatibles avec les besoins de l'éclairage public, devient une étape cruciale de l'ensemble du processus technologique, dont dépendraient fortement les performances en termes d'efficacité lumineuse, robustesse et stabilité thermique. C'est par ailleurs sur cette base (packaging) que les principales classifications des diverses technologies LED appliquées à l'éclairage, sont établies en fonction des besoins essentiels de l'utilisation finale, notamment en termes d'intensité lumineuse, puissance et qualité de la lumière (IRC, température de couleur, angle d'éclairage…). Ainsi, mis à part les premières LED à boîtier DIP (Figure 59), dont les applications à l'éclairage sont restées très limitées pour diverses raisons, dont une efficacité lumineuse très faible à laquelle s'ajoute un angle de diffusion très restreint, trois principaux types de LED ayant les caractéristiques et boîtiers appropriés, sont à la base de l'essor de l'électroluminescence comme source efficace de lumière. Les structures LED dédiées à l'éclairage, sont en effet souvent classées selon trois paliers de puissances Pled caractéristiques (Figure 66).

Figure 66. Principaux types de LED utilisés dans les systèmes d'éclairage.

I.3.3.2.1. LED SMD ou 'mid-power'

L'expérience résultant des prodigieux développements des LED comme support d'affichage à l'imagerie de couleur, notamment dans certaines générations de téléviseurs, a grandement servi leur passage à des applications de masse, comme moteur d'éclairage artificiel sous toutes ses formes. Ainsi, des solutions efficaces d'adaptation, notamment en matière de packaging prenant en charge les nouveaux profils de contraintes thermiques et d'agencement, ont rapidement pris le relais. La première a été de mettre à profit la technologie assez mature des Circuits Montés en Surface (CMS) ou SMD (Surface Mounting Device), privilégiant les LED de puissance unitaire faible (<1 W), mais qualifiée tout de même de moyenne ou 'mid-power', vu les dimensions très réduite de l'ensemble, dont l'indication est même intégrée dans la désignation commerciale de celles-ci (Figure 67). En effet, sur les quatre chiffres qui accompagnent généralement cette dernière, les deux premiers ainsi que les deux derniers indiquent les dimensions physiques de la forme rectangulaire de la LED SMD, dont l'épaisseur est de l'ordre de 1 mm.

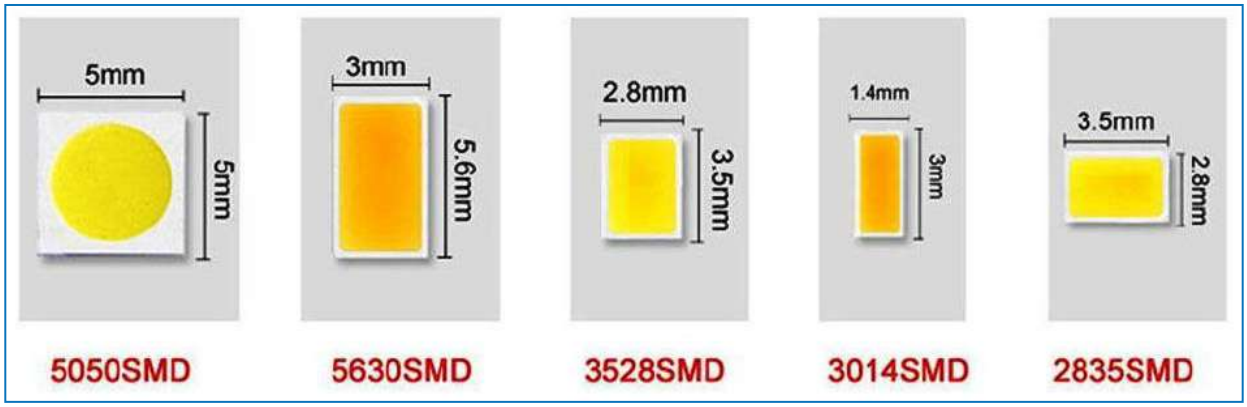


Figure 67. Les modèles de LED SMD les plus utilisés et leurs dimensions.

Avec un rendement lumineux qui n'a rien à envier aux autres structures de LED concurrentes ainsi que des contraintes thermiques bien maîtrisées, les LED SMD continuent d'être les plus utilisées dans la fabrication de systèmes d'éclairage performants et ayant le meilleur rapport qualité/prix du marché du fait qu'elles soient également fabriquées en très grands volumes. Ainsi, malgré leur puissance unitaire assez faible (<1 W), la possibilité de les assembler dans des matrices rapprochées, a été amplement mise à profit pour donner naissance à une très grande diversité de sources lumineuses adaptées aux besoins de nombreux secteurs en termes d'éclairage, y compris public. En effet, ne produisant que très peu de chaleur et parvenant déjà à des seuils d'efficacité lumineuse inégalés avec plus 200 lm/W, les LED SMD, aidées par une industrie de packaging en perpétuelle évolution, continuent à offrir une grande flexibilité comme moteur de premier plan à des sources lumineuses répondant à un large éventail de prescriptions. Ainsi, les premiers modèles de lampes à base de LED SMD, furent naturellement celles de faible puissance destinées à l'éclairage intérieur (Figure 68), avant de voir celles-ci évoluer vers les applications extérieures pour atteindre finalement des seuils d'intensité lumineuse répondant à certains besoins de l'éclairage public. Cela étant avec des configurations permettant un échange standard des lampes à décharge (HPS, MH..), avec un apport lumineux compatible avec les exigences des espaces publics (rues piétonnières, allées,…) et ce, en conservant certaines fonctionnalités du luminaire conventionnel associé, notamment le réflecteur ainsi que la douille nécessaire à la fixation et l'alimentation de la lampe (Figure 69).

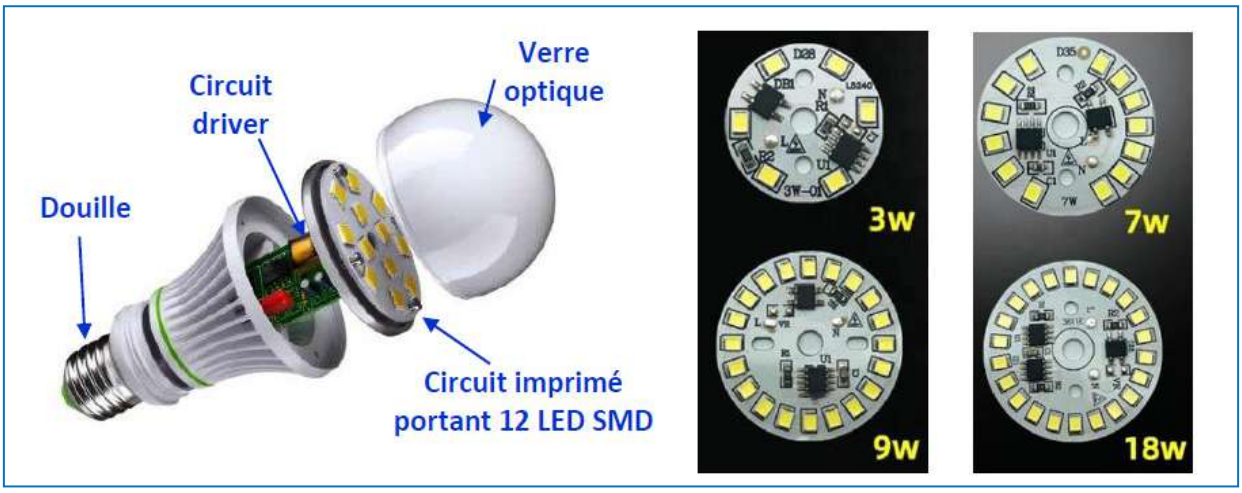


Figure 68. Lampe à LED SMD et divers modèles de circuits pour différentes puissances.

Figure 69. Lampe à LED SMD de 60 W (160 LED SMD 5630) adaptée au système d'éclairage public.

Sur un autre plan et cherchant à tirer le maximum de profits liés aux nombreux avantages que procurent les LED SMD comme source lumineuse flexible, efficace et bon marché, de nombreuses solutions ont été développées pour élargir encore plus leur domaine d'application, notamment en levant les

contraintes techniques limitant la puissance et l'intensité lumineuse. Ainsi, des configurations de montage permettant d'associer plusieurs puces dans le même boîtier, avec une bonne évacuation de la chaleur et une collecte adéquate du flux lumineux grâce à des dispositifs optiques bien adaptés (Figure 70), ont ouvert la voie à la réalisation de modules LED, pouvant constituer des luminaires répondant à un large éventail des besoins de l'éclairage public (Figures 71 et 72).

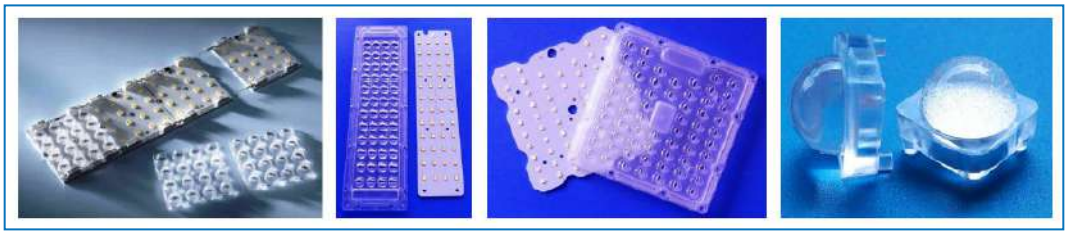


Figure 70. Accessoires optiques développés pour élargir le champ d'application des LED SMD comme sources lumineuses répondant aux spécificités de l'éclairage public.

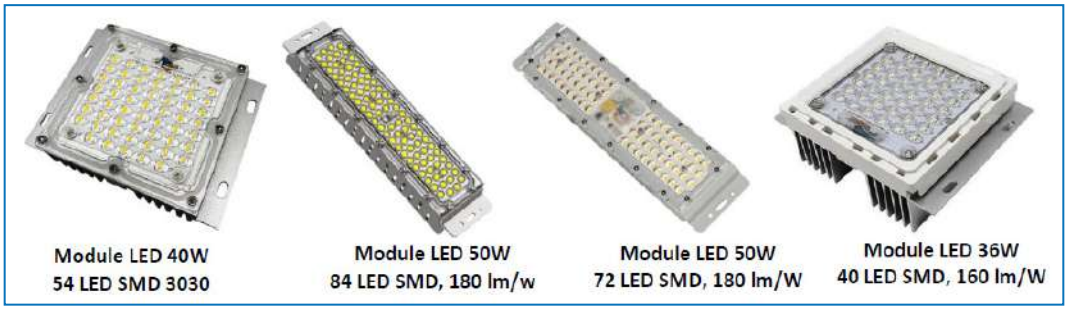


Figure 71. Modules LED pouvant servir dans un luminaire de l'éclairage public.

Figure 72. Exemples de luminaires constitués de modules LED prêts à l'emploi dans divers dispositifs d'éclairage public.

I.3.3.2.2. LED haute puissance ou 'High Power'

Les LED 'High Power' (Haute Puissance), se présentent sous forme d'un boîtier pouvant contenir une ou plusieurs LED SMD, montées sur un substrat en céramique et abritées sous une lentille optique en dôme de silicone, afin de renforcer la collecte de la lumière produite (Figure 73). L'ensemble offre ainsi une lumière de forte intensité et un très bon rendement, avec cependant un angle d'émission très réduit qui privilégie les applications nécessitant un éclairage directionnel (spots…), d'où un champ d'utilisation beaucoup plus restreint que les LED SMD.

Figure 73. Structure d'une LED de type 'High power'.

Les LED haute puissance sont disponibles selon plusieurs températures de lumière blanche ou couleur et peuvent être livrées seules ou montées sur une carte de circuit imprimé à noyau métallique (Figures 74 et 75) ou MCPCB (Metal Core Printed Circuit Board).

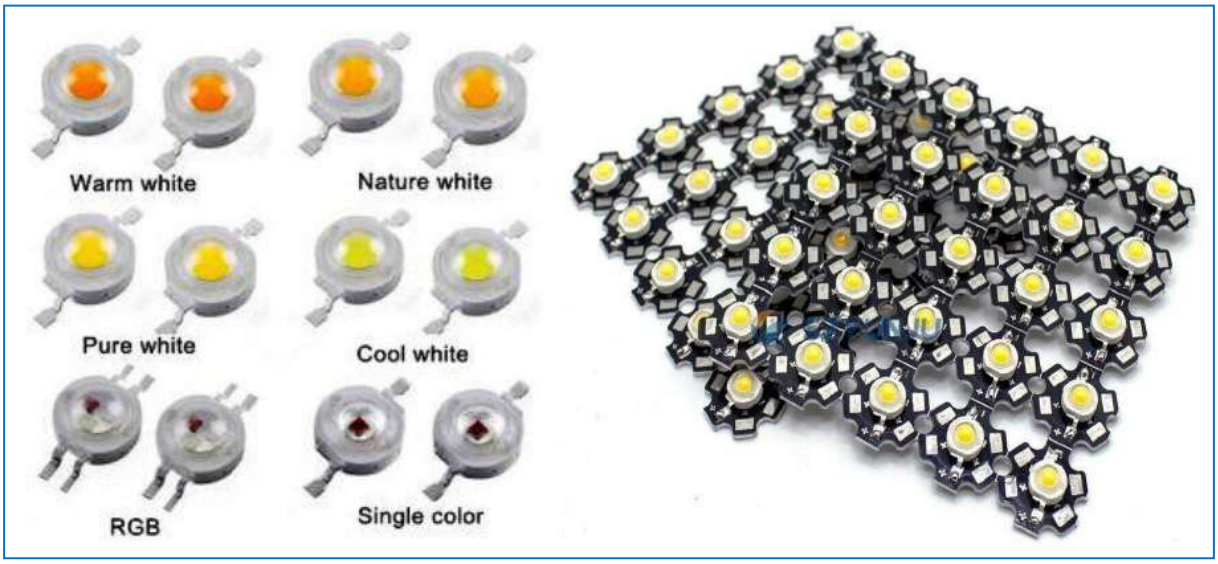


Figure 74. Divers LED de puissance, présentées seules ou montées sur circuit MCPCB.

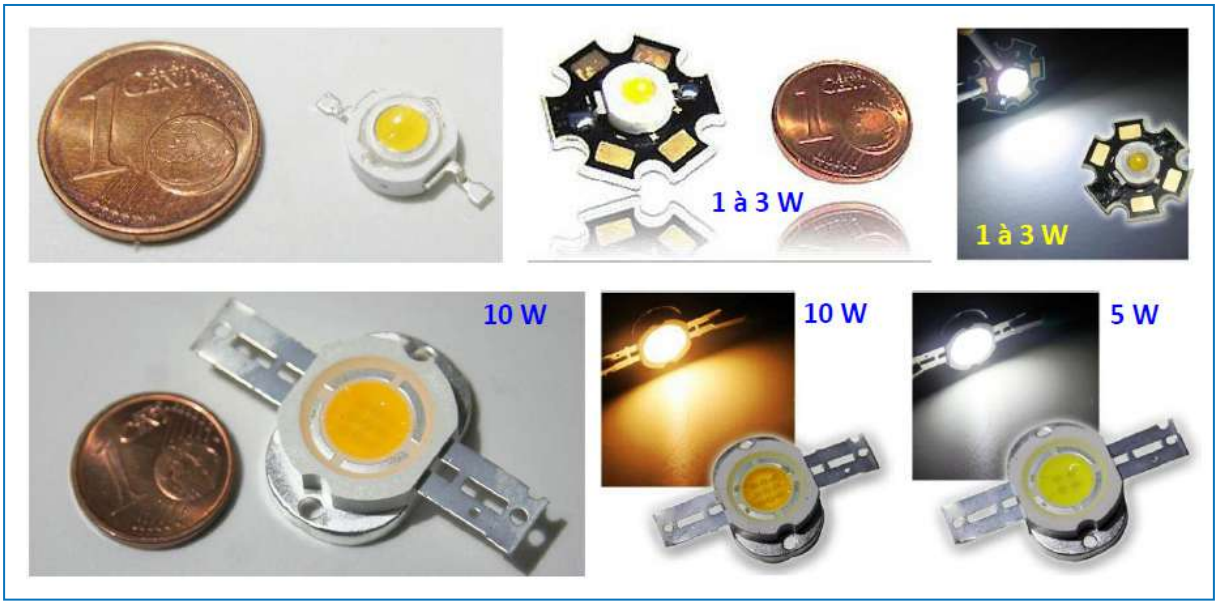


Figure 75. Présentation de LED 'high power' pour les puissance de 3, 5 et 10 W.

Vu la forte concentration du faisceux lumineux issu des LED 'high power' avec la structure du boîtier ainsi présentée [98,100], celles-ci sont essentiellement utilisées dans les spots et projecteurs (Figure 76) pour des applications bien ciblées (Figure 77).

Figure 76. Divers spots et projecteur à base de LED 'High Power'.

Figure 77. Infrastructure sportive de proximité, éclairée avec des projecteurs LED.

Sur un autre plan, il faut toutefois dire que le palier de puissance unitaire (1 à 10 W), généralement spécifié pour les LED 'High power', a été largement franchi aussi bien avec les structures d'encapsulation originelles (Figures 73 à 75), que celles inspirées des LED SMD suite aux derniers progrès dans les matériaux et conception thermique (embase céramique….). Ainsi, une augmentation notable de la densité de puissance a été opérée en regroupant plusieurs puces dans un même boîtier (Figure 78), passant ainsi à des structures de base permettant la réalisation de sources lumineuses à fort flux avec un encombrement plus réduit, d'où des solutions conformes aux exigences de l'éclairage public (Figures 79 et 80).

Figure 78. Illustration de l'évolution de la densité de puissance avec les techniques d'encapsulation des puces LED.

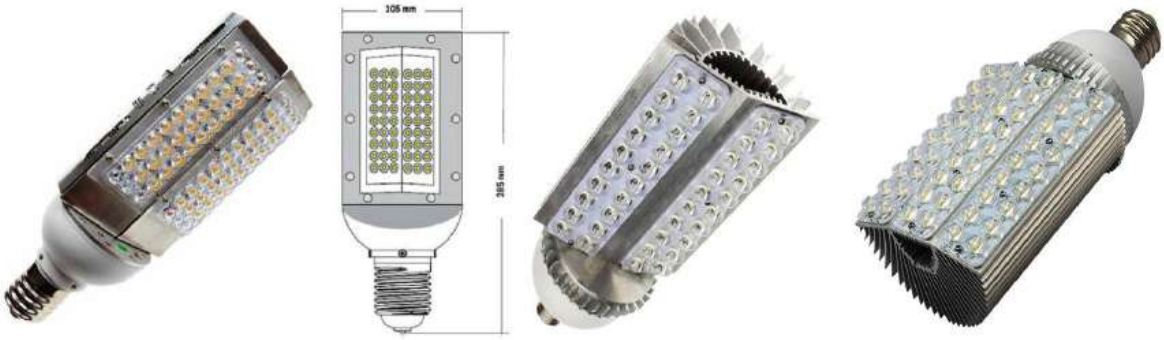


Figure 79. Diverses ampoules à LED 'High Power' de 3 W, offrant un flux lumineux de 6000 lumens et plus, pour luminaires d'éclairage public (avec culot E40).

Figure 80. Luminaires et projecteurs à base de LED 'High power'.

I.3.3.2.3. LED COB (Chip On Board)

Dans le but de répondre aux besoins toujours croissants en sources lumineuses de qualité, à forte densité de puissance et encombrement réduit, la technologie Chip-On-Board (COB) [98, 101] constitue le dernier développement pour répondre à cette quête, guidée également par le souci d'efficacité énergétique, devenu

universel face à la conjoncture que traverse le monde actuellement. Ainsi, en reprenant pratiquement le même principe de mise en boîtier de la LED blanche en associant puce bleue et phosphore (Figure 64), l'objectif de la technologie COB a été de gagner sur les espaces que le déploiement des LED SMD avec leur packaging individualisé nécessite, en les associant pour mutualiser leurs émissions lumineuses en un seul faisceau d'intensité suffisante pour une application donnée d'éclairage (Figures 68 et 69). De ce fait, un grand nombre de puces LED nues (sans boîtier), qui peut aller de quelques-unes à plusieurs centaines, sont d'abord assemblées les unes aux autres et disposées de manière appropriée sur une même surface de substrat, avant de les couvrir de phosphore jaune et emballer le tout dans un même boîtier (Figure 81). Les LED COB ainsi obtenues, reconnaissables à travers leur pastille de couleur jaunâtre très visible, présentent alors des puissances unitaires importantes, allant à 100 W pour les plus courantes actuellement alors que des modèles de 600 W sont proposés.

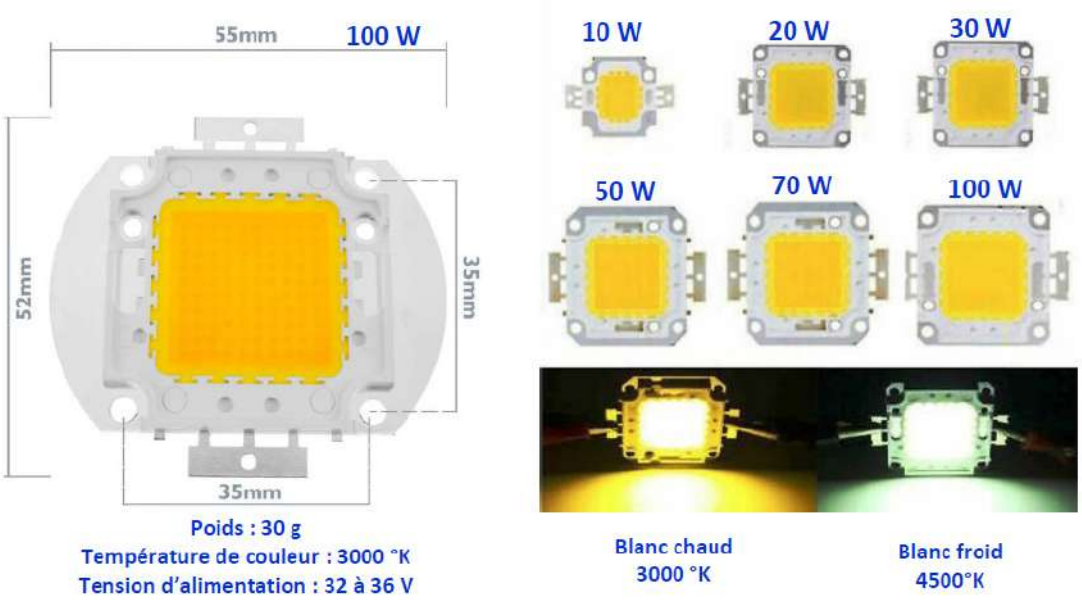


Figure 81. Modèles de LED COB et quelques données dimensionnelles.

Remarque 1: Le substrat en aluminium servant de base au packaging des LED COB, sert de refroidissement primaire, qui doit être renforcé par un dissipateur thermique additionnel, en cas de fonctionnement à une puissance supérieure à celle nominale, spécifiée notamment par le fabricant comme étant maximale.

Remarque 2: Les spécifications annoncées pour une LED COB en termes de flux lumineux (en lumen), puissance nominale (en watt) et efficacité lumineuse (en lumen/Watt), peuvent beaucoup varier d'un fabricant à l'autre et montrer une dispersion notable même entre lots différents du même fabricant.

Remarque 3: Pour répondre à certains besoins spécifiques, notamment en matière de gain d'efficacité du système et de l'optique provenant de sources à surface d'émission de lumière ou LES (Light Emitting Surface) circulaire, de nombreux modèles de LED COB à surface utile ronde, sont également disponibles, dont celles de qualité sont très demandées, notamment par les professionnels (Figure 82).

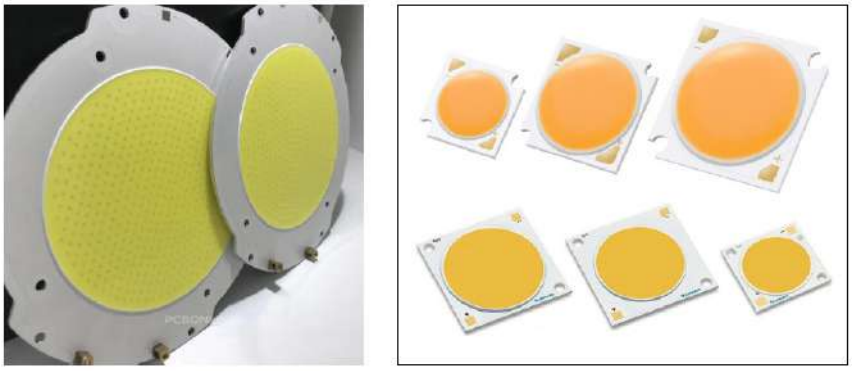


Figure 82. LED COB à surface d'émission (LES) de lumière circulaire.

Vu leurs performances en termes d'efficacité, intensité et qualité de lumière fournie, les LED COB, semblent s'imposer comme moyen d'éclairage d'avenir, avec la très grande diversité de sources lumineuses mises sur le marché et visant pratiquement l'ensemble des besoins couramment exprimés dans le domaine. S'agissant d'éclairage public dont les prescriptions en vigueur actuellement, s'articulent essentiellement autour d'une efficacité énergétique accrue, une lumière de qualité, durable et sans frais excessifs pour les collectivités locales, les premiers éléments d'analyse sur le sujet, montrent bien la tendance favorable aux systèmes à base de LED COB. En effet, l'efficacité énergétique étant acquise comparativement aux autres alternatives, avec en plus des coûts qui continuent de baisser, il se trouve que toutes les variantes d'éclairage dont ont besoin les divers espaces publics, peuvent trouver des solutions avantageuses dans les sources lumineuses à base de LED COB (Figure 83). Toutefois, l'apparition assez récente de ces dernières, fait qu'elles n'ont pas encore atteint la maturité requise pour s'imposer dans divers secteurs de l'éclairage, y compris public, face aux systèmes à base de LED SMD (Figures 68 à 72), dont la flexibilité et l'efficacité à répondre aux besoins de certaines applications (plages de température de couleurs,...) alliées aux capacités de production en masse des composants nécessaires, restent des atouts majeurs [102]. Néanmoins, en raison de la structure même d'emballage SMD, elle ne peut à l'évidence pas donner lieu à des sources lumineuses compactes comme l'exigent la plupart des dispositifs d'éclairage public, prescription à laquelle répond à juste titre la structure COB qui peut vivre longtemps à haute température [103] et de ce fait a de bonnes perspectives d'applications dans ce domaine (éclairage public) ainsi que celui industriel à haute intensité (Figure 83).

Figure 83. Luminaires et autres sources lumineuses à base de LED COB pour éclairage public et industriel.

Remarque: L'évolution la plus récente de la technologie des LED 'Chip On Board', est la mise sur le marché d'une LED COB à filament, qui reprend exactement le même concept sauf que le substrat plat dans les premiers modèles (Figures 81 et 82), est remplacé par une structure filaire autour de laquelle sont placées les puces LED nues, avant que l'ensemble soit enrobé dans le phosphore (Figure 84). Cette LED COB filaire qui est seule à posséder un angle d'émission complet (360°), a finalement donné naissance à toute une variété de lampes d'intérieur (Figure 84), au goût des nostalgiques de l'ère des ampoules à filament incandescent, mais avec une efficacité lumineuse beaucoup plus avantageuse (15 à vingt fois moins d'énergie consommée pour le même flux lumineux en sortie).

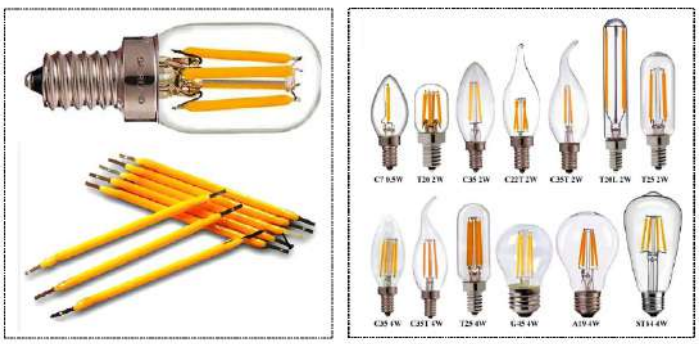


Figure 84. LED COB à filament et divers modèles de lampes.

L'efficacité lumineuse des LED, qui ne cesse de progresser vers les limites théoriques possibles, a justement enregistré le dernier record (210 lm/W) avec une lampe LED COB à filament de Philips (Figure 85), dont la mise sur le marché a symboliquement coïncidé avec l'entrée en vigueur du nouveau modèle d'étiquetage dédié à l'efficacité énergétique des sources lumineuse selon la nouvelle norme Européenne, soit le 1er Septembre 2021 [104-105]. La lampe en question dont le flux lumineux total est de 485 lumens pour une puissance d'entrée de 2,3 Watts (équivalente à une lampe à incandescence de 40 W), est de ce fait la première à satisfaire l'exigence de la nouvelle classe A, qui est la plus élevée, en exigeant une efficacité lumineuse supérieure ou égale à 210 lm/W, pour y adhérer.

Figure 85. Lampe LED Philips (210 lm/W), ayant battu le record d'efficacité lumineuse.

I.3.3.3. Vision scotopique et nouveau concept d'efficacité lumineuse

Les photorécepteurs de l'œil humain sont essentiellement de deux types, soit les cônes dédiés à la perception des couleurs et la vision diurne (de jour), dite photopique et les bâtonnets qui prennent à priori en charge la vision dite scotopique, durant la nuit ou en présence d'éclairement très faible. Entre les deux, la vision est dite mésopique. Concernant les premiers (cônes), composés de trois types (vert, rouge et bleu), dont 60% sont exclusivement verts, ils présentent une sensibilité qui penche vers cette couleur dont la longueur d'onde se situe à 555 nm dans le spectre visible (Figures 10 et 86).

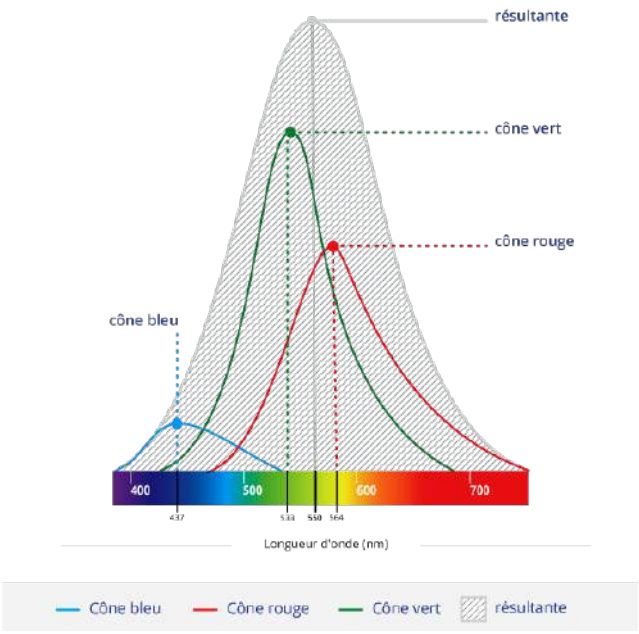


Figure 86. Distribution spectrale de la sensibilité des cônes photorécepteurs.

La plus grande efficacité lumineuse qui peut théoriquement être atteinte à 555 nm, soit pour une lumière verte monochromatique, est théoriquement égale à 683 lm/W. Dans ce contexte, les mesures actuelles faites à l'aide de photomètres photopiques, calés sur la partie centrale du spectre visible, négligent complètement la contribution de la vision scotopique, du fait que les bâtonnets sont beaucoup plus sensibles à la lumière bleue (Figure 86) [106-110]. Ce constat, permet de stipuler que l'efficacité lumineuse d'une lampe dont le spectre de la lumière émise tire vers les grandes longueurs d'ondes (jaune, rouge..) du domaine visible (lampe au sodium), est surévaluée par rapport à celle d'une lampe contenant du bleu (lumière froide). Or, il est bien connu que les LED ont justement cette propriété (Figure 65) d'émettre également dans le bleu, auquel est très sensible la vision scotopique (Figure 87), ce qui, à titre d'exemple, explique le constat général qu'une LED éclaire beaucoup plus qu'une lampe au sodium ayant la même intensité lumineuse en lumens. Finalement, c'est autour de ce point que chercheurs et professionnels du monde de l'éclairage artificiel, convergent de plus en plus vers l'introduction d'un facteur de correction, dans l'évaluation de l'intensité lumineuse d'une lampe quelconque. Ce dernier, est déterminé en faisant le rapport entre les lumens scotopiques S et photopique P, connu sous S/P ratio et dont quelques valeurs représentatives sont données dans le tableau ci-dessous (Tableau 6). Ainsi, l'utilisation de ce rapport S/P comme facteur multiplicatif du flux lumineux (en lumens), tel qu'il est actuellement affiché pour les diverses lampes, permet d'estimer au mieux la luminosité que le cerveau perçoit pour différentes couleurs de lumière et contribue de ce fait à réduire la consommation d'énergie, sans pour autant altérer le pouvoir visuel utile.

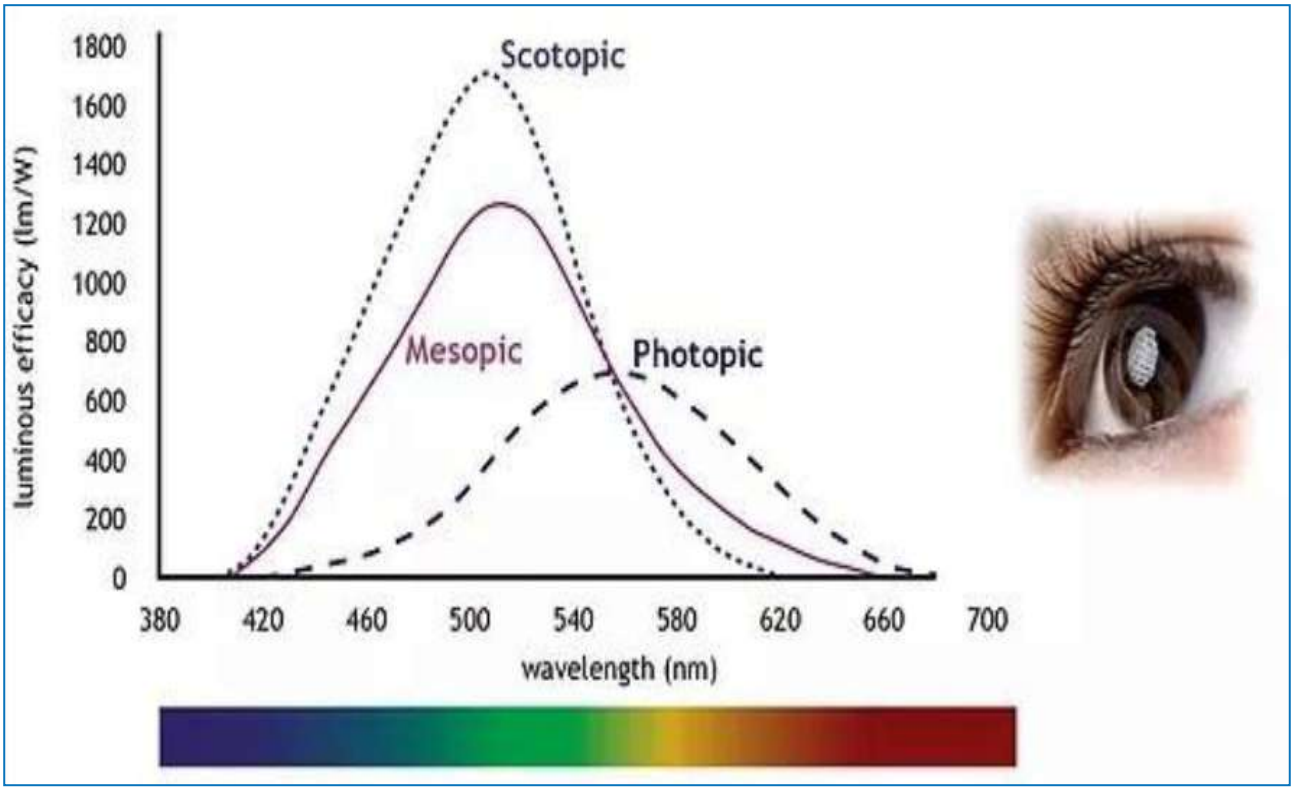


Figure 87. Caractéristiques des divers types de sensibilité visuelle de l'œil humain.

Remarque: Le rapport S/P, peut être utilement exploité pour estimer le flux lumineux d'une nouvelle lampe destinée à remplacer une ancienne de type différent.

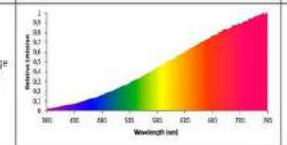
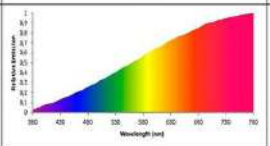
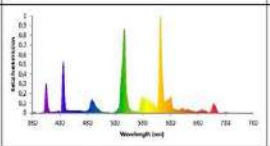
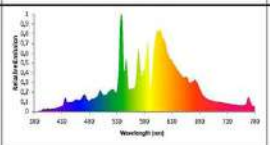
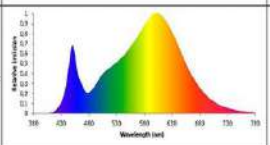
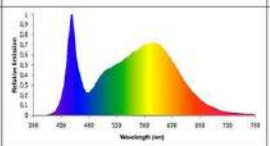
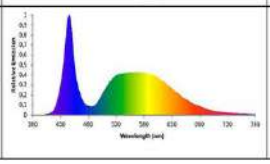
Exemple: Une lampe HPS de 250 W générant 25000 lumens (100 lm/w, S/P=0.65) (Tableau 6), peut être remplacée par une LED de température de couleur 5500 K, efficacité lumineuse de120 lm/W et S/P=2.07, ayant une puissance environ quatre fois plus faible (25000*0.65)/(120x 2,07)), soit 65,4 W.

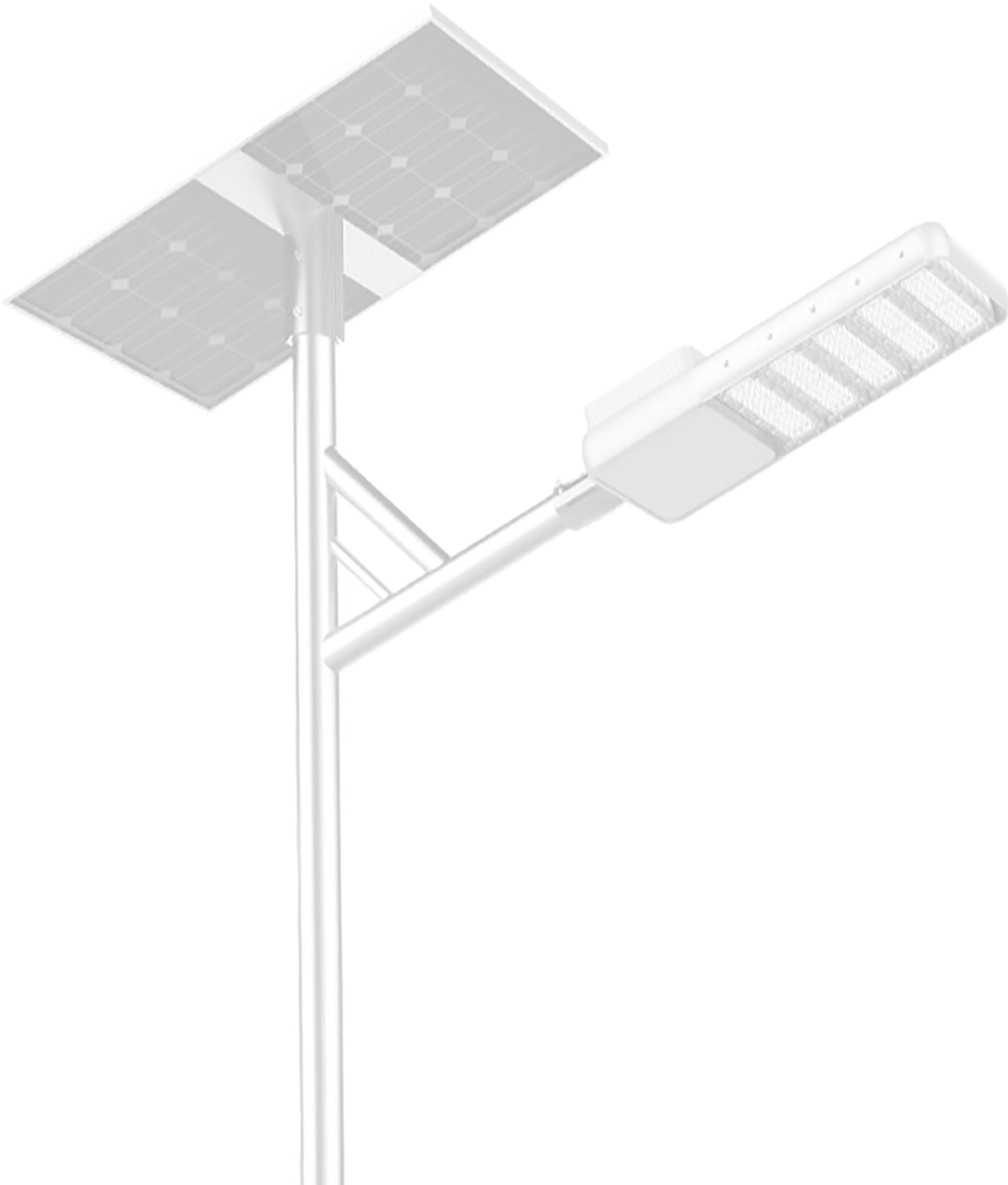
Dans le même sillage, la dépendance de l'efficacité lumineuse d'une lampe donnée par rapport à la distribution spectrale de la lumière émise, établie théoriquement à partir des courbes de sensibilité lumineuse relative (Figure 87), peut également être riche en enseignements. En effet, les résultats établis pour les lampes usuelles (Tableau 7), montrent que la conversion d'énergie en lumière visible par les lampes LED, est nettement plus efficace que l'ensemble des lampes conventionnelles.

Tableau 6. Valeurs du rapport S/P pour divers types de lampes.

Source lumineuse	S/P ratio
Lampe à incandescence	1.36
Lampe Fluorescente (3500K)	1.36
Lampe Fluorescente (5000K)	1.97
Lampe aux halogénures métalliques (blanc chaud)	1.20
Lampe aux halogénures métalliques (lumière du jour)	2.40
Lampe au sodium haute pression (HPS)	**0.65**
Lampe au sodium basse pression (HPS)	0.25
Lampe à LED (3500K)	1.39
Lampe à LED (5500K)	**2.07**
Lampe LED (6000K)	2.18

Tableau 7. Caractéristiques de l'efficacité lumineuse maximale théorique de diverses lampes, définies sur la base de la distribution spectrale de la lumière émise.

Description	Spectrum	System power consumption, measured (W)	Lamp or module luminous flux, measured (lm)	System luminous efficacy (lm/W)	Energy conversion efficiency	Theoretical maximum luminous efficacy (lm/W)
High voltage halogen, 120 W		127,4	2.249	17,7	11,9	148,7
Low voltage halogen, 60 W		59,9	1.535	25,6	15,4	166,3
Fluorescent lamp T5, 54 W, 830		51,3	4.184	81,6	23,7	344,4
Metal halide lamp, 70 W, 830		79,8	7.912	99,2	31,5	314,5
LED, 35 W, 830		34,2	4.739	138,6	42,3	327,6
LED, 35 W, 840		34,5	4.806	139,3	43,7	318,8
LED, 16 W, 750		16,2	2.436	150,5	48,7	309,0



CHAPITRE II

Lampes, appareillages associés et premiers éléments d'économie d'énergie

Mis à part les lampes à incandescence (classique et halogène) dont la conception même peut autoriser une alimentation directe à partir du réseau électrique basse tension (alimentation AC, 230 V, 50 Hz), toutes celles à luminescence ne le peuvent pas. En effet, toute la famille des lampes à décharge ainsi que les LED, fonctionnent selon des principes physiques qui font que cela n'est possible qu'à travers des circuits spécifiques d'adaptation pour chaque type de lampe [111-112]. Parmi ces derniers, on retrouve la grande famille des dispositifs associés aux lampes à décharge, qui ont pour rôle essentiel d'assurer d'abord l'amorçage de l'arc électrique (amorceur ou starter) dans les tubes de gaz utilisés (mercure, sodium…) puis faire en sorte pour qu'il puisse se maintenir et durer le temps qu'il faut (ballast).

II.1. Ballast

L'amorçage d'un arc électrique dans un mélange gazeux porteur de vapeurs métallique (mercure ou sodium) pour l'ioniser, comme c'est le cas pour l'ensemble des lampes à décharge, nécessite de soumettre ce dernier à une différence de potentiel suffisante pour créer un champ électrique assez intense pouvant engendrer une avalanche (Arc) d'électrons dans le milieu. Ce dernier devient ainsi conducteur avec une résistance électrique faible et qui va aller en diminuant, d'où la nécessité de limiter l'intensité du courant induit à un seuil acceptable pour la lampe. Cela étant justement le rôle assigné au circuit ballast [113] qui est systématiquement associé aux lampes à décharge et qui peut être réalisé à base de composants magnétiques ou électroniques.

II.1.1. Ballast magnétique

Le principe de base consiste à intercaler une impédance électrique en série avec la lampe afin de provoquer une chute de tension qui va se retrancher de celle imposée à l'arc, dans le but de réguler plus ou moins le courant qui détermine l'intensité de la lumière émise. Pour les lampes de faibles puissances, telles que certains tubes fluorescents, une simple résistance «ballast» de valeur fixe pourrait être suffisante. Dans la pratique cette dernière est souvent réalisée à l'aide d'un filament dont la résistivité augmente avec le courant qui le traverse et inversement, d'où une certaine régulation profitable à l'application [113]. Toutefois, étant données les pertes d'énergie dissipée dans cette dernière par effet joule et l'échauffement qui s'en suit (Figure 88), il va de soi que cette solution devient impraticable dès que la puissance de la lampe dépasse un certain seuil.

N'oubliant pas qu'il s'agit en premier lieu d'une alimentation en courant alternatif, l'usage d'une bobine 'magnétique' d'inductance L peut justement réaliser le même effet qu'une résistance (créer une chute de tension) et limiter ainsi le courant de décharge sans pertes actives (idéalement) du fait qu'il s'agit d'un élément réactif (réactance). La contrepartie dans ce cas est que l'énergie réactive que va consommer la bobine va provoquer un déphasage arrière du courant par rapport à la tension, dégradant ainsi le facteur de puissance (cos φ) de l'installation. Rehausser ce dernier peut être effectué à l'aide d'un condensateur (Figure 88) qui doit être dimensionné de sorte que son énergie réactive (capacitive) compense localement (avance de phase) celle inductive, pour obtenir idéalement un facteur de puissance unitaire.

II.1.1.1. Ballast magnétique avec amorceur (Starter)

Le circuit amorceur consiste simplement en un interrupteur dont la commande d'ouverture et fermeture doit suivre un séquencement précis et bien synchronisé avec le début et la fin de la seule phase d'amorçage. Cependant, il y a lieu de noter qu'avant l'allumage, les éléments métalliques de la lampe, ne sont pas sous forme de vapeur à température ambiante, le mercure étant donc initialement à l'état liquide (point d'ébullition

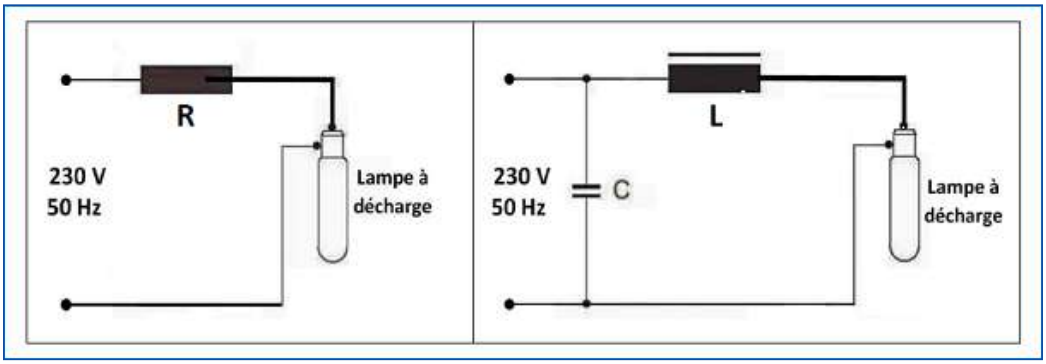


Figure 88. Circuits ballasts simples.

à 375°C) et le sodium solide (points d'ébullition à 883°C). Les deux électrodes sont ainsi séparées par un milieu isolant et le challenge consiste d'abord à faire passer un courant électrique dans ce milieu «isolant» pour démarrer la lampe. A cet effet et étant données les contraintes nécessairement différentes en fonction du type de la lampe et sa puissance, il existe des solutions généralement adaptées à une famille particulière et peu interchangeables avec les autres. En tout état de cause, le principe général à la base de la génération du pic de tension nécessaire à l'amorçage de l'arc, repose sur la surtension induite aux bornes de l'inductance suite à la coupure d'un courant minimum initié par l'amorceur. Cela étant fait, ce dernier se met en position d'attente pour un nouveau cycle (interrupteur ouvert) et le ballast ferromagnétique se retrouve au final, seul en série avec le tube de décharge afin de limiter le courant (Figures 89 et 90).

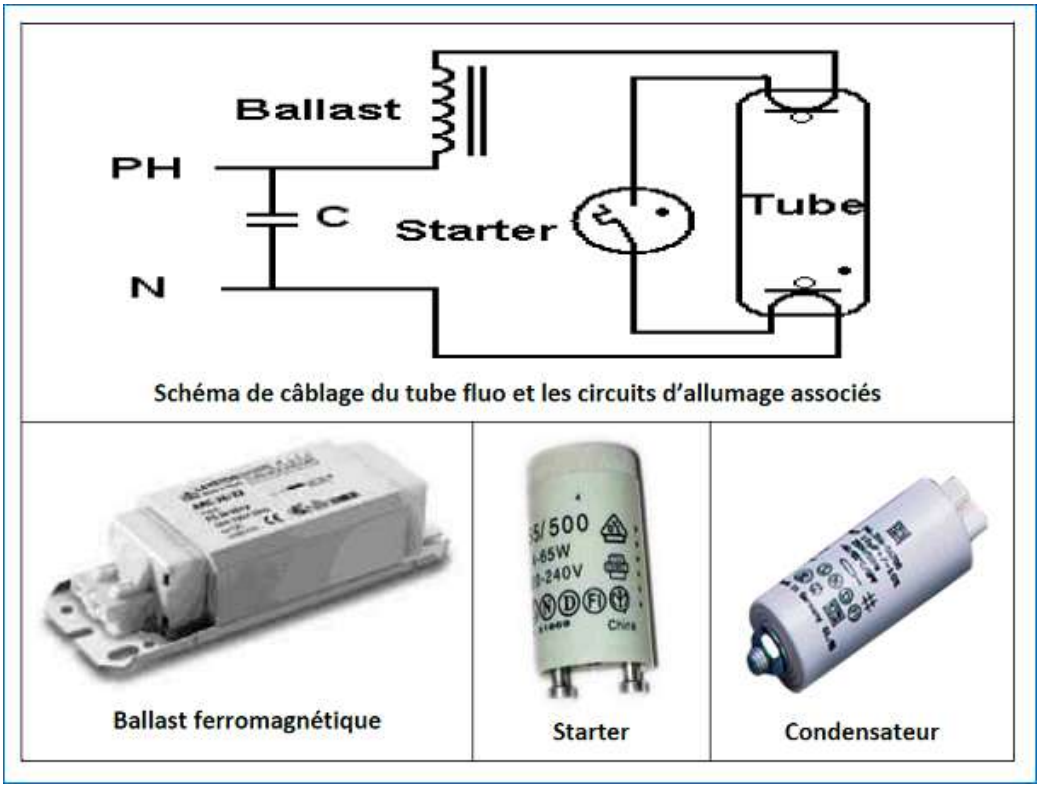


Figure 89. Principe des circuits auxiliaires dédiés à l'allumage des lampes au mercure (Ballons et tubes fluorescents).

Certaines lampes MH utilisent le principe de l'électrode auxiliaire qui est utilisée pour les 'ballons fluo' ou BF (lampes fluorescentes). Celle-ci n'est toutefois pas suffisante pour amorcer la lampe à elle seule et nécessite généralement le recours à un amorceur dédié (souvent indépendant), apte à générer une impulsion de plusieurs centaines de volts.

II.1.1.2. Problèmes de mauvaise adaptation ballast magnétique-lampe

Etant donnée la sensibilité des fonctions d'amorçage et maintien de l'arc électrique, le choix du ballast magnétique, dont dépend en grande partie la solution la mieux adaptée à ces deux fonctionnalités pour chaque type de lampe à décharge, exige à priori des précautions essentielles afin d'éviter certaines défaillances. En effet, le montage électrique permettant de faire fonctionner proprement une lampe à décharge est souvent assez complexe, car il fait appel à des constituants spécifiques qui ne sont pas toujours compatibles entre eux, rendant ainsi leur utilisation délicate pour les non professionnels dans le domaine.

II.1.1.2.1. Risques de défauts liés au démarrage

Un système d'amorçage est prévu pour provoquer un pic de tension tout en délivrant le courant nécessaire pour le démarrage d'une lampe à décharge spécifique. Dans ce cas, des ratés d'amorçage de l'arc peuvent être provoqués selon diverses raisons suite au choix d'un appareillage non compatible avec la lampe:

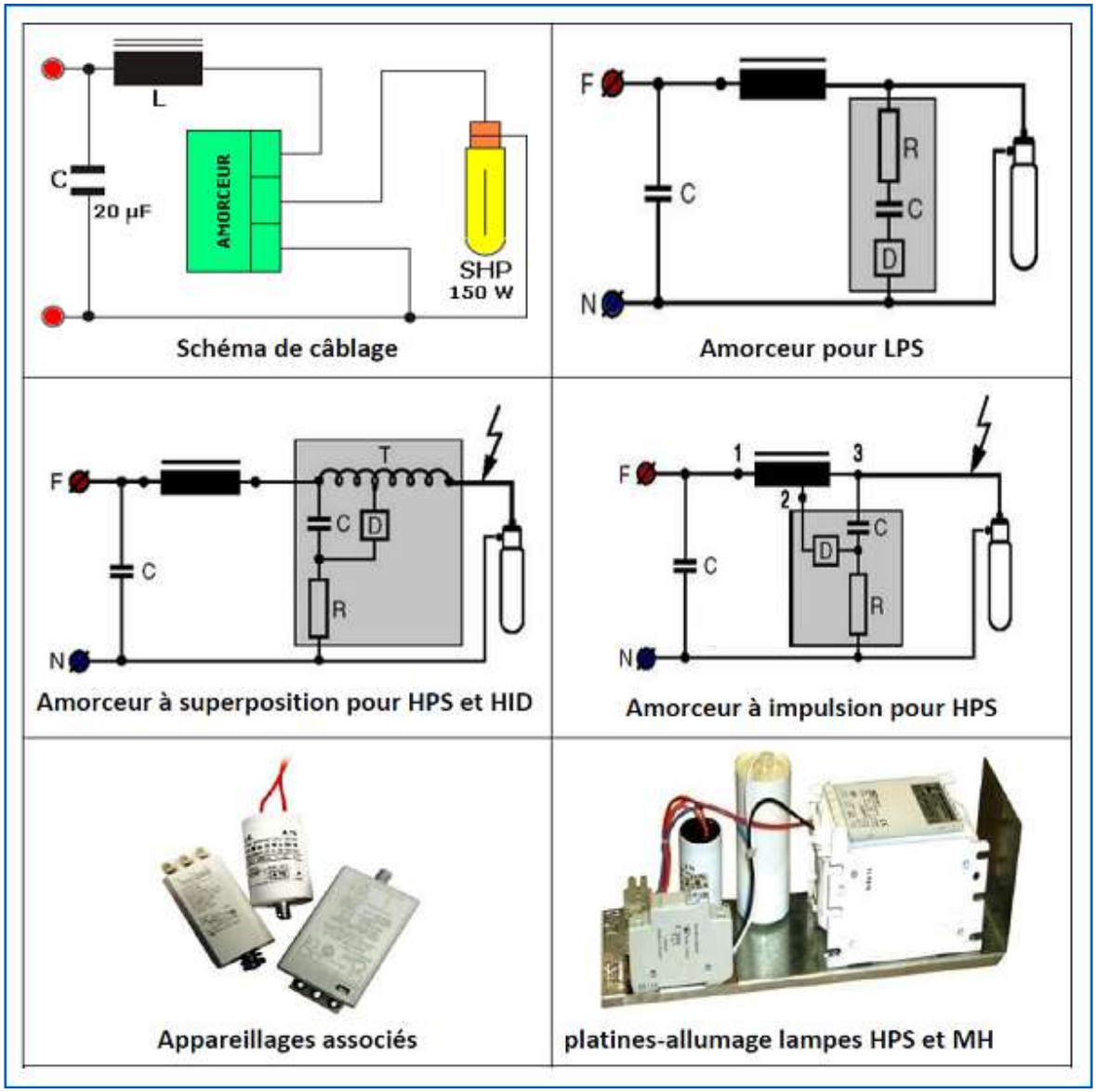


Figure 90. Principe des circuits auxiliaires dédiés à l'allumage des lampes à décharge au sodium (LPS et HPS) et halogénures métalliques (MH).

- Le système d'amorçage ne délivre pas une tension suffisante pour faire démarrer la lampe qui reste éteinte. C'est par exemple le cas si on associe une lampe au sodium haute pression (HPS) de 400 W à un appareillage destiné à une lampe à mercure (ballon fluorescent) de même puissance. Ce dernier n'incluant pas d'amorceur intégré, il ne peut pas faire démarrer la lampe HPS.

- Le système d'amorçage délivre une tension trop élevée par rapport à ce qui est nécessaire pour faire démarrer la lampe. Celle-ci peut être détruite ou endommagée à la mise sous tension et dans le meilleur des cas, elle peut continuer à fonctionner en mode dégradé, qui conduirait forcément à son vieillissement accéléré.

II.1.1.2.2. Risques de défauts en régime établi

Le ballast est prévu pour réguler la quantité de courant qui traverse la lampe une fois que celle-ci est en régime établi. En effet, une fois la vapeur métallique (mercure ou sodium) vaporisée et l'arc amorcé, aucun élément à l'intérieur du tube à décharge n'est prévu pour limiter le courant (ni par résistance ni par inductance), auquel cas celui-ci peut atteindre des valeurs excessives (court-circuit) que ne peut supporter la lampe. C'est justement là qu'intervient le rôle du circuit ballast pour stabiliser le courant en faisant intervenir une impédance extérieure, dont la valeur varie en fonction de la nature et la puissance de la lampe. De ce fait, des risques facilement caractérisables peuvent survenir lorsqu'une lampe à décharge est associée à un ballast non compatible ou mal dimensionné :

➢ **Cas-1-** Un ballast sous-dimensionné limiterait trop le courant pour le rendre insuffisant à entretenir correctement l'arc électrique et mener éventuellement à sa rupture, provoquant ainsi un sous-régime de travail préjudiciable au fonctionnement des électrodes. C'est par exemple ce qui se produit si on utilise une lampe au mercure haute pression de 400 W avec un ballast destiné à une lampe du même type mais moins puissante telle une de 250 W.

➢ **Cas-2-** Un ballast surdimensionné ne limiterait pas assez le courant et provoquerait de ce fait une surchauffe entraînant une dégradation accélérée de la lampe et pouvant même mener à son explosion suit à la surpression induite dans le tube à décharge. C'est par exemple ce qui se produit si on utilise une lampe de 250 W avec un ballast pour lampe de même nature de 400 W.

➢ **Cas-3-** Au-delà des risques de dégradation, une mauvaise alimentation influe de toute évidence sur le spectre lumineux émis par les vapeurs métalliques, donnant une lumière dont la couleur est altérée. A titre d'exemple, les principales données représentatives d'un fonctionnement correct de l'association lampe à décharge (BF, HPS, MH et LPS) et ballast correspondant, pour divers niveaux de puissance compatibles avec les besoins typiques d'un dispositif d'éclairage public, sont résumées dans le Tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8. Diverses lampes HID et données de fonctionnement correct avec ballast.

BF - Puissance (W)		**50**	**80**		**125**	**250**	**400**	**700**	**1000**
Courant lampe (A)		0,61	0,80		1,15	2,15	3,25	5,40	7,50
Tension d'arc lampe (V)		95	115		125	130	135	140	145
Puissance secteur comp. (VA)		70	108		155	290	485	860	1250
Puiss. absorbée par ballast (W)		8,6	11,4		12,4	22,1	25	40	60
HPS - Puissance (W)		**50**	**70**	**100**	**150**	**250**	**400**	**600**	**1000**
Courant lampe (A)		0,70	0,98	1,20	1,80	3,00	4,70	5,80	10,30
Tension d'arc lampe (V)		90	90	98	100	100	100	115	115
Puissance secteur comp. (VA)		66	100	120	180	320	480	680	1250
Puiss. absorbée par ballast (W)		11,7	13,1	13,7	18,1	28,1	38	42	85
MH - Puissance (W)	**35**	**50**	**70**	**100**	**150**	**250**	**400**	**1000**	**2000**
Courant lampe (A)	0,53	0,7	1	1,2	1,8	3	4,5	8,3	16,5
Tension d'arc lampe (V)	95	90	90	95	100	100	100	130	135
Puissance secteur comp. (VA)	55	66	100	120	180	320	480	1230	2375
Puiss. absorbée par ballast (W)	7,5	11,7	13,1	13,7	18,1	28,1	38	60	120
LPS - Puissance (W)	**18**	**35**	**55**	**90**	**135**	**180**			
Courant lampe (A)	0,35	0,6	0,59	0,94	0,95	0,91			
Tension d'arc lampe (V)	57	70	109	112	164	240			
Puissance secteur comp. (VA)	32	72	136	150	196	214			
Puiss. absorbée par ballast (W)	8	20	20	38	42	42			

II.1.2. Ballast électronique

La technologie utilisée dans la fabrication des ballasts électroniques a considérablement évolué au cours de ces dernières années, notamment en reproduisant avec beaucoup d'améliorations, l'ensemble des fonctionnalités nécessaires à la conduite de l'allumage des lampes à décharge. Ces dernières qui étaient partagées entre trois composants distincts (ballast ferromagnétique, amorceur et condensateur), ont toutes été intégrées sur un même circuit, appelé ballast électronique [114-116]. Mieux encore, celui-ci présente en plus un certain nombre d'atouts supplémentaires, dont une meilleure efficacité énergétique qui se traduit par une diminution notable de la puissance réactive soutirée au réseau, d'où un facteur de puissance proche de l'unité

(cos**φ≈1**) ainsi qu'une durée de vie des lampes rallongées. Les manifestations gênantes tels que le bourdonnement typique du ballast ferromagnétique ainsi que le papillotement éventuel de l'éclairage qui induisaient respectivement une fatigue sonore et visuelle, sont également fortement atténués à travers une alimentation des lampes sous hautes fréquences (de 20 à 60 KHz), dont la génération est aisée grâce aux convertisseurs électroniques (Figure 91). En plus, cela permet de gagner sur l'encombrement (en poids et volume) de certains composants, notamment l'inductance en série avec la lampe, comme le stipulent les lois théoriques permettant son dimensionnement. Un dernier avantage lié aux alimentations à fréquences élevées, réside dans le fait que la très courte période des courants induit, ne laisse pas assez de temps au gaz de rompre son ionisation au cours d'une alternance. Cependant, cette solution à base de circuits électroniques, reste plus complexe que les variantes classiques et impose certaines réserves à cause du fonctionnement en haute fréquence, notamment concernant les éventuels rayonnements gênants.

Remarque: Les ballasts magnétiques restent tout de même une solution viable et parfois même la seule pour les puissances supérieures ou égales à 250 W, ce qui rend leur présence encore courante pour une gamme importante de luminaires dédiés à l'éclairage public. En effet, comparés aux ballasts électroniques pour les puissances élevées, ils restent concurrentiels sur un grand nombre de points tels que la robustesse, coûts et génération de courants harmoniques.

Concrètement, un ballast électronique destiné à l'alimentation des lampes à décharge, réalise en fait une première conversion de la tension caractéristique du réseau AC (230V, 50Hz) en une tension continue à l'aide d'un étage redresseur avant de passer à une tension HF (Haute Fréquence), grâce à un onduleur (Figure 91). Cette configuration est généralement destinée aux lampes au sodium (HPS) et Halogénures (iodures) Métalliques (MH) sous hautes pressions, auxquelles elle assure un temps très réduit avant d'atteindre le régime d'éclairage nominal.

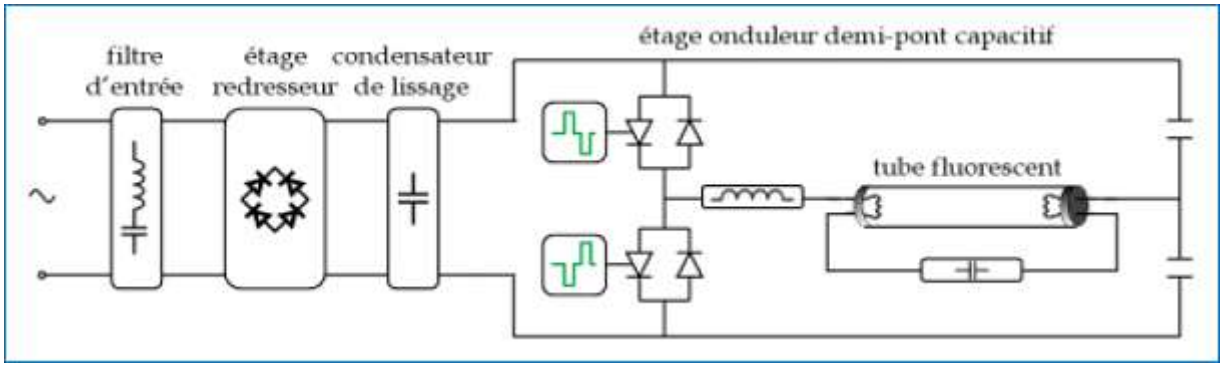


Figure 91. Configuration du ballast électronique associé aux lampes à décharge.

L'existence d'une multitude de modèles possibles de ballasts électroniques, souvent dédiés à un type particulier de lampes avec en plus diverses options tout aussi prometteuses les unes que les autres (exemple avec préchauffage ou pas….), rend difficile le choix en la matière surtout pour les non professionnels. En tout état de cause, il est souvent conseillé de prendre des renseignements précis sur la conformité du ballast avec la lampe à laquelle il est destiné ou le cas échéant, son adaptabilité pour celle de remplacement. Un bon exemple à cela concerne les lampes à induction, dont le circuit 'ballast' associé (Figures 92 et 93) consiste en fait en un générateur spécialement dédié à chacun des deux types les plus connus sur le marché (Tableau 3).

Figure 92. Modèle de générateur (ballast) associé aux lampes à induction de basse fréquence (140 KHz à 250 KHz).

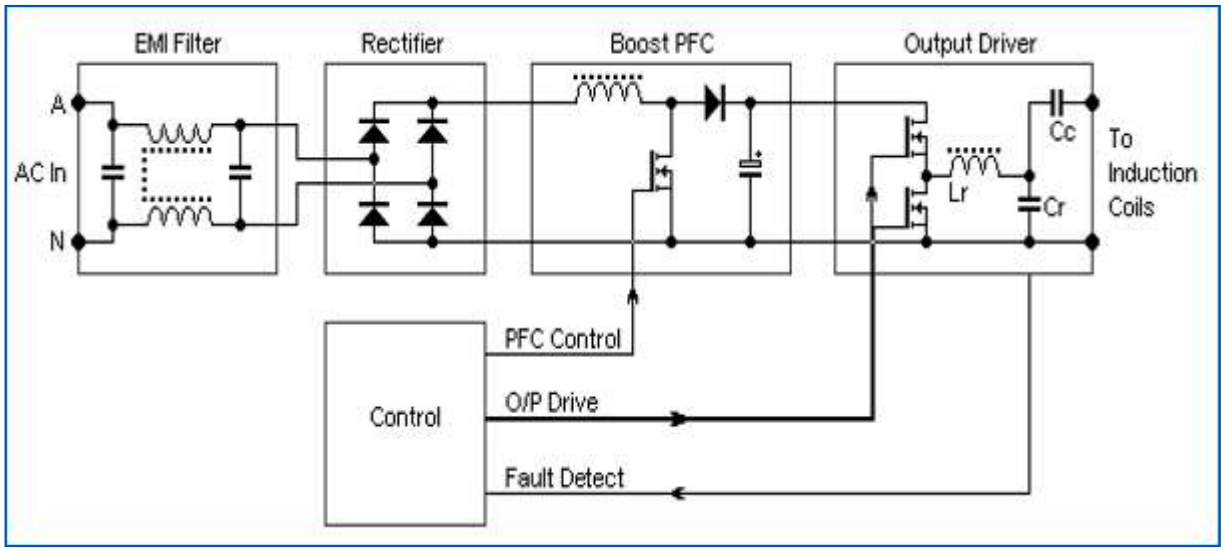


Figure 93. Circuit reflétant le principe de base d'un ballast électronique associé aux lampes à induction de basse fréquence (140 KHz à 250 KHz).

II.1.2.1. Ballast électronique pour lampes à LED

Contrairement aux lampes à décharge, les solutions LED nécessitent au final du courant continu ou DC (Direct Current), qui peut être directement disponible (batteries, solaire…) ou obtenu par redressement du courant alternatif ou AC (Alternating Current) prélevé sur le réseau de distribution (Conversion AC-DC), généralement de basse tension (230 V, 50 Hz). Dépassé ce stade, il y a lieu de noter que vu leur mode de fonctionnement, l'intensité lumineuse délivrée par les LED est presque exclusivement liée de manière linéaire à l'amplitude du courant continu qui la traverse dans le sens direct (Figure 94) [117-120].

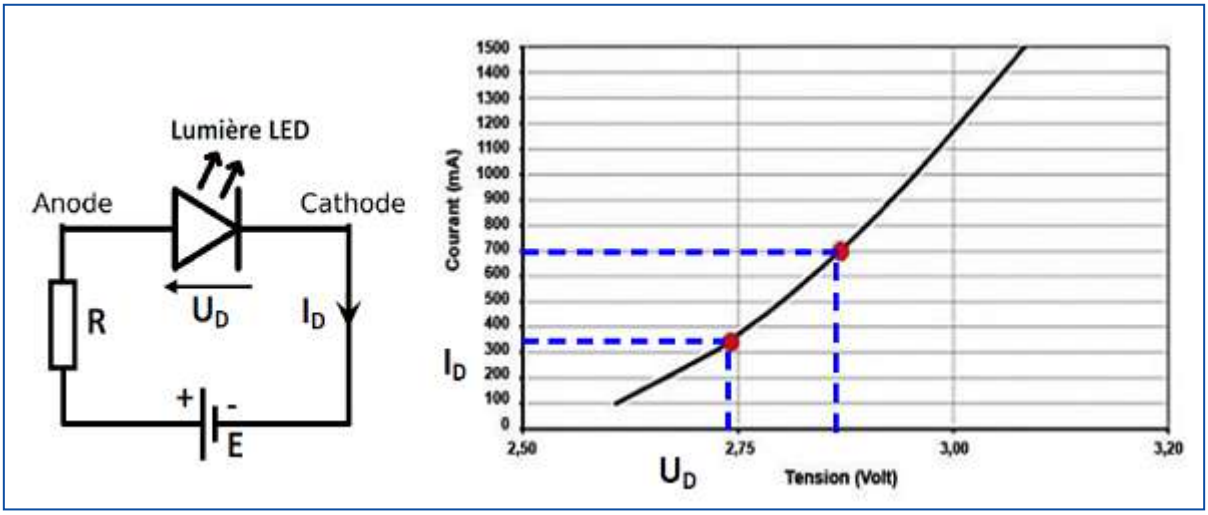


Figure 94. Caractéristique courant-tension I_D (U_D) typique d'une LED.

I.1.2.1.1. Driver de LED à courant constant

Les LED étant généralement utilisées en grand nombre selon la puissance de la source lumineuse, notamment celle destinée à l'éclairage public dont le flux lumineux de l'ordre de 10000 Lumen et plus, pourrait exiger la mutualisation de plusieurs dizaines à quelques centaines de cellules LED, dont l'uniformité de la lumière individuellement émise devient manifestement un critère important de qualité. La solution triviale dans ce cas, serait de monter toutes les LED en série, auquel cas elles seraient forcément traversées par le même courant. Le driver le mieux adapté aurait alors pour rôle d'assurer une alimentation à courant constant [121], réglé à la valeur nominale spécifiée par le fabricant de la lampe LED en fonction de sa puissance, puis veiller

à son maintien à travers une régulation adéquate. Ceci étant pour contrer toute sorte de dérive des paramètres du circuit, telles que celles inhérentes aux variations de température (résistance et tension des LED à l'état passant ….), afin de conserver les performances d'éclairage telles qu'elles aient été initialement prescrites. Pour cela, le driver a besoin d'une plage de variation de la tension, dont la limite supérieure augmente de manière incrémentale avec le nombre de LED mises en séries (Figure 95a), dont la chute de tension directe U_D est additive et a généralement une valeur moyenne pour chacune autour de 3 v (Figure 94). De ce fait, en plus de la valeur fixe du courant qu'il peut assurer, un driver à courant constant pour lampe LED, est également identifié à travers la plage de tension de sortie en fonction de sa puissance et pour laquelle le maintien du courant délivré constant est garanti (Figure 96).

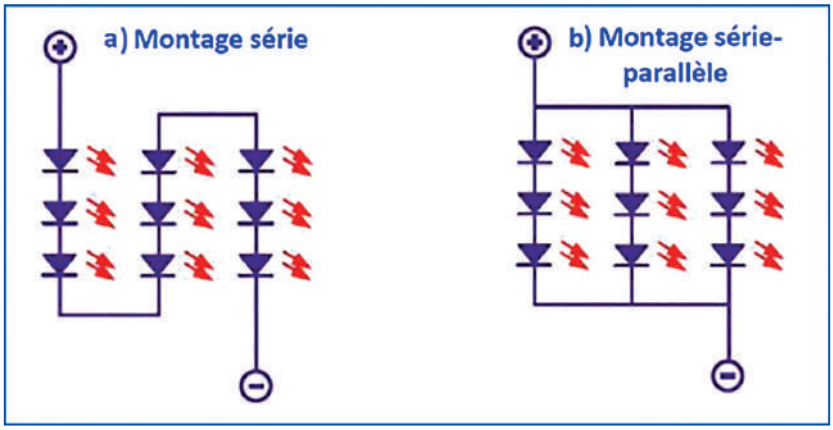


Figure 95. Divers montages des LED pour constituer une lampe avec un flux lumineux désiré.

Figure 96. Driver à courant constant (1500 mA) pour lampe LED de 60 W.

II.1.2.1.2. Driver de LED à tension constante

Vu le nombre important de LED qui peut constituer une lampe donnée, notamment au-delà d'un certain seuil de puissance, leur mise en série peut assez rapidement induire des niveaux de tension peu pratiques à subvenir, notamment par les drivers à courant constant. De ce fait, une limite du nombre de LED à mettre en série s'impose, en passant à un montage série-parallèle (Figure 95b) plus commode pour alimenter l'ensemble avec des niveaux de tension modérés dont ceux standards de 12 et 24 Vcc qui conviennent, entre autres aux applications de l'éclairage solaire. Dans ce cas et à l'évidence, il ya lieu d'y associer un driver à tension constante, dont l'inconvénient est de ne pas garantir l'équilibre entre les courants traversant les LED de branches parallèles différentes, d'où le risque d'émissions lumineuses non uniformes. Si ce type d'inconvénient est jugé négligeable ou acceptable, la solution telle quelle est présentée pourrait avoir un rapport qualité prix jugé favorable dans la mesure où un driver à tension constante est moins coûteux que celui assurant un courant constant. Toutefois, s'agissant d'un moyen d'éclairage sensé avoir une longue durée de vie (50000 heures ou plus), faire l'économie de drivers assurant également l'équilibre des courants entre branches parallèles de LED, pour avoir une lumière uniforme et de qualité stable, est jugée dans beaucoup de cas comme une option peu clairvoyante. Cela étant surtout lié au fait que le surcoût induit reste assez marginal vu qu'il s'agit de petits circuits électroniques spécialisés (Figure 97) dont la production en masse a beaucoup fait baisser les prix.

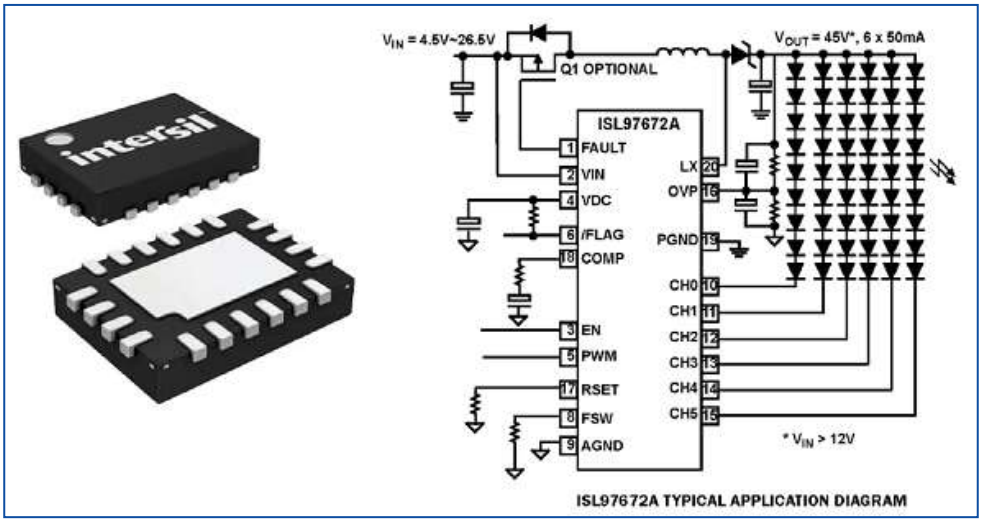


Figure 97. Exemple d'un circuit intégré, assurant la fonction de driver multi-sorties à courant constant pour LED.

Dans la pratique, le driver a tension constante, qui se résume finalement à une alimentation à tension de sortie stabilisée de qualité et qui a comme grand avantage de pouvoir raccorder facilement différents modules en parallèle, est généralement suivi d'un driver à multiples sorties à courant constant pour alimenter séparément chaque branche parallèle de la matrice globale de LED. Mieux encore, beaucoup de modules à LED (Figure 71), sont livrés avec des drivers à courant constant intégrés et assignés à chacune des branches parallèles comportant des LED montées en série (Figure 98).

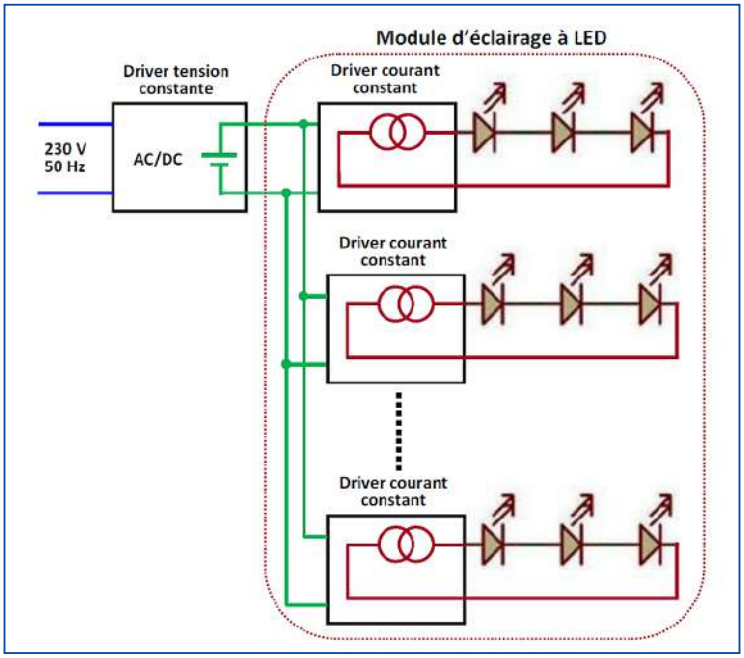


Figure 98. Driver à tension constante associé à un module à LED pré équipé de drivers à courant constant assurant une intensité identique pour toutes les LED.

Remarque: En cas d'utilisation d'un driver à tension constante seul (Figure 99), il y a lieu de veiller à la précision de la tension délivrée ainsi que sa stabilité. En effet, vu la grande pente de la caractéristique courant-tension I_D (U_D) typique d'une LED, notamment de puissance comme celles destinées à l'éclairage public (Figure 94), une variation de la tension d'alimentation même assez faible, peut engendrer de grands écarts sur le courant. Cette situation est justement bien illustrée sur la caractéristique présentée à la Figure 94, ou une variation d'à peine 5% de U_D, se traduit pratiquement par un courant I_D double (350 à 700 mA), qui s'accompagne par une augmentation de l'intensité dans le même rapport, sans parler des effets thermiques induits et l'éventuelle défaillance prématurée des LED.

Figure 99. Driver à tension constante 12 V, pour lampe LED de 60 W.

II.2. Ballasts, drivers et énergie réactive

Vu le grand nombre de points lumineux faisant partie d'un réseau d'éclairage public, leur alimentation est généralement assurée à partir d'une armoire de commande, centralisée (Figure 100), dont le contenu en termes d'appareillage (dispositifs de coupure, protection et comptage d'énergie….), est assez réglementé sur le plan qualité, efficacité et protocole de mise en œuvre.

Le dimensionnement de ces derniers est également assujetti à des règles techniques et sécuritaires afin

Figure 100. Divers modèles d'armoire de commande de l'éclairage public.

de permettre, entre autres, l'arrivée en toute sécurité de l'énergie électrique nécessaire aux besoins de l'ensemble des points lumineux, dont le déploiement peut s'étaler sur de grandes distances. Les pertes inhérentes qui accompagnent un tel transfert d'énergie électrique et dont l'origine est bien connue, peuvent ainsi être significatives d'où l'intérêt d'essayer de les limiter, en appliquant les solutions connues et largement validées dans ce domaine [122-123]. Ainsi, sachant que l'essentiel de ces pertes se résume à l'énergie électrique dissipée par effet ohmique dans les lignes, dont les résistances équivalentes sont imposées, il reste à essayer de réduire au maximum les échanges de l'énergie réactive, qui se traduisent par un courant de ligne plus élevé que nécessaire, alors que les pertes en question sont justement proportionnelles au carré de son amplitude. Pour cela, la seule alternative réalisable, consiste à faire en sorte que l'énergie réactive nécessaire au bon fonctionnement de l'ensemble lampe-ballast, soit produite localement au lieu de la demander à la source centrale distante (armoire de commande) et occasionner ainsi des pertes supplémentaires qui peuvent être évitées. A cet égard et selon la nature exacte de l'énergie réactive demandée localement, soit celle faisant suite à un simple déphasage entre courant et tension sans déformations de leurs formes sinusoïdales respectives, ou celle générée pour cause de déformation de l'une ou l'autre de ces dernières (ou les deux à la fois), des solutions appropriées à chaque cas peuvent être considérées.

II.2.1. Facteur de puissance de l'ensemble lampe-ballast

Dans le cas des lampes à décharge (HID), il a été établi que les ballasts magnétiques sont essentiellement constitués d'éléments réactifs de type inductif (Figures 88 à 90), d'où un glissement arrière du courant soutiré au réseau par rapport à la tension de celui-ci, prise comme référence. Le déphasage ϕ entre courant et tension ainsi crée (Figure 101), se traduit par un facteur de puissance ($\cos \phi$ de l'ensemble lampe-ballast), d'autant plus petit que la self du ballast est importante [124]. Ramener ce dernier vers sa valeur unitaire idéale, signifiant un besoin nul en énergie réactive, consiste dans ce cas à insérer dans le circuit un composant capacitif, idéalement dimensionné pour compenser au plus juste l'effet inductif de la self du ballast (Figures 101). Il faut dire que dans la pratique, certaines réglementations imposent également un facteur de puissance au moins supérieur à 0.9 pour les installations d'éclairage public.

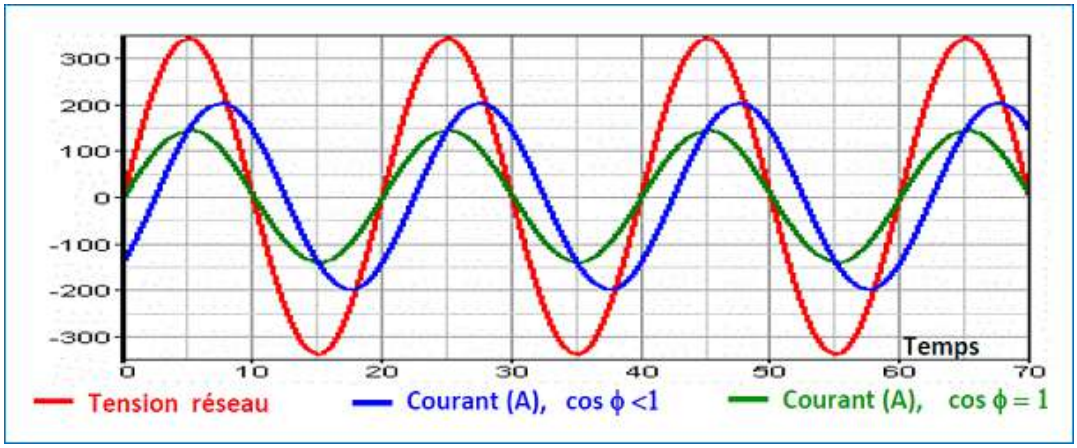


Figure 101. Tension réseau et courants avec charge inductive ($\cos \varphi < 1$) ou purement résistive ($\cos \varphi = 1$).

II.2.2. Taux Harmonique de Distorsion (THD)

La plupart des lampes à décharge, se comportent comme des récepteurs électriques non linéaires, ce qui implique une déformation plus ou moins accentuée des signaux sinusoïdaux caractéristiques des tensions et courants alternatifs du réseau d'alimentation (Figure 102). Des harmoniques de ces derniers, soit des composantes ayant des fréquences multiples de celle du réseau (typiquement fixée à 50 Hz), sont ainsi générées et échangés avec la source sous forme d'énergie réactive, dont les effets se traduisent, en plus des pertes comme dans le premier cas (déphasage courant tension sans déformation), par des seuils de perturbation qui peuvent être nocifs pour le fonctionnement de certains équipements utilisant le même réseau. Comme pour le facteur de puissance, ce type de préjudice fait justement l'objet d'une réglementation limitant le Taux Harmonique de Distorsion (THD) de l'installation, dont les plus sévères exigent qu'il soit inférieur à 5% (THD<5%), par rapport à la valeur efficace du fondamental (50 Hz) [122-123].

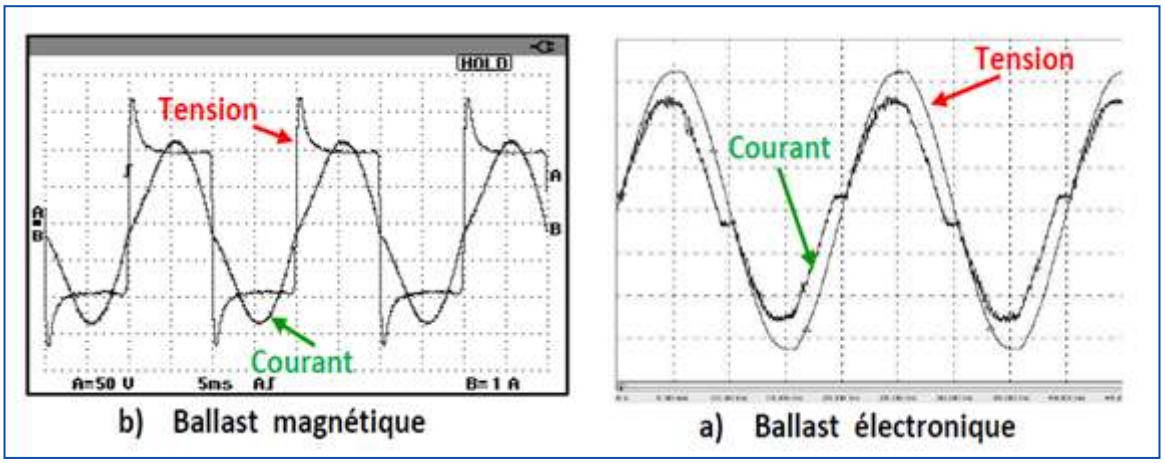


Figure 102. Allures des courants et tensions alimentant une lampe au Sodium Haute Pression (HPS) avec ballasts magnétique et électronique.

Remarque 1: Les ballasts électroniques associés aux lampes à décharge (HID), permettent à l'évidence de meilleurs facteurs de puissance (proches de 1) ainsi que des taux harmoniques de distorsion (THD) beaucoup plus faibles (Figure 102b) qu'avec les ballasts magnétiques. Ces derniers gardent cependant les avantages d'un coût plus faible et une robustesse remarquable.

Remarque 2: Les composants capacitifs qui sont généralement associés aux ballasts pour relever le facteur de puissance et contribuer éventuellement au filtrage des harmoniques, nécessitent un appel de courant au démarrage relativement élevé dès la mise sous tension. De ce fait, une entrée en fonction simultanée d'un grand nombre de points lumineux, risque d'engendrer des seuils pouvant enclencher les dispositifs de protection au niveau de l'armoire de commande, auquel cas, des solutions simples comme celles imposant un très léger décalage des divers départs, peuvent y remédier.

Remarque 3: Pour l'éclairage à LED, la seule source d'énergie réactive est liée au fonctionnement de l'étage de conversion AC-DC, au niveau duquel les problèmes du cos ϕ et THD sont réglementés et pris en charge de manière séparée.

II.3. Contrôle de l'intensité lumineuse (Gradation) et économie d'énergie

Le concept de variation du flux lumineux émis par une lampe donnée, était connu et appliqué depuis assez longtemps, mais principalement pour des besoins d'adaptation de l'éclairage à des situations particulières, liées notamment à certaines atmosphères de travail (ateliers d'usinage, scènes de tournage, théâtre.) ou tout simplement dans un but de confort visuel. Cependant, c'est dans un souci exclusivement lié à la rationalisation de la consommation énergétique, vu la situation actuelle dans le monde, qu'un tel concept a pris un grand essor, avec son application à grande échelle grâce à une multitude de nouveaux moyens techniques, permettant de contrôler efficacement et à divers degrés, le flux lumineux des principales sources lumineuses, y compris celles destinées à l'éclairage public. La prescription de base dans ce cas, étant d'ajuster le niveau d'éclairage au plus près des besoins réels afin d'éviter tout gaspillage inutile d'énergie, il va de soi que sa mise en œuvre nécessite d'abord une source lumineuse ayant certaines prédispositions techniques permettant cela, avant d'identifier l'option de réglage appropriée. Cette dernière peut en effet être menée, de manière continue (réglage fin) sur une plage plus ou moins étendue d'un côté, ou selon des niveaux discrets présélectionnés de l'autre [125-127]. Dans ce cas, il faut dire que le choix parmi l'une ou l'autre des deux options (réglage continu ou discret), dépend de plusieurs critères dont la technologie de la lampe ainsi que toute éventuelle perspective de superposer des objectifs supplémentaires à celui principal d'économie d'énergie (exemple sur le plan qualité de la lumière), auquel cas, les différences de coût peuvent devenir un élément important à prendre en considération.

II.3.1. Gradation du flux lumineux des lampes à décharges (HID)

Vu leur structure et mode de fonctionnement, les lampes à décharge sont généralement conçues pour un point de fonctionnement nominal, dont les caractéristiques dépendent principalement des conditions d'amorçage de l'arc et surtout son maintien. Sur ce point, il faut dire que toute variation du flux lumineux qui dans ce cas, passe nécessairement par celle de la puissance délivrée par la source d'alimentation, implique à l'évidence des modifications notables sur les paramètres dont dépend fortement la survie de l'arc, notamment dans le cas des lampes à haute pression. L'essentiel parmi ces dernières étant justement celles qui ont été assez récemment, les principales lampes conventionnelles utilisée dans l'éclairage public, comme les modèles au sodium à haute pression (HPS), halogénures métalliques (MH) et aux vapeurs de mercure [128]. Ainsi, une diminution allant jusqu'à 50 % de l'intensité lumineuse nominale de ces dernières reste quand même possible et ce, afin de rester loin de la zone critique de fonctionnement, pouvant déboucher sur une éventuelle extinction de l'arc, auquel cas son réamorçage nécessite d'attendre un refroidissement qui peut durer plusieurs minutes. Toutefois, il y a lieu de noter que toute variation de l'intensité lumineuse d'une lampe HID, éloigne nécessairement son fonctionnement des conditions optimales et occasionne une détérioration de la qualité de la lumière émise par rapport à celle initiale (efficacité, couleur, température de couleur) et ce de manière plus ou moins marquée selon le type de lampe, notamment la nature des mélanges gazeux utilisés. Cela étant justement le cas des lampes à halogénure métallique, dont l'indice de rendu de couleur dans les conditions nominales de fonctionnement (IRC>90) constitue son principal avantage, subit une dégradation notable même pour des seuils de gradation relativement modestes (< 20%) par rapports au flux nominal. Quant aux autres

lampes, les dégradations liées à la gradation restent acceptables, notamment pour les HPS dont l'usage à grande échelle dans les systèmes d'éclairage public a encouragé le recours à la gradation dans un but exclusif d'économie d'énergie, qui repose en grande partie sur la variation de la tension de l'arc, laquelle s'identifie pratiquement à celle de la lampe (sans ballast). Cette dernière peut en effet être variée de manière continue selon plusieurs approches appliquables localement par l'intermédiaire d'un ballast magnétique ou électronique dédiés, ou de manière assez centralisée en utilisant un autotransformateur pouvant faire varier la tension d'alimentation au départ de l'armoire de commande (Figure 103).

Figure 103. Armoires d'éclairage public avec économiseur d'énergie (Variateur stabilisateur de tension AC pour la gradation de lampes HPS).

Avec de tels procédés (variateurs de tension), robustes et relativement simples à déployer, des économies d'énergie substantielles, allant jusqu'à 40% par rapport à la consommation sans gradation de systèmes d'éclairage publics à base de lampes HPS, ont été enregistrées en diminuant la puissance de ces dernières durant les créneaux horaires de faible fréquentation. Cela étant, en assurant une plage de tension d'alimentation stable où les fluctuations inhérentes à celle du réseau n'apparaissent pas, d'où le maintien d'une qualité d'éclairage très peu altérée par rapport à celle d'un fonctionnement optimal.

Remarque 1: Vu le coût lié à la mise en œuvre de la gradation des lampes HID telle qu'elle a été présentée précédemment, ainsi que les conséquences qui peuvent être occasionnées en termes de baisse de qualité de la lumière, d'autres procédés allant dans le même sens d'économie d'énergie, mais avec des approches plus explicites quant à leur implémentation, ont été proposés et appliqués. Ces derniers consistent tout simplement à procéder à une extinction ordonnée d'un certain nombre de points lumineux, tout en veillant à ce que ceux qui restent fonctionnels (avec 100 % de leur flux nominal), puissent assurer à eux seuls un niveau d'éclairage jugé suffisant pour l'ensemble de l'espace couvert. A titre d'exemple, l'extinction d'un luminaire sur deux pendant la moitié du temps global d'éclairage, se traduit par une économie de 25 % par rapport à une situation où tous les points lumineux restent actifs à 100 %.

Remarque 2: L'économie d'énergie associée au mode opératoire de l'éclairage public, se joue pratiquement selon un planning, répartissant les activités nocturnes en créneaux horaires selon les niveaux de fréquentation qui les caractérisent et le niveau de luminosité approprié (Figure 104).

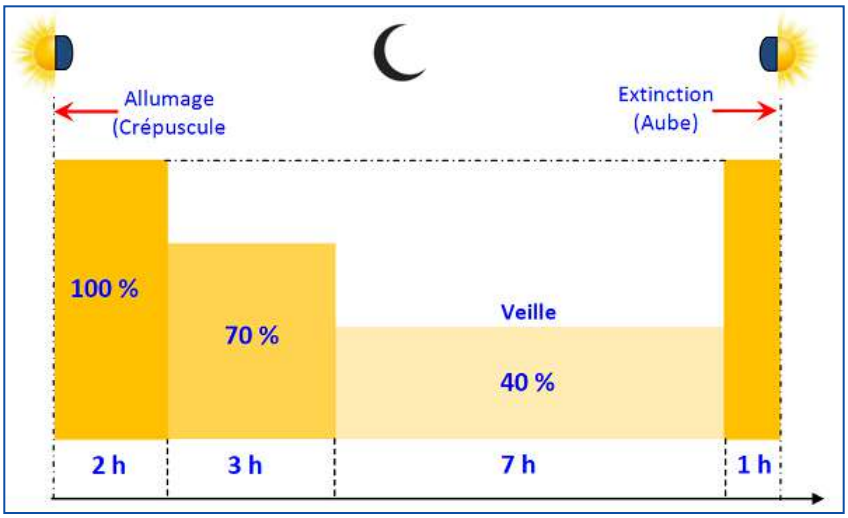


Figure 104. Illustration d'un profil d'éclairage avec trois niveaux de luminosité.

II.3.2. Gradation et économie d'énergie avec les lampes à LED

Le mode d'alimentation en courant continu (DC) des LED et le lien très étroit de l'intensité lumineuse qu'elles émettent avec le courant (Figure 94), dont la maturité des techniques de contrôle avec une grande finesse a atteint des stades très avancés, laisse présager d'immenses possibilités quant à la maîtrise au plus juste de la lumière émise par LED. Cela étant pratiquement sans perte aucune de sa qualité et avec des profondeurs de réglage qui peuvent s'étaler d'un niveau extrêmement bas à celui maximal autorisé, lui-même généralement limité uniquement par des contraintes externes de fonctionnement, telle que la température dont le maintien en deçà des seuils admissibles, dépend étroitement des conditions d'utilisation et les capacités de refroidissement prévues.

Concrètement donc, le contrôle de la lumière des LED peut tout simplement être mené avec toute la finesse désirée, par l'intermédiaire d'un driver non pas à courant constant comme c'est le cas des versions standards (Figures 96 à 99) destinées aux applications à niveau d'éclairage fixe, mais avec ceux munis de l'option permettant sa variation (courant) sur une plage donnée (avec gradation ou dimming). Mieux encore, ce dernier étant naturellement placé au plus près du module LED (Figure 71) avec lequel il est généralement confiné dans le luminaire destiné à l'éclairage extérieur (Figures 72, 79 et 80), plusieurs choix sont également proposés quant au moyen permettant l'accès au contrôle désiré (Figure 105) [129-134]. Celui-ci pouvant être simplement manuel, à distance avec télécommande personnalisée ou à travers un réseau de communication dédié, dans le cadre d'une gestion centralisée de tout un dispositif d'éclairage public, qui peut être constitué de plusieurs centaines de points lumineux, répartis sur de grands espaces urbains ou autres.

Le saut en matière de réglage de l'éclairage public avec les LED, a ainsi pratiquement mis de côté d'un seul coup et en si peu de temps, toutes les limites et autres compromis difficiles à établir entre efficacité énergétique et qualité de la lumière avec les lampes HID comme indiqué précédemment. Au contraire, un répertoire d'options et de possibilités insoupçonnées il n'y a pas si longtemps, est entrain de modifier en profondeur le concept d'éclairage public tel qu'il a été connu jusqu'ici, essentiellement articulé autour des soucis de sécurité. En effet, l'avènement des LED a non seulement répondu avec satisfaction à toutes les prescriptions en la matière, telles qu'exprimées dans les cahiers des charges les plus exigeants, mais est allé au-delà puisqu'il a également ouvert de grandes perspectives quant à l'intervention de la qualité de la lumière, comme moyen de régulation d'une vie nocturne adaptée aux grandes mutations qui s'imposent dans la vie des populations de plus en plus sédentaires, notamment dans les grands centres urbains.

Figure 105. Driver LED dimmable 50-200 W (42-58 Vdc) avec option de commande 0-10 v, dédiée au contrôle de l'intensité umineuse.

CHAPITRE III

Dispositifs d'éclairage public et éléments de déploiement

III.1. Eclairage public et moyens de déploiement

Théoriquement, une lampe nue peut être directement utilisée pour éclairer un espace donné. Toutefois une approche aussi simple, notamment en cas de déploiement à l'extérieur, serait de toute évidence peu pratique et présenterait diverses limites qui nuiraient profondément à la qualité du service rendu. En effet, en plus de la fragilité qui la caractérise de toute évidence, une telle solution peut difficilement répondre à certaines exigences fondamentales de l'éclairage public, notamment la directivité pour des raisons évidentes d'efficacité et empêchement de toutes sortes de nuisances [135-136]. C'est justement à ce niveau que les luminaires interviennent afin de solutionner, entre autres, tous ces inconvénients induits par le fait que la lumière générée par une lampe nue, est souvent dirigée dans toutes les directions (ciel, horizon…), sans la moindre focalisation sur les espaces où l'éclairage visé est réellement utile.

III.1.1. Luminaires

Un luminaire est un appareil qui regroupe un ensemble de fonctionnalités telles que la production, le contrôle et la distribution de la lumière. Il est question donc d'un ensemble complet d'éclairage public, principalement constitué d'une ou plusieurs lampes, les douilles permettant de les positionner tout en facilitant leur montage et enfin des dispositifs optiques destinés à répartir la lumière. Sur un autre plan, s'agissant d'un moyen dont le déploiement extérieur suggère souvent des contraintes mécaniques et environnementales assez sévères, la structure d'un luminaire destiné à l'éclairage public, doit présenter une rigidité suffisante pour son soutien et fixation.

Concrètement, les exigences d'un luminaire, éventuellement exprimées sous forme de prescriptions techniques [137], pourraient se résumer à ce qui suit :

1. Imperméabilité à l'eau et aux poussières afin de bien protéger les équipements intégrés (lampe, ballast…)
2. Rigidité et résistance de la structure à la rouille (Exemple en fonte d'aluminium), en vue d'une tenue mécanique vis-à-vis des aléas extérieurs
3. Canalisation optimale du flux lumineux avec un bon rendement et un effet d'éblouissement minimal.

Remarque 1: Contrairement aux sources lumineuses classiques (fluorescentes, HID…), qui émettent de la lumière dans pratiquement toutes les directions et nécessitent de ce fait un réflecteur approprié pour mieux la canaliser (Figure 106a), les LED offrent un faisceau lumineux directif à la source, d'où l'inutilité de dispositifs optiques dédiés à cette fonction (réflecteur…) dans les luminaires correspondants (Figure 106b).

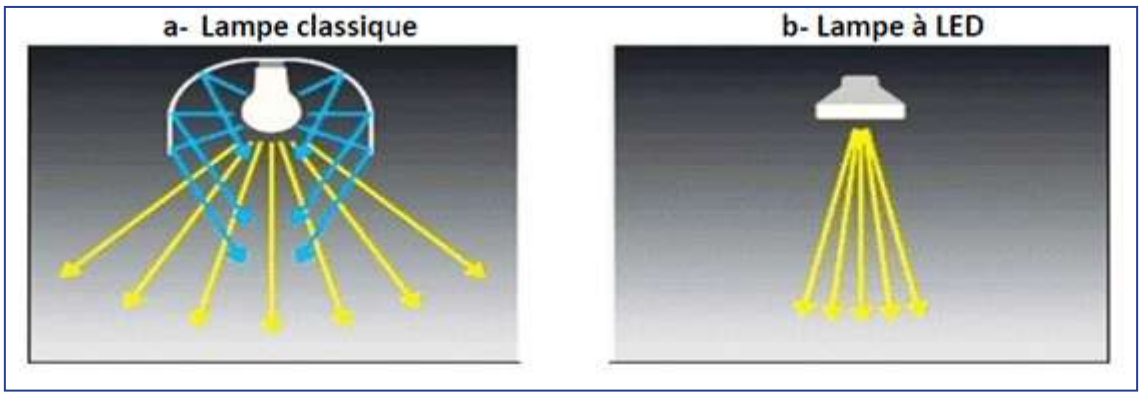


Figure 106. Faisceaux lumineux d'une lampe classique avec réflecteur et LED.

Remarque 2: Dans les luminaires avec lampes classiques, la vasque réalisée en verre ou plastique transparent et permettant la protection de la lampe tout en laissant passer la lumière, peut être bombée ou relativement plate. Ce détail a justement son importance en termes d'efficacité lumineuse, puisque dans le premier cas, une partie de la lumière est inutilement dirigée vers le ciel, provoquant en plus une pollution lumineuse qui empêche de voir le ciel étoilé, ce qui n'est pas le cas de la vasque plate (Figure 107).

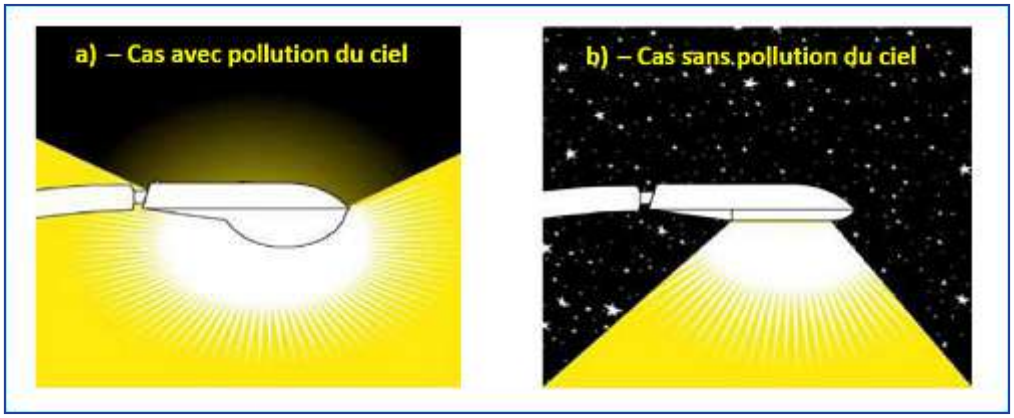


Figure 107. Type de vasque de protection et pollution lumineuse.

Remarque 3: L'association d'une lampe avec un luminaire donne à l'évidence une photométrie différente de celle de la lampe seule. Ainsi, l'efficacité lumineuse globale d'un luminaire, nécessairement inférieure à celle de la lampe nue utilisée, dépend beaucoup de la qualité du luminaire, notamment ses performances optiques.

III.1.1.1. Principaux constituants d'un luminaire

Les performances photométriques et thermiques, les matériaux utilisés ainsi que la taille d'un luminaire, dépendent essentiellement du type de lampe utilisé et sa puissance nominale. Ainsi et à titre d'exemple, les lampes qui produisent une grande quantité de chaleur ou rayonnement infrarouge nécessitent des luminaires ventilés, alors que celles fluorescentes, générant peu de chaleur mais assez sensibles à la température ambiante, peuvent exiger une enceinte fermée, notamment pour y empêcher la circulation d'air froid en cas de basses températures.

Pour répondre à l'ensemble des fonctionnalités qu'exige un dispositif d'éclairage public performant, le luminaire qui peut être considéré comme étant la source lumineuse unitaire fondamentale dans ce cas, doit également héberger, en plus de la lampe, un certain nombre d'équipements électriques auxiliaires, nécessaires au bon fonctionnement de l'ensemble (Figure 108). Ces derniers ayant essentiellement pour rôles celui d'assurer en premier la qualité nécessaire de l'alimentation de la lampe (ballast, starter, driver…) puis éventuellement le contrôle de l'intensité lumineuse émise (gradateur, dimmer…).

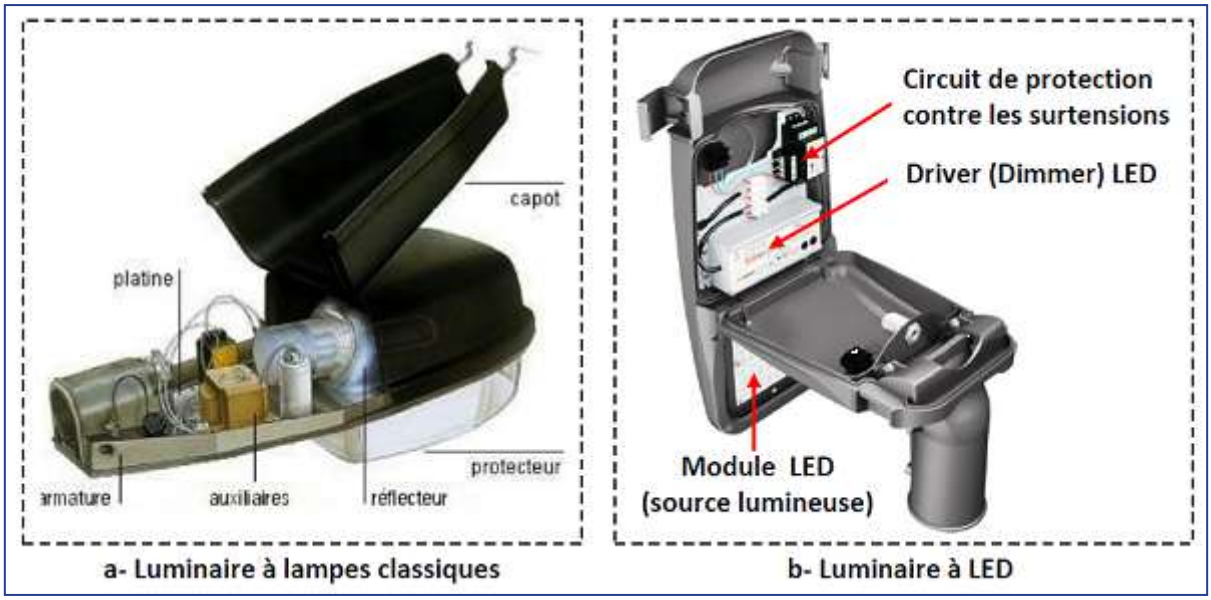


Figure 108. Luminaires classiques et à LED adaptés à l'éclairage public.

Afin de compléter le dispositif d'éclairage public, le luminaire est alors fixé à un support généralement surélevé afin d'étaler son faisceau lumineux sur une zone déterminée, où la visibilité peut être assurée selon

des critères photométriques précis. Dans le cas d'un déploiement dans des espaces ouverts (routes, places publiques…..), le luminaire est fixé à un mât d'une hauteur donnée, généralement grâce à une crosse permettant de le déporter par rapport au point d'appui du mât (Figure 109)..

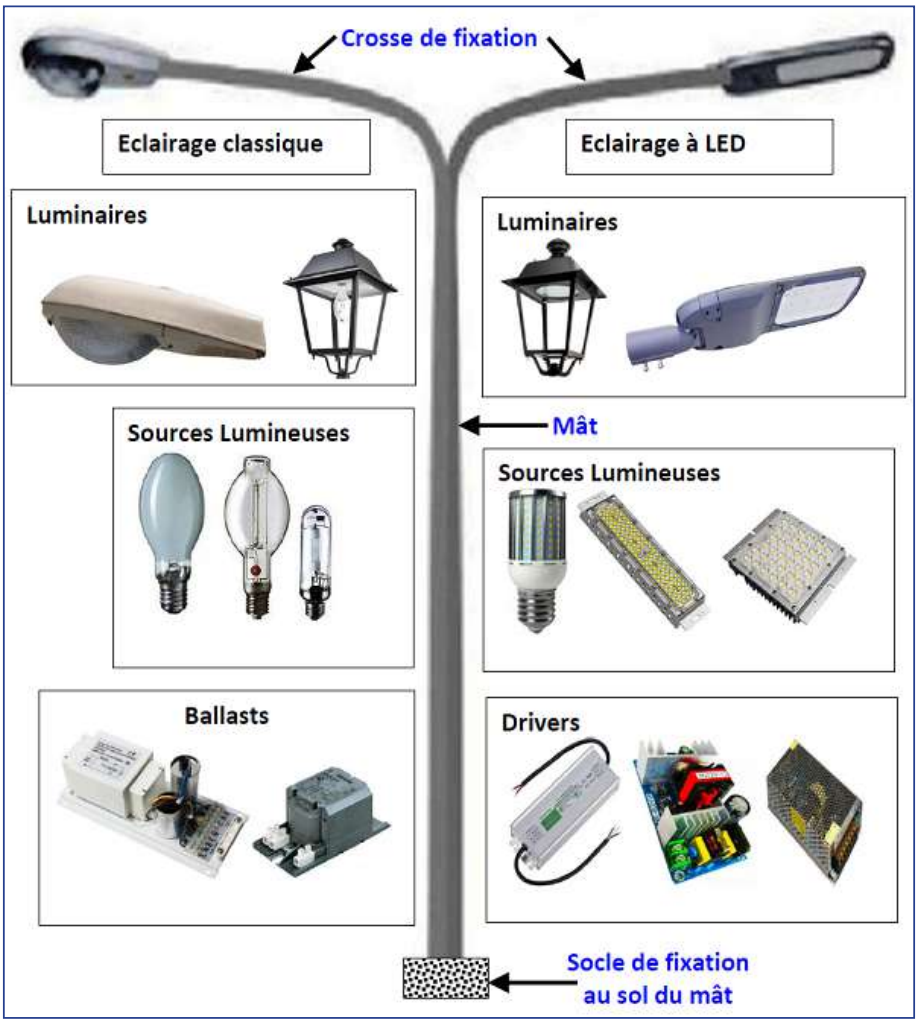


Figure 109. Lampadaires d'éclairage public et composants intégrés dans les cas classiques et à LED.

III.1.1.2. Rendement du Luminaire

Sur le plan photométrique, l'évaluation des performances d'un luminaire repose essentiellement sur son rendement, évalué à travers trois rapports caractéristiques de l'intensité lumineuse émise et sa distribution dans l'espace environnant [138-139]:

1- Le rapport entre le flux lumineux émis par le luminaire et celui généré par la source lumineuse primaire (lampe) ou LOR (Light Output Ratio). Sa valeur peut varier entre 65 et 95 % selon la qualité du luminaire.

2- La proportion de flux lumineux émise en dessous du plan horizontal passant par le luminaire dans sa position d'installation (Figure 110) ou DLOR (Downward Light Output Ratio). Sa valeur peut varier entre 5 et 95 % selon la qualité du luminaire considéré.

3- La proportion de flux lumineux émise au-dessus du plan horizontal passant par le luminaire dans sa position d'installation (Figure 110) ou ULOR (Upward Light Output Ratio). Sa valeur peut varier entre 5 et 95 % selon la qualité du luminaire considéré.

Remarque: En plus d'être inutiles, les proportions de la lumière dirigées en dehors de la zone visée (DLOR), peuvent en plus provoquer des nuisances aux automobilistes (éblouissement) et riverains. Quant à la proportion émise au-dessus du plan horizontal (dirigée vers le ciel), elle est carrément considérée comme pollution lumineuse qui peut provoquer des effets indésirables sur la faune et la flore en rompant le cycle de vie journalier correspondant.

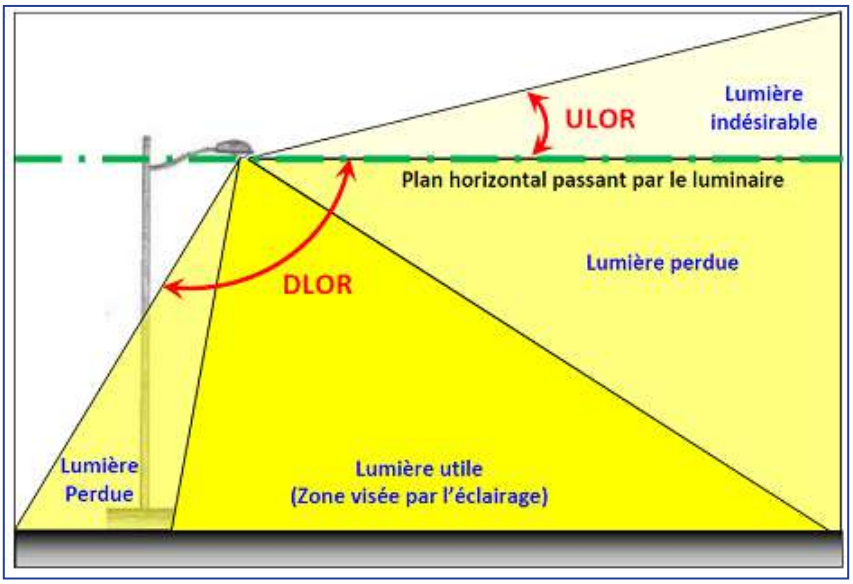


Figure 110. Distribution de la lumière diffusée par un luminaire et définitions

III.1.2. Lampadaires et éclairement des espaces publics

Qu'il soit classique ou à base de LED, le luminaire conçu pour l'éclairage publique tel qu'il a été présenté précédemment, peut être considéré comme la source lumineuse de base dès qu'il est déployé à l'extérieur, notamment dans des espaces ouverts ruraux ou urbains, dont chacun à une configuration propre (routes, rues, places et édifices publiques, parcs, espaces verts, aires de jeux, stades….). Ainsi, il va de soi que chaque cas demande des moyens d'éclairage artificiel appropriés (intensité, IRC, température de couleur…) ainsi qu'une approche spécifique quant à leur déploiement [140-145] sous forme de points lumineux distincts mais pouvant mutualiser leurs effets afin de satisfaire au mieux les performances d'éclairage recherchées. La première étape dans ce sens, consiste justement à définir la contribution individuelle de chaque point lumineux qui se résume en général à un lampadaire, constitué d'un luminaire préalablement défini (source lumineuse), fixé à une hauteur donnée grâce à un mât de support, afin que l'empreinte d'éclairage résultant dans la zone d'intérêt ait l'étendue désirée avec les performances photométriques appropriées (Figure 110).

Remarque: Le lampadaire est en fait un terme assez large qui désigne à la fois les systèmes d'éclairage extérieurs et intérieurs et reste de ce fait le plus largement utilisé dans l'usage courant alors que d'autres synonymes sont plus appropriés pour désigner ceux exclusivement déployés à l'extérieur, comme candélabre et réverbère. En fait, c'est ce dernier (réverbère) qui désigne précisément les lampadaires extérieurs quelque soit leur forme, soit ceux d'intérêt dans ce cas, alors que le second (candélabre) vise plus les lampadaires constitués de plusieurs branches et au design prononcé (configuration chandelier, flambeau, torchère...).

III.2. Eléments de conception d'un éclairage public

La distribution de la lumière en intensité et surface dans les espaces visés, reste un élément essentiel quant à la conception des systèmes d'éclairage public et constitue de ce fait une prescription technique incontournable [146-149] à faire valoir dans tout cahier des charges adressé par les collectivités locales aux divers prestataires dans le domaine.

III.2.1. Eléments de photométrie et structure appropriée du point lumineux

Partant d'un luminaire prédéfini, notamment à travers l'intensité nominale de son faisceau lumineux (en lumen) ainsi que l'angle d'ouverture de celui-ci (en degrés), c'est l'éclairement résultant de son déploiement à une hauteur donnée moyennant un mât support et une crosse de fixation (éléments de base d'une structure de lampadaire) (Figure 111), qui constitue l'élément de base à tout dispositif d'éclairage public élargi (Tableau 9).

A titre d'exemple, en prenant la configuration de l'éclairage illustrée à la Figure 111 comme modèle et en supposant que le luminaire utilisé délivre un flux lumineux net de 10000 lm avec un angle de 120°, une évaluation de la surface éclairée (circulaire de rayon R) pour divers paliers de hauteurs H, peut être menée.

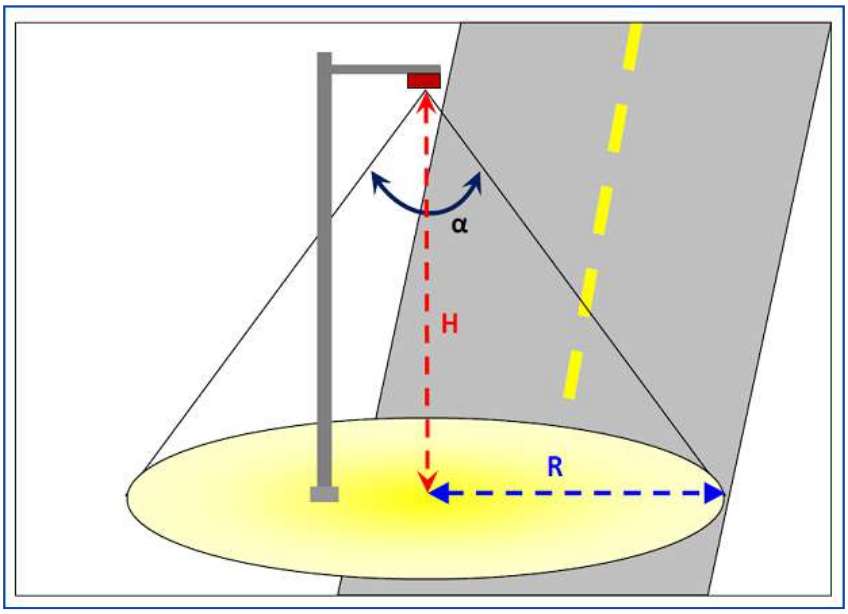


Figure 111. Distribution de la lumière diffusée par un luminaire.

Tableau 9. Hauteur du luminaire et étendue de la zone éclairée au sol.

Hauteur H du luminaire (flux 10000 lm)	Zone éclairée		Intensité lumineuse (Candela)	Eclairement lumineux de surface (Lux)
	Rayon (m)	Surface (m^2)		
6	10.39	339.29	3183.10	88.42
7	12.12	461.81	//	64.96
8	13.86	603.19	//	49.74
9	15.59	763.41	//	39.30
10	17.32	942.48	//	31.83
11	19.05	1140.40	//	26.31
12	20.78	1357.17	//	22.10

Dans la réalité, les fiches techniques relatives à un éclairage public ont tendance à se limiter aux lumens des luminaires (ou lampes), comme données de base. Toutefois, une conception plus fine a besoin d'informations complémentaires, notamment concernant la façon dont les luminaires utilisés distribuent la lumière. En effet, la forme du réflecteur et la position de la lampe dans le luminaire, permettent d'obtenir différents types de distribution lumineuses (Figure 112).

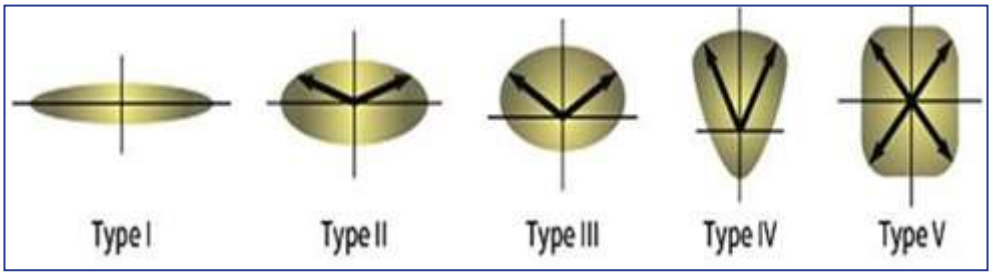


Figure 112. Les cinq principaux types de distribution pour l'éclairage extérieur.

Chaque type de distribution a certaines applications pour lesquelles il est le mieux adapté à l'espace et aux performances recherchées.

Type I – Adapté aux chemins, allées, sentier et routes étroites.

Type II – Convient lorsque les besoins de lumière distribuée sont assez loin sur les côtés, mais pas très loin en avant (Ex- lampadaire d'éclairage latéral route).

Type III – Fournit moins de distribution sur les côtés, mais assez avancée devant.

Type IV – Distribue la lumière vers l'avant du lampadaire. Adapté à l'éclairage des sites ainsi que certaines voies ou larges espaces.

Type V – Il peut engendrer une distribution sous forme ronde ou rectangulaire. La lumière ainsi générée peut être relativement uniforme dans toutes les directions, ce qui le rend approprié pour l'éclairement de grands espaces publics (places publiques, parkings, artères assez larges, grandes voies de circulation, ….).

Concrètement, étant donnée l'importance de la répartition spatiale de la lumière artificielle dans la conception d'un système d'éclairage précis, où les prescriptions insistent sur l'efficacité énergétique et lumineuse avec une pollution nulle du ciel (ULOR=0), tout luminaire impliqué est généralement accompagné dès l'acquisition ou achat par son diagramme photométrique qui en spécifie les détails (Figure113).

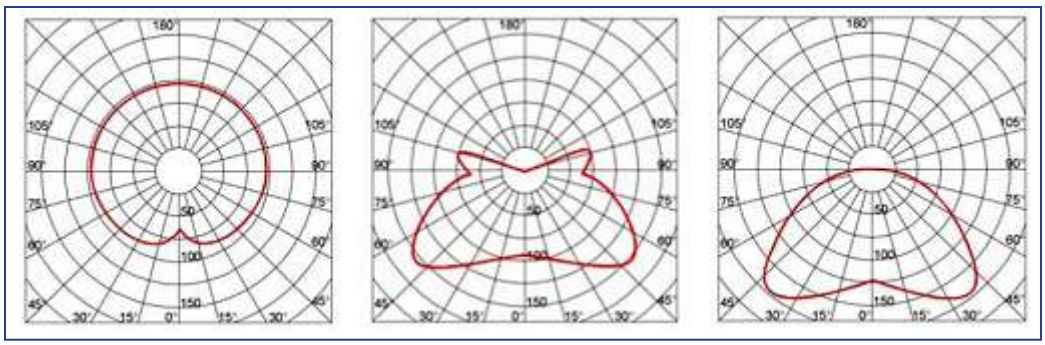


Figure 113. Exemples de diagrammes photométriques caractéristiques de luminaires spécifiques à l'éclairage public.

Une première interprétation des diagrammes photométriques donnés ci-dessus, permet de dire que le premier (à gauche) représente un luminaire sphérique (ballon) qui émet pratiquement dans toutes les directions, donc très peu efficace (beaucoup de lumière inutile) et fortement pollueur du ciel. Le second diagramme correspond à un luminaire dont le gros de la lumière est orienté vers le bas et très peu vers le ciel alors que le dernier indique que l'ensemble de son énergie lumineuse est dirigé vers le sol.

III.2.2. Structure finale d'un dispositif d'éclairage public

Afin d'éclairer tout un ensemble d'espaces publics, un dispositif particulier bien adapté à chacun, est généralement conçu à base de nombreux points lumineux individuels (lampadaire, borne ou colonne lumineuse,….), ayant des diagrammes photométriques précis et distribués de manière étudiée (Figures 113 à 115), afin d'assurer le niveau d'éclairage demandé,

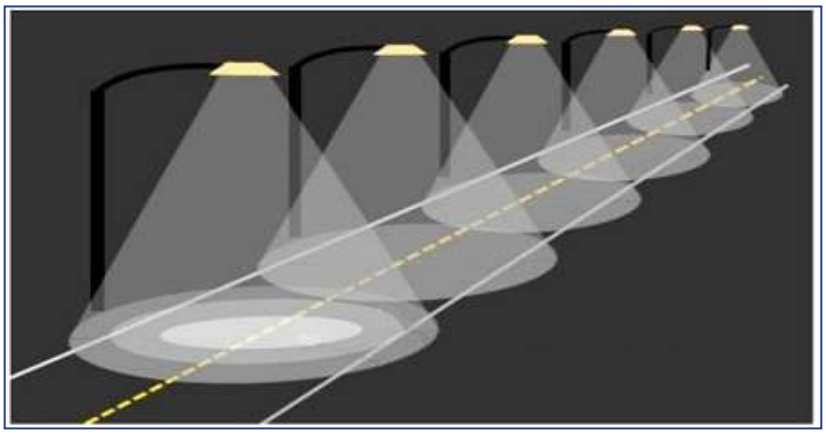


Figure 114. Exemple de dispositif d'éclairage d'une voie de circulation et empreinte lumineuse.

l'uniformité désirée et le moins possible d'aspects gênants (éblouissement, pollution lumineuse…).

L'éclairage d'un grand espace étant généralement obtenu à partir de plusieurs sources ponctuelles discrètes (points lumineux), l'uniformité globale de la lumière obtenue et qui reste un critère de qualité recherché dans beaucoup de cas, constitue souvent une prescription importante dans les cahiers des charges, d'où l'intérêt des concepteurs pour le développement de moyens d'études efficaces permettant entre autres de répondre à cette demande. Dans ce cas, il s'agit essentiellement d'un recours à des supports de simulation numérique spécialement dédiés à l'éclairage public, qui prennent en compte toutes les combinaisons possibles des paramètres pouvant avoir une influence notable (hauteur et intensité lumineuse du luminaire, inter-distances entre points lumineux…..). Au final, les résultats sont également synthétisés sous forme d'images numériques, fournissant beaucoup de détails révélateurs dont justement celui permettant d'évaluer le degré d'uniformité (continuité) de la lumière dans l'espace étudié (Figure 115).

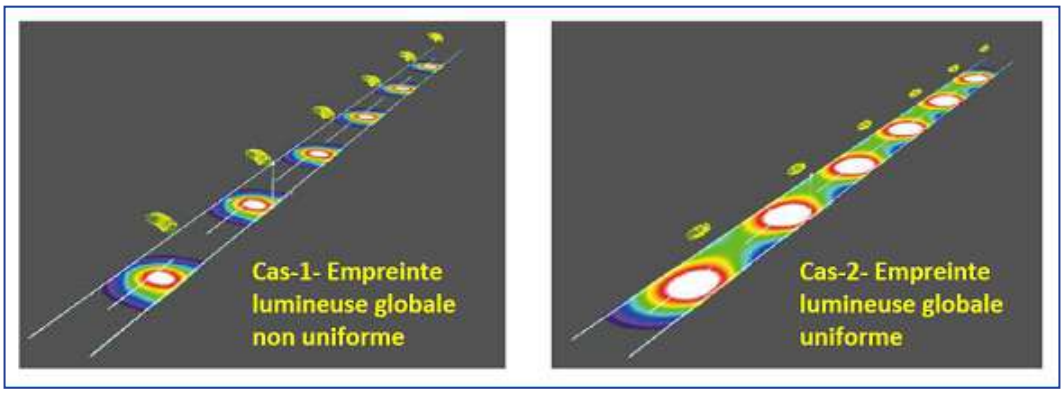


Figure 115. Résultats de simulation numérique relatifs à l'éclairage d'un tronçon routier.

En plus de leur apport à une vision nocturne efficace et de qualité, les dispositifs d'éclairage et leurs éventuels auxiliaires, représentent également certains risques, notamment pour les divers usagers de la route et doivent être de ce fait, installés de manière étudiée afin de ne pas compromettre leur sécurité tout en s'intégrant harmonieusement au paysage local (Figure 116) [145-149].

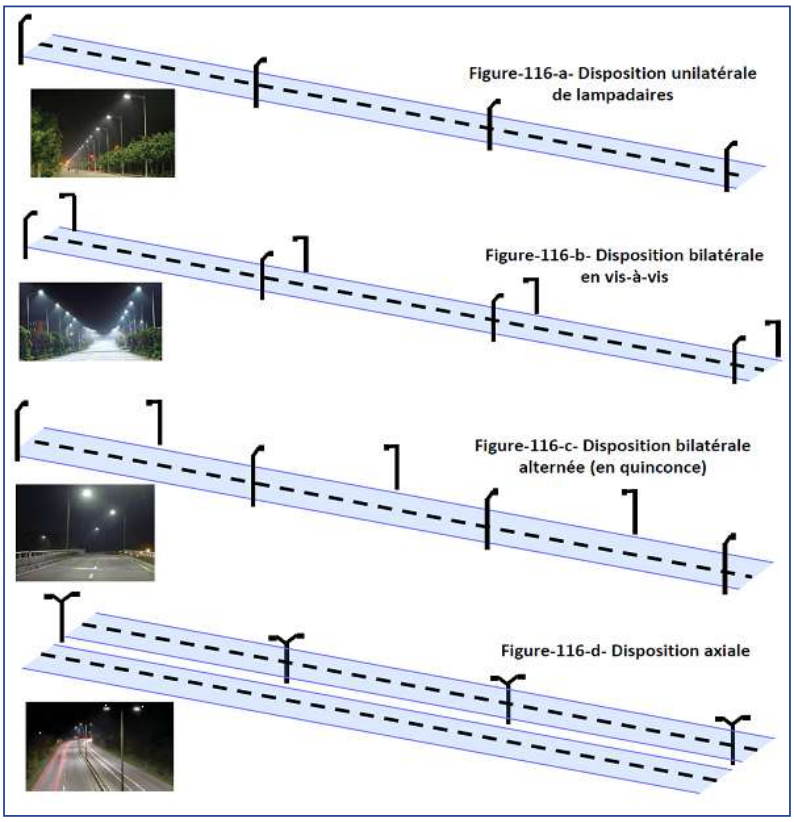


Figure 116. Divers modes de déploiement des lampadaires.

L'éclairage extérieur public ou privé, a jusqu'ici été généralement très peu réglementé, y compris le volet performances photométriques, souvent orienté à travers de simples recommandations sans aucune application obligatoire. Toutefois, la situation est en train de changer assez rapidement avec une multitude d'évolutions qui sont entrain de marquer le domaine au même titre que d'autres à l'échelle planétaire, tels que l'efficacité énergétique et les pollutions de diverses natures dont celle lumineuse. Cela étant pratiquement en parallèle avec des avancées technologiques qui ont ouvert de nouveaux horizons quant à une maîtrise plus accentuée de ces aspects à l'échelle de l'homme. En attendant, les donneurs d'ordre dans le domaine de l'éclairage extérieur et notamment public, ont intérêt à suivre les bonnes recommandations, émanant de milieux experts reconnus et souvent validées par de longues expériences et applications du terrain. Dans cette optique, certaines règles simples et pragmatiques, bien exposées dans la littérature abondante en rapport avec l'éclairage, peuvent servir comme point de départ afin de dégrossir le problème posé et adresser proprement des prescriptions techniques significatives par rapports aux réels besoins. Ainsi la hauteur H du luminaire par rapport au sol est estimée en fonction de la largeur L de la voie à éclairer selon le type de distribution des points lumineux (lampadaires…) qui y contribuent, alors que l'inter-distance d entre ces derniers doit se situer entre 3.5 et 4 fois H (Figure 117).

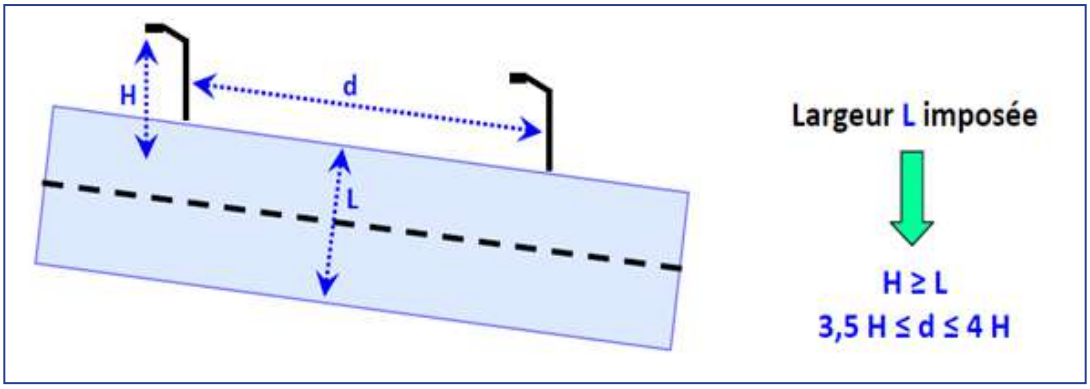


Figure 117. Cas de distribution unilatérale des points lumineux.

Exemple: Pour une route de largeur L = 9 mètres (sans trottoirs), la hauteur H du luminaire peut être fixée à H = 10 mètres (minimum 9 mètres), d'où une distance d entre lampadaires d = 37 mètres (minimum 35 et maximum 40 mètres).
Ainsi élargie aux autres configurations (Figure 116), des estimations assez réalistes de H et d peuvent également être approchées à partir de formulations similaires (Tableau 10) et ce pour une route de largeur L imposée (connue). Toutefois et pour de plus amples précisions permettant de voir certains détails importants, une étude photométrique est souvent recommandée.

Tableau 10. Voies de circulation et éléments d'implantation des lampadaires.

Implantation	Application	Rapport H/L	Inter-distance (d)
Unilatérale	Rues latérale, Allées	$L \leq H$	$d = 3,5$ à $4\ H$
Bilatérale en quinconce	Rue simple à double sens	$H < L \leq 1,5\ H$	$d = 2,5$ à $3\ H$
Bilatérale en vis-à-vis	Larges voies à double sens	$1,5 < L \leq 2\ H$	$d = 3,5$ à $4\ H$
Axiale	Grandes voies doubles	$L > 2\ H$	$d = 3,5$ à $4\ H$

En tout état de cause, l'objectif final étant un niveau d'éclairement adapté au lieu et à ses contraintes spécifiques (voies à grandes circulation, rues, giratoire, rue piétonne, trottoir, piste cyclable….), il est utile pour tout donneur d'ordre dans le domaine d'avoir une appréciation préalable de ce qui est juste

nécessaire. Sur ce point, plusieurs normes donnent assez de détails dont celle européenne 13201 et ce pour le milieu urbain (Tableau 11) et rural (Tableau 12) [150-152].

Tableau 11. Voies urbaines et ordre de grandeur du niveau d'éclairement moyen en lux selon la norme Européenne 13201.

Type de voies de circulation urbaine	Moyen	Elevé	Maximal
Voies à grande circulation (Avenue, boulevards,…) (Vitesse < 50 Km/h)		20	20
Voies urbaines secondaires (Vitesse < 50 Km/h)	10	15	20
Voie de desserte (Rues….) (Vitesse < 30 Km/h)	10	15	15
Voie commerçante (Vitesse < 30 Km/h)		20	20
Voie exclusivement piétonne	7,5 à 10	10 à 15	20
Trottoir piéton et piste cyclable adjacents à la route	7,5 à 10	10 à 15	15
Place, giratoire	**Voie d'accès la plus éclairée**	**Place ou giratoire correspondant**	
	20	30	
	15	20	
	10	15	
	7,5	10	

Tableau 12. Voies rurales et ordre de grandeur du niveau d'éclairement moyen en lux selon la norme Européenne 13201.

Type de voies de circulation rurale	Moyen	Elevé	Maximal
Voie d'accès à un village (Vitesse < 70 Km/h)	15	-	20
Traversée rue principale (Vitesse < 50 Km/h)	-	15	20
Voie transversale (Vitesse < 50 Km/h)	7,5	10	10
Lotissement (Vitesse < 30 Km/h)	10	15	15
Place, giratoire	**Voie d'accès la plus éclairée**	**Place ou giratoire correspondant**	
	20	30	
	15	20	
	10	15	
	7,5	10	

Sur le même plan, l'uniformité de l'éclairage définie comme étant le ratio entre l'éclairement mesuré entre deux luminaires voisins et celui maximum (mesuré généralement au foyer de la zone éclairée), reste également une prescription technique nécessaire à spécifier dans tout cahier des charges exigeant. Caractérisée par un rapport sans unité et proche de 1 dans le cas idéal, une uniformité de 0.4 est généralement admise comme bonne, y compris dans plusieurs normes dont celle européenne citée précédemment.

CHAPITRE IV

Eclairage public, efficacité énergétique et éléments de réglementation

L'efficacité énergétique en général, est devenue un souci majeur à travers le monde au regard de plusieurs facteurs tout aussi économiques qu'environnementaux, d'où la prise de conscience vers la fin du siècle passé, de la nécessité d'introduire un cadre réglementaire spécifique afin de réguler toute action dans le domaine avec la transparence requise. C'est dans cette optique qu'un étiquetage a été mis en place afin d'indiquer aux usagers, de manière simple et claire, les performances en termes d'efficacité énergétique de tous matériels ou équipements échangés dans les marchés nationaux et internationaux. Les fonctionnalités d'intérêt impliquent dans ce cas tout aussi bien la consommation (climatiseur, lampe…), que la production et conversion d'énergie (moteurs, générateurs électriques, batteries…..). Ainsi, plusieurs normes ont vu le jour à travers le monde, dont la plus courante concernant le domaine de l'efficacité énergétique, est celle établissant un classement des divers appareils électriques sur une échelle de A à G (sept classes) en fonction de leur efficacité énergétique décroissante (l'appareil de classe A étant celui qui consomme le moins d'énergie). Cela étant dès les années 80 du siècle dernier et depuis, voyant l'efficacité évoluer de manière notable, des classes d'efficacité supplémentaires telles que A^{+}, A^{++} et A^{+++}, ont été introduites afin de refléter et marquer ces progrès.

IV.1. Sources lumineuses, efficacité énergétique et étiquetage

Appliquée aux sources lumineuses, la classification en matière d'efficacité énergétique introduite précédemment, a généralement été exprimée par des seuils d'efficacité lumineuse en lumen/Watt, comme c'est le cas dans l'étiquetage selon la norme spécifique à l'union européenne (Figure 118) [104], qui impose également à ce qu'il figure sur l'emballage du produit (Figure 119).

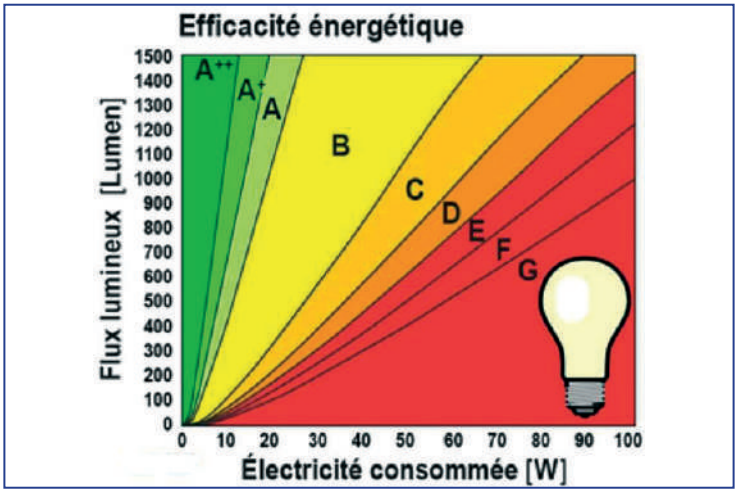


Figure 118. Efficacité et classification des sources lumineuses artificielles.

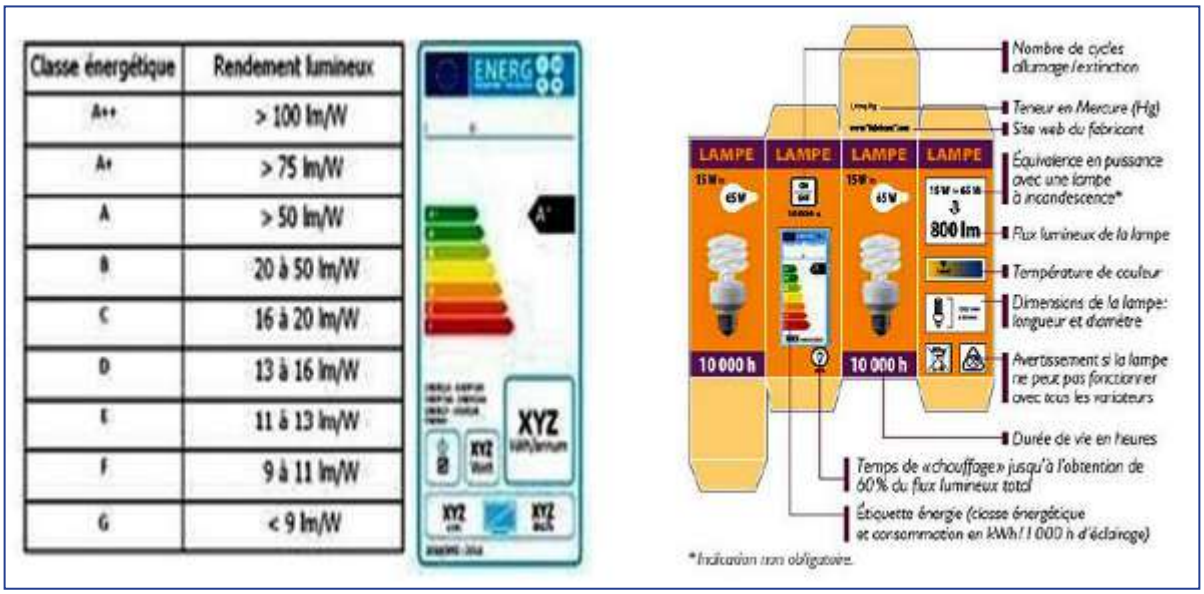


Figure 119. Etiquetage reflétant l'efficacité énergétique, appliqué aux sources lumineuses selon la norme européenne (avant le 1er septembre 2021).

Cependant, avec les progrès très accentués en matière d'efficacité énergétique qui ont vu le jour ces dernières années, la classification utilisée jusqu'ici est devenue assez lourde à refléter les orientations utiles aux consommateurs, sans confusions pouvant être déroutantes. En réponse à cela et afin de simplifier la présentation sans pour autant réduire les informations utiles sur le produit et ce grâce à la base de données électroniques renseignée par les fabricants pour plus de transparence, l'union européenne a opéré dès le 1er du mois de mars passé (2021), un retour à l'échelle de classification initiale de A à G (Figure 120).

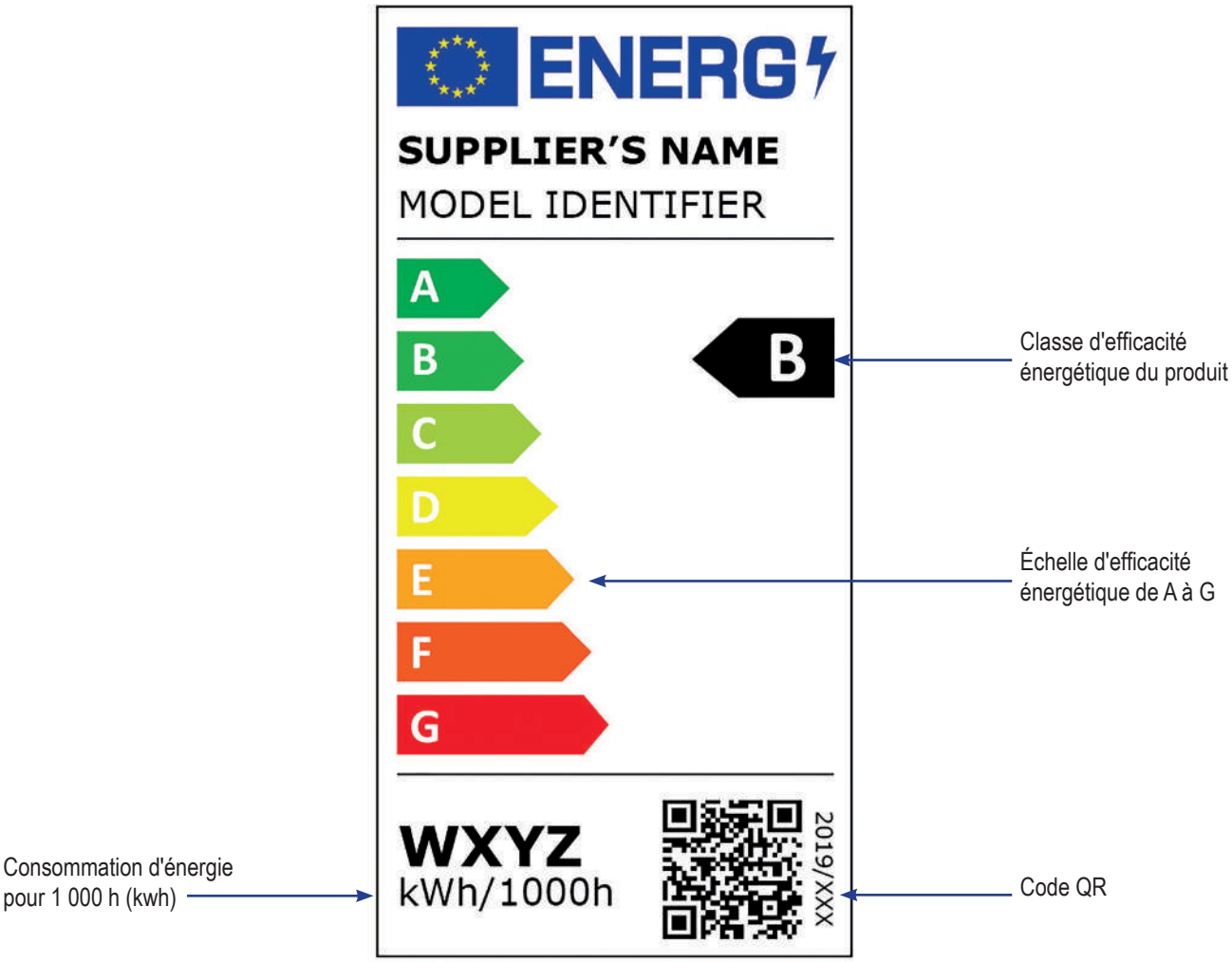


Figure 120. Nouvelle étiquette pour les ampoules et les LED, applicable à partir du 1er Septembre 2021.

Cette dernière étant applicable graduellement aux cinq groupes d'appareils concernés, soit dans l'ordre: Lave-vaisselle, lave et sèche-linge, Réfrigérateurs et congélateurs, téléviseurs et écrans, et enfin les lampes d'éclairage concernées dès le début du mois de septembre passé (Figure 120). Pour celle-ci, la barre d'efficacité a d'emblée été placée très haut, puisque la nouvelle classe A, exige pas moins de 210 lm/W au lieu des 100 lm/W demandés par la classe A++ (Figure 119) de l'ancienne réglementation. Malgré cela, la nouvelle réglementation a été inaugurée par l'attribution de la classe A à une lampe mise sur le marché le même jour de son inauguration (Figure 85).

IV.2. Eléments de protection et étiquetage des sources lumineuses

En plus des prescriptions techniques en termes de performances attendues des fonctionnalités essentielles d'une source lumineuse (efficacité énergétique, conformité photométrique, durée de vie….), il est également question de qualité du matériel apte à les réaliser. Sur ce point, une étape importante est franchie lorsque les normes de contrôle qualité sont également accompagnées par un étiquetage indiquant de manière transparente l'ensemble des capacités physiques du matériel proposé, à supporter

toute une gamme de contraintes spécifiques à l'environnement d'utilisation (étanchéité, résistance mécanique….) [153-155].

IV.2.1. Indices de protection IP et IK

Le fonctionnement en toute sécurité d'un matériel ou installation électrique, exige divers niveaux de protection, notamment contre les agents externes qu'ils soient liquides (eau,...) ou solides de diverses tailles et énergie cinétique. Sur un autre plan, il est également demandé à tout équipement de présenter une résistance et rigidité mécaniques à l'épreuve de ce qui l'attend comme conditions de travail adverses. Afin de renseigner l'utilisateur quant à ce type d'aptitudes qu'a le matériel acquis, deux indices sont universellement adoptés: IP ou indice de protection contre les intrusions externes et IK comme indice de protection mécanique (K trouve son origine dans Kinetic pour le différencier de IP) [156]. Ainsi, l'indice IP est tout simplement un indicateur destiné à renseigner l'utilisateur sur le degré de protection que procure le boîtier ou l'enveloppe du matériel électrique utilisé, contre tout contact avec un corps externe qu'il soit solide ou liquide. La référence à chacun de ces deux derniers ainsi qu'une certaine appréciation du niveau de protection, étant simplement codés à travers les deux chiffres qui suivent l'indication IP, dont le premier se rapporte à la protection contre les corps solides (poussières…) et le second contre ceux liquides (humidité…), comme détaillé ci-après (Tableau 13).

Tableau 13. Détails des protections contre les intrusions externes renseignés par IP.

1er Chiffre Protection contre les corps solides		2ème Chiffre Protection contre les corps liquides	
0	Pas de protection	**0**	Pas de protection
1	Protégé contre les corps solides supérieurs à 50 mm (Ex: contact de la main	**1**	Protégé contre les chutes verticales de gouttes d'eau (condensation)
2	Protégé contre les corps solides supérieurs à 12 mm (Ex: doigt de la main)	**2**	Protégé contre les chutes de gouttes d'eau jusqu'à 15° de la verticale
3	Protégé contre les corps solides supérieurs à 2,5 mm (Ex: outils, vis)	**3**	Protégé contre l'eau en pluie jusqu'à 60° de la verticale
4	Protégé contre les corps solides supérieurs à 1 mm (Ex: outils fins, petits-fils)	**4**	Protégé contre les projections dans toutes les directions
5	Protégé contre les poussières (pas de dépôts nuisibles)	**5**	Protégé contre les jets d'eau de toutes les directions à la lance
6	Totalement protégé contre les poussières	**6**	Totalement protégé contre les projections d'eau assimilables aux paquets de mer
		7	Protégé contre les effets de l'immersion
		8	Protégé contre les effets prolongés de l'immersion sous pression
		9	Protégé contre le jet d'eau à haute pression et à haute température

Exemple:

Un appareil affichant un indice IP65, est totalement protégé contre les poussières ainsi que les jets d'eau de toutes les directions à la lance.

Comme pour IP, la même approche est utilisée avec l'indice IK, également suivi de deux chiffres qui renseignent ensemble mais pas individuellement comme pour IP, sur le degré de protection contre les impacts mécaniques externes (Tableau 14).

Tableau 14. Détails des protections contre les impacts externes renseignés par IK.

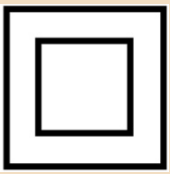
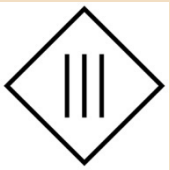
Chiffre	Protection désignée contre les impacts externes
00	Equipement non protégé
01	Protégé contre 0,15 joules d'impact (l'équivalent de l'impact d'une masse de 0,25 kg tombée de 56 mm au-dessus de la surface impactée)
02	Protégé contre 0,2 joules d'impact (l'équivalent de l'impact d'une masse de 0,25 kg lâchée de 80 mm au-dessus de la surface impactée)
03	Protégé contre 0,35 joules d'impact (l'équivalent de l'impact d'une masse de 0,2 kg tombée de 140 mm au-dessus de la surface impactée)
04	Protégé contre 0,5 joules d'impact (l'équivalent de l'impact d'une masse de 0,25 kg lâchée de 200 mm au-dessus de la surface impactée)
05	Protégé contre 0,7 joules d'impact (l'équivalent de l'impact d'une masse de 0,25 kg tombée de 280 mm au-dessus de la surface impactée)
06	Protégé contre 1 joule d'impact (l'équivalent de l'impact d'une masse de 0,25 kg lâchée de 400 mm au-dessus de la surface impactée)
07	Protégé contre 2 joules d'impact (l'équivalent de l'impact d'une masse de 0,5 kg lâchée de 400 mm au-dessus de la surface impactée)
08	Protégé contre 5 joules d'impact (l'équivalent de l'impact d'une masse de 1,7 kg lâchée de 300 mm au-dessus de la surface impactée)
09	Protégé contre 10 joules d'impact (l'équivalent de l'impact d'une masse de 5 kg lâchée de 200 mm au-dessus de la surface impactée)
10	Protégé contre 20 joules d'impact (l'équivalent de l'impact d'une masse de 5 kg lâchée de 400 mm au-dessus de la surface impactée)

Exemple: Un appareil affichant un indice IK05 résiste à des chocs de 0,70 Joules, soit la chute d'une masse de 250 g depuis une hauteur de 28 cm.

IV.2.2. Protection d'isolation

S'agissant de matériel électrique à large utilisation, les luminaires sont également concernés par les préventions d'usage en matière d'isolation, comme pour tout équipement fonctionnant à l'électricité. Sur ce point, quatre classes définissant divers niveaux d'isolation (Tableau 15) [157-158], sont généralement répertoriées pour définir et indiquer la nature des risques potentiels pour une personne d'être en contact avec la tension du réseau d'alimentation (230 V AC), ou toute autre tension jugée dangereuse pour l'homme.

Tableau 15. Quatre classes d'isolation électriques selon la norme NF C 71000.

Classe	Définition	Symbole
0	Isolation fonctionnelle simple sans liaison à la terre (danger en cas de rupture de cette isolation). De tels appareils (classe 0) sont interdits dans beaucoup de pays.	**Aucun**
1	Isolation fonctionnelle avec liaison à la terre ainsi que l'ensemble des parties métalliques. Dans ce cas et en présence d'un défaut d'isolation, les parties conductrices ne posent pas de risques.	
2	Isolation renforcée où les parties métalliques sont-elles même protégées. Cette double isolation évite la mise à la terre de l'appareil afin de ne pas propager les éventuels défauts.	
3	Ce sont des appareils de classe 2 fonctionnant en Très Basse Tension (inférieure au seuil de 50 V dangereux pour l'homme). Ces derniers sont généralement alimentés à travers un transformateur abaisseur	

CHAPITRE V

Eclairage solaire

V.1. Fondements de l'éclairage solaire

L'éclairage artificiel dont beaucoup d'aspects liés à l'activité humaine dépendent de nos jours, a été une des toutes premières applications de l'électricité, alors que la génération de cette énergie à base de solaire photovoltaïque est en train d'élargir encore plus l'usage en la rendant disponible et de manière autonome dans des endroits où elle était rare, peu accessible ou tout simplement inexistante.

Ainsi et contrairement aux lampadaires d'éclairage public classiques, utilisant généralement le réseau électrique de distribution basse tension (230 V, 50 Hz) comme source d'énergie centralisée en courant alternatif (AC), ceux destinés à l'être par de l'électricité renouvelable, notamment solaire photovoltaïque, sont tout à fait autonomes et de déploiement assez simple [159-160]. En effet, aucune installation d'acheminement de l'énergie nécessaire (câble) à partir d'une armoire de commande centralisée n'est exigée, puisque cette dernière peut justement être générée localement à la juste mesure et de manière complètement indépendante au niveau de chaque lampadaire. L'électricité solaire permet ainsi d'apporter un éclairage abordable et de qualité à divers endroits, notamment ceux reculés où cela était autrefois coûteux ou peu pratique. Plus encore, étant initialement produite sous forme de courant continu (DC), elle peut être directement utilisée sans aucune conversion intermédiaire (DC-AC), par de nombreux types de lampes, parfaitement adaptées à cet aspect d'alimentation et dont le principe même de génération de lumière, exige au final un courant continu. Parmi ces dernières, on y trouve justement les lampes à diodes électroluminescentes (LED), qui s'imposent aujourd'hui dans le monde de l'éclairage, notamment public, pour de multiples raisons dont la qualité de la lumière, la finesse de son réglage et surtout l'efficacité énergétique qui la caractérise et qui continue de progresser encore. C'est justement ce dernier argument qui fait que le développement de l'éclairage solaire en particulier, ne peut être imaginé de nos jours, sans l'usage presque exclusif des LEDs comme source lumineuse.

Le lampadaire solaire photovoltaïque qui s'immisce ainsi de plus en plus dans le domaine de l'éclairage public suite à l'apparition des luminaires à LED, économes en énergie, et quoiqu'il n'ait pas encore vocation à remplacer les lampadaires existants raccordés au réseau, il commence néanmoins à intégrer des espaces urbains de plus en plus denses alors qu'il était initialement destiné aux zones rurales éloignées du réseau électrique où les coûts de raccordement sont parfois jugés prohibitifs. Ainsi, il fait dorénavant partie des solutions à considérer par l'ensemble des collectivités locales en Algérie, dès qu'il s'agit de lancer des projets d'éclairage publics, qu'ils soient nouveaux ou tout simplement destinés à des opérations de remplacement des anciens moyens parvenus en fin de vie et surtout dépassés, en termes d'efficacité énergétique, devenue un souci permanent pour tous les pays du monde. Dans ce cadre et une fois les besoins exprimés, il reste à l'évidence le fait de les traduire dans le langage des spécifications techniques permettant de les caractériser au mieux, en fonction des possibilités matérielles et financières intrinsèques ainsi que toute éventuelle orientation connexe. Pour cela, il est indéniable qu'un minimum de connaissances du domaine serait d'une grande utilité pour les porteurs de projets, qui ne peuvent faire converger leur demande vers leurs besoins réels qu'une fois les éléments essentiels en main pour décider de la configuration la plus pertinente à mettre en place. C'est justement dans cette optique que cette partie du référentiel s'inscrit et s'adresse particulièrement aux services techniques des collectivités locales, en charge du dossier de l'éclairage public, notamment lorsqu'il s'agit de décider laquelle des solutions est la plus pertinente entre un projet de lampadaires solaires autonomes, ou au contraire un système d'éclairage connecté au réseau ?

V.1.1. Lampadaire solaire d'éclairage public

Physiquement, le seul élément de différenciation d'un lampadaire solaire par rapport à celui classique déjà présenté, se résume aux constituants associés au dispositif permettant de générer localement et de manière autonome, suffisamment d'énergie électrique à base de solaire photovoltaïque, qui sera convertie en lumière (aux pertes près) grâce à la lampe utilisée [161-163]. En effet, face à des besoins d'éclairage public répondant à des performances photométriques données, la structure globale du dispositif (intensité et

qualité de la lumière émise, hauteur et espacement des lampadaires,…) reste logiquement la même que ce soit avec alimentation classique par le réseau où à base d'électricité solaire. Il n'y a donc pas lieu d'aborder de nouveau ce volet puisqu'il suffit d'appliquer les mêmes règles qui ont déjà été présentées pour aider quant au choix d'une source de lumière artificielle destinée à des fins d'éclairage bien définies. Ceci laisse donc assez de place pour présenter ici et avec les détails qui s'imposent, toutes les particularités techniques et matérielles spécifiques aux lampadaires solaires qui sont en fait toutes liées au mode d'alimentation autonome utilisé. En effet, la mise en œuvre de ce dernier nécessite en premier des modules photovoltaïques destinés à transformer sur place les radiations solaires reçues en électricité. Celle-ci étant générée uniquement de jour, il y a lieu de la stocker dans des batteries afin d'en disposer le moment venu, notamment pour les besoins d'éclairage la nuit. Afin de minimiser le coût et l'encombrement des moyens ainsi mis en place (panneau solaire + batteries), il y a manifestement intérêt à y associer une lampe à haute efficacité énergétique et une longue durée de vie afin d'assurer un fonctionnement approprié en termes d'autonomie et espacement des éventuelles interventions. Sur ce plan, les lampes LED qui se distinguent par une efficacité lumineuse élevée, une consommation électrique faible et une longue durée de vie, constituent aujourd'hui les solutions les plus adaptées à tout point de vue, d'où leur utilisation quasi exclusive avec les lampadaires solaires partout dans le monde.

En plus de ces trois constituants de base d'un candélabre solaire (panneau solaire + batterie + lampe LED), certains circuits d'interface sont souvent nécessaires afin d'optimiser le fonctionnement de l'ensemble et en assurer le contrôle adéquat selon les besoins exprimés. Parmi ces derniers, le plus prioritaire est le régulateur permettant d'assurer le profil de charge adéquat pour la batterie et ce à partir de l'électricité produite par le panneau solaire photovoltaïque. A côté de ce dernier, on retrouve également le circuit qui permet d'ajuster l'intensité lumineuse émise par la lampe LED (driver) selon les besoins désirés, en réglant l'alimentation de celle-ci à partir de la batterie sans pour autant dévier des prescriptions techniques indiquées par le fabricant. La chaîne de conversion ainsi constituée, permettant de passer d'une énergie solaire primaire à une lumière d'intensité fixe ou réglable, peut être résumée selon les synoptiques respectifs (Figure 121 et 122).

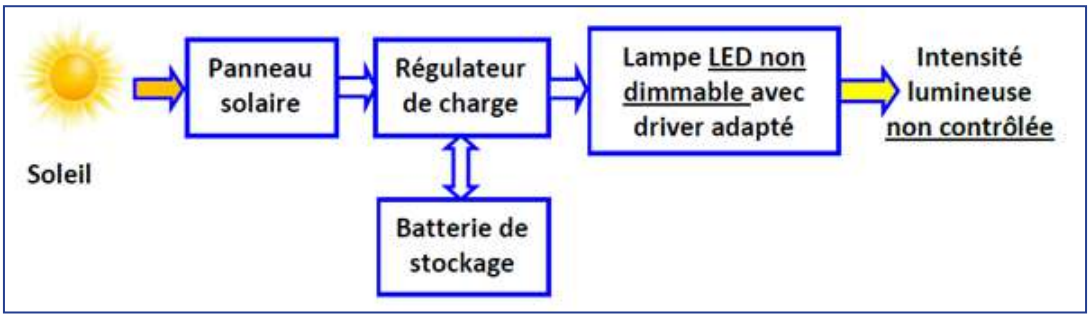


Figure 121. Synoptique d'un système d'éclairage solaire non commandé.

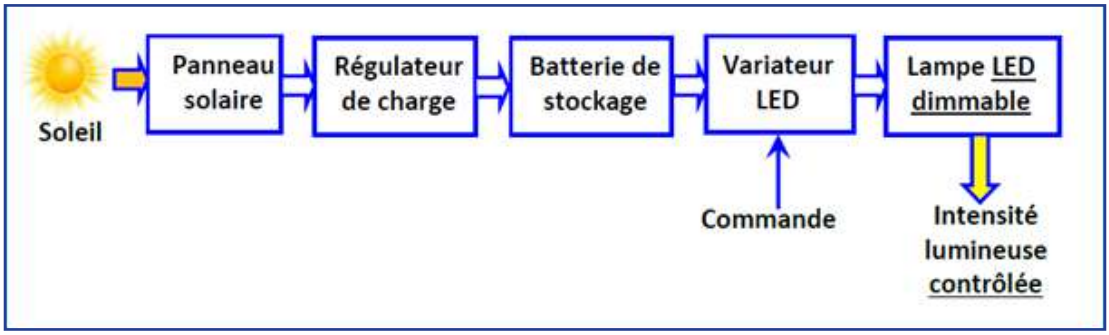


Figure 122. Synoptique d'un système d'éclairage solaire commandé (Avec gradation)

V.1.1.1. Structure globale d'un Lampadaire solaire

En tant que moyen d'éclairage public parmi tant d'autres, le lampadaire solaire est assujetti aux mêmes performances photométriques que ceux classiques, alimentés à partir du réseau électrique de manière centralisée et ce, pour un espace et environnement d'utilisation donnés. Dans ce cas, les capacités intrinsèques de la source lumineuse, le dimensionnement de son support (hauteur du Mât…) et la topologie de son déploiement sur le terrain (espacement…), peuvent être spécifiés selon les modes d'analyse communs à tous les systèmes d'éclairage public. Ainsi, un lampadaire solaire va essentiellement se distinguer par rapport aux autres, à travers la façon dont les équipements qui lui sont propres (Figures 123 et 124), ont été intégrés à sa structure réelle. Sur ce plan, où le poids et l'encombrement sont déterminants quant aux choix à faire, il y a également à considérer certaines fonctionnalités inhérentes au bon fonctionnement de certains équipements. Parmi ces derniers, il est par exemple trivial de placer le panneau solaire tout en haut du mât afin de lui assurer un maximum de temps d'accès direct aux rayons du soleil sans intervention d'obstacles gênants, notamment dans les zones urbaines (immeubles, arbres,….). Ceci permet en effet de minimiser les situations d'ombrage pouvant rompre partiellement ou complètement la collecte continue de l'énergie solaire durant la journée, avant même de la convertir en électricité et la stocker dans la batterie en prévision de sa consommation exclusive la nuit. Plus encore, la tête de mât amovible doit permettre d'orienter proprement le champ PV, qui peut être constitué d'un ou plusieurs modules, au moins vers une position moyenne privilégiée du soleil dans la journée (exemple midi) avec la possibilité d'y apporter les corrections saisonnières qui peuvent être opérées afin d'optimiser encore plus l'énergie solaire journalière recueillie.

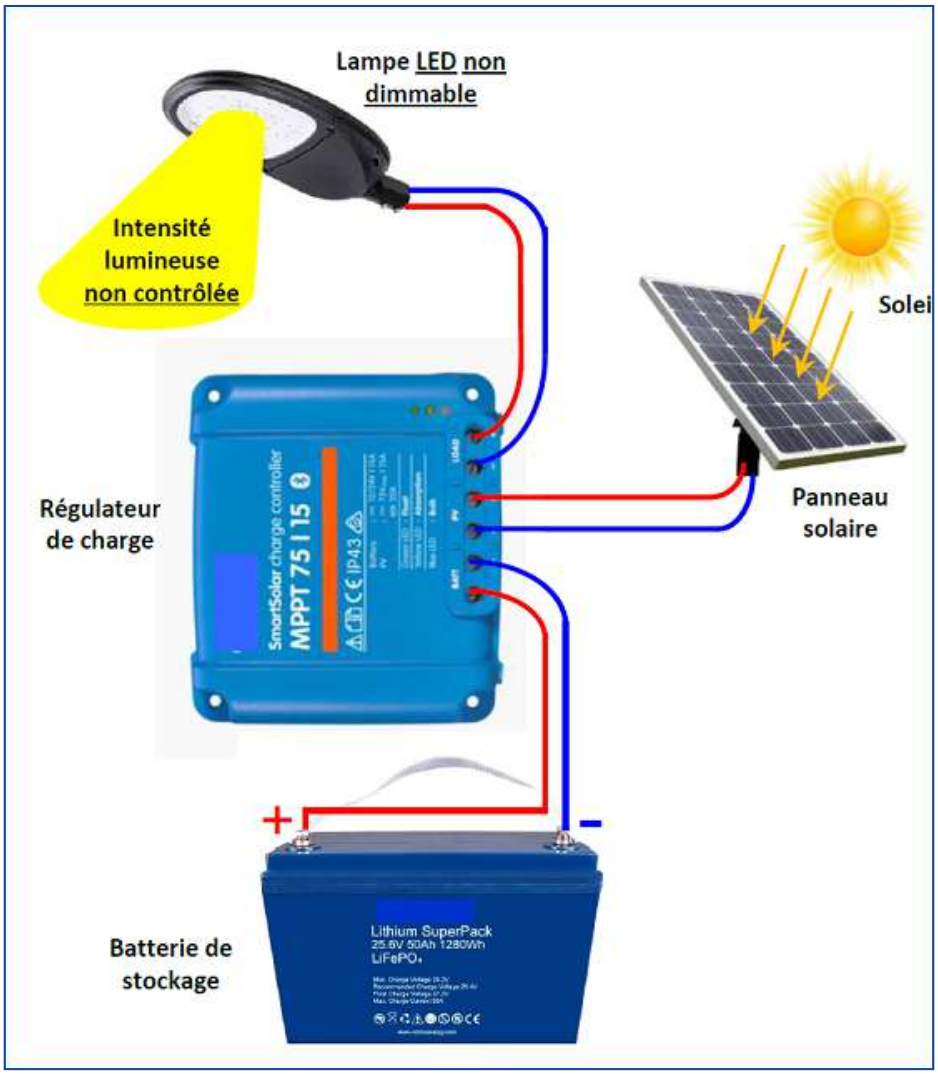


Figure 123. Montage complet d'un système d'éclairage solaire sans contrôle de l'intensité lumineuse émise par la lampe LED.

Figure 124. Montage complet d'un système d'éclairage solaire avec contrôle de l'intensité lumineuse (Gradation) émise par la lampe LED.

Mis à part le luminaire à LED dont la fixation sur le mât est à l'évidence dictée par la zone à éclairer (chaussée, monument…), plusieurs choix restent donc à pourvoir quant à l'intégration du reste des équipements (batterie, régulateur, driver…) à la structure du lampadaire. Les critères déterminants dans ce cas étant essentiellement liés au poids et l'encombrement, ce sont finalement les évolutions technologiques liées à chaque composant, qui ont montré le chemin vers les configurations les plus adoptées aujourd'hui. Sur ce plan et vu qu'il s'agit d'un éclairage extérieur, il y a manifestement obligation d'assurer une protection adéquate pour l'ensemble des équipements susceptibles d'être endommagés en présence des inhérents aléas naturels (pluie, poussière…) ou autres (vandalisme…). De ce point de vue, le panneau solaire ainsi que le luminaire à LED étant conçus et fabriqués à la source avec des standards leur permettant de supporter ces contraintes (étanchéité, chocs…), il ne reste alors que la batterie et autres auxiliaires électroniques (Figures 123 et 124) auxquels il faut assurer les protections requises en vue de les intégrer proprement à la structure originelle du lampadaire solaire.

V.1.1.2. Structure split ou "all-in three"

La solution évidente et largement adoptée en premier, a été de regrouper les seuls composants en question dans un caisson obéissant à certains standards d'étanchéité (IP, ...) et chocs mécaniques (IK), avant de le sceller au mât à une hauteur donnée (Figure 125). L'ensemble des équipements électriques du lampadaire solaire ainsi constitué, seraient finalement physiquement répartis en trois blocs (panneau, luminaire à LED et caisson étanche pour la batterie et équipements auxiliaires). La configuration ainsi éclatée, plus connue sous les dénominations 'Split' ou 'all in three', selon la terminologie anglo-saxonne correspondante (Figure 126), garde en effet un aspect pratique très utile dès qu'il s'agit de mener des opérations de maintenance, entretien ou réglages inhérents (orientation optimale du panneau solaire….).

Remarque 1: Dans le cas où les caractéristiques de l'éclairage demandé, notamment en termes d'intensité lumineuse et durée d'utilisation, sans parler des pertes inhérentes aux divers modes de conversion d'énergie (solaire-électricité-lumière), cela peut déboucher sur des écarts excessifs de poids et d'encombrement du pack de batteries pouvant assurer la capacité de stockage juste nécessaire. Dans ce cas il est prévisible que certaines situations extrêmes (poids faible ou excessivement lourd) nécessitent des solutions plus adaptées quant à l'utilité ou l'efficacité du caisson étanche, servant à héberger les batteries et autres équipements de contrôle (Figures 125 et 127).

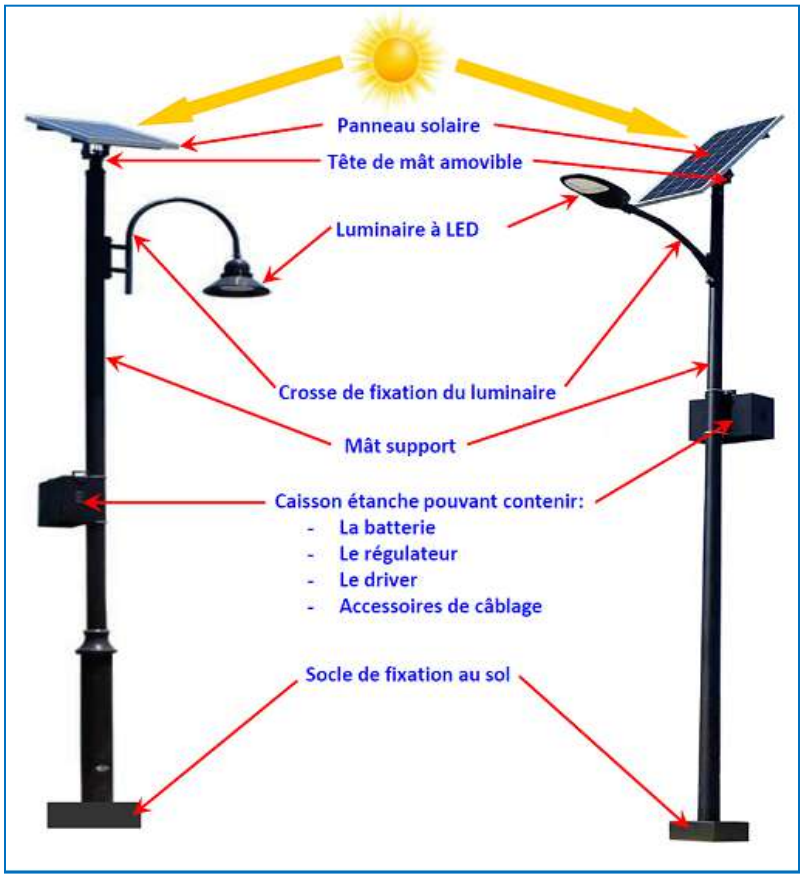


Figure 125. Structure et agencement des divers composants d'un lampadaire solaire.

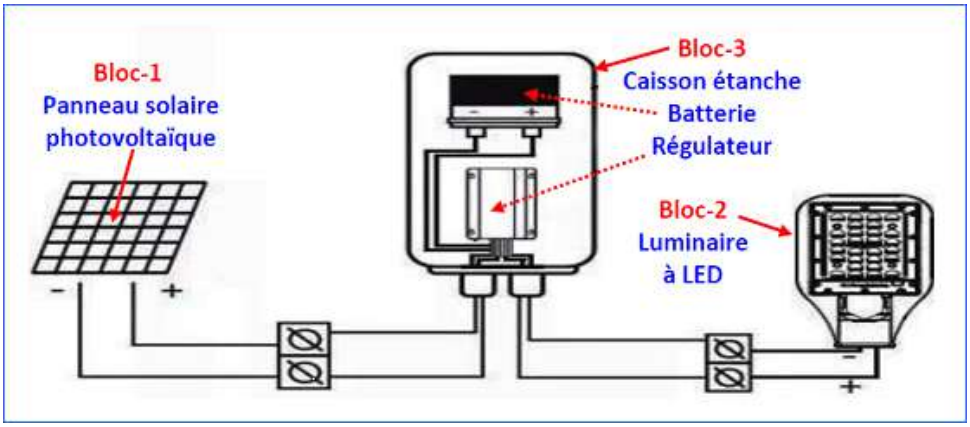


Figure 126. Blocs définissant la configuration split (All in three) d'un lampadaire solaire.

Remarque 2: Si les besoins d'éclairage solaire font appel à des puissances électriques importantes et une autonomie de fonctionnement au-delà de certains seuils, il y a manifestement le risque de déboucher sur un pack de batteries de stockage dont le poids et l'encombrement, laissent peu de chances à l'usage d'un simple caisson étanche comme abri pour ce dernier, sans altérer la rigidité de la structure globale du lampadaire. Face à

cette situation et à défaut de nouvelles solutions dûment éprouvées, la sagesse voudrait que l'on revienne vers celles qui ont déjà fait leur preuve en la matière, malgré l'inhérent surcoût induit sur les frais d'installation. En effet, la solution la plus utilisée dans ce cas, consiste à aménager une niche souterraine (trappe) à proximité du lampadaire solaire, afin d'y loger de manière appropriée le pack de batteries de stockage et éventuellement d'autres auxiliaires tel que le régulateur de charge (Figure 127).

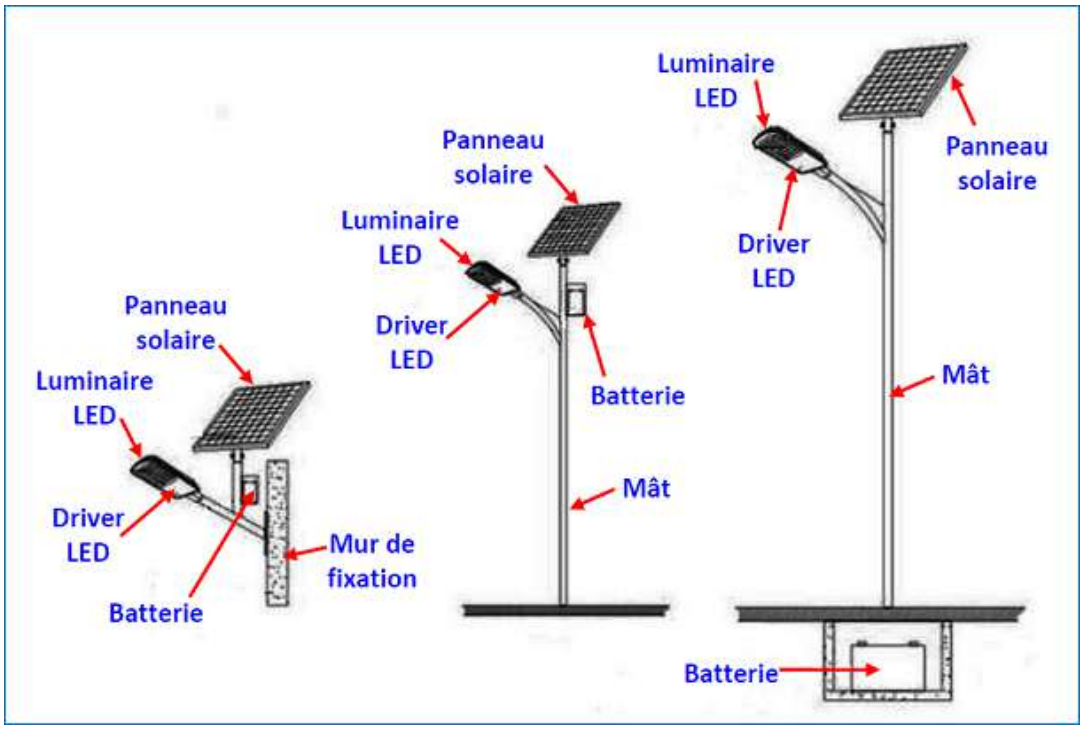


Figure 127. Divers modes d'emplacement en fonction du poids du pack de batteries de stockage associé à un lampadaire solaire.

Remarque 3: Vu l'augmentation notable de la puissance massique de certains types de batteries de stockage dites solaires, notamment celles au lithium, leur intégration à la structure globale du lampadaire de manière appropriée est devenue envisageable sans recours à un caisson étanche indépendant. Ceci reste tout de même applicable seulement dans le cas où l'encombrement et le poids de la batterie restent au-dessous de certains seuils permettant son association de manière appropriée à l'un des deux principaux composants (blocs) que sont le module ou le luminaire. La structure résultante se résume alors à seulement deux blocs physiquement séparés, regroupant l'ensemble des équipements électriques, d'où sa caractérisation comme étant du type All in two (Figure 128), pour la distinguer de celle originelle (All in three).

Figure 128. Divers exemples de lampadaires solaires de type split All in two.

V.1.1.3. Structure intégrée ou All-in one

Vu l'évolution des composants d'intérêt (batterie au lithium, régulateur, driver…) vers des configurations de plus en plus compactes et généralement dimensionnées au plus juste des besoins, des gains notables en termes d'encombrement et poids ont pu être enregistrés. De ce fait et pour des besoins assez modérés d'éclairage solaire, notamment en termes de puissance et d'autonomie, une multitude de solutions d'intégrations plus équilibrées de certains équipements dans la structure standard du lampadaire solaire de type split (Figure 125), ont pu voir le jour (Figure 128). Plus encore, une ultime intégration de l'ensemble des équipements électriques constituant un lampadaire solaire est proposée sous forme d'un seul bloc tout en un (Figure 129), commercialement plus connu sous la même étiquette exprimée en Anglais (All in One). Bien que présentant une lacune insurmontable en termes d'optimisation de l'orientation vers le soleil du panneau solaire de petite taille, rigidement lié au luminaire à LED dont il constitue le couvercle (Figure 130), cette configuration continue néanmoins à se développer.

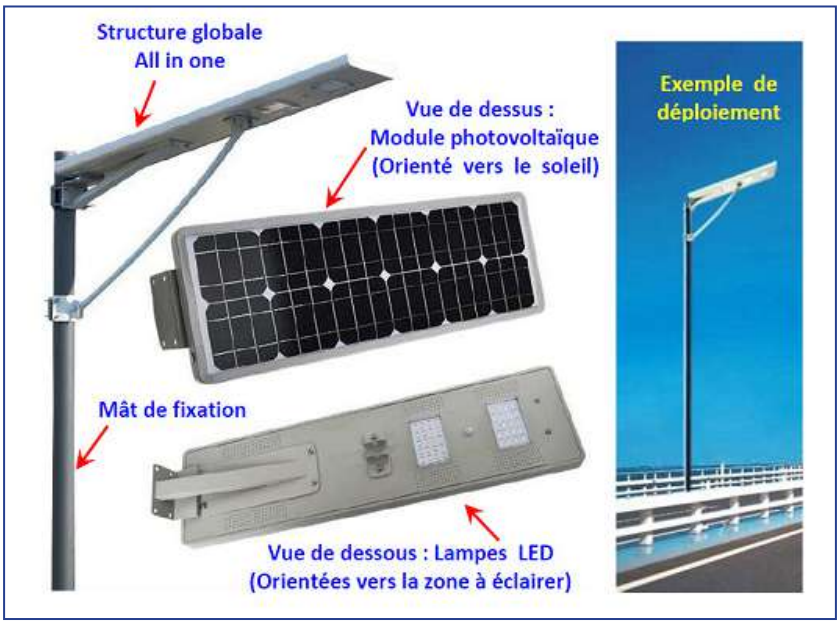


Figure 129. Structure globale d'un lampadaire solaire intégré (All-in-one).

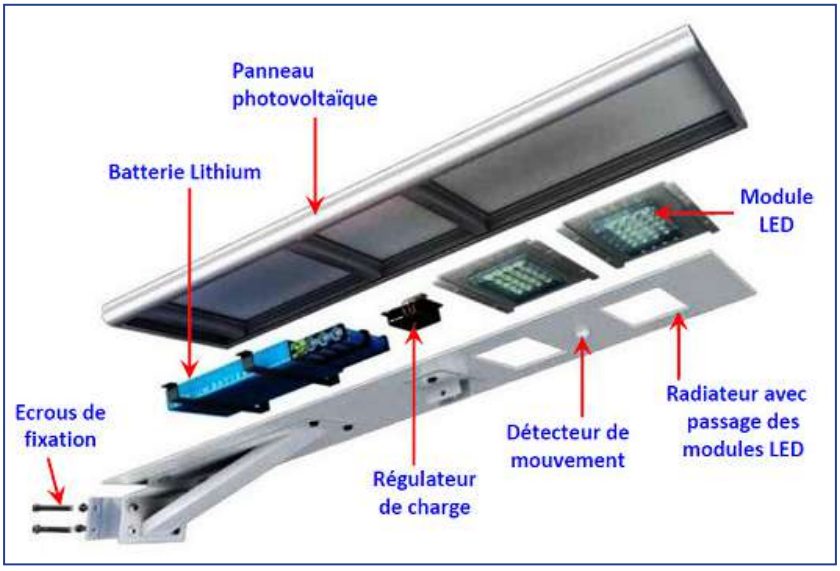


Figure 130. Vue éclatée d'un lampadaire solaire intégré (All-in-one).

L'aspect très compact du lampadaire solaire du type all in one et la facilité de son installation du fait qu'il soit livré entièrement prêt à l'emploi, ne devrait pas occulter certains inconvénients majeurs. En effet, en plus du fait qu'il soit manifestement destiné à des applications d'éclairage peu exigeantes en termes de puissance et d'autonomie, vu le poids et l'encombrement nécessairement réduits des composants impliqués, notamment le panneau photovoltaïque et la batterie, il présente également une limite critique quant à l'optimisation du rayonnement solaire perçu. Cela est justement lié au couplage rigide qu'impose cette structure (all in one) entre l'orientation du panneau solaire et celle du faisceau lumineux généré par le luminaire à LED. En effet, il ya manifestement un dilemme difficile à satisfaire dans la plupart des cas de déploiement, qui se résume au fait de ne pouvoir satisfaire l'exigence tacite de diriger le faisceau lumineux (luminaire) vers la zone à éclairer sans altérer l'orientation optimale du panneau photovoltaïque vers le soleil et inversement. Une illustration très simple de cette situation se présente justement dans la plupart des dispositifs d'éclairage appliqués aux voies de circulation et ce, exclusivement avec le déploiement de lampadaires solaires de type all in one alors que le split ne pose aucun problème (Figure 131).

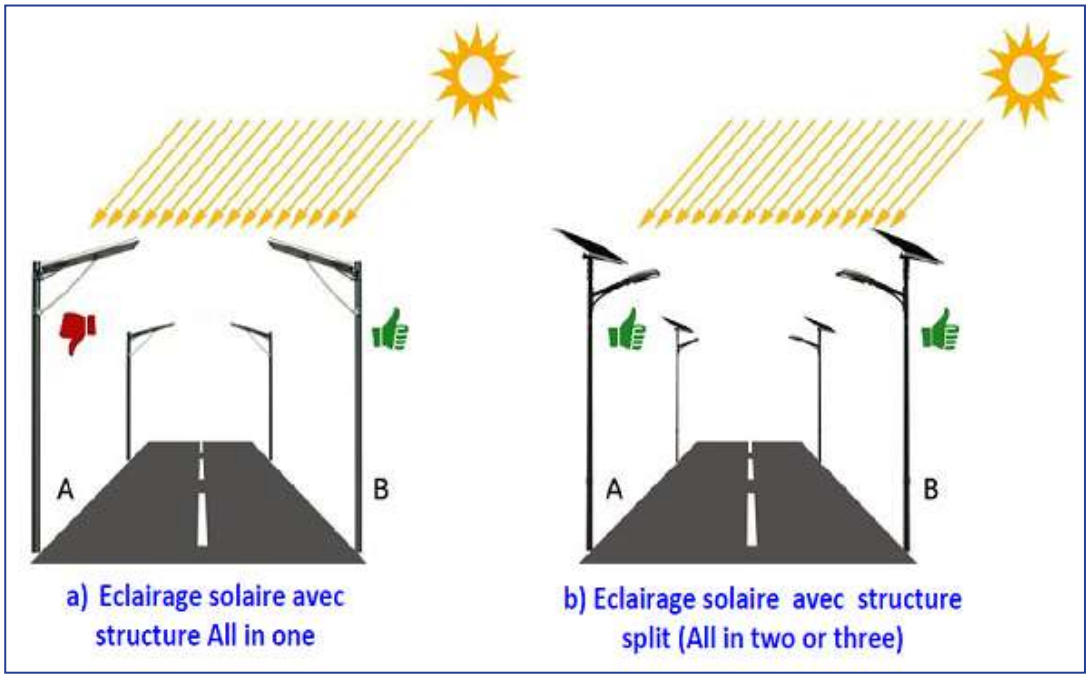


Figure 131. Dispositif d'éclairage à base de lampadaires solaires et Illustration du dilemme d'optimisation des orientations que pose la configuration All in one.

V.2. Eléments de conception et dimensionnement d'un lampadaire solaire

Lors de la conception des installations photovoltaïques, il y a lieu de prendre en compte un grand nombre de paramètres afin de parvenir à ajuster la production d'énergie nécessaire au plus près des besoins réels sans en altérer les qualités requises par les équipements alimentés. Il convient de noter que dans ce cas, tout surdimensionnement au-delà d'un seuil raisonnable, peut s'avérer trop coûteux, totalement inutile et peut même se traduire par des effets contraires, comme celui d'impacter négativement la durée de vie de certains composants essentiels.

En général, tout dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome consiste en premier lieu à identifier les besoins énergétiques de l'application, que seul l'utilisateur final peut contribuer à définir de manière assez précise [164-165]. Dans ce cas, s'agissant d'un éclairage solaire autonome, les données de base peuvent être résumées à ce qui suit :

1- Puissance de la source lumineuse (établie selon les besoins d'éclairage)
2- Qualité de la lumière (Température, IRC, Spectre….)
3- Durée quotidienne de son utilisation
4- Radiations solaires caractéristiques du lieu de déploiement
5- Autonomie exigée en journées sans ensoleillement

V.2.1. Prescriptions préliminaires

Les prescriptions de base pour un éclairage artificiel sont essentiellement exprimées sous forme de performances photométriques à satisfaire sous certaines contraintes environnementales particulières, sans nécessairement faire référence à la nature de la source d'énergie électrique qui va être utilisée. Pour répondre à cette demande, une première étape du travail consiste à déterminer au plus juste les besoins en lumière que la lampe, non encore identifiée, doit assurer en quantité (nombre de lumen) et qualité (IRC, température de couleur, spectre…). Une fois ces paramètres caractéristiques évalués quantitativement, arrive alors l'étape du choix de la source lumineuse la mieux appropriée, selon divers critères tels que l'efficacité énergétique, durée de vie, aptitude à certains modes de contrôle, coût… C'est également à ce niveau que toute spécification particulière concernant le mode d'alimentation en énergie de l'ensemble (électricité solaire ou prélevée sur le réseau) doit intervenir, car déterminante pour orienter pratiquement tous les choix ultérieurs, notamment techniques.

Remarque: La décision quant à la provenance de l'énergie électrique nécessaire à l'alimentation d'un dispositif d'éclairage public, est généralement prise dès le lancement de sa conception pour de multiples raisons souvent d'ordre pratique mais peut également être dictée par des orientations rentrant dans le cadre de stratégies globales de développement, notamment en matière d'aménagement du territoire ou de politique énergétique. Cependant et pour des actions limitées et planifiées à plus ou moins court terme, c'est la nature et le coût des aménagements urbains à entreprendre sur les structures existantes, qui sont déterminants. En tout état de cause et au vu de l'évolution technologique assez rapide dans le domaine de l'éclairage public, notamment à base d'énergie solaire, rien n'empêche de laisser la décision finale quant au choix du mode d'alimentation (solaire ou réseau), au gré de la concurrence entre les prestataires professionnels de services dans le domaine (soumissionnaires). Cela pourrait notamment être le cas lorsqu'il s'agit de dispositifs d'éclairage public, intégrés à de grands projets de nouvelles infrastructures ou extensions urbaines….

V.2.2. Source lumineuse

Dans le cas où c'est l'option pour une alimentation autonome à base d'électricité solaire qui est privilégiée, le choix de la source lumineuse répondant aux performances photométriques déterminées au préalable (nombre de lumen, IRC, température de couleur, spectre…) est pratiquement limité à la technologie LED. Cette dernière s'est en fait imposée depuis relativement longtemps à travers l'évolution de l'efficacité lumineuse qu'elle permet de réaliser et qui surpasse déjà toutes les technologies concurrentes en la matière, dont celle à base de décharge à haute intensité (HID), qui est pratiquement à l'origine des diverses lampes qui ont servi l'éclairage public dans le monde durant une grande partie du siècle passé (Mercure, HPS, MH,…). En effet, le fait que l'énergie électrique nécessaire pour un lampadaire solaire soit générée localement et de manière autonome, l'efficacité de son utilisation devient manifestement un critère de première importance, notamment en matière de coût global de l'installation dédiée à sa production, sans tenir compte des effets préjudiciables de son encombrement inutile, d'où le recours systématique dans ce cas aux luminaires à base de LED. Au final, c'est la puissance globale nécessaire au fonctionnement de ce dernier, évaluée au préalable selon les besoins photométriques dictés par l'utilisation, qui constitue une donnée essentielle pour entamer le processus de dimensionnement des composants intervenant dans la génération de l'électricité solaire nécessaire.

Partant des dernières performances affichées en termes d'efficacité lumineuse de certaines lampes LED déjà commercialisées, soit près de 200 lm/W et un peu moins (150 à 180 lm/w) pour un luminaire complet, vu les pertes engendrées à son niveau, on peut évaluer avec une marge d'erreur acceptable la puissance électrique nécessaire au bon fonctionnement d'un lampadaire solaire pour divers niveaux standards d'éclairage public en Algérie. Pour cela, il suffit de se référer aux données disponibles qui indiquent que ce domaine est globalement dominé par les lampes au sodium haute pression (HPS), avec un taux de 60% du parc national, notamment dans l'éclairage des voies de circulation et ce, à travers l'usage de quatre niveaux standards de puissance (Tableau 16). Dans cette optique et à titre d'exemple, ces derniers sont pris comme référence d'abord dans une perspective d'éventuel remplacement (Relamping) des lampes HPS classiques couramment utilisées, par des luminaires à LED équivalents. Ces dernières peuvent également servir d'indicateurs quant aux puissances à prendre en considération, lors d'une évaluation des besoins quotidiens d'énergie d'un lampadaire solaire

conforme aux besoins réels d'éclairage routier en Algérie. A cet effet, on prendra comme référence le cas précis du luminaire HPS de 150 W, dont la puissance de celui de remplacement à base de LED, est fixée à une valeur moyenne de 80 W (Tableau 16) et servira de support à l'évaluation quantitative des besoins typiques en énergie électrique d'un lampadaire solaire destiné à être déployé dans le cadre d'un éclairage routier en Algérie.

Tableau 16. Lampes HPS standards utilisées en Algérie et LED équivalentes.

Puissance des lampes HPS à remplacer (W)	70	150	250	400
Lampes à LED équivalentes (W)	30 à 50	70 à 90	110 à 130	150 à 170

V.2.3. Mode d'éclairage solaire et éléments de dimensionnement

S'agissant essentiellement du dimensionnement des éléments intervenant dans la génération locale d'électricité solaire (panneau photovoltaïque, batterie de stockage et régulateur correspondant) et ce en quantité suffisante pour alimenter proprement la source lumineuse, il y a lieu d'identifier en premier lieu les besoins réels en énergie. Pour cela, ayant affaire à une charge unique et bien identifiée qu'est le luminaire dont on connait la puissance globale demandée par l'ensemble de ses constituants (lampe à LED, driver et éventuel contrôleur associé), il reste à déterminer les créneaux horaires journaliers de son utilisation et selon quel taux de luminosité. Sur ce plan et afin de mener l'ensemble des étapes du dimensionnement visé de manière concrète, selon des hypothèses de travail quantifiées et représentatives d'un cas réel, les prescriptions de base peuvent être quantifiées et résumées comme suit:

1. L'éclairage visé est sensé rester opérationnel sur plusieurs années et être continument disponible dès que la lumière naturelle du jour est jugée insuffisante. Cela inclut essentiellement les périodes nocturnes dont la durée est marquée par de grands écarts selon les saisons (environ 16 et 8 heures lors des solstices respectifs de l'hiver et l'été). Ainsi, un besoin maximum d'énergie est à prévoir pendant les longues nuits d'hiver dont une durée maximale de référence où l'éclairage public devrait être pleinement opérationnel, peut être fixée à environ 13 heures dans le cas de l'Algérie.

2. En plus de la puissance nominale du luminaire à LED fixée à 80 W, l'estimation de la réserve d'énergie à produire et stocker dans la batterie pour assurer son fonctionnement durant toute une nuit, il y a lieu de connaître également les modes d'éclairage adoptés durant celle-ci. Pour cela, il convient d'identifier en premier les moyens permettant de décider à partir de quels moments précis l'éclairage public devient fonctionnel, notamment à la tombée de la nuit puis son inhibition dès la levée du jour (détecteur de seuil de luminosité, horloge astronomique…). Entretemps, ce sont essentiellement les estimations des durées de fonctionnement et avec quels taux de puissance le dispositif d'éclairage public en question va finalement intervenir, qui déterminent au plus près les besoins énergétiques nécessaires. Encore faut-il prendre en compte les nombreux aléas inhérents à ce type d'applications (radiations solaires et températures locales très variables, incertitudes sur les rendements des équipements utilisés…) et ce, en adoptant des marges suffisantes pour assurer un fonctionnement fiable durant toute la durée de vie du moyen en question. Pour résumer, il y a donc lieu d'opter pour un dispositif d'éclairage solaire dimensionné au plus juste en termes de consommation d'énergie, tout en veillant à ne pas altérer la qualité d'éclairage, résumée à travers les prescriptions formulées à la demande. Autrement dit, le processus de dimensionnement des moyens de production locale d'électricité solaire, doit se fixer comme priorité:

- Assurer la continuité de service (disponibilité de l'éclairage) à tout moment où cela est nécessaire et durant une période minimale, exprimée en nombre de jours d'autonomie de fonctionnement, notamment suite à une absence prolongée d'ensoleillement (ciel couvert….).

- Satisfaire certains critères de performances particuliers et clairement exprimés. Parmi ces derniers, le plus en vue ces derniers temps dans le domaine de l'éclairage public en général et celui à base d'électricité solaire en particulier, étant celui qui vise en premier l'efficacité

énergétique. Ce concept étant en effet devenu un leitmotiv commun à tous les pays du monde, ayant entamé une transition énergétique vers les ressources propres et durables.

3. Afin d'apprécier le gain en efficacité énergétique d'un éclairage solaire avec possibilité de contrôle du flux lumineux, le dimensionnement visé est initialement mené avec un luminaire LED non dimmable avec flux luminaire maintenu constant et égal à sa valeur nominale (Cas-1, Figure 132a), avant de passer au cas dimmable avec une intensité lumineuse variable selon un profil simple comme illustré dans la Figure 132b (Cas-2).

V.2.3.1. Luminosité contrôlée, économie d'énergie et autonomie

Appliqué aux installations d'éclairage public en général, au-delà du dimensionnement initial effectué sur la base d'un fonctionnement basique consistant en un allumage au crépuscule suivi d'extinction à l'aube, le concept d'efficacité énergétique visé, passe également par une variation adaptée entretemps du flux lumineux émis par la lampe LED (dimmable). En effet, un gain significatif de l'énergie consommée peut être enregistré en superposant au premier cas où le flux lumineux et maintenu en permanence à sa valeur nominale, un contrôle de ce dernier permettant d'ajuster au mieux la demande instantanée aux besoins réels, notamment en intensité (image directe de la consommation énergétique du luminaire) et durée de maintien. Dans cette optique, plusieurs modes de réglage applicables aux systèmes d'éclairage public en général, dont certains sont techniquement bien appropriés pour les dispositifs à LED (allumage et extinction instantanés, luminosité continument réglable de pratiquement 0 à 100%), sont ainsi adoptés presque systématiquement dans les lampadaires solaires. En effet, cela a permis à ces derniers d'atteindre des seuils remarquables d'efficacité énergétique, qui les ont rendus compétitifs sur ce plan, même pour certains services d'éclairage public dans des zones aussi bien rurales qu'urbaines où le réseau électrique est disponible. Dans cette optique et afin de bien d'illustrer le gain en efficacité énergétique d'un éclairage solaire avec possibilité de contrôle du flux lumineux, le dimensionnement visé est initialement mené avec un luminaire LED non dimmable (sans contrôle). Le flux lumineux de ce dernier étant maintenu constant et égal à 100% de sa valeur nominale (Figure 132a) durant 13 heures, identifiée au préalable comme durée moyenne d'éclairage représentative d'une longue nuit d'hiver, avant d'aborder le cas dimmable avec une intensité lumineuse variable selon un profil simple comme illustré dans la Figure 132b.

Remarque 1: Le profil à imposer aux variations du flux lumineux peut à l'évidence être plus affiné que celui présenté, afin de répondre à certaines exigences, souvent liées à des activités nocturnes particulières nécessitant des niveaux d'éclairage public très différents. Ainsi, le flux lumineux émis par le luminaire à LED, peut osciller entre 100 % de sa valeur nominale et des seuils très bas (dont éventuellement l'extinction totale). Cela étant en passant par plusieurs paliers de luminosité adaptés aux besoins minimums de certains usages, comme celui de réduire les lumières (exemple: de 100% à 70%) après la fermeture des commerces, avant de les réduire encore plus (exemple à 40%) (Figure 104) ou carrément les éteindre après l'horaire tardif du dernier moyen de transport collectif. Ils peuvent également être rallumés plus tard, soit à titre d'exemple une heure avant la levée du jour pour accompagner les activités très matinales.

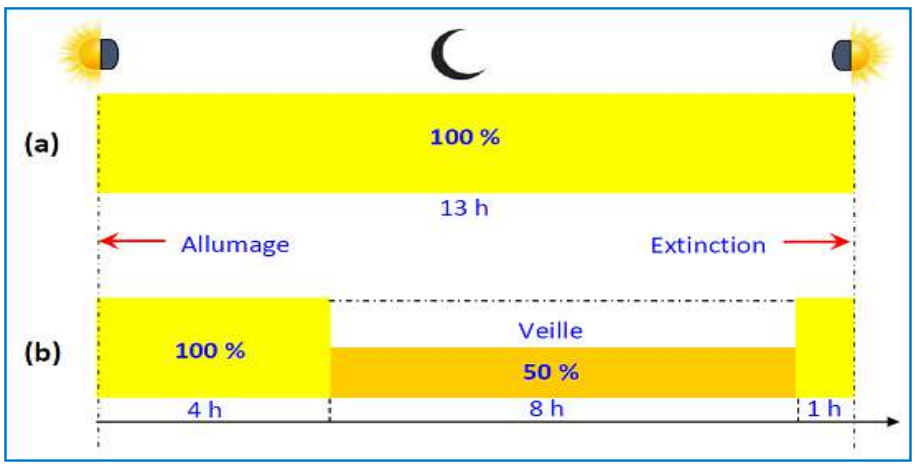


Figure 132. Illustration des deux modes d'éclairage adoptés :
(a)- Non dimmable (100 % du flux nominal pendant 13 heures).
(b)- Dimmable (100 % pendant 4 h + 1h et 50 % pendant 8h).

Remarque 2: La meilleure solution applicable dans beaucoup de cas, notamment ceux caractérisés par une densité réduite de circulation, serait à l'évidence d'opter carrément pour un contrôle de l'éclairage par détecteur automatique de présence (Figure 133). Ce dernier, combiné avec un détecteur de luminosité ou autre dispositif (horloge astronomique) empêchant le fonctionnement de jour ou lorsque la lumière naturelle est suffisante, permet en effet de caler au mieux l'entrée en action d'un tel éclairage artificiel avec le besoin réel. Toutefois, il reste dans ce cas le problème lié à l'évaluation plus ou moins précise des besoins énergétiques nécessaires, du fait qu'il s'agit là d'une consommation de nature aléatoire, donc difficile à évaluer pour en assurer la disponibilité à tout moment durant la période de fonctionnement autonome fixée (une à plusieurs nuits). Par prudence, la réponse la plus simple à cela, passe à priori par un surdimensionnement de l'installation de production d'électricité solaire et son stockage pour parer au cas le plus défavorable de la consommation journalière globale, ce qui nous ramène à la case de départ en reposant de nouveau le même problème de l'efficacité énergétique invoqué à la source.

Figure 133. Illustration d'un contrôle de l'éclairage par détecteur de présence:

Remarque 3: Afin de sortir du type d'impasses telles que celle soulevée à l'issue de la remarque précédente et faire avancer de manière simple le processus de dimensionnement entamé, du moins de manière déterministe et éloignée de toutes éventuelles approches prévisionnelles, assez complexes à mettre en œuvre et que la nature figée de l'application ne justifie en aucun cas, il devient impératif de stabiliser certains choix. A cet égard, plusieurs voies peuvent être explorées en ordonnant clairement les priorités qui s'imposent, avant d'affiner les éléments qui peuvent aider à caractériser au plus près les prescriptions à satisfaire par l'éclairage solaire projeté.

V.2.3.2. Evaluation des besoins quotidiens en électricité solaire

En tenant compte des hypothèses et prescriptions spécifiées ci-dessus, une estimation de l'énergie électrique nette à pourvoir quotidiennement au luminaire à LED utilisé, dont la puissance a été fixée à 80 W peut être menée. Pour cela, le mode et la durée de fonctionnement de ce dernier ayant été définis au préalable pour une longue nuit d'hiver, dont la durée moyenne de référence a été fixée à 13 heures (cas le plus défavorable), les consommations globales E1 et E2 du luminaire pour chacun des deux modes retenus quant à son fonctionnement (Figure 132), peuvent être simplement établies comme présentées dans le Tableau 17.

Tableau 17. Consommation quotidienne du luminaire.

Cas-1 Eclairage non contrôlé (Figure 132a)	Cas-2 Eclairage contrôlé (Figure 132b)
E0 = 80 W x 13 heures E0 = 1040 Wh	E0 = (80Wx 5heures)+(0,5x 80W x 8 heures) E0 = 720 Wh

V.2.4. Dimensionnement des constituants essentiels

Sur la base des nombreuses données à préciser afin d'orienter au mieux la solution d'éclairage désirée vers les objectifs recherchés, il apparaît manifestement que la disparité des situations à considérer est telle, qu'un certain nombre de choix déterminants sont à prendre au préalable sur la base de considérations pratiques et bien inspirées de ce qui se fait dans le domaine. Face à cela et en dernier ressort, seul le donneur d'ordre peut aider à trancher quant aux décisions finales dont dépendent la conception et le dimensionnement du lampadaire solaire et ce pour des raisons évidentes, principalement liées au coût que cela induit. En effet, il y a manifestement certaines marges à prévoir en présence d'une multitude de situations qui peuvent se présenter, dont l'impact sur des fonctionnalités importantes et parfois incontournables pour un service tel que l'éclairage public, est déterminant. A ce propos, la grande disparité des aléas environnementaux dont dépend fortement l'énergie produite localement au niveau du lampadaire solaire, en est un bon exemple. En effet, l'option de dimensionner l'ensemble des installations en vue de couvrir toutes les situations qu'on peut recenser comme étant les plus défavorables, se traduit manifestement par des surdimensionnements qui peuvent être très couteux. Ainsi et à titre d'illustration, prendre comme base de travail ce type d'approche afin de spécifier une autonomie excessive avec maintien des mêmes performances photométriques au regard des fluctuations inhérentes de l'ensoleillement journalier le long de l'année, peut tout simplement s'avérer impraticable au-delà même du problème de coût (encombrement excessif, contraintes mécaniques sur le mât…). C'est afin de situer ces limites de manière quantifiée et donner une idée assez précise sur les compromis à faire, sans forcément altérer la qualité de service d'un point de vue rationnel, que des cas d'études jugés représentatifs, sont présentés. Ces derniers étant juste considérés comme support pour l'élaboration d'un profil de prescriptions techniques quantifiées, en prélude à un processus de dimensionnement simple mais illustrant des écarts bien visibles sur les structures des lampadaires solaires résultants. Cela étant en vue d'une analyse ne laissant aucune zone d'ombre quant aux conséquences des choix formulés à travers les prescriptions techniques initiales, notamment celles ne reflétant aucune modération objective en termes d'efficacité énergétique.

V.2.4.1. Champ photovoltaïque

Le champ photovoltaïque a généralement pour rôle de générer l'énergie nécessaire pour une seule nuit d'éclairage, laissant le soin à la batterie, dimensionnée au préalable dans ce cas pour prendre en charge tout éventuel déficit solaire se prolongeant sur quelques jours successifs. En effet, cette situation étant par nature exceptionnelle, penser à faire contribuer le générateur photovoltaïque à ce niveau revient à le surdimensionner inutilement car la plupart du temps il sera sous-utilisé, sans parler des contraintes pratiques que son encombrement conséquent peut poser et encore moins du surcoût induit. Il convient de noter à ce propos que le nombre parfois excessif de jours d'autonomie annoncés pour certains systèmes d'éclairage solaire commercialisés (7 jours et parfois beaucoup plus), notamment les configurations all in one de capacité énergétique réduite par essence, supposent en fait un fort taux de baisse de l'intensité lumineuse au cours de la nuit (dimming), si ce n'est carrément un contrôle par capteur de proximité. Cela étant en plus d'une éventuelle baisse automatique de la lumière en fonction de l'état de charge de la batterie, lorsque cela devient inévitable.

Ayant évalué les besoins énergétiques de l'utilisateur final (Luminaire à LED) dans les deux cas d'étude présentés (Figure 132) et en présence du cas le plus défavorable (nuit d'hiver la plus longue), le champ solaire photovoltaïque doit donc être dimensionné pour pouvoir accumuler durant la journée correspondante (la journée la plus courte), assez d'énergie pour assurer un éclairage ininterrompu sur 13 heures, prises comme durée de référence de la nuit la plus longue de l'année.

Afin d'assurer la collecte d'une telle énergie de manière régulière, sur la base de l'ensemble des hypothèses retenues, il faut en toute rigueur se référer au profil moyen journalier d'ensoleillement du lieu de déploiement sur une année, avant d'opter pour le cas le plus défavorable (worst case scenario), soit celui de la journée la moins ensoleillée [166]. Toutefois, il faut reconnaître qu'une information aussi détaillée, est assez coûteuse et difficilement accessible, par rapport aux données

relatives à une moyenne journalière d'ensoleillement sur l'année, largement diffusées sous forme de cartes (Figure 134) [167] mais peu utiles dans ce cas précis du fait que cela va masquer une bonne partie des situations recherchées, dont l'ensoleillement journalier est au-dessous de la moyenne.

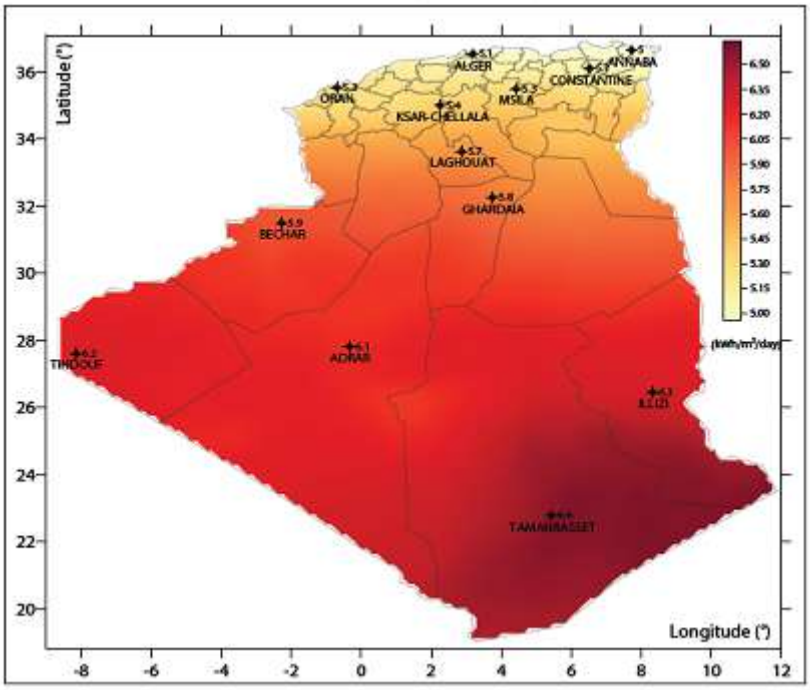


Figure 134. Carte d'ensoleillement mensuel moyen en Algérie.

Parallèlement aux données cartographiées, il existe bien des données plus fines sur les distributions moyennes des radiations solaires globales journalières, établies mensuellement sur toute l'année. Une compilation de celle-ci, obtenue à partir de mesures couvrant l'année 2016 [PVGIS-SARAH], est présentée pour certaines villes représentatives en la matière de plusieurs régions de l'Algérie (Tableau 18).

Tableau 18. Moyennes mensuelles de l'irradiation solaire journalière globale sur un plan incliné à 32° en (Wh/m²/jour), sur la base des données de 2016 (PVGIS).

Mois	Site			
	Alger	Djelfa	Ghardaïa	Adrar
Janvier	4201	5825	6256	6928
Février	4060	5202	6386	7140
Mars	5726	5930	7030	7845
Avril	5954	6602	7510	7314
Mai	6361	6952	7298	6786
Juin	6716	7146	7074	7217
Juillet	7099	7254	7278	7121
Aout	7185	7177	7414	7284
Septembre	6303	6251	6965	6570
Octobre	5265	6095	6376	6556
Novembre	3586	4803	5704	6054
Décembre	3790	4097	5517	6181

Afin de maximiser la production d'électricité d'une installation photovoltaïque, il convient d'orienter les modules de façon à capter le plus possible d'énergie solaire dans la journée. Sachant que la direction du soleil varie non seulement dans la journée mais également en fonction des saisons (Figure 135), il y a lieu d'opter pour une orientation du panneau photovoltaïque, supposée figée le long de l'année dans la direction initialement fixée, pouvant assurer au mieux le besoin journalier d'énergie dans le cas le plus défavorable.

Vu sa position géographique (hémisphère nord), la direction optimale dans ce sens pour l'Algérie, correspond à une orientation plein sud du panneau photovoltaïque avec une inclinaison pouvant atteindre 55 ° durant l'hiver et descendre à 10° l'été, en passant par environ 32° aux équinoxes de l'automne et du printemps. C'est pratiquement cette dernière valeur qui constitue de fait le meilleur compromis en termes de choix de l'inclinaison optimale à donner aux capteurs solaires fixes qui y sont déployés tout en veillant à une orientation plein sud.

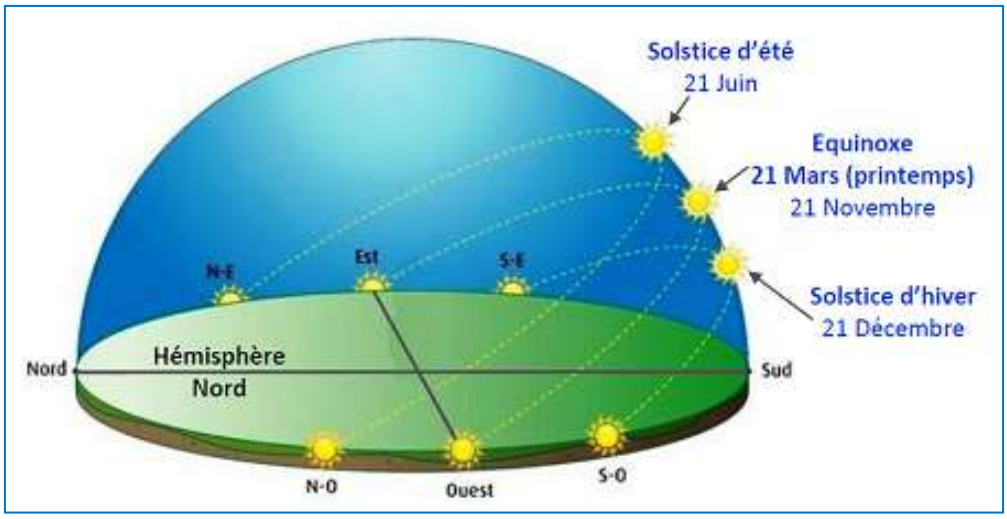


Figure 135. Illustration des trajectoires quotidiennes du soleil selon les saisons, vues notamment par un observateur localisé à l'hémisphère nord.

Remarque: Il convient de noter que des écarts raisonnables par rapport à la direction optimale (orientation plein sud et 32° d'inclinaison pour l'Algérie), peuvent être assumés sans engendrer de pertes notables quant à l'énergie solaire globale reçue à la surface du panneau solaire photovoltaïque (Figure 136).

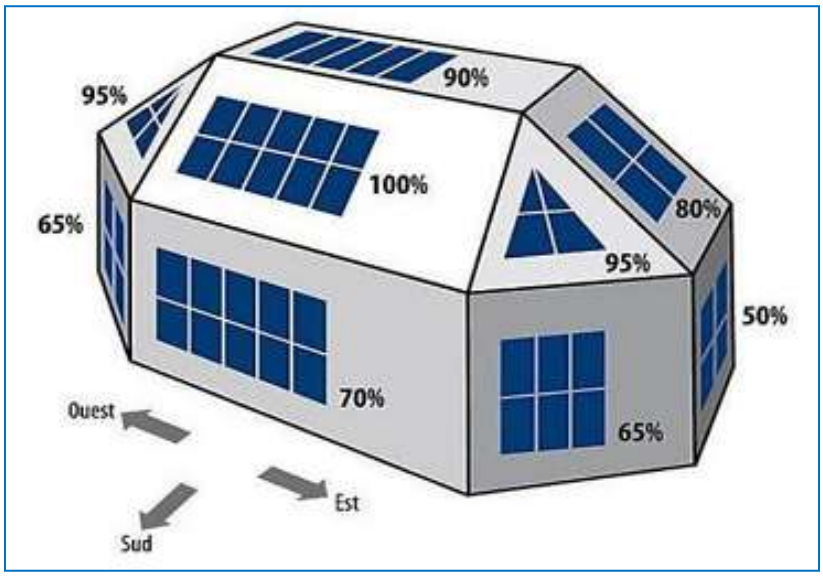


Figure 136. Aperçu du taux de perte de l'énergie solaire incidente sur un champ photovoltaïque, non idéalement orienté vers la direction optimale (100%).

V.2.4.1.1. Lieu de déploiement et évaluation de la puissance crête

En supposant que le système d'éclairage solaire d'intérêt est appelé à servir dans la région de Djelfa (Longitude = 3.253° ; Latitude= 34.674° ; Elévation= 1143 m), disposant d'un gisement solaire représentatif de l'ensemble des hauts plateaux de l'Algérie, les données disponibles pour ce site (Tableau 18), permettent de déduire que l'ensoleillement journalier le moins favorable de l'année, correspond à celui du mois de décembre, avec une moyenne de 4097 Wh/m2/jour.

Un module photovoltaïque étant essentiellement caractérisé par sa puissance crête, soit celle qu'il peut générer dans des conditions standards, définies par une radiation solaire de 1000 W/m2 et une température de 25 °C. La détermination de l'énergie électrique Pe qu'il peut produire quotidiennement, nécessite alors la connaissance du nombre d'heures Nh passées durant la journée concernée dans les mêmes conditions standards.

Sur ce point et quoique le profil typiquement irrégulier d'ensoleillement durant la journée ne le permet pas directement, on peut justement le convertir en un profil équivalent défini par une radiation standard de 1000 W/m2 pendant un nombre d'heures dites équivalentes de sorte à ce que l'énergie solaire reçue par unité de surface (m2) reste la même (Figure 137).

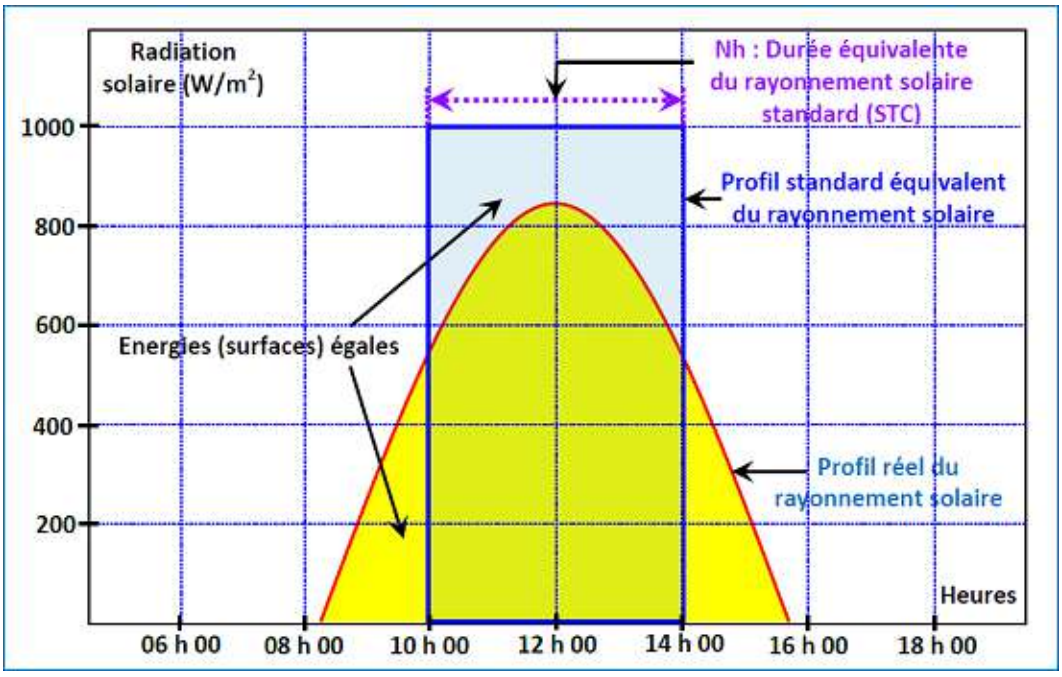


Figure 137. Illustration de l'énergie issue d'une radiation journalière quelconque et sa moyenne captée durant un nombre d'heures équivalentes en présence d'une radiation solaire standard (1000 W/m², 25°C, AM=1,5)

Concernant le cas d'étude (Djelfa), l'ensoleillement journalier moyen le moins favorable de l'année, a été évalué à 4097 Wh/m2/Jour (Tableau 18.). De ce fait, le nombre Nh d'heures équivalentes pour un rayonnement standard (STC), est déduit comme suit:

4097 (Wh/m2/Jour) = Nh (heures/jour) x 1000 (W/m2), d'où :

Nh≈ 4.1 heures/jour, soit
4 heures et 6 minutes/jour

Enfin, sachant qu'il est l'unique source d'énergie primaire du lampadaire solaire, le champ photovoltaïque doit être dimensionné afin de pouvoir générer à la fois la composante utile (consommation du luminaire à base de LED), sans oublier l'ensemble des pertes inhérentes aux divers étages de conversion mis en jeu (Régulateur de charge, batterie, driver…). Une caractérisation simple de ces dernières (pertes) est adoptée dans ce cas en fixant le rendement du circuit champ PV-batterie à 85 % (15 % de pertes) et 90% pour celui associant la batterie à la charge finale qu'est le luminaire à LED. L'ensemble des données ainsi identifiées, permet alors d'évaluer proprement les puissances crêtes des champs photovoltaïques respectifs (Tableau 19), nécessaires à l'éclairage solaire dans les deux cas d'étude adoptés, soit avec ou sans gradation (Figure 132).

Tableau 19. Résumé des données nécessaires au dimensionnement du champ PV.

Consommation journalière luminaire	Cas-1	80W x 13 heures = 1040 Wh
	Cas-2	(80Wx 5 h) + (40Wx8h)= 720 Wh
Données préliminaires: Pertes du circuit batterie-luminaire = 10% Pertes du circuit module-batterie = 15% ⇩		
Production journalière du champ PV	Cas-1	E1 = 1040 x 1.1x1.15 = 1316 Wh
	Cas-2	E2 = 720 x 1.1x1.15 = 911 Wh
Nombre d'heures Nh d'ensoleillement équivalentes pour un rayonnement STC : **Nh ≅ 4.1 heures** ⇩		
Puissance crête nécessaires du champ PV	Cas-1	P1 = 1316 /4.1 = 321 Wc
	Cas-2	P2 = 911 /4.1 = 223 Wc

Remarque: Etant donné le climat typiquement chaud en Algérie, on est tenté d'en tenir compte à travers un surdimensionnement adapté du module selon les coefficients de température correspondants indiqués par le fabricant. En effet les pertes par rapport à la puissance crête spécifiée pour les conditions standards STC (T=25 °C, Radiation solaire=1000 W/m^2, AM=1.5), étant généralement de l'ordre de 1% pour chaque augmentation de 2°C (-0.5%/°C), indique que pour une température réelle de fonctionnement à 45 °C, le champ photovoltaïque en question générerait 10% en moins. Toutefois, il ya lieu de ne pas oublier que le dimensionnement du module a été initialement effectué sur la base d'une journée d'hiver (froide et courte), d'où une large compensation de ces pertes durant les saisons chaudes par le fait que les journées seront également plus longues, donc plus d'ensoleillement.

V.2.4.1.2. Eléments de choix des panneaux photovoltaïques

Vu la nature de l'application et pour des raisons évidentes liées à l'installation du panneau solaire (fixation au mât…) et les contraintes mécaniques qu'il doit supporter (résistance au vent…), il y a manifestement intérêt à réduire au maximum la surface du champ photovoltaïque répondant à la puissance crête qui vient d'être déterminée, pour collecter de jour l'énergie nécessaire à l'éclairage de nuit. Pour cela, l'option pour un module à base de silicium monocristallin, dont le rendement se situe entre 17 et 19 % ou plus actuellement, est toute indiquée en premier comme pour la plupart des installations de cette nature [168-169]. Cela étant avant de se tourner exceptionnellement vers le poly-cristallin un peu moins cher, mais avec un rendement plus faible (entre 14 et 16 %). L'efficacité énergétique des modules commercialisés à base des autres technologies (couches minces…) étant relativement faible, ils sont très rarement utilisés dans ce cas précis.

Remarque 1 : Au-delà de la puissance crête qui définit en premier le module à choisir, il y a également d'autres critères pratiques qui peuvent entrer en ligne de compte quant au choix final des modules photovoltaïques à retenir. Ainsi, il convient de signaler que dans l'application d'intérêt, la rigidité de la structure des modules devient également un paramètre important à considérer, vu la nature de leur déploiement et les contraintes mécaniques qui en découlent. Ces dernières étant largement fonction des surfaces globales exposées, il ne faut pas négliger certains arrangements pratiques qui peuvent contribuer à une meilleure tenue, telle que l'option de diviser la puissance crête demandée sur deux modules au lieu d'un seul.

Remarque 2: Dans le même ordre d'analyse et vu les rendements assez rapprochés, il ne faut pas

négliger d'emblée la solution à base de modules en silicium poly-cristallin, du fait que les cellules photovoltaïques à base de ce dernier, permettent de meilleurs arrangements en termes d'encapsulation, ce qui pourrait induire, à puissance crête égale, des dimensions globales semblables, sinon un peu plus réduites que celles d'un module en monocristallin. Ainsi, le coût notablement supérieur de ce dernier, peut ne pas justifier sa préférence par rapport à un module en poly-cristallin si d'autres critères jugés recevables, ne viennent s'interposer.

Tenant compte de la puissance crête nécessaire déterminée précédemment et les éléments d'analyse qui ont suivi, plusieurs choix restent quand même recevables pour l'application en question, si l'on s'attaque à la grande diversité des modules photovoltaïques disponibles sur le marché. Sur ce point, on peut dire que le dernier choix qui reste encore à faire concernant le régulateur de charge à adopter pour la batterie, peut pratiquement être partiellement anticipé à ce niveau. En effet, la différence que va imposer la tension Vmp, caractéristique essentielle du point de fonctionnement optimal du module photovoltaïque et celle qui reste à fixer pour la batterie (Ubat), va orienter la décision quant au maintien en course ou non d'un type particulier de régulateur solaire. Mettant de côté cette éventuelle interaction, afin de ne pas limiter outre mesure la liberté du choix d'un composant important et laisser seule la prescription de base en décider, soit la puissance crête du module photovoltaïque en question, une analyse prospective des produits répondant à ce profil, peut alors être menée selon la disponibilité sur le marché et les contraintes pratiques qui s'imposent. Toutefois, les caractérisations ultérieures de la batterie, notamment sa tension nominale Ubat ainsi que le régulateur de charge associé, pourraient donner une meilleure vision quant à la conduite des choix définitifs dont l'harmonie pourrait simplifier beaucoup d'étapes.

V.2.4.2. Batteries de stockage

La batterie étant un élément essentiel du système d'éclairage public à énergie solaire, dont dépendent de manière significative le coût, la fiabilité et la durée de vie de l'ensemble, il y a lieu de cerner dès le début les critères essentiels qui permettent de converger vers le meilleur compromis possible quant à son choix final [170-171]. Sur ce plan, il convient de rappeler que la durée de vie d'une batterie peut varier beaucoup en fonction de l'attention qui lui est portée et l'utilisation qui en est faite, sans parler des prédispositions intrinsèques liées à sa technologie et la qualité de sa fabrication [170-171]. A ce propos, il est bien établi que des paramètres tels que la température et la profondeur de décharge ou Depth Of Discharge (DoD), peuvent impacter négativement les performances d'une batterie de stockage et même la rendre inutilisable de manière prématurée. Pour cela, plusieurs variantes de batteries spécialement conçues et optimisées pour les applications solaires, sont proposées sur le marché et se distinguent par rapport à celles classiques, à travers certaines caractéristiques spécifiques essentielles. Ainsi, elles sont mieux adaptées au cyclage typique des systèmes solaires, illustré par une charge lente à travers les panneaux photovoltaïques le jour, suivie par une décharge tout aussi longue durant la nuit pour les besoins d'éclairage. Au vu de cela, il y aurait donc intérêt à ce qu'elles soient à cycle profond, afin d'optimiser l'utilisation de la capacité globale de stockage offerte, sans trop altérer la garantie spécifiée quant au nombre maximum de cycles autorisés avec un taux de décharge profonde (DoD) donné. En plus de ces performances techniques demandées par l'application elle-même, l'acquisition d'un moyen de stockage d'énergie dont dépendent en grande partie la fiabilité et le coût global de l'ensemble du lampadaire solaire en question, fait manifestement appel à d'autres considérations tout aussi importantes, notamment en matière de fiabilité, durée de vie et investissement (Capex et Opex). Face à cela, tout donneur d'ordre quant à un projet d'éclairage solaire, a manifestement intérêt à bien baliser les objectifs en élaborant des prescriptions aussi précises, claires et détaillées que possibles dans beaucoup de domaines, notamment technique, afin de les rendre facilement vérifiables à travers les solutions proposées. Dans cette optique, la qualité de la batterie de stockage et la conformité de ses performances avec celles attendues quant à la bonne marche du lampadaire dans l'environnement précisé (température ambiante, profondeur de décharge effective…), reste entre autres, un critère de recevabilité très important. C'est dans cette perspective, qu'un exposé succinct sur les principaux types de batteries d'usage courant dans les applications d''éclairage solaire, peut s'avérer utile, au moins lorsqu'il s'agit de mettre en avant certaines prescriptions techniques d'orientation dans le domaine et disposer d'indices utiles quant à leur validation une

fois le produit final réceptionné. Avant cela et afin de bien cerner les éléments critiques à prendre en considération à cet effet, un minimum de définitions relatives aux paramètres caractéristiques essentiels des batteries en général s'impose.

Définitions importantes

1- La capacité (C) d'électricité pouvant être stockée (emmagasinée) dans une batterie est exprimée en Ampère-heure (Ah) et constitue, avec la tension fixe de cette dernière (exemple: 12 V), les deux principales caractérisations que l'utilisateur doit spécifier en premier pour une application donnée. L'énergie qui peut y être stockée au sens physique du terme, est obtenue en multipliant les deux (capacité en Ah x tension en V) et s'exprime ainsi en Watt-heure (Wh). Toutefois, la capacité pouvant être réellement utilisée, dépend également de la rapidité avec laquelle elle est soutirée ou vitesse de décharge. Ainsi, la capacité C spécifiée est complétée par un indicateur supplémentaire n (Cn) qui correspond au nombre d'heures nécessaires pour soutirer la totalité de la capacité nominale Cn sous un courant nominal In défini par (In = Cn/n). Par défaut, le nombre n d'heures est généralement fixé à 10 (C10), toutefois, plusieurs autres paliers sont également utilisés pour caractériser les vitesses de décharge (C1, C5, C20, et C100) et sont spécifiés, entre autres, pour indiquer si la batterie en question est plus adaptée pour les décharges rapides (démarrage…) ou lentes (alimentation de charges régulières, servitudes…). Ainsi, pour une batterie de démarrage, on parle plutôt d'un régime de décharge en 5 h (C5), alors que pour une batterie solaire, il s'agit plutôt d'une décharge lente à courant faible et constant sur 100h (C/100).

Exemple : Une batterie de 12V/50 Ah, peut stocker jusqu'à 600 Wh, qu'elle peut restituer en 10 heures (C10) sur une charge imposant un courant nominal de 5A, ou en 100 heures (C100) si le besoin est de 0.5 A seulement.

Remarque: Il y a lieu de noter que plus la décharge est rapide, plus la capacité nominale pouvant être soutirée est réduite (Tableau 20). Ainsi, il y a lieu de bien spécifier la capacité de la batterie en tenant compte de la rapidité de décharge que l'application va imposer. Pour les batteries solaires, c'est généralement la capacité C10 (décharge en 10 heures) qui est assez représentative de leur mode d'emploi du fait de leur cyclage journalier (exemple: si la capacité indiquée est de C100 = 100 Ah, la capacité effective de la batterie pour une décharge sur 10 heures, serait de seulement 80 Ah (C10 = C100/1.25).

Tableau 20. Diverses présentations de la capacité d'une batterie et rapports caractéristiques.

Durée de la décharge de la batterie	Capacité indiquée pour la batterie	Capacité effective de la batterie comparée à C10
120 heures	C120	C120 = C10 x 1.28
100 heures	C100	C100 = C10 x 1.25
20 heures	C20	C20 = C10 x 1.09
5 heures	C5	C5 = C10 x 0.88
1 heure	C1	C1 = C10 x 0.61

2- L'état de charge ou SoC (State of Charge en anglais) exprimé en %, est le rapport entre la capacité résiduelle et celle nominale de la batterie. En d'autres termes cela représente le niveau minimum d'énergie à maintenir en permanence dans la batterie.

3- La profondeur de décharge ou DoD (Depth of Discharge) exprimée également en %, est le rapport entre la capacité d'énergie à utiliser en régime normal et celle nominale de la batterie, constituant ainsi le complément de l'état de charge (DoD + SoC = 100%), (Figure 138). En d'autres termes, cela représente la capacité théorique utilisable avant une nouvelle recharge, sans engendrer des dommages pouvant être irréversibles pour la batterie.

Exemple: Une batterie qui a une profondeur de décharge (DoD) de 30%, a un état de charge (SoC) de 70%.

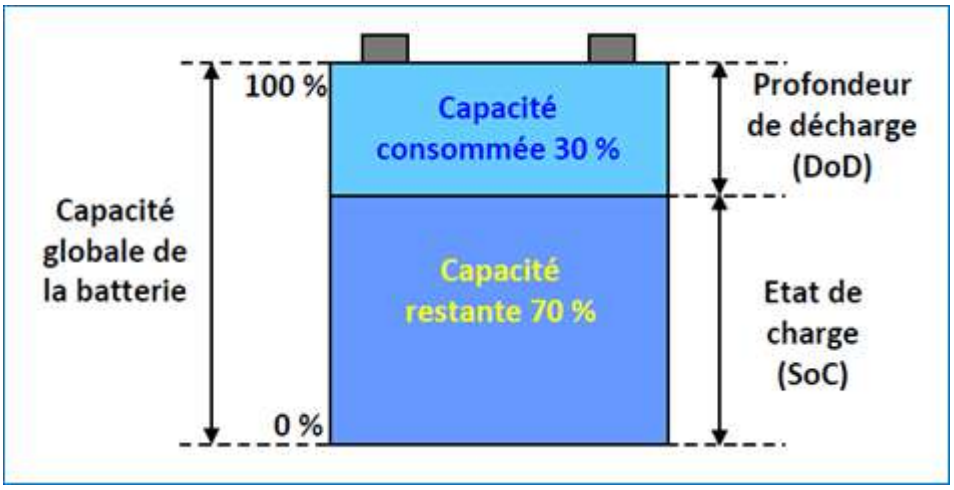


Figure 138. Illustration des divers états d'une batterie.

V.2.4.2.1. Stockage électrochimique et batteries solaires

Les batteries dédiées au stockage électrochimique de l'énergie électrique, ont plus d'un siècle d'existence et c'est le principe utilisé en premier, associant plomb et acide sulfurique, qui continue d'être à la source d'un grand nombre de produits répandus et adaptés pour divers usages dans le domaine.

1- Batterie plomb ouvert

Les modèles commercialisés depuis le début étaient à électrolyte liquide (flooded) et ouverts pour permettre à l'usager d'y apporter l'appoint nécessaire en eau distillée ou déminéralisée, en compensation des pertes par évaporation résultant de la décomposition (hydrolyse) de l'eau dans l'électrolyte en éléments constitutifs, soit l'hydrogène et l'oxygène. Ce type de batterie était essentiellement destiné aux applications nécessitant des appels importants d'énergie électrique pendant des courts instants comme pour le démarrage d'une voiture, avec une phase de recharge qui intervient juste après (cycle rapide). Il est par contre mal adapté pour les cycles charge-décharge lents, préférés pour les servitudes dont les besoins en énergie sont réduits mais étalés dans le temps comme les charges électriques usuelles d'une maison ou autre lieu de vie autonome (bateau, abri…), ce qui est le cas également pour l'éclairage solaire.

Dans le sillage du modèle ouvert décrit ci-dessus, sont apparues les batteries plomb-acide dites fermée, grâce justement à l'introduction d'un dispositif conçu autour d'une valve de régulation ou VRLA (Valve Regulated Lead Acid), permettant la récupération automatique en cycle fermé de l'eau résultant de l'évaporation inhérente à la structure originelle. Ainsi, le niveau de l'électrolyte reste pratiquement inchangé et ne nécessite aucun apport d'où un modèle de batterie étanche, scellé à vie et n'exigeant aucune maintenance. Finalement, c'est le développement de deux sous familles [172-173] de cette configuration qui a donné naissance aux premières batteries adaptées aux applications de servitudes ou solaires et dites sèches du fait que l'électrolyte liquide n'est plus libre mais emprisonné dans l'espace inter-plaques de plomb, selon deux procédés distincts :

2- Batterie plomb AGM

Dans ce cas, l'électrolyte est imprégné (Absorbé comme par un buvard) dans un tapis en fibres optique ou AGM (Absorbed Glass Mat). Contrairement aux configurations précédentes, qui supportent mal les décharges profondes, limitées en général à 50 %, celle-ci (AGM) autorise des DoD allant à 80% et résiste bien au cyclage lent. Il y a lieu de noter qu'au vu de leur prix et robustesse, les batteries AGM sont devenues une option assez intéressante pour un profil particulier d'installations solaires, notamment celles tolérant un certain encombrement.

3- Batterie plomb GEL

Comme pour l'approche AGM, l'électrolyte est plutôt gélifié au lieu d'être imprégné, en le combinant à un gel de silice. Les batteries à GEL ainsi conçues, admettent généralement un nombre plus important de cycles de travail que l'AGM et peuvent supporter une profondeur de décharge qui peut aller à 100%. Elles ont également

une assez bonne tenue aux températures basses et chaudes en autorisant une plage allant de -15 ° à + 50 °C et ce, comparées aux batteries AGM (0°C à 40 °C). Cet atout et d'autres font que les batteries GEL présentent un rapport qualité prix généralement plus favorable que celles du type AGM quant à leur utilisation comme moyen de stockage dans le domaine de l'éclairage solaire, notamment dans les zones à climat chaud.

4- Batterie Plomb-carbone

Une dernière amélioration assez récente des batteries AGM et GEL est venue proposer des alternatives très intéressantes à celles-ci, grâce à un additif de carbone au plaques de plomb utilisées, ce qui a ouvert la voie à de multiples avantages dont une durée de vie plus allongée (2000 cycles avec DoD=50%), une meilleure tenue aux températures (-40°C à + 65°C) et une endurance plus accrue à l'état de charge partiel ou PSoC (Partial State of Charge). Autrement dit, contrairement à la plupart des batteries traditionnelles pour lesquelles la recharge complète à l'issue de chaque cycle reste obligatoire pour valider la durée de vie affichée et de ce fait sont considérées non compatibles avec la norme PSoC, cela n'est plus nécessaire dans le cas de la batterie au plomb carbone. En effet cette dernière autorise bien le cyclage sans attendre la fin de la recharge complète après chaque décharge, évitant ainsi une opération qui peut prendre beaucoup de temps et ce, sans trop altérer sa durée de vie d'où le fait de la considérer comme conforme à la norme PSoC.

5- Batteries au Lithium

Malgré une chimie de base très similaire, il existe de nombreux types de batteries lithium-ion, dont la principale différence réside dans les matériaux rentrant dans la composition de la cathode, qui déterminent en fait à eux seuls l'essentiel des performances qui distinguent cette technologie par rapport à celle traditionnelle au plomb, notamment en termes de densité d'énergie et durée de vie (Tableau 21), justifiant ainsi son coût nettement plus élevé. Toutefois, concernant les applications liées aux énergies renouvelables, c'est la variante LFP (pour Lithium-Fer-Phosphate) ou (LiFePO4) qui prédomine du fait qu'elle présente une grande stabilité thermique lui attribuant d'excellentes garanties en matière de sécurité [174], une longue durée de vie et une bonne tolérance face aux contraintes caractéristiques de certains modes d'emploi.

Cela étant malgré une énergie massique moindre (environ 120 Wh/kg) par rapport à d'autres modèles de lithium-ion pouvant réaliser jusqu'à 200 Wh/Kg et plus (Figure 19) [175-176]. Ainsi le gain en volume et poids (2 à 3 fois moins à capacité de stockage égale par rapport aux batteries à base de plomb), conjugué à une utilisation possible à des températures allant à 70° C, les batteries lithium-LiFePO4 semblent prendre une longueur d'avance comme moyen de stockage d'avenir pour les énergies renouvelables.

Cela étant surtout si l'on sait que le prix des batteries lithium-ion a déjà chuté de près de 90% en 10 ans, alors que les dernières prévisions tablent déjà sur un prix moyen à moins de 100 dollars/KWh dès 2023.

Tableau 21. Durée de vie en nombre de cycles de diverses batteries et énergie massique.

Type de batterie	Nombre de cycles (T=25°C)/Profondeur de décharge DoD			Energie massique (Wh/Kg)	Rendement charge/décharge
	30 %	50 %	80 %		
Plomb ouvert	?	?	?	?	?
Batterie AGM	1500	600	400	20-40 (40-100 Wh/l)	50-92%
Batterie AGM Plomb-Carbone	1500	1000	?	?	?
Batterie GEL	1900	750	500	?	?
Batterie GEL Plomb-Carbone	2500	1750	?	?	?
Batteries Lithium LiFePO	6000	5000	2500	120-140	?

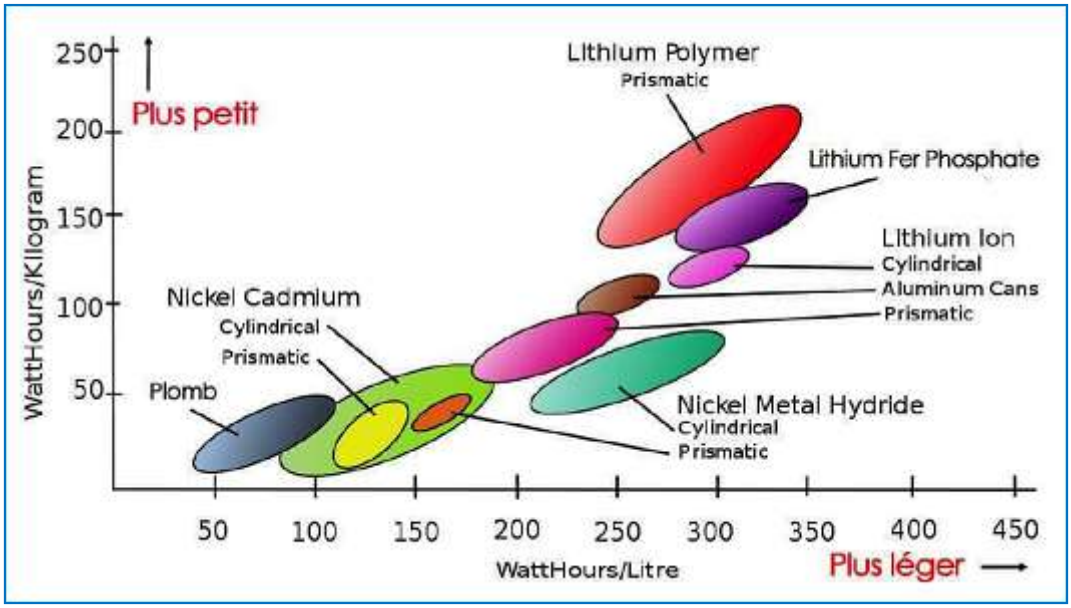


Figure 139. Illustration des diverses technologies de batteries et leurs performances.

V.2.4.2.2. Dimensionnement de la batterie

Le processus d'évaluation de la consommation électrique nécessaire pour une nuit (Tableau 17), dont la durée moyenne a été fixée à 13 heures (cas le plus défavorable d'une nuit d'hiver), le dimensionnement de la batterie de stockage peut être entamé en tenant compte de certains choix pratiques, qui doivent être fixés au préalable. Ces derniers se résument en premier lieu à l'autonomie désirée quant au nombre D de jours sans soleil (temps couvert…), où la capacité de la batterie doit être dimensionnée pour pouvoir assurer la continuité de service en alimentant normalement le luminaire à LED sur D+1 jours et cela, en fixant au préalable sa profondeur de décharge maximale DoD.

1- Autonomie

L'énergie estimée précédemment étant suffisante pour une seule nuit d'éclairage, il ya lieu de considérer le fait qu'elle est initialement générée à travers des panneaux photovoltaïques de jour avant d'être stockée dans une batterie pour être utilisée de nuit. Dans ce cas, se pose avec acuité le problème lié à la disponibilité de l'énergie nécessaire pouvant assurer la continuité de service lors d'un manque d'ensoleillement, notamment en cas de ciel couvert qui peut se prolonger sur un ou plusieurs jours successifs. A ce propos, un scénario de référence approchant au mieux la situation au cours de l'année, doit nécessairement être élaboré selon la localisation géographique du lieu, notamment ses caractéristiques climatiques et météorologiques essentielles. La prescription finale relative au sujet, est généralement présentée sous forme d'un nombre maximal D de jours successifs au cours desquels les radiations solaires directement perçues par le champ photovoltaïque concerné, sont supposées complètement absentes (nuages…) où très insuffisantes. Connaissant parfaitement la situation en la matière concernant l'Algérie, on peut dire qu'une durée maximale de deux jours successifs (D=2) où l'ensoleillement direct est absent, reste une bonne moyenne pour caractériser toutes les régions du pays, même si elles sont géographiquement très dispersées (régions désertiques du sud, hauts plateaux et littoral méditerranéen).

2- Profondeur de décharge

Il y a lieu de noter que la capacité finale de stockage dont dépend fortement le coût de la batterie ainsi que son encombrement en poids et volume, est étroitement liée à la profondeur de décharge (DoD) retenue en vue de son dimensionnement pour une durée de vie donnée avant son éventuel remplacement. Il convient donc de disposer au préalable d'assez d'éléments pouvant aider à fixer le type de batterie qui va être utilisée, notamment en matière de moyens financiers alloués à cela, car il va de soi que c'est à ce niveau que le choix des technologies les plus performantes en la matière se décide.

Pour un système d'éclairage solaire public, dont la durée de vie estimée peut aller jusqu'à vingt ans

et plus, les choix économiquement viables ne se mesurent pas sur la base de l'investissement initial mais sur l'ensemble des coûts induits durant tout son cycle de vie. Ainsi, un choix de batteries de stockage coûteuses mais ayant des performances beaucoup plus profitables sur le moyen et long terme à plusieurs égards, peut au contraire s'avérer extrêmement rentable sur le plan purement économique. Dans ce cas précis et sur la base d'analyses objectives très simples, il est possible de voir que le choix d'une batterie au lithium pouvant assurer 3000 cycles complets de travail (charge-décharge) avec un DoD de 80% présente depuis le début des indicateurs beaucoup plus favorables que celles garantissant au plus 1000 cycles avec un DoD de 50 % (Tableau 21).

En effet cette dernière doit probablement être remplacée plusieurs fois (4 à 5 et parfois plus) après l'installation initiale, alors que la première peut ne pas l'être du tout ou au plus une seule fois. Cela étant sans citer d'autres critères tout aussi importants, dont le fait qu'une batterie au plomb, est nécessairement beaucoup plus encombrante en poids et volume (2 à 3 fois plus) que celle au lithium et ce à capacité de stockage égale, d'où les surcoûts induits quant aux renforcements des structures permettant une intégration appropriée au lampadaire (aménagement éventuel d'une trappe, caisson étanche et mode de fixation au mât…).

Pour résumer, c'est le cout du service rendu en termes de KWh stockés et utilement consommés (convertis en lumière) tant que le dispositif d'éclairage en question est supposé rester fonctionnel, qui doit être à la base de toute évaluation rigoureuse en termes d'efficacité économique réelle des options initialement prises quant au choix des batteries de stockage retenues. Sur ce plan, de nombreuses études menées selon le même modèle d'approche appliqué à des d'exemples concrets, ont pratiquement toutes abouti aux mêmes conclusions, stipulant que le coût moyen du KWh avec les solutions à base de batteries au lithium est au final bien inférieur (dans un rapport de 2 à 3) à celui obtenu avec la solution à base de plomb. Sur ce plan et afin de maintenir tout de même les choix ouverts en la matière, une profondeur de décharge DoD de 60 % a été retenue comme base de travail, pour compléter le processus de dimensionnement de la batterie dans les deux cas d'éclairage solaire considérés.

L'ensemble des données nécessaires à l'évaluation de l'énergie globale Ebat que la batterie doit pouvoir stocker, soit de quoi satisfaire les besoins de trois nuits (D+1) successives d'éclairage avec un DoD = 60% et ce, suite à une autonomie fixée à deux jours successifs sans soleil (D=2), y compris les pertes du circuit batterie-luminaire à LED, fixées au préalable à 10 % (voir dimensionnement du champ PV), sont ainsi connus. Toutefois, pour évaluer le dernier paramètre caractéristique de la batterie qu'est sa capacité Cbat de stockage exprimée en Ampère-heure (Ah) selon les usages en la matière, il reste à fixer également sa tension nominale Ubat. Dans ce cas, les choix sont à l'évidence très limités puisqu'il s'agit de valeurs standards (12V, 24V, 36V, 48V….), dont au plus deux sont conformes aux besoins de l'éclairage solaire, qui utilise généralement les batteries 12V et 24 V.

Sur ce plan, et quoique plusieurs argumentations de natures diverses, peuvent être présentées pour étayer le choix de l'une ou l'autre des deux options, il y en a au moins une qui est simple et décisive, vu la nature de l'application. En effet, l'objectif prioritaire d'efficacité énergétique, milite en faveur de la tension la plus élevée, donc l'option 24 V, du fait que les courants seraient deux fois plus faibles qu'avec le 12 V à énergie échangée égale, d'où des pertes ohmiques induites 4 fois plus faibles pour l'ensemble des circuits concernés. Au final toute la procédure menant aux paramètres essentiels caractérisant l'aspect énergétique de la batterie, partant de l'unique charge consommatrice représentée par le luminaire à LED et ce dans les deux cas définissant les modes d'éclairage adoptés (Figure 132), sont résumés ci-après (Tableau 22).

V.2.4.2.3. Contraintes pratiques et choix final des batteries

Vu les nombreux critères qui peuvent influencer profondément sa durée de vie et même sa disponibilité momentanée, le choix final de la batterie doit être bien muri en ordonnant les priorités qu'exige l'application sans oublier les contraintes réelles qui lui sont inhérentes et dont les effets sont les plus marquants. Dans cette optique, il faut dire que les spécifications purement techniques affichées par les fabricants en général, notamment celles décrivant les performances essentielles en termes de cyclage

Tableau 22. Données nécessaires et dimensionnement de la batterie.

Consommation journalière du luminaire à LED	Cas-1	80W x 13 heures = **1040 Wh**
	Cas-2	(80Wx 5 h) + (40Wx8h) = **720 Wh**
Données préliminaires: Nombre de jours D d'autonomie sans soleil: D=2 Pertes du circuit batterie-luminaire = 10% ⇩		
Consommation globale (pertes incluses) durant trois nuits (D+1) successives d'éclairage, soit une autonomie fixée à deux jours successifs sans soleil (D=2)	Cas-1	**E1** = 1040 x 3 x 1.1 = **3432 Wh**
	Cas-2	**E2** = 720 x 3 x 1.1 = **2376 Wh**
Données préliminaires: Profondeur de la décharge maximale retenue pour la batterie : DoD = 60% Tension nominale retenue pour la batterie: U_{bat} = 24 V ⇩		
Capacité finale de la batterie	Cas-1	**C1** = 3432/(24 x 0.6) = **238 Ah**
	Cas-2	**C2** = 2376/(24 x 0.6) =**165 Ah**

(dynamique des charges et décharges et dans quelles conditions…), restent à l'évidence assez larges pour être concrètement exploitées de manière précise. Paradoxalement, cela laisse justement une certaine marge au non spécialiste dans le domaine, pour affiner son choix en fonction de considérations pratiques tout aussi importantes et laissant entrevoir des compromis utiles et nécessaires à la bonne tenue de la batterie. Sur ce plan, vu l'environnement assez contraignant que va imposer l'application visée, soit l'éclairage solaire en Algérie, notamment de longues périodes de chaleur où les températures frôlent les limites prescrites, toute prospective visant les batteries éligibles, doit impérativement orienter le choix vers les technologies adaptées à ce type d'environnement. Celles-ci doivent en effet autoriser un fonctionnement satisfaisant bien au-delà du seuil de 50 °C et ce, sans diminution excessive des performances par rapport à celles usuellement affichées pour des températures beaucoup plus clémentes (20 à 25 °C) [177-178]. En effet, plus que les températures ambiantes relativement élevées, caractéristiques de la plupart des régions du pays sur de longues périodes de l'année, il y a lieu de considérer également les effets amplificateurs liés au fait que la batterie peut être directement exposée au soleil, sans même l'aération adéquate (configurations all in one et all in two). Cela peut même être le cas avec la configuration all in three, lorsque la batterie est abritée dans un caisson étanche fixé au mât. Par contre et au cas où l'encombrement et le poids du pack de batteries le justifient, la solution d'une trappe souterraine comme abri, pourrait éventuellement apporter également une solution acceptable au problème que posent les températures ambiantes élevées en surface.

V.2.4.2.4. Régulateur de charge

Malgré que le coût du régulateur de charge reste faible comparé aux autres composants intervenant dans une installation autonome de génération d'électricité solaire comme c'est le cas ici, cela ne diminue en rien l'importance de son choix. En effet, c'est lui qui va conditionner l'efficacité énergétique de toute la chaîne de conversion ainsi que la durée de vie d'un élément essentiel qu'est la batterie de stockage. Dans cette optique, les deux types de régulateurs proposés sur le marché pour une gamme de puissance compatible avec celle des lampadaires solaires, s'articulent essentiellement autour de deux techniques distinctes [179], dont une seule aborde de manière rationnelle le volet important de l'efficacité énergétique, lié aux spécificités qu'a tout générateur photovoltaïque d'électricité solaire. Cependant et pour le reste, les deux types de régulateurs convergent, dès qu'il s'agit du suivi de l'état global de la batterie (charge, décharge…), ainsi que les modes de protection qui vont avec. Au final, il parait essentiel d'éclairer au mieux les éléments clés qui distinguent clairement chacun des deux types de régulateurs, afin d'orienter le choix au plus juste.

Régulateur MPPT

Etant données les caractéristiques typiques à tout module photovoltaïque comme générateur d'énergie électrique sous forme de courant continu (DC), notamment son aptitude à délivrer, pour une même irradiation solaire, une puissance maximale Pmpp pour un point de fonctionnement particulier, défini par une tension Vmp et courant Imp de sortie qui lui sont spécifiques (Figure 140). Ces dernières, désignent en fait une charge unique assimilée à une résistance Ropt (Ropt = Vmp / Imp), permettant justement d'optimiser au mieux le couplage du générateur photovoltaïque à sa charge, illustrant ainsi le concept d'adaptation d'impédance bien connu des électriciens en général [180-181]. Dans la pratique, la charge étant quelconque et souvent variable, c'est un algorithme automatique qui est presque systématiquement mis en œuvre selon divers protocoles, afin de rechercher le point de fonctionnement optimal et l'appliquer en temps réel, dans le but d'adapter continument le module à sa charge et faire bénéficier celle-ci du maximum de puissance possible pour un ensoleillement donné. L'implémentation de ce dernier, connu sous l'acronyme MPPT (Maximum Power Point Tracking), est réalisée au niveau d'un étage de puissance spécialement dédié qui s'intercale entre le module et la charge (batterie dans ce cas). En général, l'équipement réalisant cette fonctionnalité fait partie intégrante de l'ensemble de la chaine de conversion d'énergie solaire photovoltaïque avec ou sans stockage, en vue d'optimiser la quantité d'électricité produite tout en adaptant ses caractéristiques (tension, courant,…) aux besoins réels de l'utilisation finale. C'est ce même principe qui est le plus souvent à la base du régulateur de charge des batteries de stockage associées à tout lampadaire solaire, dont la mise en œuvre fait appel à des techniques numériques assez avancées pour permettre un rendement de conversion d'énergie allant à 99%.

Régulateur PWM

Lorsque les puissances mises en jeu restent relativement faibles, il existe une autre alternative de régulation plus simple, donc moins coûteuse, qui impose un cycle de charge classique à la batterie selon la technique connue de modulation de largeur d'impulsion ou PWM (Pulse Wave Modulation) [182]. Dans cette dernière c'est pratiquement la batterie qui impose sa tension (Ubat) au module photovoltaïque, forçant ce dernier à fonctionner en un point autre que celui optimal, occasionnant ainsi une perte de puissance (ΔP) par rapport à celle maximale (Pmp) d'autant plus importante que Ubat est plus faible que Vmp (Figure 140). Limiter cela impose finalement l'introduction d'une contrainte supplémentaire quant au choix préalable du module photovoltaïque, dont la tension optimale Vmp, fixée par le nombre de cellules qui le composent (généralement toutes mises en série), doit être bien adaptée à celle de la batterie, si on veut que la charge de celle-ci avec un régulateur PWM, ait un rendement énergétique acceptable. En fait, combien même cette condition est jugée satisfaite, il ya lieu de ne pas oublier que cela n'est garanti que dans les conditions standards (STC), du fait que Vmp, initialement spécifiée pour une température de 25°C, peut varier notablement avec celle-ci.

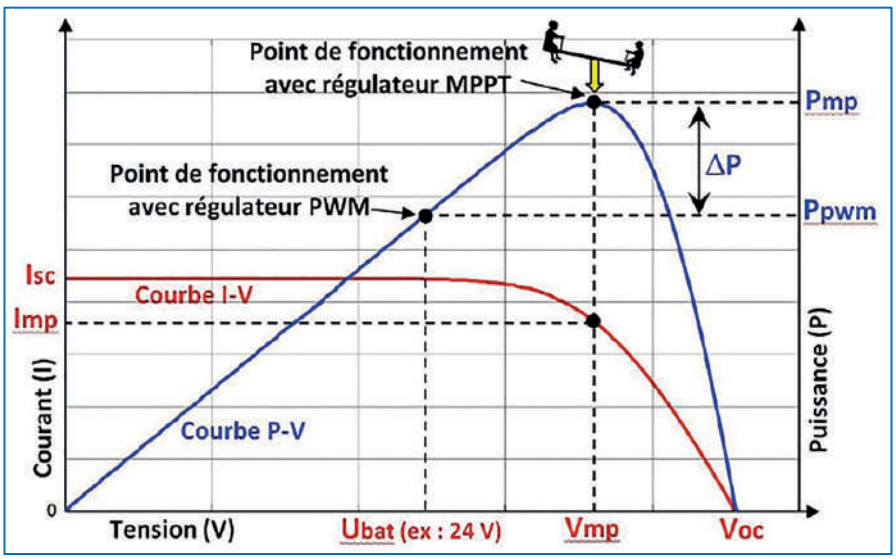


Figure 140. Illustration de l'efficacité des régulateurs MPPT et PWM.

En conclusion, on peut dire que l'adoption d'un régulateur de type PWM, malgré son coût relativement plus faible et sa fiabilité rassurante, nécessite quand même au préalable une évaluation assez précise du bilan énergétique qu'il occasionne et ce, sur un cycle bien représentatif du fonctionnement global du lampadaire solaire ainsi équipé. En tout état de cause, il est admis en général que le gain en énergie du régulateur MPPT par rapport au PWM, peut aller à 30% et plus.

V.2.4.2.5. Eléments de choix du régulateur

Choisir quel type de régulateur parmi les deux possibles (MPPT ou PWM), ne pose pratiquement plus de problèmes aujourd'hui, puisque l'ensemble des critères les plus significatifs, notamment ceux liés à l'efficacité énergétique, déterminants à plusieurs égards lorsqu'il s'agit d'applications autonomes d'éclairage solaire comme c'est le cas ici, penchent tous vers un régulateur de charge à base de MPPT. Cela en plus du fait que ce dernier, contrairement au PWM, permet une grande souplesse au niveau du choix du champ photovoltaïque, où pratiquement tous les types de modules peuvent être utilisés du moment que l'on reste dans les tolérances de tension et de courant du régulateur. Toutefois, le maintien du régulateur PWM dans la course sur le marché actuellement, reste exclusivement limité aux faibles puissances (< 200 Wc), où le rapport efficacité/prix pourrait jouer en sa faveur dans certains cas, notamment lorsque la tension de la batterie est du même ordre de grandeur que celle caractéristique du champ photovoltaïque associé (Figure140). Ainsi et en tout état de cause, une fois décidé le choix entre régulateur MPPT et PWM, il va falloir éclairer également les caractéristiques techniques que chacun doit satisfaire afin qu'elles soient conformes au champ PV et la batterie imposés. En effet, en tant qu'interface entre le champ photovoltaïque comme source d'énergie et la batterie comme récepteur, il va de soi que le transit d'énergie que le régulateur va opérer, nécessite bien certaines adaptations, notamment en termes de courant et tension:

1- En sortie et comme tout régulateur, il doit ajuster sa propre tension de sortie afin de contrôler le courant débité et l'adapter au profil de charge imposé à la batterie, réalisé généralement en trois phases (Figure 141) [183]. Il doit de ce fait, pouvoir assurer en sortie au moins le courant maximal caractéristique de la première phase (boost) et la tension maximale imposée durant la deuxième phase dite d'absorption, selon les aptitudes spécifiques à chacune des stratégies MPPT ou PWM [182].

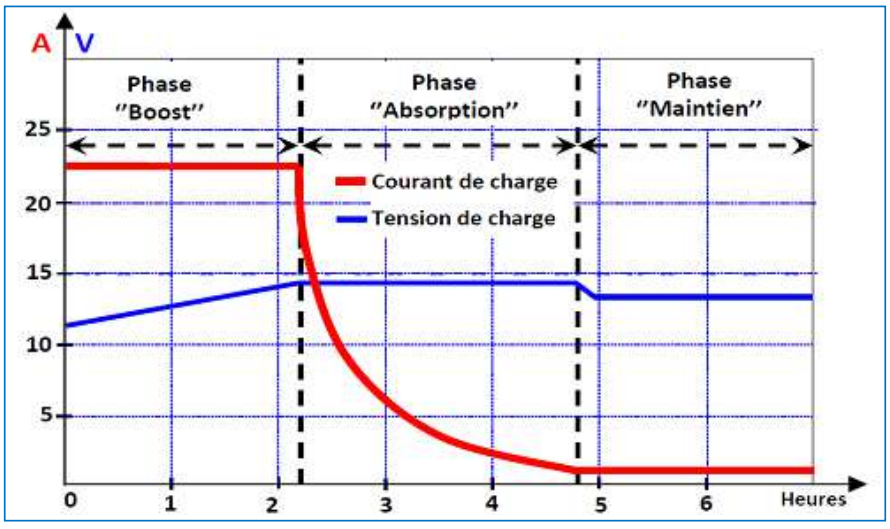


Figure 141. Diverses phases du cycle de charge de la batterie.

2- En entrée, il y a cependant une disposition spécifique à vérifier pour que le régulateur choisi (MPPT ou PWM), puisse assumer proprement son rôle. Celle-ci se résume principalement à une certaine nuance quant au rapport entre la tension de la batterie et celui du champ **photovoltaïque**:

- Cas avec régulateur MPPT:

Il faut une tension à vide du champ photovoltaïque (Voc) supérieure à celle nécessaire à la charge de la batterie et ce avec une marge adaptée (Exemple: 20% de Voc en plus, pour compenser l'effet de la température sur celle-

ci), pour que le régulateur MPPT puisse fonctionner correctement. Dans ce cas, ce dernier doit afficher une tension d'entrée égale à sa valeur normalisée juste au-dessus (75V, 100V, 150V ou plus). Quant à son courant d'entrée caractéristique, il doit être supérieur (avec une marge suffisante) au courant de court circuit Isc du champ PV. A titre d'exemple, pour un module de 330 Wc qui affiche une tension à vide Voc = 44,72 V et un courant de court circuit Isc = 9,75 A, le régulateur MPPT compatible (avec des marges suffisantes), serait celui autorisant en entrée une tension et courant normalisés respectivement égaux à 75V et 15 A.

- Cas avec régulateur PWM:

Au contraire, pour que ce dernier puisse afficher une efficacité énergétique acceptable, il y a intérêt à ce que la tension du champ photovoltaïque soit la plus proche possible (par valeurs supérieures) à celle de la batterie (Figure 140), ce qui est manifestement assez contraignant quant à trouver des configurations de modules qui vont avec. Pour ce qui est du courant d'entrée, il doit également être supérieur (avec une marge suffisante) au courant de court circuit Isc du champ PV. A titre d'exemple, pour un module de 115 Wc qui affiche une tension à vide Voc = 23,32 V et un courant de court circuit Isc = 6,61 A, le régulateur PWM compatible (avec des marges suffisantes), serait celui autorisant en entrée un courant normalisé de 10 A et supportant jusqu'à 47 V.

V.2.5. Kits complets d'éclairage solaire

Ayant finalisé le dimensionnement et la caractérisation des divers composants électriques et électroniques pouvant équiper un lampadaire solaire selon deux modes d'éclairage, une validation concrète et riche en informations complémentaires utiles sur l'ensemble du processus, peut être menée en constituant des Kits complets et homogènes sur la base des produits réels et disponibles sur le marché. Sur ce plan, la procédure adoptée n'a pas pour but d'astreindre la prospective menée aux cas jugés les plus représentatifs, mais vise plutôt à élargir l'aspect illustratif en diversifiant les choix et complétant au mieux la démarche suivie jusqu'ici par un maximum de supports concrets pouvant aider à faire ressortir des éléments d'analyse utiles et encore insoupçonnés.

Remarque : Dans cette optique, il y a lieu de signaler que tous les résultats présentés comme exemples ou d'illustrations, seront en fait donnés à titre indicatif car établis sur la base de certaines hypothèses qui ne sont pas forcément représentatives de l'ensemble des situations qui peuvent survenir dans la réalité. De ce fait, cela ne peut en aucun cas, représenter un cas général applicable quelque soit l'environnement de déploiement et la qualité du matériel utilisé pour sa mise en œuvre. Toutefois, il est toujours utile de disposer d'estimations même grossières mais fondées sur une analyse en harmonie avec le sujet et sur laquelle des modèles plus réalistes et précis peuvent y être greffés dès que les applications réelles sont abordées et leurs exigences précisées.

Avant de présenter les divers Kits de lampadaires solaires répondant aux besoins exprimés et constitués suite à une large analyse exploratoire, il est jugé utile de rappeler l'ensemble des prescriptions formulées au préalable et les résultats essentiels auxquels le processus de caractérisation et dimensionnement des divers composants est parvenu (Tableau 23) [184]

Tableau 23. Divers composants choisis pour équiper le lampadaire solaire d'intérêt.

Tableau 23.a. Choix du luminaire solaire à LED: 80 W, 24 V

Puissance nominale	80W
Marque de la cellule	Lumileds LUXEON 5050
Courant LED	50 mA
Flux lumineux	13200 lm
Efficacité lumineuse	165 lm /w
Tension d'entrée	24V DC
Température de couleur	3000K - 5700K
Index Rendu de Couleur (CRI)	> 70
Rendement	> 90%
Température	-40 ºC ~ +50 ºC
Dimensions	504*316*136 mm
Poids	6.1 kg
Durée de vie	100000 h

Tableau 23.b. Résumé des résultats relatifs au dimensionnement

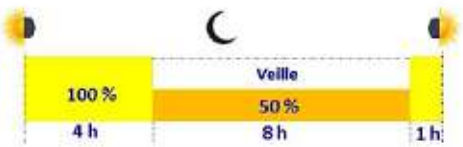
Cas-1 (Sans dimming)	Cas-2 (Avec dimming)
	
Puissances crête nécessaire	
321 Wc	223 Wc
Batterie : Tension, capacité et DoD	
24 V, 238 Ah, 60%	24 V, 165 Ah, 60%

Tableau 23.c. Choix des modules photovoltaïques

Type de Module	Silicium monocristallin
Puissance crête	175 Wc

Puissance nominale Pmpp	175 W
Tension à puissance max. Vmpp*	19.4 V
Courant à puissance max. Impp*	9.03 A
Tension en circuit ouvert Voc	23,7 V
Courant de court-circuit Isc	9,89 A
Dimensions Module	1485 x 668 x 30 mm
Poids Module	11 kg
Coefficient de température Pmpp (%)	-0,45/°C
Nombre de cellules couplées en série	36

Type de Module	Silicium poly-cristallin
Puissance crête	115 Wc

Puissance nominale Pmpp*	115 W
Tension à puissance max. Vmpp*	18.9 V
Courant à puissance max. Impp*	6.08 A
Tension en circuit ouvert Voc	22.73 V
Courant de court-circuit Isc	6.56 A
Dimensions Module	1015 x 668 x 30 mm
Poids Module	8 kg
Coefficient de température Pmpp (%)	-0,45/°C
Nombre de cellules couplées en série	36

Tableau 23.d. Choix des batteries

Type de batterie	Plomb GEL Carbone
Tension	12 V
Capacité nominale C10	143 Ah

Capacité nominale C20	150 Ah
Température	-20 °C à 50°c
Courant de charge max	37,5 A
Tension d'absorption	14,4 V
Tension de maintien	13,7 V
Durée de vie (DoD = 50%)	1500 à 1750 cycles
Durée de vie (DoD = 80%)	800 à 900 cycles
Dimensions batterie	522 x 221 x 240 mm
Poids Batterie	45 kg

Type de batterie	Plomb GEL Carbone
Tension	12 V
Capacité nominale C10	95 Ah

Capacité nominale C20	100 Ah
Température	-20 °C à 50°c
Courant de charge max	25 A
Tension d'absorption	14,4 V
Tension de maintien	13,7 V
Durée de vie (DoD = 50%)	1500 à 1750 cycles
Durée de vie (DoD = 80%)	800 à 900 cycles
Dimensions batterie	368 x 219 x 172 mm
Poids Batterie	30 kg

Tableau 23.e. Choix des régulateurs de charge

Régulateur MPPT -75 V -15 A

- Tension : 12 V ou 24 V détection automatique
- Courant de charge nominal : 15A
- Puissance nominale PV, 12 V : 220 W
- Puissance nominale PV, 24 V : 440 W
- Tension de charge « d'absorption » : 14,4 V/28,8 V
- Tension de charge « maintien » : 13,8 V/27,6 V
- Efficacité de crête : 98%
- Dimensions en mm : 100 x 113 x 40 mm
- Poids : 0,5 kg
- Rendement : 98%

Régulateur MPPT -75 V -10 A

- Tension : 12 V ou 24 V détection automatique
- Courant de charge nominal : 10A
- Puissance nominale PV, 12 V : 135 W
- Puissance nominale PV, 24 V : 270 W
- Tension de charge « d'absorption » : 14,4 V/28,8 V
- Tension de charge « maintien » : 13,8 V/27,6 V
- Efficacité de crête : 98%
- Dimensions en mm : 100 x 113 x 40 mm
- Poids : 0,5 kg
- Rendement : 98%

En plus des Kits de matériels adaptés à chacune des deux stratégies d'éclairage adoptées, celle nécessitant l'implémentation d'un contrôle d'intensité (Cas-2), a besoin d'un supplément de composants afin de réaliser deux fonctions essentielles: permettre la variation de l'intensité émise par la lampe LED (dimmer) et programmer les durées successives (minuterie) pour chaque niveau de luminosité. Une exploration rapide des produits disponibles sur le marché et pouvant réaliser cela, montre que l'offre en la matière est très diversifiée (Figure 142), tout en proposant une multitude d'options pratiques notamment concernant le mode de programmation (manuel, analogique, télécommande…) alors que les prix restent très abordables, comme pour tous les petits circuits électroniques compacts.

Figure 142. Exemples de variateurs de lumière pour éclairage à LED (Dimmer).

Toutefois, il faut dire qu'il y a de plus en plus sur le marché des régulateurs qui, en plus de la gestion à la fois de la production solaire et la recharge des batteries, intègrent toutes ces fonctionnalités, telle que la programmation automatique de l'allumage et l'extinction de la lampe avec contrôle du niveau d'éclairage et sa durée (Figure 143) ainsi que beaucoup d'autres options jugées utiles spécialement pour les applications d'éclairage solaire (détecteur de crépuscule, détecteur de proximité…). Mieux encore, une fonction qu'on peut appeler d'autogestion peut également y être intégrée (au régulateur) afin de bien surveiller la quantité d'énergie produite quotidiennement par le champ photovoltaïque ainsi que l'état de la batterie pour passer éventuellement à un protocole d'éclairage mieux adapté à une économie d'énergie pouvant offrir une plus longue autonomie. Enfin, comme réponse aux inhérents problèmes liés à la gestion d'un vaste réseau d'éclairage composé d'un grand nombre de lampadaires solaires, le régulateur de charge peut également intégrer des fonctionnalités de contrôle à distance pour chaque lampadaire de manière individuelle ou centralisée pour l'ensemble (Figure 144) [185] et ce, à travers divers supports de communication (Bluetooth, GSM…).Grâce à cela, les opérations usuelles de diagnostic et interventions de maintenance en tête de mât, peuvent aussi être réduites du fait qu'un certain nombre d'entre elles, peut également être effectué à distance.

Figure 143. Exemple de régulateur de charge adapté aux lampadaires solaires étudiés, avec possibilité de programmation de la lumière émise par la lampe à LED de 80W.

Figure 144. Exemple de régulateur de charge adapté aux lampadaires solaires étudiésavec programmation de la lumière émise par la lampe à LED et Gestion centralisée

V.2.5.1. Eléments d'assemblage du lampadaire solaire

Le câblage des différents composants, peut être effectué conformément à la Figure 145 dans le premier cas (sans contrôle de luminosité) et selon la Figure 146 pour le deuxième où la programmation pour un fonctionnement autonome selon le profil de variation de luminosité fixé au préalable (Figure 132), peut être menée avec l'ensemble proposé, constitué du dimmer (commande de la luminosité) et la minuterie (programmation des horaires de transition).

V.2.5.2. Considérations pratiques et évaluation

1- Dans le premier cas (sans contrôle de luminosité), vu le poids total des batteries (90 Kg), il est recommandé d'aménager une trappe souterraine pour les abriter et réduire en même temps leur exposition au soleil afin de leur assurer une température de fonctionnement (limitée au maximum à 45 °C) et aider ainsi à maintenir des performances acceptables lors des périodes de grande chaleur. L'option de placer les batteries dans un caisson étanche fixé au mât, reste cependant possible dans le

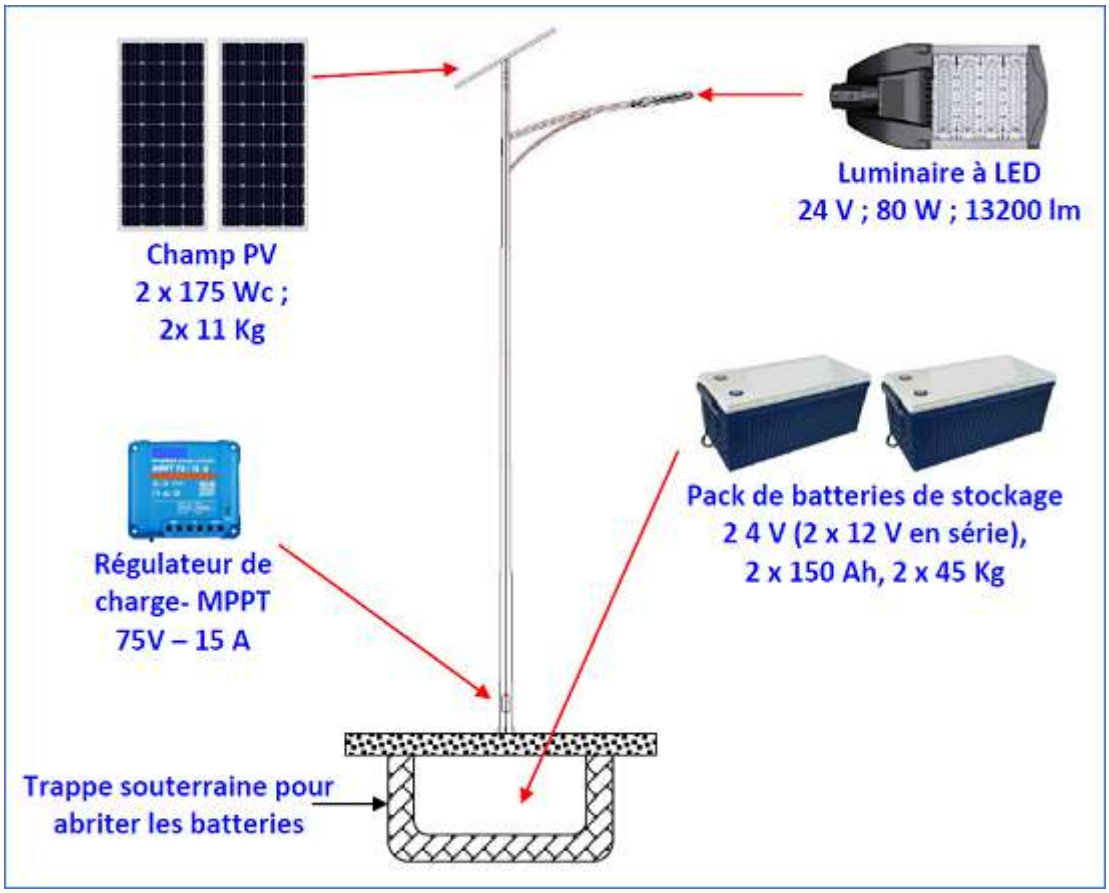


Figure 145. Configuration finale du lampadaire sans dimming (Cas-1).

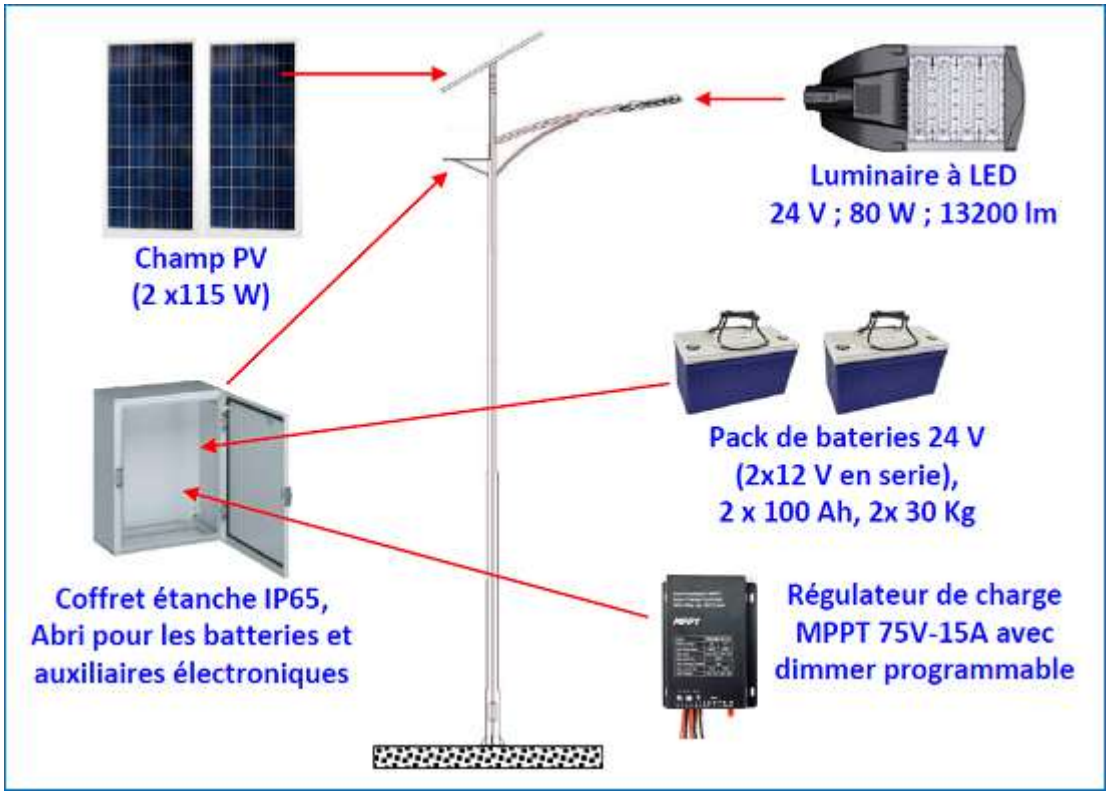


Figure 146. Configuration finale du lampadaire avec dimming (Cas-2).

second cas où le poids des deux batteries totalise 60 Kg. Il faut néanmoins bien analyser le problème des environnements chauds, notamment à l'intérieur confiné du boîtier malgré les aérations qui y sont aménagées, où la batterie serait manifestement exposée à des températures encore plus importantes que celles ambiantes. La solution la mieux adaptée dans ce cas est de placer la caisse contenant la batterie, son régulateur de charge et autres circuits électroniques auxiliaires (dimmer…), juste en dessous des panneaux photovoltaïques afin de profiter au mieux de leur ombrage. Il faut dire qu'un tel emplacement reste également avantageux du fait qu'il rend plus difficile l'accès à la batterie pour de multiples raisons (sécurité, vol..).

2- Afin de d'assurer encore plus d'autonomie au lampadaire, la commande du début de l'éclairage au crépuscule et son arrêt à l'aube, peut être réalisée en mettant à profit les propriétés du champ photovoltaïque lui-même, qui peut parfaitement jouer le rôle du détecteur de luminosité classique, généralement utilisé dans ce cas, moyennant la comparaison de sa tension à des seuils représentatifs. Cela peut en effet être mené avec des circuits électroniques additifs très simples et bon marché, hébergés au même titre que les autres circuits auxiliaires, pour donner en plus une meilleure fiabilité que le détecteur de luminosité classique. Quant à l'idée d'une commande centralisée à base d'horloge astronomique, elle n'est tout simplement pas adaptée à l'application en question, vu la lourdeur inhérente à sa mise en œuvre en plus du surcoût induit.

3- Il y a lieu de prévoir une structure en tête de mât, offrant la possibilité de régler l'inclinaison du champ photovoltaïque dans une fourchette suffisante (exemple ±10°) centrée autour de 30° qui reste une bonne moyenne pour le cas de l'Algérie, l'orientation étant plein sud.

V.2.5.3. Kit initial et autres alternatives

Afin d'illustrer divers critères de choix possibles (Polycristallin au lieu du monocristallin et inversement, module PV unique au lieu de deux, régulateur PWM…), d'autres alternatives aux composants initialement retenus à la première étape, sont également présentés dans le Tableau 24.

Tableau 24. Autre combinaison de choix possibles de composants pouvant servir dans les deux lampadaires solaires d'intérêt (Sans et avec gradation).

Tableau 24.a. Autres options pour le choix des modules photovoltaïques

Deux modules au silicium polycristallin de 36 cellules chacun (2x 175 W)

Puissance nominale Pmpp*	175 W
Tension à puissance max. Vmpp*	18.3 V
Courant à puissance max. Impp*	9.56 A
Tension en circuit ouvert Voc	21.9 V
Courant de court-circuit Isc	10.24 A
Dimensions Module	1485 x 668 x 30 mm
Poids Module	12 kg
Nombre de cellules couplées en série	36
Coefficient de température de Pmpp (%)	-0,45/°C
Coefficient de température de Voc (%)	-0,35/°C
Coefficient de température de Isc (%)	+0,04/°C
Résistance aux impacts (grêle)	23 m/s, 7,53 g

Deux modules au silicium monocristallin de 36 cellules chacun (2x 115 W)

Puissance nominale Pmpp*	115 W
Tension à puissance max. Vmpp*	19 V
Courant à puissance max. Impp*	6.04 A
Tension en circuit ouvert Voc	23.32 V
Courant de court-circuit Isc	6,61 A
Dimensions Module	1015 x 668 x 30 mm
Poids Module	8 kg
Nombre de cellules couplées en série	36
Coefficient de température de Pmpp (%)	-0,45/°C
Coefficient de température de Voc (%)	-0,35/°C
Coefficient de température de Isc (%)	+0,04/°C
Résistance aux impacts (grêle)	23 m/s, 7,53 g

Module au silicium monocristallin
72 Cellules (350 Wc)

Puissance nominale Pmpp*	350 W
Tension à puissance max. Vmpp*	39.3 V
Courant à puissance max. Impp*	8.91 A
Tension en circuit ouvert Voc	47.65 V
Courant de court-circuit Isc	9.2 A
Dimensions Module	1957 x 990 x 40 mm
Poids Module	22.5 kg
Nombre de cellules couplées en série	72
Coefficient de température de Pmpp (%)	-0.389/°C
Coefficient de température de Voc (%)	-0.273/°C
Coefficient de température de Isc (%)	+0.0344/°C
Rendement du module	18.06

Module au silicium polycristallin
de 60 Cellules (230 Wc)

Puissance nominale Pmpp*	230 W
Tension à puissance max. Vmpp*	30,30 V
Courant à puissance max. Impp*	7,60 A
Tension en circuit ouvert Voc	37,20 V
Courant de court-circuit Isc	8,14 A
Dimensions Module	1650x990x35 mm
Poids Module	22 kg
Nombre de cellules couplées en série	60
Coefficient de température de Pmpp (%)	-0.45/°C
Coefficient de température de Voc (%)	-0.35/°C
Coefficient de température de Isc (%)	0.05/°C
Rendement du module	14.00

Tableau 24.b. Autres options pour le choix des batteries

Deux batteries
2x (12 V, 150 Ah)

Type de batterie :	Lithium LiFePO4
Tension nominale :	12.8V
Capacité nominale :	150Ah, 25ºC,C10
Énergie nominale :	1920WH 25ºC,C10
Dimension (L x P x H):	327 x 172 x 238mm
Poids :	16kg
Indice de protection:	IP56
Le cycle de vie de 100%DOD :	>3000 cycles à 25ºC et C10
Le cycle de vie de 80%DOD :	>4000 cycles à 25ºC et C10
Le cycle de vie de 50%DOD :	>6000 cycles à 25ºC et C10
La tension de charge max :	14,4 V
Courant de charge max :	50A
Courant de décharge max :	100A
Température de charge	0 °C à 45 °C
Température de décharge	-20°C à 60 °C

Deux batteries
2x (12 V, 90 Ah)

Type de batterie :	Lithium LiFePO4
Tension nominale :	12.8V
Capacité nominale :	90Ah 25ºC
Énergie nominale :	1152 Wh 25ºC
Dimension (L x P x H):	350 x 167 x 192 mm
Poids :	12 kg
Indice de protection:	IP55
Le cycle de vie de 100%DOD :	> 2500 cycles
Le cycle de vie de 80%DOD :	> 4000 cycles
Le cycle de vie de 50%DOD :	> 6000 cycles
La tension de charge max :	14,6 V
Courant de charge max :	30A
Courant de décharge max :	90 A
Température de charge	- 0 °C à + 50 °C
Température de décharge	-20°C à 65 °C

Tableau 24.c. Autres options pour le choix du Régulateur de charge

Régulateur PWM
12/24 V , 10 A

Tension finale de charge	13,9 V (27,8 V)
Tension de charge rapide	14,4 V (28,8 V)
Charge d'égalisation	14,7 V (29,4 V)
Dimensions	187 x 96 x 45 mm
Poids	345 g
Tension max du panneau	< 47 V
Courant max panneau	10 A

V.2.5.4. Configuration adoptée et éléments d'évaluation

Les caractéristiques du luminaire à LED adopté (Tableau 23.a), le prédestinent en fait à un large éventail d'applications comme source lumineuse pour un éclairage routier conforme aux normes les plus significatives dans le domaine (Tableaux 11 et 12). En effet l'éclairage résultant, évalué selon des hypothèses simples, montre que dans le cas le plus contraignant, soit un déploiement sur un mât de 12 mètres de hauteur, il reste acceptable avec un éclairement de 29.2 Lux sur une surface au sol qui s'étale sur 1357 m^2 (Figure 147 et Tableau 25). Plus encore, en se basant sur des données photométriques prises comme référence à titre indicatif (Figure 148), ainsi que les règles usuelles permettant d'évaluer l'inter-distance appropriée entre lampadaires (Figure 117), on peut déduire qu'un éclairage satisfaisant reste possible avec le lampadaire solaire dimensionné, même pour des voies à grandes circulation. En effet et à titre d'exemple, pour une largeur de route imposée dépassant les 12 mètres, une implantation unilatérale de lampadaires solaires tels que ceux présentés (Figure 145 et 146), avec une inter-distance allant à 40 m, serait suffisante pour offrir un éclairage aux normes (Tableaux 11 et 12).

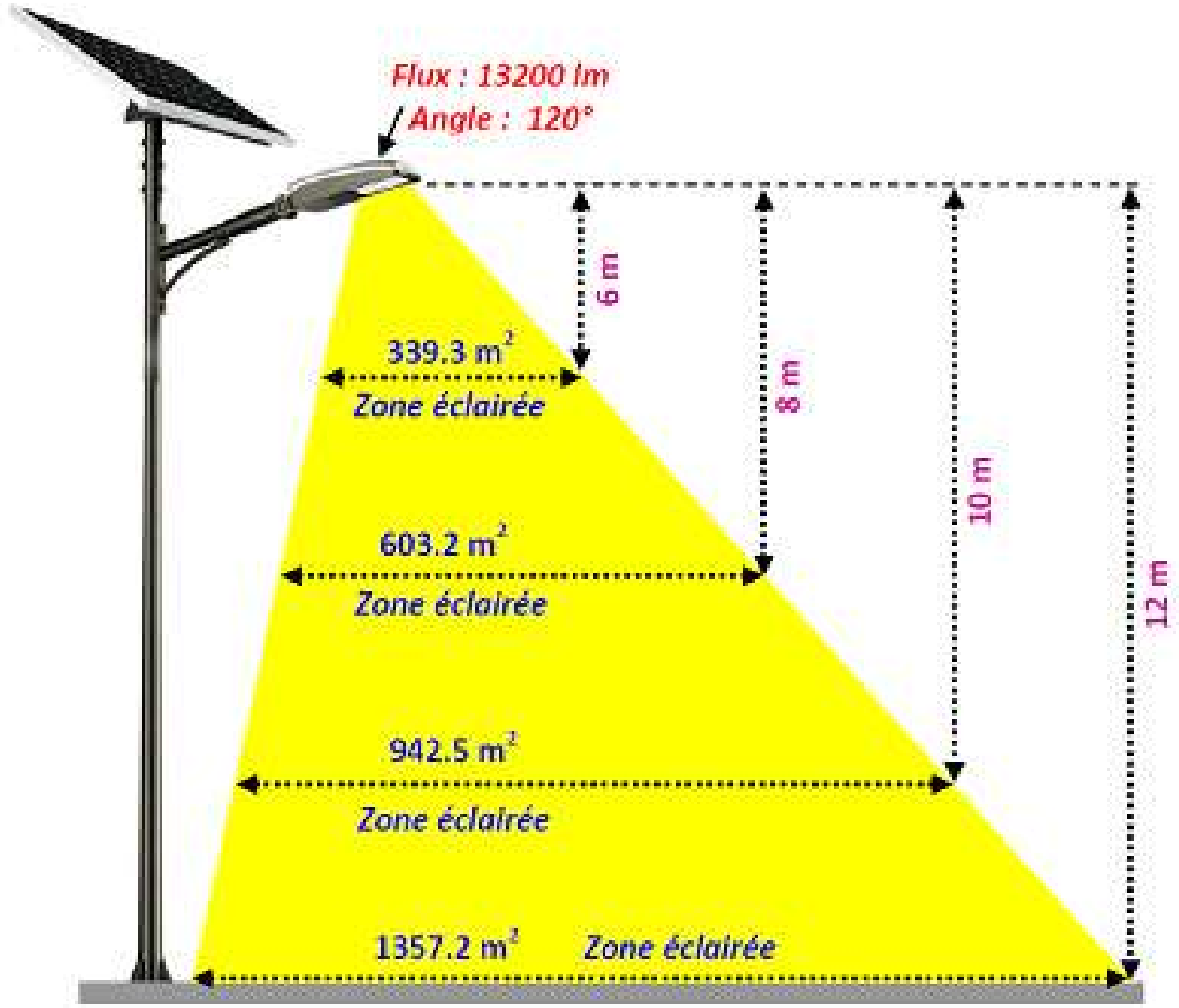


Figure 147. Lampadaire solaire dimensionné et illustration de l'éclairage résultant

Tableau 25. Lampadaire solaire déployé et caractéristiques de l'éclairage résultant

Hauteur du luminaire (flux 13200 lm)	Zone éclairée		Intensité lumineuse (Candela)	Eclairement lumineux de surface (Lux)
	Rayon (m)	Surface (m^2)		
6	10.4	339.3	4201.7	116.7
8	13.9	603.2	//	65.6
10	17.3	942.5	//	42.0
12	20.8	1357.2	//	29.2

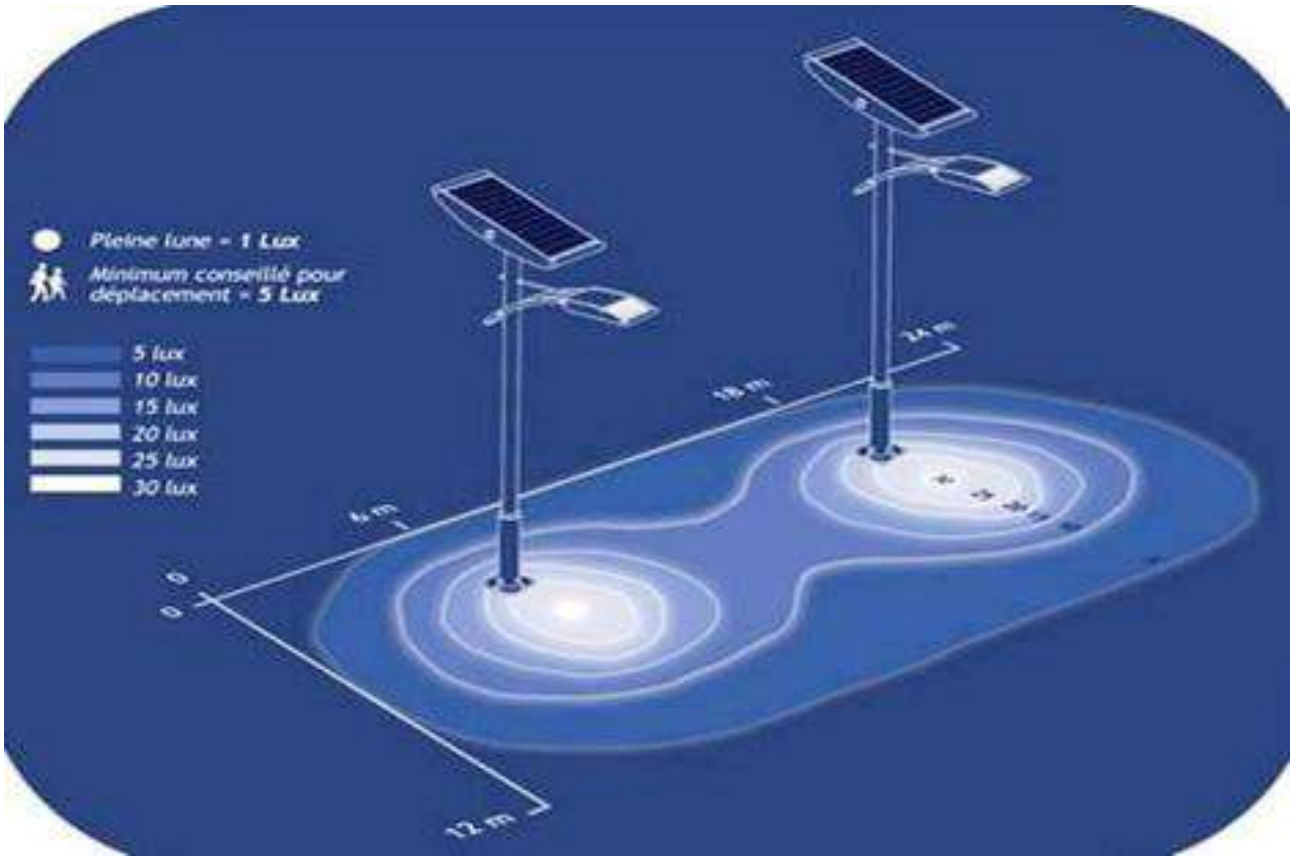


Figure 148. Lampadaires solaires et illustration d'une distribution typique de la lumière.

CHAPITRE VI

Transition énergétique et éclairage public: Nouveaux projets et/ou rénovation de l'existant

Aucune étude analytique sur l'évolution de l'éclairage artificiel à ce jour, ne peut échapper au constat que durant les dernières années, ce domaine est entrain de subir une profonde métamorphose et ce à un rythme accéléré avec l'avènement de la technologie des diodes électroluminescentes ou LED [186-187]. En effet, en se limitant aux seuls moyens d'éclairage à base d'électricité, on peut noter que les technologies successives, qui ont toujours coexisté pratiquement à ce jour, y compris celle à incandescence qui a fait son apparition il y a plus d'un siècle, sont entrain de céder sans ménagement la place au nouveau conquérant [188-189]. Ainsi, en plus des interdictions de commercialisation qui ont touché quelques types (incandescence, mercure…) et ce il y a à peine une dizaine d'années, pour des raisons d'efficacité énergétique obsolète ou toxicité, des stocks de lampes à décharges (mercures, sodium halogénures métalliques…) sont entrain d'être écoulés à la va vite ou carrément détruits (mercure), pour laisser place dorénavant aux lampes à LED, qui ne représentaient que 2% au plus il y à peine 10 ans [189].

VI.1. Efficacité lumineuse et évolution du marché de l'éclairage

Le remplacement des lampes conventionnelles par des LED, fait dorénavant partie des actions phares de toute stratégie de transition énergétique dans beaucoup de pays du monde, comme l'attestent les derniers taux de progression de cette technologie face aux autres (Figure149) [190-193].

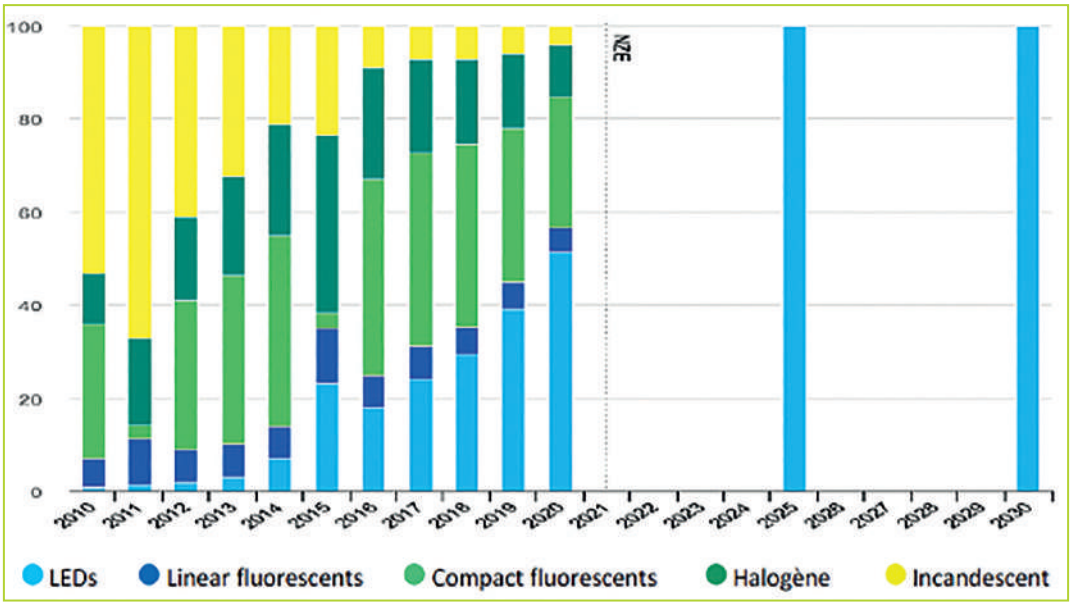


Figure 149. Evolution du marché mondial de l'éclairage 2010-2020 et scénarios pour 2030

Remarque: Des rapports datant d'il y a à peine une dizaine d'années, imputés à des organismes internationaux, spécialement créés pour la transformation du marché mondial vers des technologies d'éclairage efficaces, ne faisaient aucune mention des LED. Ces derniers montrent en effet qu'à l'époque, le pari était sur les lampes compactes à fluorescence (CFL), sans référence aucune aux LED comme c'est le cas du rapport intitulé «Rapport régional sur l'éclairage efficace au Moyen-Orient et en Afrique du Nord » publié en 2011 par « en.lighten initiative » du PNUE-FEM [194].

Le principal moteur qui a fait tourner assez récemment les regards vers les LED, reste manifestement leur efficacité lumineuse qui a fait des bonds prodigieux (Figure 85) en si peu de temps et dans une période cruciale pour la mise en place de stratégies économiques fondées sur une efficacité énergétique sûre et d'avenir, pour accompagner le monde dans sa transition vers un environnement durable [195]. Dans cette optique, les LED ont en effet réuni pas mal d'atouts pour permettre une réduction significative et à la hauteur des attentes les plus ambitieuses en termes de réduction de la facture énergétique de l'éclairage dans le monde. Cette dernière, qui représentait pratiquement le cinquième de la consommation mondiale d'électricité en 2018 (Figure 150) [196], est en effet entrain de décliner selon des signes probants, suite à l'intégration massive des LED durant ces dernières années, notamment au niveau des secteurs résidentiel et commercial, dont les besoins

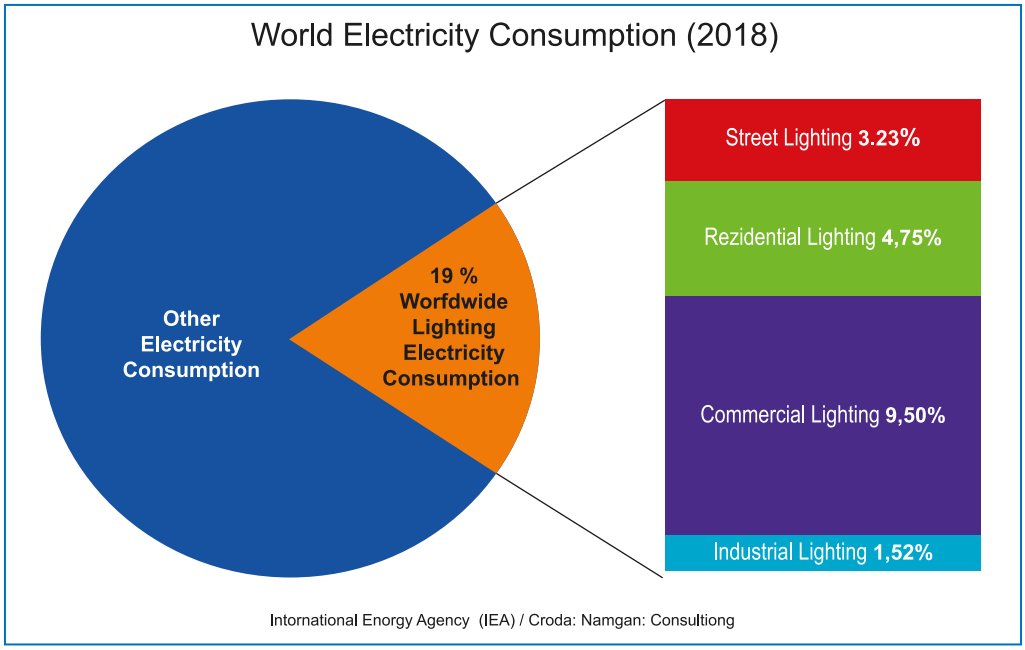


Figure 150. Consommation électrique de l'éclairage dans le monde en 2018.

d'éclairage sont de loin les plus importants (Figure 150) [190, 197-198].

VI.2. Eclairage public et intégration des LED

La flexibilité de la technologie des LED a rapidement permis aux fabricants de proposer des solutions bien adaptées aux diverses situations prévisibles et ce, face à l'introduction presque forcée des nouvelles sources lumineuses dans le paysage de l'éclairage public, que ce soit au niveau des infrastructures existantes, nouvelles ou en projet [199-200]. Si pour les deux derniers cas, l'approche est simple car les diverses prescriptions sont coordonnées et prises en charge à la source, le premier cas pose par contre des problèmes évidents d'adaptation technique, afin d'intégrer au mieux les sources lumineuses à LED, à des supports (mâts, luminaires, auxiliaires…) qui ne leur étaient pas initialement destinés [201-203]. Finalement les choses se sont arrangées très vite, puisque de grands projets de remplacement des lampes jadis usuelles de l'éclairage public, telles que celles au sodium haute pression (HPS), halogénures métalliques (MH) et autres à vapeur de mercure ou fluorescentes, ont été initiés au niveau d'une multitude de grandes agglomérations urbaines dans le monde il y a déjà plusieurs années [203-204]. C'est justement suite aux premiers retours d'expérience encourageants de ces projets, qu'une pression encore plus forte a été ressentie, pour aller encore plus vite vers des scénarios avec un éclairage à 100% LED et à des échéances aussi proches que 2025 à 2030 (Figure149). Il faut dire que les progrès en matière d'économie d'énergie avec l'éclairage à base de LED, permettent déjà des réductions de la consommation électrique dans le domaine de l'ordre de 50 à 60% et plus, selon des analyses émanant de sources crédibles, qui ajoutent que des progrès supplémentaires restent également possibles à court terme avec le dynamisme qui caractérise le secteur actuellement. Ainsi et à titre d'exemple, même les démarches qui tablaient sur un échéancier étalé de remplacement des lampes classiques jugées encore performantes, telles que celles au sodium (HPS) ou aux halogénures métalliques (MH) dans l'éclairage public, se sont avérées moins intéressantes qu'un plan de remplacement immédiat. En effet, vu la durée de vie beaucoup plus longue pour les systèmes d'éclairage avec LED, la flexibilité des moyens à mobiliser pour leur diagnostic, maintenance et gestion, leur mise en place sans attendre la fin de vie de leurs prédécesseurs à base de lampes à décharge (HID et MH), ni l'épuisement des stocks existants, peut s'avérer beaucoup plus payante à moyen et long terme. Sur le même plan, les dernières hésitations soulevées quant aux éventuelles incidences sur la santé de la lumière émise par les LED, notamment à cause de sa composante bleue et son effet néfaste

sur le rythme circadien (sommeil et réveil quotidiens), ont été fortement atténués suite à la publication des nombreux rapports sur le sujet par les plus grandes instances officiellement concernées dans le monde. En effet, ces dernières sont pratiquement unanimes sur le fait que les LED ne présentent aucune préoccupation particulière pour le danger sensé être provoqué par la lumière bleue, comparativement à d'autres sources courantes dans des conditions d'utilisation typiques [61, 205-206].

VI.2.1. Stratégies d'intégration en masse des LED à l'éclairage public

L'éclairage public reste un élément essentiel de l'environnement urbain et représente généralement entre 40 et 50% d'une facture moyenne d'électricité pour une ville. Selon certaines statistiques, le nombre total de lampadaires éclairant les routes et voies de circulation dans le monde, avoisine actuellement les 317 millions alors que des projections estiment qu'il peut atteindre 363 millions à l'horizon 2027.

Quoiqu'il existe des données en abondance sur des projets précis d'intégration des LED à divers dispositifs d'éclairage public plus ou moins étendus (grands axes routiers, quartiers, agglomérations urbaines….), elles concernent cependant des projets isolés et ne faisant pas partie de stratégies globales à l'échelle de tout un pays. Il existe néanmoins certains cas ou une coordination assez centralisée, au moins sur le plan de la collecte des données et leur diffusion, accompagnées d'analyses pertinentes sur l'état d'avancement de l'opération. Un tel rôle est assumé à titre d'exemple par le Département d'Etat Américain de l'énergie (DOE), qui assure le suivi de l'évolution de l'intégration des LED dans tous les domaines de l'éclairage aux USA, y compris public et publie régulièrement des rapports très détaillés sur la situation. Ainsi, il y apparaît que les lampes au sodium haute pression (HPS) qui dominaient l'éclairage routier aux USA avec plus de 65% en 2016, représentaient moins de 47% en 2018 alors que sur la même période les LED ont progressé de 28 à 48,6% sur les 50 millions de points lumineux illuminant les seules voies de circulation (Figure 151). Quant aux aires de stationnement (parkings), dont l'éclairage était pratiquement à moitié (48,7%) assuré par les lampes aux halogénures métalliques (HM) en 2016, les LED qui ne représentaient que 28% à la même date, ont pratiquement doublé en l'espace de 3 années, en équipant 54% des 50,1 millions points lumineux que comptent l'ensemble des parcs de stationnement aux USA (Figure 152) [194].

VI.2.2. Exemple de projet de remplacement de lampes HPS par des LED

En 2014, le gouvernement thaïlandais a décidé que le coût de maintenance élevé des anciens lampadaires à base de HPS de Bangkok, justifiait

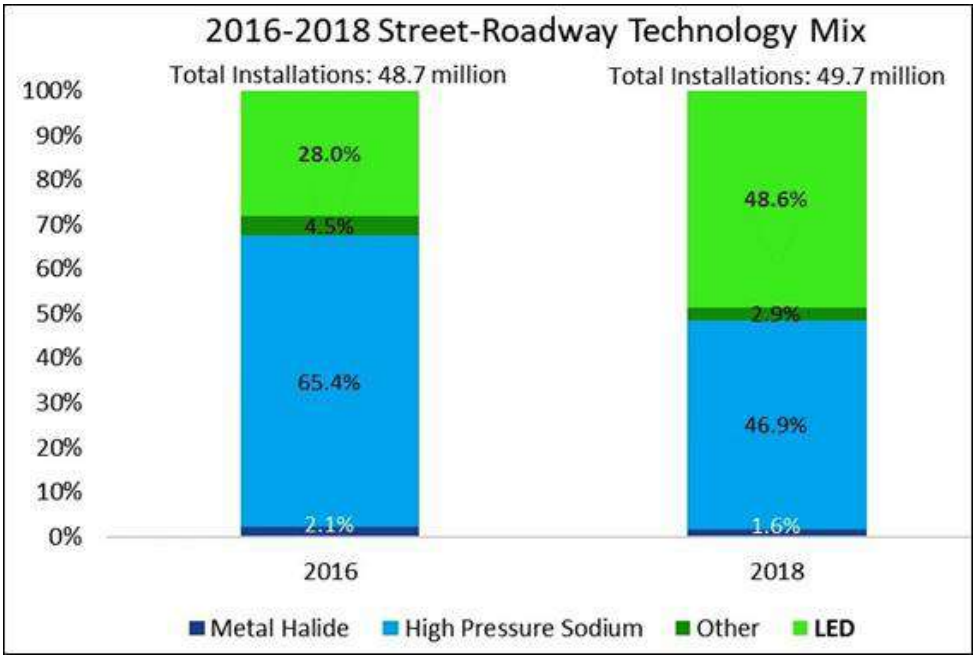


Figure 151. Taux de pénétration des sources lumineuses à LED au niveau de l'éclairage des rues et routes aux Etats Unis, de 2016 à 2018.

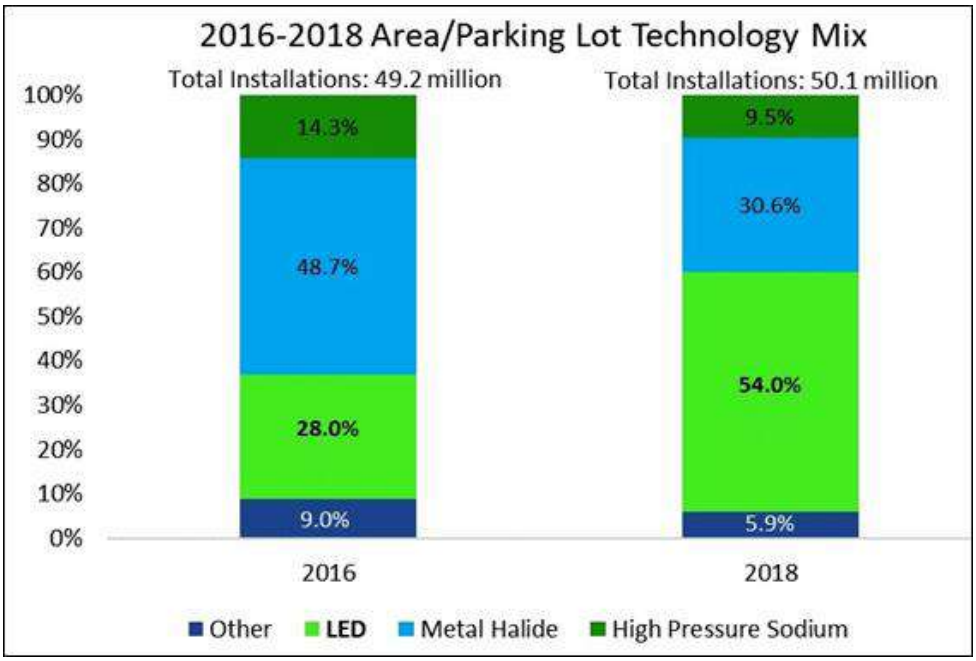


Figure 152. Taux de pénétration des sources lumineuses à LED au niveau des Parcs de stationnement (parkings) aux Etats

une étude pour voir si leur remplacement par des LED est profitable à la ville. Résultat, un projet visant l'installation de 400000 lampadaires à LED sur les grands axes routiers de la ville et 10000 lampes à LED dans des zones résidentielles avec l'objectif de réaliser jusqu'à 70% d'économie d'énergie. Pour la réalisation, le fabricant local de systèmes d'éclairage qui a été retenu, a proposé des luminaires à LED (Figure 153) [207]. ayant une efficacité lumineuse de 100 lm/W (2015).

Figure 153. Luminaire à LED adopté pour équiper 400000 points lumineux à Bangkok, en remplacement de ceux à base de sodium (HPS).

VI.2.3. Exemple de projet d'éclairage solaire

Le cahier des charges du projet visant la dotation des routes du Sénégal de 50000 points lumineux à base d'éclairage solaire, soit le tiers des besoins du pays, a été proposé aux soumissionnaires en 2017, dont celui retenu a estimé le cout du projet à 87 millions d'euros, avec des configurations éclatées (Split all in two). Pour la réalisation, une filiale a été créée au Sénégal en 2018 et a déjà finalisé la moitié des installations (Figures 154) [208] malgré le ralentissement des travaux à cause du Covid 19.

Figure 154. Exemples de réalisation du projet de 50000 lampadaires solaires, lancé pour éclairer 30% du réseau routier au Sénégal.

VI.2.4. Remplacement des lampes HID par des LED (Relamping)

Vu la dynamique du marché d'éclairage en général, notamment public à base de LED, tirée par une demande toujours croissante dans le sillage des politiques de transition énergétique qui sont entrain d'être opérées dans le monde, l'offre de qualité est sous forte pression avec l'arrivée massive sur le marché d'une très large gamme de produits (lampes, luminaires, drivers,…..), parmi lesquels il est très difficile de se retrouver, même pour un initié du domaine [209-210]. Or, le risque d'un mauvais choix dans ce cas, peut avoir des conséquences désastreuses en termes de coût et durabilité de la solution, qui est sensée tenir pendant dix ans et plus avec des seuils de qualité et fiabilité irréprochables. C'est dans de telles situations qu'apparait toute l'utilité des normes dans le domaine, lorsqu'elles sont établies sur des bases solides et rigoureusement appliquées en toute transparence, pour réglementer la qualité des produits mis sur le marché local, notamment sur des points clefs qui font la vraie différence en matière de qualité, donc de prix. Cela étant exclusivement du ressort des autorités nationales compétentes, il reste toutefois un certain nombre de choix cruciaux dans ce cas précis, qui dépendent exclusivement des compétences du client prescripteur comme utilisateur final [211-213], à qui incombe la mission de bien cadrer les options demandées et s'assurer que ce qui est spécifié comme performances dans le cahier des charges, soit bien en accord avec au moins l'essentiel des objectifs. Sur ce point et concernant le sujet d'intérêt, ces derniers peuvent explicitement se résumer à la demande d'une source lumineuse en remplacement d'une autre, pouvant assurer au moins les mêmes performances et qualités photométriques (nombre de lumens ou autres), mais avec une consommation électrique plus faible comme le permettent les LED [214-215]. En d'autres termes et pour être précis, il est souvent question de fixer la puissance et l'efficacité lumineuse appropriées pour la source lumineuse à LED au préalable, car le prix unitaire final en dépend et surtout le gain énergétique, sensé en découler qui a principalement motivé le remplacement en question. Il apparaît ainsi qu'on est dans une situation où un critère de dimensionnement d'apparence banale d'habitude, prend une importance capitale, surtout lorsqu'il s'agit d'un achat massif dans le cadre d'un projet d'envergure, visant la modernisation d'un dispositif complet d'éclairage public, à travers l'introduction de luminaires à base de LED dans le but de faire des économies substantielles sur sa consommation globale d'énergie électrique.

En fait, étant données les grandes disparités dans les équivalences affichées entre LED et autres sources lumineuses (HPS, MH, CFL…) [211-212], notamment en termes de puissance pour répondre aux mêmes besoins d'éclairage, il est très difficile de se retrouver. Dans cette optique, certains éléments d'information simples mais rationnels, tels que ceux présentés dans la première partie du présent travail et se rapportant à la caractérisation des sources lumineuses d'intérêt pour l'éclairage public, peuvent être avantageusement exploités pour faire le bon choix.

En tout état de cause et à défaut de soumettre à une vérification rigoureuse, les divers choix présentés dans un cahier des charges relatif à un projet d'envergure portant sur la rénovation à base de LED d'un nombre important de points lumineux d'éclairage public, la sagesse veut que des tests préliminaires soient menés sur des échantillons représentatifs à base de protocoles démonstratifs simples mais significatifs.

VI.3. Eléments pratiques de remplacement des lampes HID par des LED

Concernant les infrastructures d'éclairage public en place, il existe des solutions d'échange standards bien adaptées, qui vont jusqu'à exploiter au maximum les équipements optiques des luminaires associés aux lampes HID (réflecteur, douille de fixation…), qui sont appelées à être remplacées par des LED équivalentes (Figures 69, 79 et 155) [203, 213-218]. Dans ce cas, des constats préliminaires ainsi que des essais comparatifs sur la qualité d'éclairage à base des luminaires ainsi constitués avec les LED, peuvent être facilement effectués (Figure 156 et 157), avant même la rédaction d'un cahier des charges final et faire y figurer tous les correctifs et autres détails constatés de visu. Autrement et faute d'être décelés à temps lors des essais réels préliminaires ainsi menés, certains problèmes auraient abouti à des impasses sur les plans financiers et juridiques avec le prestataire, sans parler de l'indisponibilité prolongée au profit des usagers.

Remarque: Il y a lieu d'éliminer (découpler) les ballasts en place afin d'amener sur la douille la pleine tension (230 V, 50 Hz), car les lampes LED de remplacement ont leur propre driver intégré (Figure 156) [213, 218].

Figure 155. Modèles de lampes LED pour remplacement standard des lampes HID (HPS et MH).

Figure 156. Illustration d'échanges standards de lampes MH et Mercure par des LED.

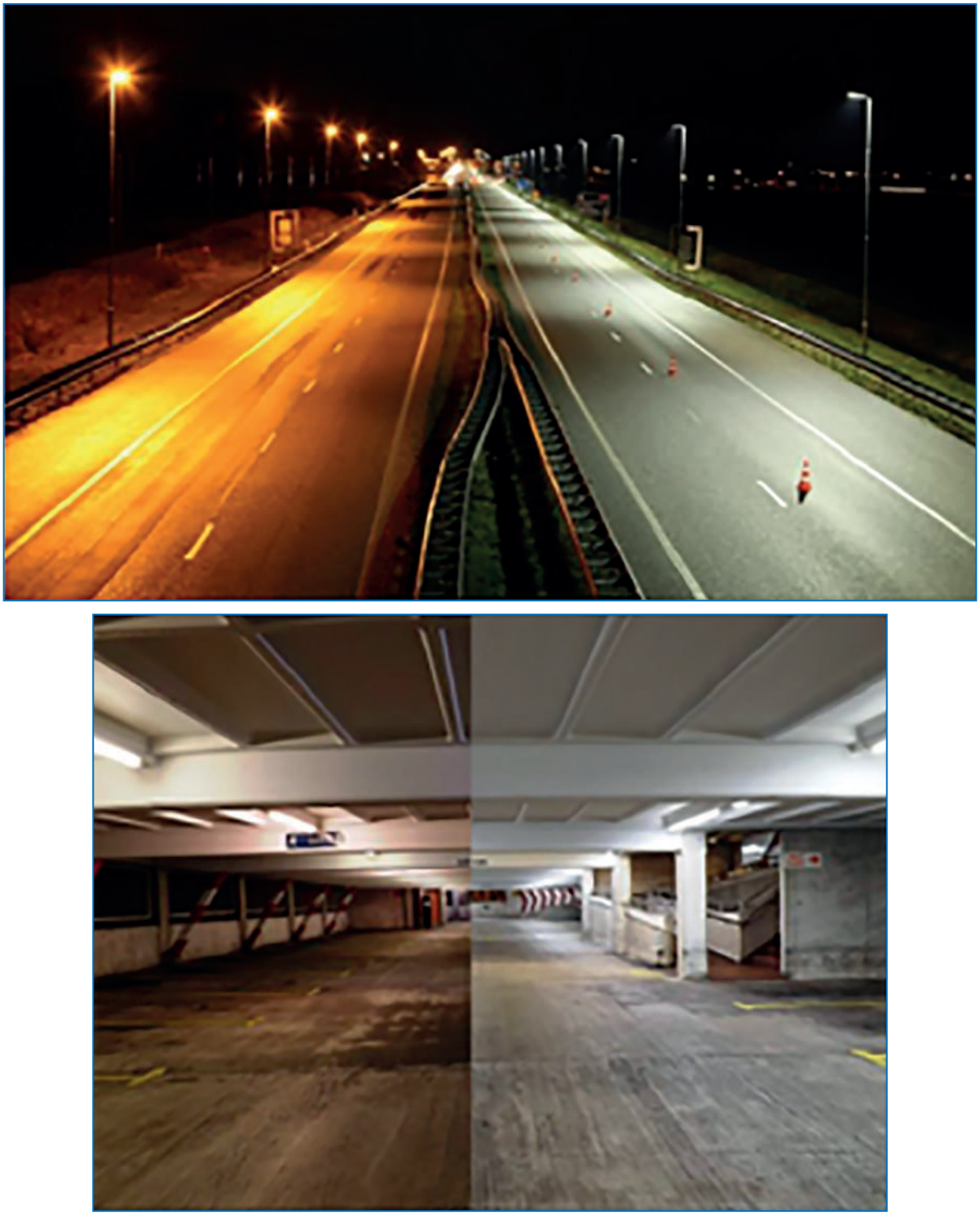


Figure 157. Illustration des nuances d'éclairage suite au remplacement des anciennes lampes (HID) par des LEDS.

CHAPITRE VII

Eclairage Public en Algérie: état des lieux et recommandations

VII.1. Collectivités locales et éclairage public en Algérie

Afin de réduire la facture d'électricité des collectivités locales qui a atteint 27 milliards de dinars en 2017 pour une consommation globale de **4 801 GWh**, soit 8 % de celle nationale qui avoisinait les 60 000 GWh, les autorités publiques ont décrété le recours à un éclairage public moins énergivore comme axe à privilégier. En effet, ce secteur mobilise à lui seul **2839 GWh**, soit environ 60 % de l'ensemble des consommations d'électricité dans les communes (Figure 158) avec un budget annuel de près de 15 Milliards de DA [219].

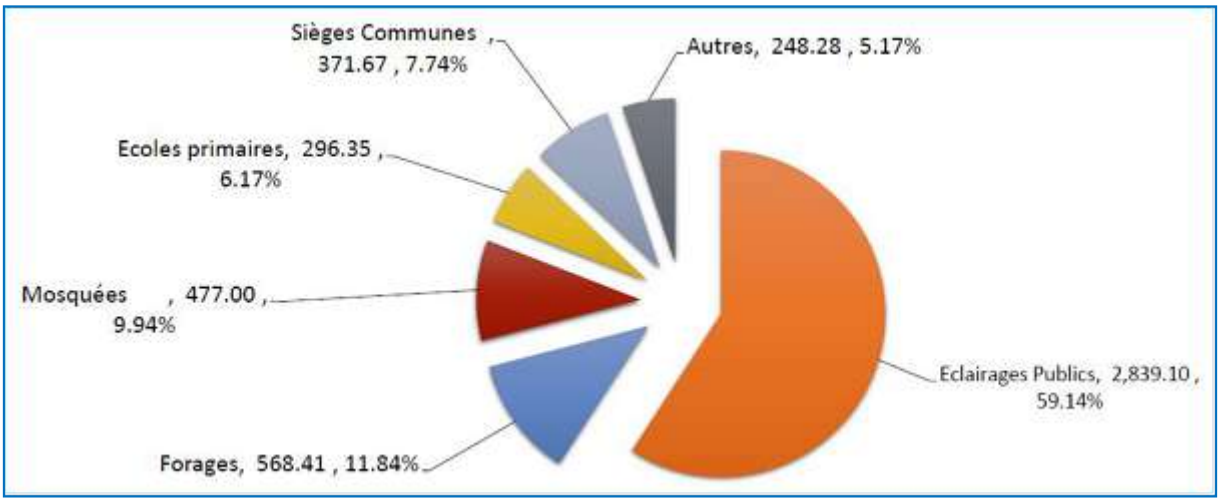


Figure 158. Consommation d'énergie électrique (GWh) par activité pourles communes de l'ensemble des 48 wilayas en 2018.

Les niches qui peuvent être explorées afin de rendre l'éclairage public moins énergivore, sans pour autant hypothéquer la moindre parcelle des multiples avantages qui lui sont associés, plusieurs voies peuvent être explorées:

1- Recourir à la juste mesure de l'éclairage nécessaire (sans excès inutiles).

2- Veiller à l'utilisation de luminaires à haute efficacité énergétique.

3- Adopter et généraliser le principe de variation du flux lumineux (gradation) en fonction des besoins réels de l'éclairage public.

Si la première alternative est à l'évidence relativement difficile à cerner, sans une maîtrise poussée des effets de l'éclairage sur l'ensemble des situations auxquelles il est censé apporter une solution (sécurité, confort visuel de nuit,…), les deux dernières approches restent par contre faciles à appréhender et assez directes quant à leur mise en œuvre. Il suffit pour cela de suivre les évolutions technologiques dans le domaine de l'éclairage, dont l'efficacité énergétique a justement été un des principaux vecteurs de mobilisation des efforts en termes de recherche et développement technologique dans le secteur. La meilleure illustration à cela étant les progrès accomplis dans le domaine des diodes électroluminescentes (LED), comme source de lumière efficace et offrant déjà des aptitudes inégalées quant à la mise en œuvre des diverses stratégies d'adaptation de l'éclairage au juste besoin. Cela étant sans altérer le confort visuel des usagers, ni occasionner de pollution lumineuse devenue fortement indésirable ces dernières années, tellement elle a un impact écologique négatif sur la biodiversité. Ainsi, l'activité économique autour des LED et les auxiliaires qui vont avec (ballasts électroniques, drivers…), est entrain de dominer le marché mondial de l'éclairage (Figure 149) dans pratiquement tous les segments (résidentiel, public, commercial, industriel, récréatif…) avec une part du marché avoisinant les 60 % actuellement.

VII.1.1. Systèmes d'éclairage public existant en Algérie

L'éclairage public, essentiellement destiné à équiper des espaces ouverts (routes, ruelles, places publiques, lieux de récréation…), fait appel à des luminaires répondant à des critères assez bien définis, que ce soit en termes de robustesse vis-à-vis des divers aléas inhérents à leur déploiement à l'extérieur (étanchéité, rigidité…), ou leurs performances

lumineuses intrinsèques (efficacité lumineuse, qualité de la lumière…). Dans cette optique et au regard de leur fonction centrale qu'est l'éclairage proprement dit, ils doivent entre autres générer un niveau suffisant de luminosité afin d'assurer convenablement la visibilité requise, selon les usagers des lieux (piétons, voitures…), sans pour autant verser dans l'excès qui peut être préjudiciable (éblouissement, pollution lumineuse…). C'est cette dernière exigence qui détermine en grande partie le type de lampes à utiliser selon la technologie appropriée, la puissance électrique nécessaire, ainsi que certaines fonctionnalités liées au mode d'alimentation, généralement dédié à des objectifs d'économie d'énergie. Pour commencer dans ce sens, un inventaire aussi sommaire soit-il du parc d'éclairage public existant en Algérie, pourrait aider à y voir clair quant à son évolution vers des objectifs balisés par l'allègement des charges liées à sa gestion par les collectivités locales, notamment sa facture énergétique.

VII.1.2. Parc actuel et points lumineux en Algérie

Les résultats du dernier recensement de l'ensemble des points lumineux constituant le parc d'éclairage public en Algérie ainsi que la nature des sources lumineuses utilisées, ont été rendus par les services publics compétents du Ministère de l'Intérieur, des Collectivités Locales et de l'Aménagement du Territoire (MICLAT) vers 2018 [220] et font état d'un parc assez développé (Tableau 26).

Tableau 26. Parc d'éclairage public et points lumineux en Algérie (2018).

Nombre de points lumineux existant dans le parc d'éclairage public	**3 134 824**		
	Mercure	1 122 589	36 %
	Sodium	1 940 045	62 %
	LED	59 145	2 %
	Photovoltaïque	13 045	0,42 %

Une première remarque est que la part des lampes à mercure est assez importante et son remplacement graduel selon la circulaire interministérielle N° 01 du 5 Février 2018, pourrait prendre beaucoup de temps, ne sachant pas la durée de fonctionnement de celles déjà fonctionnelles ainsi que l'état des stocks alimentés avant la circulaire. En tout état de cause, une grande partie de l'ensemble des trois millions de lampes à décharge (mercure et sodium) en cours d'utilisation, vont continuer à l'être pendant plusieurs années encore, car les remplacer prématurément par des LED, serait manifestement très coûteux et économiquement irrationnel. Face à cette réalité, il reste donc à s'attaquer à l'existant pour essayer de le rendre énergétiquement plus efficace pendant la durée de vie qui lui reste et engranger au final un gain énergétique significatif pouvant amplement justifier le coût de l'opération. En effet, s'agissant de lampes à décharge de nature connue (sodium et mercure haute pression), il existe bien des solutions de gradation (réduction de flux lumineux en restant en deçà du seuil de décrochage de l'arc) qui leur sont applicables selon un profil horaire approprié pour permettre au moins 30% d'économie d'énergie (Figure 104) [125-133]. Avant cela, il va de soi qu'une collecte d'informations précises doit être menée sur les lampes concernées afin de juger quant à la rentabilité effective de l'action en vue avant de procéder à l'identification des circuits auxiliaires convenables ainsi que leur disponibilité (Tableau 27). Une validation à échelle réduite de la faisabilité technique de l'opération peut être menée sur un site réel, englobant par exemple une centaine de points lumineux, dont le contrôle est centralisé au niveau d'une seule armoire de commande afin d'en faire une plateforme d'essai crédible quant à l'évaluation de la rentabilité économique du projet.

Pour ce qui est du remplacement des anciennes lampes à base de mercure et sodium, arrivées en fin de cycle et jusqu'à épuisement des stocks de rechange standard, il est préconisé de passer aux LED mais suite à une réflexion poussée quant au choix du modèle qui va être adopté. Cela étant selon plusieurs critères qui engagent sur le long terme (puissance, ballast électronique gradable ou pas, qualité de la lumière, IRC, température de couleur…..) [209-213]. En effet, en plus de l'option triviale

Tableau 27. Données typiques de l'éclairage public à Alger
(Selon l'Etablissement de Réalisation et de Maintenance de l'Eclairage Public d'Alger (ERMA)).

Luminaire	Puissance (W)	Flux lumineux (Lumens)	Hauteur candélabre (m)
Sodium Haute Pression (SHP)	70	5600	3 ÷ 5
	150	14500	6 ÷ 8
	250	23000	8 ÷ 12
	400	43000	≥ 14
Iodures Métalliques (IOM.C)	70	5200	3 ÷ 5
	150	12000	6 ÷ 8
	250	18000	8 ÷ 12
	400	32500	≥ 14
Diodes électroluminescentes (LED)	50	6000	3 ÷ 5
	100	12500	6 ÷ 8
	150	18000	8 ÷ 10
	200	24000	11 ÷ 12
	250	30000	≥ 12

de l'interchangeabilité physique de la lampe LED avec l'ancienne à mercure ou au sodium (en utilisant le même luminaire et le maximum des anciens circuits auxiliaires), il est important d'affiner au plus juste le choix de la puissance et les qualités photométriques de la nouvelle source, dont dépendront en grande partie les économies futures d'énergie.

VII.2. Recommandations générales

Suite aux renseignements recueillis sur les dispositifs d'éclairage public au niveau national ainsi que certaines visites effectuées sur sites et les discussions menées avec les services compétents et autres acteurs concernés, plusieurs points peuvent être soulevés afin de mieux coordonner les actions à venir et répondre aux exigences de l'heure en matière d'efficacité énergétique dans le domaine. Ainsi, certaines analyses jugées opportunes et en rapport direct avec les constats dressés, sont menées et les recommandations qui s'imposent présentées de manière claire, dans le but de constituer une plateforme commune pouvant aider à mutualiser au mieux les efforts pour un éclairage public de qualité et énergétiquement efficace [221].

VII.2.1. Suivi et évaluation

Mis à part l'information indiquée à travers la facture d'électricité correspondante, la consommation énergétique de l'éclairage public en Algérie, n'a suscité que très peu d'analyses objectives afin de déceler les vraies raisons de sa hausse démesurée et prendre les mesures qui s'imposent. En fait, aucun plan concret de suivi des performances énergétiques des systèmes réalisés ne semble avoir été établi, même dans le cas où cela a fait l'objet de prescriptions claires dans les cahiers des charges ayant conduit à des réalisations coûteuses en conséquence [220]. Cette situation, cumulée avec l'absence chronique de réglementations précises dans le domaine, qui peuvent au moins servir de rempart purement théorique face aux dépassements les plus élémentaires, laisse en effet peu de place à un quelconque progrès sur lequel une stratégie d'efficacité énergétique aussi sincère soit elle, peut compter. Il y a donc matière à bien ordonner les priorités et assainir la situation du secteur à la base, à commencer par la clarification des prérogatives allouées aux services compétents auprès des collectivités locales, tout en mettant à leur disposition tout moyen leur permettant d'agir localement, ou à défaut faire intervenir certaines capacités régionales ou même nationales [222-224]. Dans cette optique et en attendant la mise en place de laboratoires légalement accrédités à délivrer les certificats d'assurance qualité à tout produit mis sur le marché national, rien n'empêche à ce que des essais souvent simples puissent être menés localement afin de statuer au préalable sur l'aptitude d'un équipement donné à bien remplir les fonctionnalités recherchées avec les performances dûment exprimées. Ainsi, procéder à quelques installa-

tions pilotes de lampadaires selon le modèle préétabli ou remplacer une lampe au sodium par une LED jugée équivalente, afin de les évaluer au préalable et pourquoi pas recueillir l'avis des passants, constitue à coup sûr une démarche pragmatique de grande sagesse qui, malgré qu'elle soit peu habituelle, peut néanmoins éviter l'engagement sur une voie incertaine et forcément couteuse en cas de généralisation. Il faut cependant reconnaitre qu'une telle alternative ne peut être menée qu'exceptionnellement et qu'elle ne peut en aucun cas remplacer les procédures bien établies et encadrées par des protocoles d'essais précis, qui laissent très peu de place au hasard et à l'improvisation de dernière minute pour bien faire les choses [225].

VII.2.2. Etudes préliminaires et cahiers des charges

Une grande partie des performances d'un système d'éclairage public, ne peuvent être validées que suite à une durée de fonctionnement et d'observations plus ou moins longues, afin de déceler toute éventuelle dérive par rapport à ce qui a été annoncé initialement et pouvant entrainer une dégradation perceptible, avec le risque de voir apparaître certains signes précurseurs d'une défaillance prématurée. Or, cela contrarie justement l'espoir de voir se concrétiser les prévisions en termes d'économie d'énergie, faites sur la base d'une source lumineuse à base de LED dont la durée de vie affichée avec une bonne stabilité des performances va au-delà de plusieurs années (50000 heures et plus). Pour cela et faute de pouvoir vérifier concrètement ces performances en dehors d'une certification authentique, inexistante localement pour le moment, il devient hasardeux de ne pas mettre de son côté le maximum d'indices, révélateurs dans le domaine, qui ne peuvent être réunis qu'à travers une étude préliminaire crédible et bien documentée. C'est cette dernière qui constitue au final la source principale d'où seront inspirées les prescriptions essentielles à faire figurer sur le cahier des charges [226-229].

VII.2.3. Eclairage public et déficit réglementaire

Au vu de ce qui précède comme remarques sur les conséquences liées à l'absence de textes clairs destinés à réglementer proprement tous les produits liés à l'éclairage qui arrivent sur le marché national, il y a manifestement urgence à sortir de cette situation dès que possible car toute action menée dans les conditions actuelles risque d'impacter négativement et durablement les progrès escomptés quant à un éclairage public de qualité et écoénergétique [230]. En effet, les projets réalisés depuis quelques années dans le domaine et financés d'une manière ou d'une autre par l'état, avec l'objectif d'alléger la facture énergétique du secteur en imposant le recours aux dernières technologies à base de LED, ne présentent en fait aucune garantie dans ce sens. La raison à cela étant toute simple: aucun engagement à ce propos n'est concrètement perceptible, alors que les éléments d'information disponibles, dont certains ont été recueillis à travers des visites sur terrain, indiquent presque tous que les produits utilisés, présentent des signes de défaillances prématurées, alors qu'ils sont sensés durer encore plusieurs années (Figure 159), pour justifier les coûts de leur acquisition [231-233].

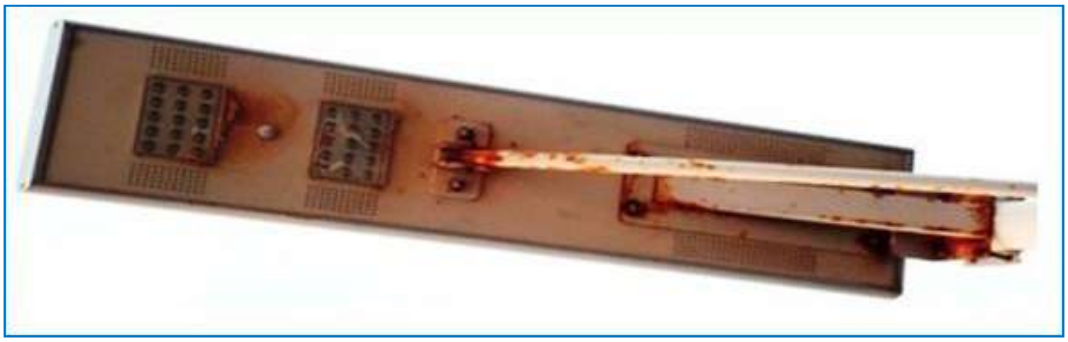


Figure 159. Luminaire solaire d'éclairage public, installé assez récemment.

VII.2.4. Eclairage public et déficit d'entretien

Vu leur déploiement dans des espaces ouverts, les lampadaires dédiés à l'éclairage public sont à l'évidence soumis à des aléas climatiques (pluie, grêle, vent de sable,...) et autres (rouille, dépôt de sciure, …), dont les incidences directes (dégradation de la structure, durée de vie, …) et indirectes (efficacité lumineuse réduite, ...), sont généralement bien connus et les actions d'entretien

appropriées sont bien identifiées. Sur ce plan et à notre connaissance, mis à part les interventions que nécessite le remplacement d'une ampoule ou ballast défaillants, les opérations d'entretien proprement dites des installations d'éclairage public, semblent être très rares. Mieux encore, de très nombreux constats réels montrent qu'ils ne sont même pas planifiés, là où au moins des opérations périodiques de nettoyage sont strictement nécessaires, comme l'illustrent des lampadaires solaires dont les modules photovoltaïques n'ont visiblement pas reçu une seule opération de nettoyage depuis leur installation. Manifestement il y a là un décalage immense entre le souci légitime de faire des économies d'énergie sur l'éclairage public d'un côté puis payer le prix fort pour des installations dont un simple geste leur permet de rester fonctionnels et d'éclairer utilement de manière autonome pendant longtemps, n'est même pas à l'ordre du jour. Voilà encore une situation sur laquelle il y a lieu de trancher sans attendre, en associant à toute demande d'éclairage solaire, l'obligation ferme d'y associer un plan d'entretien régulier, dont la périodicité d'exécution est fixée selon la nature des nuisances locales [234-235].

VII.3. Recommandations particulières

Les recommandations précédentes, relèvent en fait d'un caractère général puisqu'elles peuvent être adressées dans la même forme à d'autres services publics, où la conduite des projets financés par l'état, souffre pratiquement des mêmes carences, qui peuvent être résumées par une préparation sommaire avant et manque d'intérêt après. Parallèlement à cela, des remarques plus ciblées sont également jugées opportunes, notamment concernant les fondements de certaines prescriptions techniques figurant sur les cahiers des charges, sensées refléter l'essentiel des objectifs en matière d'efficacité énergétique pour l'exploitant.

VII.3.1. Critères de choix des luminaires LED de remplacement

En toute logique et comme partout ailleurs, l'adoption des LED comme source lumineuse principale dans l'éclairage public en Algérie, a été essentiellement dictée par le souci d'efficacité énergétique dans le domaine. La traduction de cela dans les faits, consiste donc à substituer des lampes LED au parc existant, constitué essentiellement de lampes au Sodium (62 %) et à mercure (36 %), selon les statistiques disponibles de 2018 (Tableau 26). Toutefois, l'opération qui a commencé il ya quelques années et a pratiquement atteint son rythme de croisière, notamment au niveau de certaines grandes villes du pays, est entrain de se dérouler de manière désordonnée, puisqu'aucune norme permettant de faire le bon choix des lampes LED de remplacement n'a été élaborée. Ainsi, en prenant le cas de la Wilaya d'Alger, dont le parc d'éclairage public est majoritairement géré par l'Etablissement de Réalisation et de Maintenance de l'Eclairage Public d'Alger (ERMA), un cahier des charges type a bien été établi en 2019, fixant cinq paliers de puissance pour les LED (50 à 250W par pas de 50W) avec une efficacité lumineuse minimale de 120 lm/W. Sachant que le contexte pour lequel ce cahier des charges a été élaboré a manifestement ses propres contraintes pratiques, que seuls les exécutants connaissent, il ya néanmoins deux points qui méritent d'être soulevés à propos de certains choix, jugés éminemment importants pour l'objectif d'efficacité énergétique.

1- La structure modulaire par pas de 50 W des luminaires LED exigés, laisse très peu de choix à l'optimisation du remplacement des lampes HID visées (SHP et à iodures métalliques) avec seulement 4 niveaux de puissances (70W, 150W, 250W et 400W), dont les plus répandus sont ceux utilisés dans l'éclairage des routes et voies de circulation (150 et 250 W). En effet, remplacer une SHP de 250 W par une LED de 200 W (Figure 160), ne permet manifestement pas le gain en énergie que prédisent beaucoup d'analyses crédibles dans ce cas (Tableaux 6 et 7), par contre cela se traduit par un excédent [217-218] inutile de luminosité (Figure 160), ce qui n'est pas le but recherché.

2- Les progrès qui continuent d'être régulièrement enregistrés en termes d'efficacité lumineuse pour les luminaires LED, conjugués avec leur durée de vie (50000 heures et plus), indiquent qu'il serait prudent d'étaler les achats en fonction des besoins réels sur un horizon court et éviter les stocks importants.

VII.3.2. Critères de choix des systèmes d'éclairage solaire

Avec les encouragements soutenus aux collectivités locales pour l'usage de l'éclairage solaire, cette alternative a donné lieu à une dynamique notable dans le domaine, qui s'est traduite par la naissance d'un marché florissant et hautement concurrentiel. Toutefois, l'absence des textes

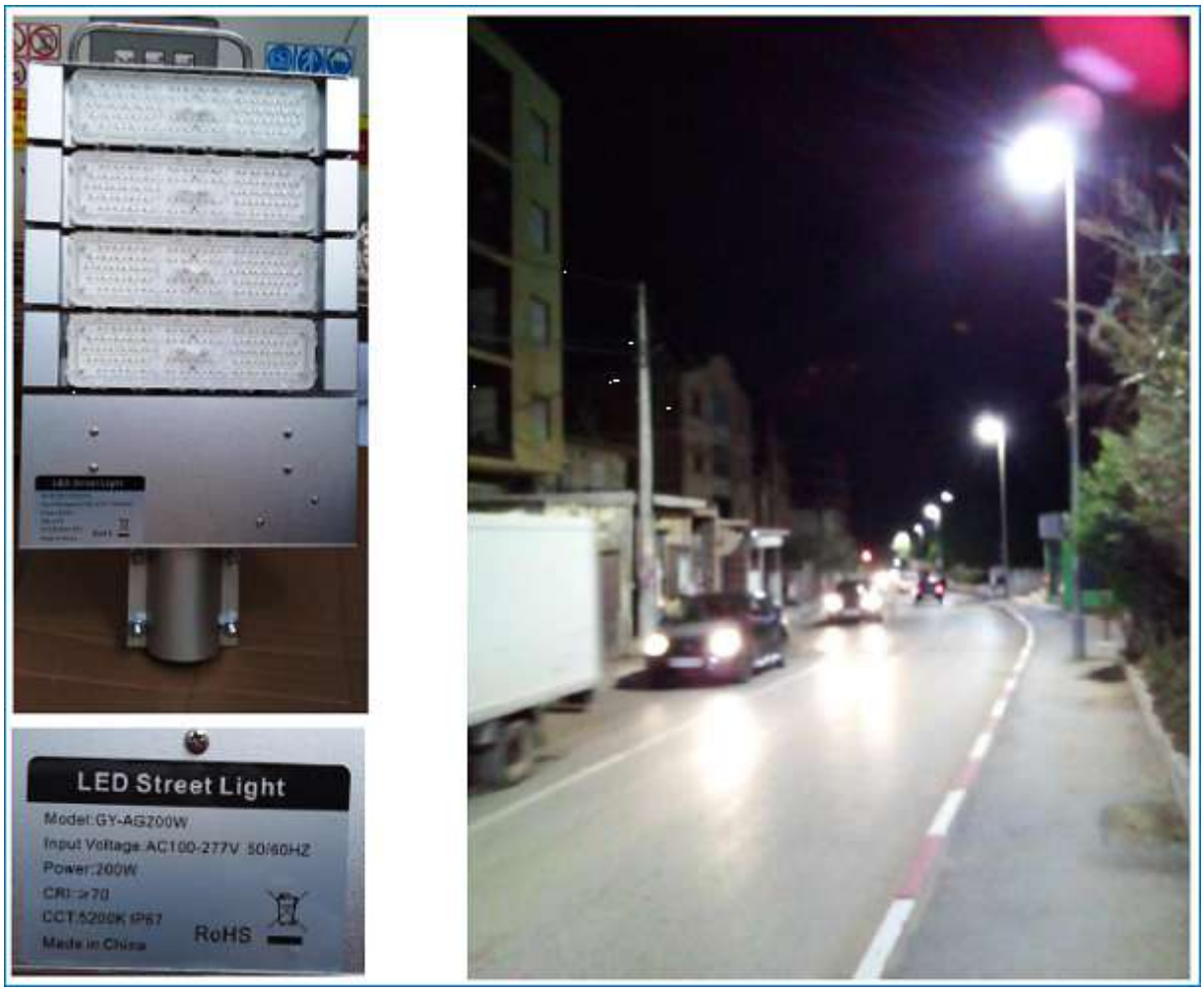


Figure 160. Luminaire LED de 200 W, en remplacement du précédent à base de lampe HPS 250 W et excés de luminosité.

réglementaires appropriés, conjuguée avec le manque d'expérience du personnel en charge du dossier auprès des collectivités locales, a entrainé certaines dérives dans la formulation des solutions demandées, vers des configurations qui ont finalement été dictées par l'existant sur le marché et non les vrais objectifs qui ont motivé leur introduction dans le paysage de l'éclairage public au niveau national. Ainsi, une grande partie des installations dans le domaine, a été réalisée à base de luminaires solaires du type all in one (Figure 161), dont la structure compacte livrée prête à l'emploi (Figures 129 et 130), a complètement occulté des inconvénients majeurs qui vont à l'encontre de leur adéquation avec l'emploi visé (Figure 131), sans parler de la qualité et l'efficacité recherchées. En effet, une analyse rationnelle toute simple (voir section V.1.1.3.), montre que le couplage rigide qu'impose sa structure même entre la source lumineuse et le capteur solaire, induit manifestement un dilemme difficile à satisfaire dans la plupart des cas de déploiement visés (Figure 131 et 161). A cela s'ajoute également le fait que l'intégration de l'ensemble des composants actifs (champ photovoltaïque, module LED, batterie et autres circuits auxiliaires) dans un seul boîtier, présente manifestement des limites sur les plans puissance et autonomie de l'éclairage assuré, qui font qu'une telle structure ne peut répondre à ce qui est attendu de l'éclairage solaire en Algérie. Même dans le cas où les performances affichées sur ce plan semblent convenir, il ne faut pas oublier qu'elles ne sont garanties que dans des conditions d'emploi très particulières, notamment avec un taux de gradation (diminution de l'intensité lumineuse) élevé et assez prolongé dans le temps (Figures 104 et 132). Afin de compléter les éléments d'analyse ainsi présentés sur le luminaire solaire du type « All in one », une dernière remarque mérite également d'être soulevée sur sa capacité de convenir dans un environnement chaud tel que celui qui caractérise la plupart des régions du pays. En effet, sa structure compacte laisse très peu de possibilités pour une aération appropriée, notamment dans un climat chaud comme c'est le cas en Algérie, d'où le risque réel d'amener certains composants, à des températures de fonctionnement qui leurs sont très défavorables,

Figure 161. Illustration de situations typiques où la structure 'All in One' ne peut convenir.

ou carrément en dehors des limites spécifiées par les fabricants eux-mêmes. Ceci est notamment le cas des batteries, dont la sensibilité à la température est critique, alors qu'il s'agit tout de même d'un élément essentiel dans tout dispositif d'éclairage solaire (voir la recommandation suivante (section VII.3.3.).

En conclusion, vu l'importance de voir les applications solaires réussir dans le pays et être perçues par les citoyens comme des solutions efficaces et d'avenir, il est impératif de ne rien négliger pour que cela soit une réalité tangible et sans équivoque. S'agissant avant tout de choix techniques dont les fondements relèvent de sciences exactes plus qu'autre chose, ces derniers devraient logiquement converger vers des solutions laissant peu de place à la confusion et l'option de la structure « All-in-One » pour l'éclairage solaire en Algérie, n'en est manifestement pas la bonne. De ce fait, il est recommandé de revenir aux solutions dictées par le bon sens même et qui sont universellement adoptées dans des conditions climatiques et environnementales semblables à celles de l'Algérie. Ainsi, les configurations éclatées de lampadaires solaires (Figure 162), constituent de fait la solution la mieux adaptée, vu qu'elles permettent au moins d'éliminer à la source tous les problèmes particuliers liés à la structure « All-in-One » tels que ceux présentés et ce, par le simple découplage de l'orientation de la source lumineuse (vers la zone à éclairer) par rapport à celle du champ photovoltaïque (vers le soleil).

Figure 162. Illustration d'installations d'éclairage solaire efficace réalisées en Algérie.

VII.3.3. Eclairage solaire et problématique des grandes chaleurs en Algérie

Les nombreux critères techniques identifiés comme étant essentiels pour orienter le choix final des batteries de stockage, conformément aux exigences spécifiques à l'éclairage solaire, montrent qu'on ne peut manifestement pas éviter le recours à certains compromis dont l'issue pourrait affecter durablement la qualité du service public attendu. Cela est d'autant plus crucial qu'il y a absence totale de normes applicables au domaine des batteries sur le plan national, notamment en termes de qualité de fonctionnement par temps chauds, où les températures ambiantes locales flirtent souvent avec les limites indiquées par les fabricants comme pouvant être hautement préjudiciables [236-238].

En effet, les performances affichées pour l'ensemble des batteries proposées sur le marché, dont celles jugées d'une extrême importance pour l'application de l'éclairage solaire (capacité de stockage, profondeur de décharge, nombre de cycles, efficacité énergétique,….), le sont généralement pour une température ambiante de 20 °C. Dans cette optique et à titre d'exemple, il est bien connu qu'au-delà, la température influe fortement sur l'électrochimie de la batterie qui subit en conséquence un vieillissement d'autant plus accéléré que la température de fonctionnement imposée est plus élevée, entrainant de fait une réduction notable de sa durée de vie. Cette dernière peut en effet descendre à la moitié de celle initialement affichée (en nombre d'années ou de cycles pour une profondeur de décharge donnée) et ce, pour chaque élévation de 10 °C, soit pour une température ambiante de seulement 30 °C. En fait, il faut dire que toutes les batteries qui souffrent à divers degrés de la chaleur, le sont également en présence de grand froid, notamment le gel pour lequel certaines limites ont quand même été techniquement repoussées, vu l'importance du sujet pour les pays à climat froid, notamment nordiques.

Par contre, connaissant le climat typiquement chaud de l'Algérie et l'effet amplificateur de l'exposition directe aux rayons du soleil, inhérent à l'application d'intérêt, une question pertinente se pose alors quant au recours au mode d'éclairage en question, sans prendre les précautions qui s'imposent. Parmi ces dernières, les conditions appropriées au bon fonctionnement de la batterie, sans dépassement des limites signalées avec insistance par les fabricants eux-mêmes, notamment les conditions de température vu le climat et l'environnement local, ne peuvent être négligées. Dans ce cas et selon les estimations déduites avec rigueur des conditions de fonctionnement du lampadaire solaire, la solution de disposer les batteries dans une trappe mitoyenne du lampadaire (Figure 127), n'est plus à écarter.

Bibliographie

[1]. Christian Bracco, "Histoire des idées sur la lumière, de l'Antiquité au début du XX siècle", 2008, Licence / L2.
https://hal-sfo.ccsd.cnrs.fr/sfo-00321414

[2]. Isidoros Katsos, ''Chasing the Light: What happened to the Ancient Theories'', Isis, volume 110, number 2, 2019. The History of Science Society.
https://www.repository.cam.ac.uk/bitstream/handle/1810/289604/703515.pdf?sequence=6&isAllowed=y

[3]. Peter Adamson, "Vision, light and color in Al-Kindi, Ptolemy and the ancient commentators", Arabic Sciences and Philosophy, vol. 16 (2006) pp. 207–236, doi:10.1017/S0957423906000312, 2006, Cambridge University Press
https://epub.ub.uni-muenchen.de/15822/1/oa_15822.pdf

[4]. A. J. Wagner, "Lecture 27, Fundamentals of Physics, Optics" , North Dakota State University, Fargo, ND 58102, 2015.
https://www.ndsu.edu/pubweb/~carswagn/LectureNotes/120/LectureSlides27_Optics.pdf

[5]. Robert MQOD. "Ibn al-Haytham, the Arab who brought Greek optics into focus for Latin Europe" .*AdvOphthalmol Vis Syst.* 2019;9(2):44-51. DOI: 10.15406/aovs.2019.09.00344
https://medcraveonline.com/AOVS/AOVS-09-00344.pdf

[6]. A. Mark Smith, "Alhacen's Theory of Visual Perception: A Critical Edition, with English Translation an Commentary, of the First Books of Alhacen's De Aspectibus, the Medieval Latin Version of Ibn al-Haythams' Kitab al-Manazir", Transactions of the American Philosophical Society 91.4-5, Philadelphia, 2001, ISBN 0-87169-914-1.
https://jps.library.utoronto.ca/index.php/aestimatio/article/download/25649/18844/56617

[7]. Azzedine BOUDRIOUA, "L'Optique Arabe de la période médiévale : L'exemple d'Ibn al Haytham",
http://dx.doi.org/10.1051/photon/20157934

[8]. ZAIDI Khadidja, "Scientific Contributions of the Islamic Medieval Period to the West: Ibn Al-Haytham's Legacy of Optics", Master of Arts in Anglo-American Studies, Faculty of Letters and Languages, Department of English, Larbi Ben M'hidi University-Oum El Bouaghi, 2018.
http://bib.univ-oeb.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/6019/1/Scientific-Cintributions-of-the-Islamic-Medieval-Period-to-the-West-Ibn-Al-Haythams-Legacy-of-Opt.pdf

[9]. Robert J. Richards, Review of David C. LINDBERG book, "Theories of Vision from Al-Kindi to Kepler", University of Chicago history of science and medicine,1976, ISBN 0-226-48234-0
http://home.uchicago.edu/~rjr6/articles/1979-lindberg%20Journal_of_the_History_of_the_Behavioral_Sciences.pdf

[10].Claude Guthmann, "Newton et la naissance de la théorie des couleurs", *Bibnum*, Physique, Fondation Maison des sciences de l'homme, ISSN: 2554-4470
http://journals.openedition.org/bibnum/743

[11].Bernard Maitte, "Les théories de la lumière dans une science en mouvement", Reflets de la Physique n° 47–48,
http://dx.doi.org/10.1051/refdp/20164748016

[12]. Jean-Louis Léonhardt, "Comment en est-on arrivé à admettre la dualité onde-particule?", « Le Philosophoire », 2011/1 n° 35 | pages 115 à 128ISSN 1283-7091, ISBN 9782353380381, DOI 10.3917/phoir.035.0115.
https://www.cairn.info/revue-le-philosophoire-2011-1-page-115.htm

[13]. Alexandre Gondran, Michel Gondran, "La théorie ondulatoire de Fresnel et la dualité onde-corpuscule", La Revue de l'électricité et de l'électronique, Société de l'Électricité, de l'Électronique et des Technologies de l'Information et de la Communication, 2018, 2018 (5). hal-01971578.
https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-01971578

[14]. Dualité onde-corpuscule.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Dualit%C3%A9_onde-corpuscule_

[15]. Jean-Jacques Samueli, ''Foucault et la mesure de la vitesse de la lumière dans l'eau et dans l'air'', Fondation Maison des sciences de l'homme,2009, ISSN: 2554-4470.
http://journals.openedition.org/bibnum/788

[16]. André Michaud, 2020, ''L'électromagnétisme selon l'interprétation initiale de Maxwell''.
https://www.researchgate.net/publication/338513874 (Version anglaise du même article publiée au Journal of Modern Physics, 11, 16-80.
https://doi.org/10.4236/jmp.2020.111003, https://www.scirp.org/pdf/jmp_2020010915471797.pdf

[17]. Yann Verdo, '' Maxwell-et-la-lumière-fut-191080'', https://www.lesechos.fr/2015/01/maxwell-et-la-lumiere-fut-191080, 2015. https://www.lesechos.fr/2015/01/maxwell-et-la-lumiere-fut-191080

[18]. Loîc Villain, ''Lumière et éther, de Newton à Maxwell et Lorentz (milieu du XVIIe - XIXe siècle)'', 2018. https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-relativite-restreinte-naissance-espace-temps-509/page/5/

[19]. Rayonnement du corps noir. https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_du_corps_noir

[20]. Le rayonnement thermique du corps noir, 2018.
https://www.encyclopedie-environnement.org/physique/le-rayonnement-thermique-du-corps-noir/

[21]. Laurent Sacco, ''En résumé: ce qu'il faut retenir sur le corps noir'', 2015.
https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-corps-noir-trous-noirs-743/page/13/

[22]. Laurent Sacco, ''Les lois de Kirchhoff, Wien, Stefan-Boltzmann '', 2015.
https://www.futura sciences.com/sciences/dossiers/physique-corps-noir-trous-noirs-743/page/2/

[23]. ''Max Planck et le problème du corps noir'', 2014.
http://www.promenades-quantiques.com/journal/lettres_2014/lettre_14_06/14-06-Planck-corps-noir.html

[24]. Léna Soler, ''Les origines de la formule de Planck e = hv, ou comment l'analogie est source de nouveauté en physique''. *PhilosophiaScientiae*, Editions Kime, 2001, 5 (2), pp.89-123. ⟨hal-00512635⟩. http://www.numdam.org/article/PHSC_2001__5_2_89_0.pdf

[25]. Joachain Charles Jean, '' L'effet photo-électrique: d'Einstein à la physique multiphotonique'', Bulletin de la Classe des sciences, tome 16, n°7-12, 2005. pp. 243-268.
doi: https://doi.org/10.3406/barb.2005.28490
https://www.persee.fr/doc/barb_0001-4141_2005_num_16_7_28490

[26].Kossi Wolanyo Adjoto, "Du comportement ondulatoire des corpuscules aucomportement corpusculaire des ondes: analyse philosophique de la mécanique classique à partir del'œuvre de Louis de Broglie (1892-1987)", Maîtrise en philosophie – Université Laval, Québec, Canada, 2020.
https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/40145/1/36123.pdf

[27]. Jean-François Le Gargasson, «II- L'œil et la vision», Œil et physiologie de la vision [en ligne]. http://lodel.irevues.inist.fr/oeiletphysiologiedelavision/docannexe/file/210/ii_plan.pdf

[28]. Patrick Ferrand, Optique Physiologique. https://www.fresnel.fr/spip/IMG/pdf/Optique_Physiologique.pdf

[29]. Comment voit-on les couleurs ?
https://fr.science-questions.org/questions_de_science/161/Comment_voit-on_les_couleurs_

[30]. Quelle différence entre lumen et watt ?
https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/economie-d-energie/quelle-difference-entre-lumen-et-watt

[31]. La correspondance entre lumen et watt
https://www.silamp.fr/correspondance-lumen-watt-c1200x66408

[32]. James Benya & al, ‘’Advanced Lighting Guidelines’’. https://www.lightingassociates.org/i/u/2127806/f/tech_sheets/advanced_lighting_guidelines_2001.pdf

[33].Tout sur l’intensité lumineuse, le flux lumineux et l‘éclairement.
https://www.auersignal.com/fr/infos-techniques/alarmes-optiques/intensite-lumineuse/

[34]. Les grandeurs utilisées dans le domaine de l’éclairage. http://phozagora.free.fr/?page=zoom_eclairagisme

[35]. La candela.
https://www.lne.fr/fr/comprendre/systeme-international-unites/candela

[36]. Intensité lumineuse : dans une direction donnée, la candela
https://www.lightzoomlumiere.fr/definition/intensite-lumineuse-dans-une-direction-donnee-la-candela-photometrie/

[37]. Le luxmètre.
https://www.labo-energetic.eu/fr/labo/a_telecharger/Guide%20d’utilisation/luxmetre.html

[38]. Cours E314 Principe d’éclairagisme.
https://moodle.polymtl.ca/pluginfile.php/153805/mod_resource/content/8/Module%202%20unites%20de%20mesures.pdf

[39]. R. Floru. Eclairage et vision. [Rapport de recherche] Notes scientifiques et techniques de l’INRS NS 149, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). 1996, 135 p., ill., bibliogr. hal-01420151
https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01420151/document

[40]. Luminance. https://fr.wikipedia.org/wiki/Luminance

[41]. L’œil humain et la perception des couleurs.
https://www.guide-gestion-des-couleurs.com/oeil-perception-couleurs.html

[42]. Bernard Valeur, La vision des couleurs : Dossier-La couleur dans tous ses éclats.
https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-couleur-tous-eclats-1396/page/3/

[43]. Notions de base sur la couleur. http://jl.domec.free.fr/siteDjl_fichiers/TP-coursTEL/Them09Webcam/CapteurCCD/couleur1SpectrEMVisionHumain.html

[44]. Daniel Metz, ‘’Le modèle CIE 1931, 7 - La luminance V(λ) selon la CIE’’.
http://modele-cie-1931.blogspot.com/2015/07/7-la-luminance-v-selon-la-cie.html

[45]. Mesure colorimétrique – le système CIE 1931. https://www.datacolorchina.cn/wp-content/uploads/2019/10/FR-Colorimetric_Book-3_Chapter-9-10.pdf

[46]. Nicolas Pousset, ‘’Caractérisation du rendu des couleurs des nouvelles sources: les diodes électroluminescentes (LED)’’, Physique [physics]. Conservatoire national des arts et métiers, 2009.
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00452845/document

[47]. Rendu des couleurs.
https://energieplus-lesite.be/theories/eclairage12/physique-lumiere/rendu-de-couleurs/

[48]. Qu’est-ce-que l’Indice de Rendu des Couleurs?
https://www5.konicaminolta.eu/fileadmin/content/eu/Measuring_Instruments/4_Learning_Centre/C_A/What_is_Colour_Rendering_Index/Colour_Rendering_Index_FR.pdf

[49]. Indice de Rendu des Couleurs, IES TM-30: enfin une méthode adaptée aux LED ? https://piseo.fr/wp-content/uploads/2020/07/Point-de-vue-PISEO-TM-30-09-05-16.pdf

[50]. Qu'est-ce que l'efficacité lumineuse spectrale ?
http://www.blog-couleur.com/?Qu-est-ce-que-l-efficacite

[51]. La luminance de la CIE. La Fonction d'efficacité lumineuse spectrale.
http://www.profil-couleur.com/ec/110b-luminance.php

[52]. Température de couleur.
https://www.energie-environnement.ch/definitions/208-temperature-de-couleur

[53]. Balance des blancs et température de couleur en photo.
https://www.luzphotos.com/prise-de-vue/les-bases/balance-des-blancs-temperature-de-couleur

[54]. Balance des blancs-Colorimétrie,
https://www.infotographiste.fr/balance-des-blancs-colorimetrie/

[55]. Soleil, une banale étoile. https://www.cosmodixi.fr/planetes/soleil.php

[56]. True-Light, lumière du jour à spectre complet.
https://luxcedia.fr/solutions-eclairage/true-light-lumiere-du-jour/

[57]. Chap3: Spectre lumineux de différentes sources de lumière.
http://lyc-renaudeau-49.ac-nantes.fr/IMG/pdf/chap3_spectre_de_diff_sources_de_lumiere.pdf

[58]. Confort visuel.
http://www.enviroboite.net/spip/IMG/pdf/0606_confort_visuel_Faure_V1.pdf

[59]. Ambiances lumineuses.
https://educnet.enpc.fr/pluginfile.php/31189/mod_resource/content/1/Enerbat10-Eclairage.pdf

[60]. A. Tiberguent, ''L'ambiance lumineuse et les risques professionnels'', 2007,
http://www.ergonomie.chups.jussieu.fr/op5_5_at.pdf

[61]. Biohacking : Tout sur la lumière bleue, la comprendre et s'en protéger
https://eatfat2befit.com/voir-la-vie-rose-sans-lumiere-bleue

[62]. Suzel Balez, ''Eclairage artificiel'',
https://sitelec.org/download_page.php?filename=cours/roudil/download/eclairage_artificiel.pdf

[63]. De la maîtrise du feu à la LED, l'Humanité a toujours cherché des moyens d'éclairage efficaces. Quelles innovations nous ont permis de nous éclaire.
https://www.playhooky.fr/retro/evolution-eclairage/

[64].De la lampe à huile aux LED: histoire physico-chimique de l'éclairage artificielhttp://www.mediachimie.org/sites/default/files/Lumiere_p81.pdf

[65]. Ch. Féry, Ch. Chéneveau, La loi du rayonnement lumineux des lampes à incandescence. J. Phys. Theor. Appl., 1910, 9 (1), pp.397-409. 10.1051/jphystap:019100090039701 . jpa-00241559
https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00241559/document

[66]. Guide de référence de l'éclairage. https://moodle.polymtl.ca/pluginfile.php/159002/mod_resource/content/2/Guide%20de%20reference%20eclairage%20Ressources%20naturelles%20Canada.pdf

[67]. Roger Cadiergues, ‘’Les sources de lumière’’. https://conseils.xpair.com/auxidev/mD02a_SourcesLum%20.pdf

[68]. Emission de la lumière par la matière, Partie I: Incandescence et luminescence. file:///C:/Users/HP/Downloads/Fiche%20tutorat%20Emission%20de%20la%20lumi%C3%A8re%20par%20la%20mati%C3%A8re%20(luminescence%20et%20lasers)%20(11).pdf

[69]. Jean-Michel GITTON & Charles De IZARRA, ‘’ Température du filament d’une lampe à incandescence et pyrométrie optique’’. http://www.armelmartin.mon-site-a-moi.fr/doc/tipe/Article-BUP_20695_TemperatureFilamentLampe.pdf

[70]. Lampes. http://phozagora.free.fr/?page=zoom_lampe

[71]. Les lampes à incandescence classiques. http://phozagora.free.fr/?page=zoom_lampeid&type=Inclassique

[72]. Les lampes à incandescence halogènes. http://phozagora.free.fr/?page=zoom_lampeid&type=Halogene

[73]. Version 21/10/17 Fiche n° 2-3: Lampes par type et par puissance. https://www.adec56.org/spip/IMG/pdf/fiche_no_2-3_ver_21-10-17.pdf

[74]. Abandon des lampes à incandescence.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Abandon_des_lampes_%C3%A0_incandescence

[75]. Interdiction des ampoules halogènes en 2018. Où en est-on ?
https://www.led-flash.fr/blog/interdiction-ampoules-halogenes-2018/

[76]. Murthy, K.V.R. & Virk, Hardev. (2013). Luminescence Phenomena: An Introduction. Defect and Diffusion Forum. 347. 1-34. 10.4028/www.scientific.net/DDF.347.1.
https://www.researchgate.net/publication/271866484_Luminescence_Phenomena_An_Introduction

[77]. Bernard Valeur, ‘’La genèse des couleurs, un dialogue entre lumière et matière’’
https://new.societechimiquedefrance.fr/wp-content/uploads/2019/12/2015-396-mai-p29-valeur-hd.pdf

[78]. High Intensity Discharge Lighting Technology Workshop Report, DOE, 2005
https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/corporate/hid_workshop-report.pdf

[79]. Les lampes à décharge
http://phozagora.free.fr/?page=zoom_lampeid&type=Decharge

[80]. Les Lampes à décharge et l’Environnement
http://www.afe-eclairage.fr/docs/10311-ext.pdf

[81]. Lampe à décharge luminescente sous haute pression
https://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_%C3%A0_d%C3%A9charge_luminescente_sous_haute_pression

[82]. Aurélie Le Ru, Bases de la fluorescence
https://trigenotoul.com/wp-content/uploads/2014/09/Fluorescence-cours.pdf

[83]. Les tubes fluorescents
http://phozagora.free.fr/?page=zoom_lampeid&type=TF

[84]. Les lampes fluocompactes
http://phozagora.free.fr/?page=zoom_lampeid&type=CF

[85].Les lampes à induction
http://phozagora.free.fr/?page=zoom_lampeid&type=IDC

[86]. E. Roaux, La lampe à induction
http://clg.lakanal.free.fr/techno/IMG/pdf/la_lampe_a_induction.pdf

[87]. Les ballons fluorescents
http://phozagora.free.fr/?page=zoom_lampeid&type=BF

[88]. Les lampes aux halogénures métalliques
http://phozagora.free.fr/?page=zoom_lampeid&type=MH

[89]. Lampe aux halogénures métalliques
https://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_aux_halog%C3%A9nures_m%C3%A9talliques

[90]. Lampe à vapeur de sodium
http://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_%C3%A0_vapeur_de_sodium

[91]. Les lampes à vapeur de sodium sous basse pression
http://phozagora.free.fr/?page=zoom_lampeid&type=LPS

[92]. Les lampes à vapeur de sodium sous haute pression
http://phozagora.free.fr/?page=zoom_lampeid&type=HPS

[93]. Lampe sodium haute pression HPS,
https://sitelec.org/cours/abati/shp.htm

[94].Modes d'Alimentation et de Commande des lampes sodium haute pression en vue d'éviter les résonances acoustiques, Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2010.
https://oatao.univ-toulouse.fr/7205/1/chhun.pdf

[95]. L'électroluminescence
https://new.societechimiquedefrance.fr/wp-content/uploads/2019/12/2002-mars-251-LeBarny-p102.pdf

[96]. Diode électroluminescente
https://fr.wikipedia.org/wiki/Diode_%C3%A9lectroluminescente

[97]. Diodes émettrices de lumière bleue : Le prix Nobel de physique 2014
https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2016/01/refdp201647-48p54.pdf

[98]. Eclairage a Leds- Théorie et exemples de réalisation pratique
http://jp79dsfr.free.fr/_Docs%20et%20infos/Elec%20_%20Projecteurs%20a%20leds.pdf

[99]. LEDs blanches: les différentes technologies
https://sitelec.org/download_page.php?filename=cours/leds_blanches.pdf

[100]. Sources LED
https://sitelec.org/download_page.php?filename=cours/eplus/sources_led.pdf

[101]. LED / Technologie LED – Définition, fonctionnement et avantages
https://www.silamp.fr/technologie-led

[102]. SMD Vs COB LED Lights
https://prolightinggroup.com/wp-content/uploads/2020/01/SMD-Vs-COB.pdf

[103]. Instruction Manual(COB LED Package)
https://led.cdiweb.com/datasheets/citizen/citizen-instruction-manual-cob-led-package.pdf

[104]. Nouvelle étiquette énergie ampoules et Led au 1er septembre 2021
http://www.afe-eclairage.fr/docs/2021/07/01/07-01-21-10-03-NOUVELLE%20ETIQUETTE%20ENERGIE.pdf

[105]. Led's go, Conseils et consignes à propos des éclairages LED
http://www.clora.ch/wp-content/uploads/LEDs_go_FR.pdf

[106]. Photopic and Scotopic – The "eyes" have it
https://pioneerlighting.com/wp-content/uploads/2019/06/photopic_scotopic-comparisons..pdf

[107]. Photopic, Mesopic, Scotopic - Concepts
https://docs.agi32.com/AGi32/Content/references/Photopic_Mesopic_Scotopic_-_Concepts.htm

[108]. Scotopic vs. Photopic
http://www.innovativelight.com/wp-content/uploads/2014/07/Scotopic_vs_Photopic.pdf

[109]. Human eye sensitivity and photometric quantities
https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/Sample-Chapter.pdf

[110]. Navarrete-de Galvez, E.; Gago-Calderon, A.; Garcia-Ceballos, L.; Contreras-Lopez, M.A.; Andres-Diaz, J.R. Adjustment of Lighting Parameters from Photopic to Mesopic Values in Outdoor Lighting Installations Strategy and Associated Evaluation of Variation in Energy Needs. Sustainability 2021, 13, 4089. https://doi.org/10.3390/su13084089
https://www.mdpi.com/2071-1050/13/8/4089

[111]. J. Schonek M. Vernay, Cahier technique n° 205 L'alimentation des circuits d'éclairage
https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/3862/3862-ct205.pdf

[112]. Technical Details – Components for Discharge Lamps,
http://www.lamps.ru/files/vs/(16)Technical_Delails_Components_for_Discharge_Lamps.PDF

[113]. Ballasts
https://sitelec.org/download_page.php?filename=cours/divers/ballasts.pdf

[114]. Electronic Ballasts
https://www.lrc.rpi.edu/programs/NLPIP/PDF/VIEW/SREB2.pdf

[115]. De l'inductance au ballast Electronique
http://www.itemelec.sitew.be/fs/E_Puissance/da1x0-CA_EP01_Inductance_Ballast_Electronique.pdf

[116]. Electronic-fluorescent-lamp-ballast
https://www.st.com/resource/en/application_note/an527-electronic-fluorescent-lamp-ballast-stmicroelectronics.pdf

[117]. Led drivers for general lighting
https://pdfserv.maximintegrated.com/en/pg/led-drivers-for-general-lighting.pdf

[118]. Guide de l'utilisateur avancé d'éclairages LED & leurs pilotes
https://assets.astrolighting.com/pdfs/original/22907-drivers-advancedguide-fr.pdf

[119]. LED power supply technical manual
https://www.adminstrumentengineering.com.au/files/mean-well-led-technical-manual.pdf

[120]. Selecting or Specifying a Driver for Your LED Array
https://www.engineersonline.nl/download/Selecting_A_Driver.pdf

[121]. Constant current LED drivers
http://endrich.hu/BOOK_EN/Articles/23_LEDdrv.pdf

[122]. Courant alternatif, puissances active et réactive, facteur de puissance, harmoniques…
https://negawatt.org/IMG/pdf/fiche_puissances_en_alternatif.pdf

[123]. Compensation d'énergie réactive, Condensateurs et armoires de rephasage
https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/documents/4_compensation_nrj_reactive.pdf

[124]. Qu'est-ce que le facteur de puissance?
https://www.nextgenerationled.be/assets/downloads/Qu%E2%80%99est-ce%20que%20le%20facteur%20de%20puissance.pdf

[125]. Théorie de la gradation
https://leclairage.fr/th-gradation/

[126].Gradation: composants
https://leclairage.fr/gradation-type-de-fonctionnement-de-composants-et-dutilisation/

[127]. Différence entre la gradation triac et 1-10V
https://led-hallenbeleuchtung.com/fr/unterschied-zwischen-triac-1-10v-dimmung/

[128]. Pachamanov, A & Todorov, George & Ratz, N. (2006). Dimming of High Pressure Discharge Lamps. https://www.researchgate.net/publication/259668332_Dimming_of_High_Pressure_Discharge_Lamps

[129]. Dimmable.
https://www.silamp.fr/dimmable

[130]. Gestion d'éclairage centralisée : solutions intégrées
https://www.lutron.com/TechnicalDocumentLibrary/367-845_FR.pdf

[131].Economiseur de l'énergie électrique dans l'éclairage
https://augier.com/contenu/uploads/doc/6011731.pdf

[132]. Économies d'énergie grâce à la variation de tension de l'éclairage public
https://www.sodielec-berger.fr/fr/content/260/92/installation-electrique-led/variateur-de-tension-augier

[133].Pierre WILLEM, Eclairage: conception et régulation,-audit: évaluer le potentiel d'économie
https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/pres-191022-ecla-2-5-audi-fr.pdf

[134]. Telea : Système de gestion des installations d'éclairage extérieur
http://www.thornlighting.com/pdb/ressource/teaser/fr/tlg_telea.pdf

[135]. Bien choisir son équipement ÉCLAIRAGE PUBLIC
https://www.sde07.com/wp-content/uploads/2015/05/fiche_eclairage_public_6.pdf

[136]. Public Lighting Design Manual
https://www.ergon.com.au/__data/assets/pdf_file/0005/216950/Public-lighting-design-manual.pdf

[137]. Les luminaires d'éclairage public
http://phozagora.free.fr/?page=zoom_luminaire

[138]. Réduire la pollution lumineuse
https://www.globe-swiss.ch/files/Downloads/962/Download/beco%20reduire%20la%20pollution%20lumineuse.pdf

[139]. Eclairage public et urbain _ Quel impact sur l'homme et la biodiversité,
https://www.syane.fr/data/Files/2018_06_07_presentations_VF.pdf

[140]. L'influence de l'éclairage urbain sur les espaces publics
https://igd.unil.ch/memoires/uploads/memoire/memoire_pdf/73/59d6cafe-af4e-430d-8550-ce239e6b1082.pdf

[141]. Réduire l'impact environnemental de l'éclairage public
https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/IF_QDurables_ENE01_FR.PD-#:~:text=Pour%20l'%C3%A9clairage%20de%20certaines,ne%20consomme%20pas%20d'%C3%A9nergie.

[142]. Éclairage des espaces publics pour les piétons
https://www.ensemble77.fr/images/outils/gestion_domaine_public/eclairage_espaces_publics_pietons_decembre_2020.pdf

[143]. L'éclairage des aménagements piétons, Recommandations pour le choix et l'installation
https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/vm-eclairage-fr-web.pdf

[144]. Guide de conception des installations d'éclairage extérieur,
https://metropole.nantes.fr/files/pdf/espace-public/guide-eclairage-public.pdf

[145]. Manuel de conception d'un système d'éclairage routier
https://moodle.polymtl.ca/file.php/270/Routier/Manuel_Conception_Eclairage_Routier_Fevrier_2011.pdf

[146]. Ivone Chou. Dispositifs techniques et ségrégations urbaines, le cas de l'éclairage urbain à Rio de Janeiro. Architecture, aménagement de l'espace. INSA de Lyon, 2013. Français. NNT: 2013ISAL0109ff.
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01127467/file/2013ISAL0109.pdf

[147]. Recommandations sur le calcul des structures de mâts d'éclairage de grands espaces
https://kupdf.net/download/cticm-calcul-mats-d-eclairagepdf_5a1f1551e2b6f5f668f07876_pdf

[148]. Eclairage Grande Hauteur
https://www.ghm-eclatec.nl/files/downloads/Nederlands/masten/Eclairage-Grande-Hauteur.pdf

[149]. Alliance : Mâts à Couronne Mobile
https://webassets.valmont.com/valmontstaging/vs-morocco-catalogs-and-resources/alliance.pdf

[150]. Les applications sous les feux de la rampe : L'éclairage routier
http://www.thornlighting.lu/fr-lu/solutions/etudes-de-cas-par-projet/milieu-urbain/olivet-france/thorn_roadlighting-brochure_fr.pdf

[151]. Code de bonne pratique
https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/epurecodedebonnepratique.PDF?IDR=402

[152]. Eclairage urbain : Enjeux et instruments d'actions,
http://eclairagepublic.eu/these-lcpc-eclairage-urbain.pdf

[153]. Roger Cadiergues LA SECURITÉ ÉLECTRIQUE * (Guide RefCad: nR22.a).
https://media.xpair.com/auxidev/nR22a.pdf

[154]. Formation "Eclairage public"
https://www.pedagogie.ac-aix-marseille.fr/upload/docs/application/pdf/2012-07/3_techniques.pdf

[155]. Dimensionnement et protection des installations électriques BT Réglementation et Normalisation – Méthodologie
https://www.ourdoconline.com/MI/dimensionnement-protection-56.pdf

[156]. Indices de protection d'un luminaire
https://energieplus-lesite.be/theories/eclairage12/caracteristiques-des-luminaires/indices-de-protection-d-un-luminaire/

[157]. La protection contre les influences externes, GUIDE PUISSANCE 2014 / LIVRE 8
https://www.legrand.be/sites/default/files/guides_techniques/Powerguide_Livre_8_1.pdf

[158]. C4/12.1 Règles de l'art pour les appareillages et supports n'appartenant pas à l'EP,
http://www.synergrid.be/download.cfm?fileId=C4_12_1_FR_201906_CBP_non_EP_sur_EP.pdf&language_code=NED

[159]. Description lampadaire solaire 5m
http://www.lampadairesolaireled.com/WebRoot/StoreFR/Shops/78046190/544F/FEB2/71B9/9BD1/FC2A/C0A8/2BBC/44B9/Description_lampadaire_solaire_5M.pdf

[160]. Candélabre solaire 7m
http://www.lampadairesolaireled.com/WebRoot/StoreFR/Shops/78046190/544D/03AD/9C98/A9CE/1BBD/C0A8/2AB8/EF91/Description_technique_candelabre_solaire_7M.pdf

[161]. Handbook on Solar Light System
https://rdso.indianrailways.gov.in/works/uploads/File/Handbook%20on%20Solar%20Light%20System.pdf

[162]. Solar Street Lighting: Using Renewable Energy for Safety for the Turtle Mountain Band of Chippewa
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/11/f57/Allery-2018-solar-street-lighting.pdf

[163]. Lampadaires solaires
https://www.ines-solaire.org/site/assets/files/3725/guideisa_lampadaires-v-web.pdf

[164]. Petit Guide pour étudier un projet d'installation photovoltaïque
http://www.interaide.org/pratiques/sites/default/files/installation_photovoltaique.pdf

[165]. Manuel de formation pour l'Installation et la Maintenance de petits systèmes photovoltaïques
https://unmundosalvadorsoler.org/_Files/foro/Manuel%20Pratique%20de%20petits%20syste%CC%80mes%20photovoltai%CC%88ques.pdf

[166]. Le Gisement Solaire.
https://energypedia.info/images/c/c1/Le_Gisement_Solaire.pdf

[167]. Le rayonnement solaire
https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/

[168]. Thomas Mambrini. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Météorologie. Université Paris Sud -Paris XI, 2014. Français. NNT: 2014PA112380.
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01164783/file/VD2_MAMBRINI_THOMAS_16122014.pdf

[169]. Une installation photovoltaïque en site isolé
https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/1358/1358-175-p32.pdf

[170]. Choisir une batterie solaire
https://www.batterie-solaire.com/choisir-une-batterie-solaire.htm

[171]. Going Solar Chapter 15: Know Your Battery
https://greensarawak.com/things-to-know-before-going-solar/going-solar-chapter-15-know-your-battery/

[172]. Limitations des batteries au Plomb
https://www.powertechsystems.eu/fr/home/technique/limitations-des-batteries-au-plomb/

[173]. Optimiser-la-vie-des-batteries-plomb
https://www.victronenergy.fr/upload/documents/Optimiser-la-vie-des-batteries-plomb-Le%C3%A7on-V02-Bis.pdf

[174]. La sécurité des batteries Lithium-Ion
https://www.powertechsystems.eu/fr/home/technique/la-securite-des-batteries-lithium-ion/

[175]. Lithium-Ion vs. AGM Batteries: Which Is Best for Solar?
https://www.solarips.com/blog/2020/january/lithium-ion-vs-agm-batteries-which-is-best-for-s/

[176]. A Comparison of Lead Acid to Lithium-ion in Stationary Storage Applications
https://www.batterypoweronline.com/wp-content/uploads/2012/07/Lead-acid-white-paper.pdf

[177]. Les effets des températures d'été sur la batterie.
https://batteryworld.varta-automotive.com/fr-fr/les-effets-des-temperatures-dete-sur-la-batterie

[178]. Quelle est la durée de vie d'une batterie pour panneau solaire
https://www.nouvelr-energie.com/pv/duree-de-vie-batterie-panneau-solaire

[179]. Power bank à rechargement solaire
http://jp79dsfr.free.fr/_Docs%20et%20infos/Elec%20_%20Chargeur%20solaire.pdf

[180]. Régulateur de charge solaire MPPT en boitier
https://www.jade-technologie.com/produits/regulateur-de-charge-solaire-mppt-boitier/

[181]. Tout ce que vous devez savoir sur la technologie MPPT
https://www.energiedouce.com/content/23-conseils-faq-tout-savoir-sur-les-regulateurs-mppt

[182]. Quel régulateur solaire choisir ? Pwm ou Mppt ?
https://www.myshop-solaire.com/quel-regulateur-solaire-choisir-pwm-ou-mppt--_r_80_a_183.html

[183]. Le processus de charge à 3-étapes+
https://www.mastervolt.fr/le-processus-de-charge-3-tapes/

[184]. Panneau photovoltaïque
http://www.flexyourte.com/uploads/2/4/8/1/24812001/pdf_panneau_photovoltaique.pdf

[185]. Lampadaires solaires intelligents & connectés
https://pdf.capenergie.fr/doc-site-isole/sunna-design-gamme-2018.pdf

[186]. Azevedo, Inês& Morgan, M. & Morgan, Fritz. (2009). The Transition to Solid-State Lighting. Proceedings of the IEEE. 97. 481 - 510. 10.1109/JPROC.2009.2013058.
https://www.researchgate.net/publication/224396587_The_Transition_to_Solid-State_Lighting/citation/download

[187]. Adoption of Light-Emitting Diodes in Common Lighting Applications, DOE Report, August 2020
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/09/f78/ssl-led-adoption-aug2020.pdf

[188]. Accelerating the Global Adoption of ENERGY-EFFICIENT LIGHTING, United Nations Environment Programme, 2017
https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/20406/Energy_efficient_lighting.pdf

[189]. IEA (2020), Tracking Lighting 2020, IEA, Paris
https://www.iea.org/reports/tracking-lighting-2020

[190]. IEA (2021), Lighting, IEA, Paris
https://www.iea.org/reports/lighting

[191]. Transitioning to Safe and Sustainable Public Lighting
https://www.ipwea.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=a6fc964a-de72-de8f-2cce-c9e80c5430fd

[192]. Street lighting replacement programme 2019-2020
https://barnsleymbc.moderngov.co.uk/documents/s68097/LED%20Group%20A%20Streetlight%20Programme.pdf

[193]. Relamping des luminaires existants
https://www.assets.signify.com/is/content/Signify/Assets/philips-lighting/france/20191122-Relamping-des-luminaires-existants-Arr%C3%AAt%C3%A9s-nuisances-lumineuses-18-novembre-2019.pdf

[194]. Regional Report on Efficient Lighting in the Middle East and North Africa, enlighten-initiative,2011
http://www.enlighten-initiative.org/portals/0/documents/country-support/regional-workshops/Regional%20Report%20MENA%20Final.pdf

[195]. 2020 adoption of light-emitting diodes in common lighting applications
https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/09/f78/ssl-led-adoption-aug2020.pdf

[196]. Everything you need to know about smart street lighting
https://intelilight.eu/smart-street-lighting/

[197]. Zissis, G., Bertoldi, P., Serrenho, T., 'Update on the Status of LED-Lighting world market since 2018', Publications Office of the European Union, 2021, ISBN 978-92-76-27244-1, ISSN 1831-9424, doi:10.2760/759859
https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC122760/status_of_led_lighting_world_market_2020_final_rev_2.pdf

[198]. Lighting Market Trends
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/02/f71/ssl-rd2020-elliott-market.pdf

[199]. LED lighting Semiconductors for power conversion and smart lighting
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-General_Lighting_LED-ApplicationBrochure-v04_00-EN.pdf?fileId=db3a304327b897500127f76de0b2654b

[200]. LED driving technology for long term flexibility
https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-2496721/LED%20driving%20technology%20for%20long%20term%20flexibility.pdf

[201]. Led street lighting best practices: Lessons Learned from the Pilot LEDMunicipal Streetlight and PLN SubstationRetrofit Project (Pilot LED Project)in Indonesia
https://econoler.com/wp-content/uploads/2017/10/led-lighting-best-practices.pdf

[202]. ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program). 2016. Proven Delivery Models for LED Public Lighting: Synthesis of Six Case Studies. ESMAP Knowledge Series 026/16. Washington, DC: World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/25336 License: CC BY 3.0 IGO.
https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/25336/109532-ESM-P152422-PUBLIC-ABSTRACT-SENT-FINALESMAPProvenDeliveryModelsLEDPublicLightingKSopt.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[203]. LUCIA_technology_state_of_the_art_report_190826
https://lucia-project.eu/wp-content/uploads/2020/04/LUCIA_technology_state_of_the_art_report_190826.pdf

[204]. Street lighting replacement programme 2019-2020
https://barnsleymbc.moderngov.co.uk/documents/s68097/LED%20Group%20A%20Streetlight%20Programme.pdf

[205].Synthèse lumière bleue et santé
https://www.yearbook-ers.jle.com/download/ers-312078-38828-synthese_lumiere_bleue_et_sante-a.pdf

[206]. Impacts of artificial blue light on health and the environment: Evidence summary
https://www.royalsociety.org.nz/assets/Uploads/Blue-light-Aotearoa-evidence-summary.pdf

[207]. Thailand Launches Ambitious Street Lighting Project, 2015
https://lumileds.com/wp-content/uploads/files/CS112.pdf

[208]. Au Sénégal, déjà 50 % du plus grand marché d'éclairage solaire au monde installé en moins d'1 an, Communiqué de presse, Avril 2020.
https://www.fonroche-eclairagesolaire.fr/fichier_article/files/communique/CP_Fonroche-Senegal_24%20avril2020.pdf

[209]. Lampes LED de substitution pour l'éclairage public Une alternative qui pose questions
https://www.actiled.com/sites/default/files/lux-299_article-led-substitution.pdf

[210]. Les lampes LED de substitution dans l'éclairage Public: Une solution optimale quand la conception est maîtrisée
http://www.eci-eclairage.fr/pdf/ECI%20LUX%202018.pdf

[211]. Sędziwy, Adam & Basiura, Artur & Wojnicki, Igor. (2018). Roadway Lighting Retrofit: Environmental and Economic Impact of Greenhouse Gases Footprint Reduction. Sustainability. 10. 10.3390/su10113925.
https://www.researchgate.net/publication/328576906_Roadway_Lighting_Retrofit_Environmental_and_Economic_Impact_of_Greenhouse_Gases_Footprint_Reduction

[212]. Simple retrofit solutions with spectacular energy savings
https://www.assets.signify.com/is/content/PhilipsLighting/Assets/philips-lighting/united-states/20200617-plt-20018cm-philips_hid-replacement-led-brochure.2.pdf

[213]. Led-retrofit-lamp-user-manual-8-54w
https://www.venturelighting.com/ws/documents/user-manuals/led-retrofit-lamp-user-manual-8-54w.pdf

[214]. Public Lighting Design Manual
https://www.ergon.com.au/__data/assets/pdf_file/0005/216950/Public-lighting-design-manual.pdf

[215]. LED Street Lighting: Procurement & DesignGuidelines
https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b6d1cf07&appId=PPGMS

[216]. Lighting technology overview
https://cltc.ucdavis.edu/sites/default/files/files/publication/2015-lighting-technology-overview-apr-2016.pdf

[217]. HID replacement LED lamps
https://www.nglantz.com/ASSETS/DOCUMENTS/CMS/EN/KeystoneHIDLEDBrochure_NGlantz.pdf

[218]. Remplacer les lampes https://energieplus-lesite.be/ameliorer/eclairage2/remplacer-les-lampes/

[219]. Présentation du modèle de consommation énergétique au niveau des communes
https://www.interieur.gov.dz/images/Prsentation-du-modle-de-consommation-nergtique-au-niveau-des-communes.pdf

[220]. Nahla Kheddache, "La promotion territoriale des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique : Opportunité et défis pour les collectivités locales", Rencontre Nationale 2018.
https://www.interieur.gov.dz/images/La-promotion-territoriale-des-nergies-renouvelables-et-de-lfficacit-nergtiquee-.pdf

[221]. Recommandations pour un éclairage assurant, sécurité, confort visuel, économies et protection de l'environnement.
https://www.valdeloire.org/uploadfiles/publications/1166/recommandations2.pdf

[222]. Eclairage public : Guide de l'élu local et intercommunal
https://www.sdec-energie.fr/sites/sdec.createurdimage.fr/files/pdf/guide-_eclairage-public_2021_vf.pdf

[223]. Rénover l'éclairage extérieur, Ademe,2021
https://www.syndicat-eclairage.com/wp-content/uploads/2021/10/SyndEclairage-Guide-ADEME-eclairage-exterieur-2021.pdf

[224]. Municipal Lighting Handbook, January 2021
https://www.firstenergycorp.com/content/dam/customer/OpCoHome/files/municipal-lighting-handbook.pdf

[225]. Guide d'exploitation des installations d'éclairage extérieur
https://metropole.nantes.fr/files/pdf/espace-public/guide-exploitation-eclairage.pdf

[226]. Fiches pratiques : Eclairage dans les collectivités. Edition 2019 / 2020.
http://www.afe-eclairage.com.fr/docs/2019/11/22/11-22-19-9-27-AFE%20-%20FICHES%20PRATIQUES%202019-2020-V2%20-%20HD%20print.pdf

[227]. Prescriptions applicables pour l'intégration d'un réseau d'éclairage public au patrimoine communal.
https://www.territoire-energie53.fr/media/prescriptions_techniques_eclairage_public_nov2018__042924800_1058_18122018.pdf

[228]. Eclairage public : Modèle de cahier des charges avec des prescriptions techniques
http://www.collectiviteslocales.gov.tn/wp-content/uploads/2021/06/EP_SE-Modele-de-Cahier-des-Charges-avec-des-prescriptions-techniques.pdf

[229]. City and County of Denver: Street Lighting Design Guidelines & Details
https://www.denvergov.org/files/assets/public/doti/documents/standards/pwes-012.2-street_lighting_design_guidelines.pdf

[230]. Importance de la normalisation des critères de performance des luminaires LED
https://www.syndicat-eclairage.com/wp-content/uploads/2014/09/SyndEclairage-Guide-Importance-de-la-normalisation-des-criteres-de-performance-des-luminaires-LED-CELMA.pdf

[231]. Règlement de l'Union Européenne du 1er octobre 2019 , établissant des exigences d'écoconception pour les sources lumineuses et les appareillages de commande séparés en application de la directive 2009/125/CE du Parlement européen.
https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R2020&from=FRA

[232]. Candélabres pour l'éclairage public : Acier ou aluminium, droit ou à crosse selon la Norme EN 40. https://www.syndicat-eclairage.com/wp-content/uploads/2016/05/Candelabres-pour-leclairage-public-oct-2006.pdf

[233]. Charte de l'éclairage public : Pour un éclairage économe et de qualité
https://www.sde35.fr/sites/default/files/2020-04/Charte_Eclairage_Public_2013.pdf

[234]. Eclairage public: Guide de maintenance
https://metropole.nantes.fr/files/pdf/espace-public/guide-maintenance-eclairage.pdf

[235]. Diagnostic Energétique et Technique sur les Installations d'Eclairage Public
http://observatoire.espace-mont-blanc.com/d/227/diagnostic-energetique-et-technique-sur-les-installations-declairage-public_megeve.pdf

[236]. Thomas Samuel, Raphael Baillota, ''Enjeux du stockage de l'énergie pour un haut niveau de fiabilité des systèmes solaires en milieux désertiques''.
https://www.reseau-cicle.org/wp-content/uploads/sunna-batteries-1460115406_White-Paper_Energy-Storage_VF.pdf

[237]. Facteurs favorisant le vieillissement prématuré d'une batterie « plomb »
https://fr.krannich-solar.com/fileadmin/content/news/France/newsletter_2015_02/Krannich_-_Victron_-_DOC_-_Facteurs_vieillissement_premature_batterie_Bis.pdf

[238]. Leng, Feng & Tan, Cher & Pecht, Michael. (2015). Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature. Scientific reports. 5. 12967. 10.1038/srep12967.
https://www.researchgate.net/publication/280870913_Effect_of_Temperature_on_the_Aging_rate_of_Li_Ion_Battery_Operating_above_Room_Temperature/citation/download

GLOSSAIRE et ABREVIATIONS

Lumière

Angle de rayonnement: C'est l'angle formé par un faisceau lumineux et celui réémis par un réflecteur à titre d'exemple.

Chromaticité de Planck: Est en général représentée dans un modèle colorimétrique CIE. Elle décrit une suite imaginaire de localisations chromatiques qui prend la lumière d'un corps noir qu'il émettrait s'il était soumis à un réchauffement progressif (par exemple, de 1 000 K à 10 000 K) dans le modèle colorimétrique CIE.

Commission Internationale de l'Eclairage (CIE): Est une organisation qui se donne pour but la coopération internationale et l'échange d'informations entre les pays membres sur toutes les questions relatives à l'art et à la science de l'éclairage. Fondée à Berlin en 1913, elle est actuellement basée à Vienne en Autriche et a pour objectifs:

- de constituer un centre d'étude international pour toute matière relevant de la science, de la technologie et de l'art de la lumière et de l'éclairage, et pour l'échange d'informations dans ces domaines entre pays;
- d'élaborer des normes et des méthodes de base pour la métrologie dans les domaines de la lumière et de l'éclairage;
- de donner des directives pour l'application des principes et des méthodes d'élaboration de normes internationales et nationales dans les domaines de la lumière et de l'éclairage ;
- de préparer et publier des normes, rapports et autres textes, concernant toutes matières relatives à la science, la technologie et l'art dans les domaines de la lumière et de l'éclairage;
- de maintenir une liaison et une collaboration technique avec les autres organisations internationales concernées par des sujets relatifs à la science, la technologie, la normalisation et l'art dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.

Corps noir (black body): Est une source de rayonnement thermique idéalisée. Ce corps absorbe le rayonnement électromagnétique incident de toutes les longueurs d'onde et renvoie l'énergie absorbée sous forme de rayonnement électromagnétique avec un spectre caractéristique ne dépendant que de la température. On utilise ces corps pour calculer les rayonnements les plus divers, par exemple, les radiations solaires dont la lumière. L'intensité de son émission lumineuse, par incandescence, est fonction, d'après la loi de Planck, de la longueur d'onde et de sa température T, en Kelvin. Elle (l'intensité) augmente avec la température et devient visible (dans le rouge) vers 700 K, avant d'atteindre son maximum vers 5 200 K avec une longueur d'onde de 555 nm. A titre d'exemple, un métal chauffé, comme le tungstène utilisé dans les lampes à incandescence, a un comportement proche de celui du corps noir.

Corpuscule: Elément solide infinitésimal pouvant porter de l'énergie, tel le photon pour la lumière. L'approche corpusculaire est souvent opposée à l'approche ondulatoire des phénomènes électromagnétiques.

Diffraction: Comportement de la lumière face à un obstacle tel le passage d'une ouverture dans un écran. Ce phénomène est dû aux interférences et met en évidence la nature ondulatoire de la lumière.

Faisceau: Lumière dirigée dans l'angle d'ouverture pour constituer un faisceau lumineux considéré comme intensif ou pointu (autour de 10°), moyen (autour de 30°) et extensif ou large (> 60°).

Fluorescence: Est une émission lumineuse provoquée par l'excitation d'une molécule (généralement par absorption d'un photon) immédiatement suivie d'une émission spontanée. Ce processus est différent de la phosphorescence. La fluorescence peut entre autres servir à caractériser un matériau.

Incandescence: Phénomène physique caractérisé par l'émission de lumière d'un corps soumis à de très fortes températures. L'intensité et la couleur de la lumière émise dépendent de la température de surface du corps émetteur: rouge-jaune vers 1.600 °C, blanche vers 5.000 °C, bleutée au-delà de 8.000 °C.

Interférence: Phénomène qui apparaît lorsque deux ondes du même type se rencontrent. Appliqué à la lumière, ce phénomène peut expliquer la diffraction ou l'irisation des taches d'huile par exemple.

Luminescence: Emission de lumière résultant d'interactions entre particules électriquement chargées, au niveau d'une substance donnée suite à une réaction chimique (chimiluminescence) ou enzymatique (bioluminescence). La lumière ainsi générée est dite « froide » par opposition à l'incandescence qui est dite « chaude » et profite à de nombreuses applications, comme les LED, mais aussi à des plantes et animaux qui s'en servent (pour communiquer, se camoufler...).

Longueur d'onde: Grandeur physique caractérisant la distance la plus courte entre deux points identiques (par exemple les maximums) à un moment donné d'un phénomène périodique type onde, voir détails.

Lumière: Tout rayonnement qui rend les objets visibles. C'est une énergie électromagnétique rayonnante qui peut exciter la rétine et produire une sensation visuelle

Lumière du jour: Lumière artificielle correspondant à une certaine lumière du jour, conventionnellement pour une température de couleur proximale entre 5000 K et 6500 K.

Onde électromagnétique: Représentation du phénomène électromagnétique qui peut être illustré par une courbe ondulatoire type sinusoïde ayant des équations précises (équations de Maxwell) et des propriétés spécifiques (propagation, polarisation, énergie…). L'approche ondulatoire de la lumière permet d'expliquer des expériences comme la diffraction par les phénomènes d'interférence.

Phosphorescence: Comme la fluorescence, la phosphorescence est une forme de photoluminescence qui consiste en une émission de lumière suite à une absorption de celle-ci. Ce phénomène est en effet observé lorsqu'une matière continue à émettre de la lumière après avoir été éclairée, comme le phosphore blanc qui continue d'émettre une lumière dans le noir.

Photon: Particule élémentaire associée à l'onde électromagnétique lumineuse.

Rayonnement: Emission d'ondes ou particules (photons pour la lumière) électromagnétique.

Spectre électromagnétique: Gamme totale des longueurs d'onde (fréquences) existant dans un rayonnement électromagnétique.

Spectre lumineux: Ensemble des longueurs d'ondes électromagnétiques présentes dans une lumière émise par une source donnée.

Visible: Sous ensemble des ondes électromagnétiques perceptibles par l'œil humain, dont la longueur est comprise entre 380 et 780 nm (1 nm = 10^{-9} m).

Photométrie

Qu'est-ce que la photométrie?: La photométrie est l'art de mesurer le rayonnement lumineux tel qu'il est perçu par l'œil humain. On l'utilise principalement lorsqu'il est question d'éclairagisme, que ce soit dans un contexte d'architecture, de photographie, d'audiovisuel ou d'autres situations.

Ambiance lumineuse: Résultat d'une interaction entre une ou des lumières, un individu, un espace et un usage. Elle provient d'un éclairage naturel ou artificiel et influence momentanément ou durablement la perception du lieu éclairé.

Blanc chaud: Teinte de lumière particulièrement appréciée pour apporter une ambiance apaisante et relaxante comme celle qui accompagne le coucher du soleil au crépuscule. Cela correspond à une température de couleur entre 2000 et 3500 K (voir température de couleur).

Blanc neutre: Aussi appelé blanc naturel, il correspond à un effet « lumière du jour » qui est particulièrement indiquée dans les espaces plutôt étroits ou ne bénéficiant pas beaucoup de luminosité tels que les lieux de passage (couloirs, entrées, escaliers…) avec une température de couleur entre 3500 et 5000 K.

Blanc froid: Apporte une lueur bleutée dynamisante et énergisante. Il offre ainsi un rendu des couleurs plus précis, idéal pour les travaux de précision, tout en inspirant une ambiance moderne, typée industrielle. C'est pourquoi le blanc froid est très souvent utilisé dans les magasins (vitrines, espaces de présentation, laboratoires, usines…). Il est ainsi particulièrement adapté aux espaces de travail, favorisant alors la vitalité et la concentration dans les tâches à réaliser avec des températures de couleur variant entre 5000 et 7000 K.

Contraste: Evaluation de la différence d'aspect de deux ou plusieurs parties du champ observé, juxtaposés dans l'espace ou dans le temps (contraste de luminosité, de clarté, de couleur, simultané, successif, etc.). On distingue en éclairage, le contraste positif (objet éclairé sur fond sombre) du contraste négatif (objet sombre sur fond clair).

CTC (Contrôle de la Température de Couleur): La température de couleur décrit la "teinte" d'une source de lumière artificielle. Une température de 2700°K est considérée comme chaude car son spectre est composé majoritairement de radiations oranges et rouges; 4000°K est considéré comme neutre et 5500°K comme froid car riche en radiation bleues. La technologie CTC permet de régler la température de couleur de l'éclairage à l'installation mais aussi durant son utilisation pour certains produits.

Efficacité lumineuse ŋ (Unité: Lumen par Watt [lm/W]): L'éclairement artificiel nécessite une source alimentée par une énergie électrique. On traduit l'efficacité lumineuse d'une source par le quotient du flux lumineux global qu'elle émet en tous points par la puissance qu'elle absorbe. Plus élevée en est la valeur, meilleur en est le rendement. Par exemple: l'ampoule à incandescence fournit environ 14 lm/W, celle halogène en 12 V fournit environ 26 lm/W et le tube fluorescent environ 80 lm/W.

Éclairement E (Unité: Lux [lx]): L'éclairement d'un objet correspond à l'ensemble des flux lumineux qu'il intercepte, rapporté à la surface réelle éclairée. Son unité est exprimée en lm/m² ou lux (lx).

Flux lumineux Φ (Unité: Lumen [lm]): Il correspond à l'énergie lumineuse rayonnée dans un angle solide, par une source ponctuelle située à son sommet et d'intensité constante dans toutes les directions de l'angle solide.

Illuminance (Unité: candéla/m²): Est une mesure de la « quantité » de lumière qu'une source émet sur une surface. Plus précisément, il s'agit de la densité du flux lumineux (lumens) qui tombe sur une surface donnée. Elle diminue avec la distance entre cette dernière et la source (loi de l'inverse des carrés).

Indice de rendu des couleurs ou IRC: Pour certains lieux et types d'utilisation, les couleurs des objets éclairés par la lumière artificielle doivent être aussi proches de la réalité que possible (comme s'ils étaient éclairés par la lumière naturelle). L'indice de rendu des couleurs, mesure la qualité de la lumière artificielle par rapport à celle naturelle. En d'autres termes, l'IRC évalue la qualité de restitution des couleurs d'une source lumineuse, par comparaison à une source de référence d'indice 100. Plus l'IRC est élevé, meilleur est le rendu de la couleur. Sa valeur maximale de 100 indique qu'il permet le rendu des couleurs le plus naturel possible. Plus l'IRC est faible, plus les couleurs de l'objet éclairé sont dénaturées.

Intensité lumineuse (Unité: Candela [cd]): Une source lumineuse émet son rayonnement dans diverses directions avec une puissance variable. L'intensité lumineuse d'une source, mesure le flux lumineux rayonné dans une direction donnée, à l'intérieur du spectre visible. La courbe photométrique est obtenue en reliant les points aux extrémités de l'intensité lumineuse dans les différentes directions. Elle présente le type de répartition du flux lumineux: direct, indirect ou une combinaison des deux.

Kelvin: Grandeur physique exprimant la température à partir du zéro absolu, qui est à -273,15°C (degré Celsius). Par conséquent, 0°C équivaut à +273,15 K et 100°C à +373,15 K. Le kelvin est utilisé dans l'éclairage pour caractériser la température de couleur proximale en référence à celle d'un corps noir (température de couleur). Ainsi, une source de lumière émettant autour de 3000K donne un blanc chaud (jaune), alors que pour 4000K et 6000 K cela est respectivement considéré comme blanc neutre ou blanc du jour (blanc bleuâtre).

Kruïthoff (règle de): Règle qui établit une correspondance entre le niveau d'éclairement (en lux) et la température de couleur pour percevoir une lumière "confortable". Ainsi, suivant cette règle, plus le niveau d'éclairement augmente, plus sa température de couleur doit augmenter pour être agréable.

Luminance (Unité: Candela/m2 [cd/m2]): La luminance d'une source non ponctuelle, dans une direction déterminée, est le quotient de son intensité dans cette direction par sa surface apparente. C'est la seule grandeur photométrique qui décrit les relations d'éclairage dans un local, mieux que l'intensité lumineuse. Toutefois, cette dernière l'intensité peut être calculée et mesurée plus facilement en lux.

Température de couleur K (Unité: Kelvin [K]): C'est la teinte qui caractérise la couleur apparente de la lumière émise par une source. Le niveau d'éclairement influence la perception de la température de couleur. Il existe trois groupes principaux: Températures chaudes (en dessous de 3300 K), neutres (entre 3300 et 5000 K), et lumière du jour (supérieure à 5000 K). La température de couleur de la lumière utilisée doit être choisie en fonction des objets observés ou encore, selon l'ambiance à créer. Ainsi, souvent des sources halogènes et incandescentes sont choisues pour l'éclairage des zones d'habitation (ambiance chaude) alors que des sources neutres telles que les lampes fluorescentes, conviennent mieux pour les lieux de travail. Il reste à noter que La température de couleur ne fournit aucune indication sur l'intensité lumineuse. Les luminaires en 4000 K produisent une lumière apparaissant souvent plus claire pour l'œil humain. Dans les sanitaires et pièces blanches (par exemple salles de bain, laboratoires etc.), les luminaires en 4000 K sont souvent utilisés pour donner aux surfaces une impression de pureté.

Température de couleur proximale (ou température de couleur corrélée): Température d'un corps noir idéal dont la couleur perçue est la plus proche de l'objet ou de la lumière observée. La température de couleur proximale est couramment utilisée car dans les faits, rares sont les sources à avoir des spectres équivalents aux corps noirs. Elle est exprimée en Kelvin.

Lumen (lm): Unité de mesure du flux lumineux, soit la quantité totale de lumière émise par une lampe. 1 lumen = 1 candela, x 1 stéradian.

Lux (lx): Unité d'éclairement ou de niveau d'éclairement égale à un lumen uniformément réparti sur une surface d'un mètre carré.

Photomètre (luxmètre): Appareil destiné à la mesure des grandeurs photométriques comme l'éclairement (en pied-bougies ou en lux).

Pied bougie (fc): Unité de travail pratique pour la mesure du niveau d'éclairement qui est égale à un lumen tombant uniformément sur une surface d'un pied carré.

Vision

Acuité visuelle: Capacité de perception distincte de détails ayant une faible différence angulaire.

Adaptation: Modification de l'état du système visuel en fonction de changements dans le champ visuel comme la luminance ou la couleur.

Bâtonnet: Cellule photosensible de la rétine réactive aux faibles luminances donc à la vision de nuit dite scotopique. Il y a environ 130 millions de bâtonnets dans la rétine. Ils sont peu sensibles à la couleur, mais participent à l'évaluation des formes et des contrastes et servent à la vigilance.

Classe de qualité: Classification des exigences de qualité relative à la limitation de l'éblouissement en fonction des caractéristiques de la tâche visuelle. Il existe 5 classes notées de A à E, du plus au moins exigeant.

Champ visuel: Espace angulaire dans lequel l'œil immobile peut (ou les yeux immobiles peuvent) voir un objet. Il est défini par la portée verticale de l'œil (140°) et le champ horizontal de vision (180°).

Circadien (rythme ou cycle): Regroupement des mécanismes biologiques et physiologiques qui se répètent pendant une période d'environ 24 heures, les plus connus étant l'état de veille/sommeil, l'humeur et la température du corps. Étymologiquement, le mot vient de circa (environ) et diem (jour).

Confort visuel: Défini une bonne condition de vision, sans éblouissement.

Cône: Cellule photosensible de la rétine réactive aux fortes luminances donc à la vision de jour dite photopique. Il y a environ 6 millions et demi de cônes dans la rétine qui participent au décodage de la couleur.

Cornée: Partie extérieure transparente et saillante de l'œil. La cornée est le premier élément de l'œil à jouer un rôle optique (dioptre) et joue un rôle de protection face au milieu extérieur.

Cristallin: Organe plein et transparent de l'œil situé entre l'iris et la rétine. D'un point de vue optique, le cristallin joue un rôle de lentille biconvexe et permet de concentrer les rayons lumineux sur la rétine au fond de l'œil.

Fovéa: Partie centrale de la macula située dans l'axe visuel. C'est la partie de la rétine où la sensibilité est la plus forte. La fovéa ne contient que des cônes, les bâtonnets étant situés dans la partie périphérique de la macula et de la rétine.

Flicker free ou anti scintillement: Pour faire simple, la plupart des dispositifs lumineux scintillent sans que ce soit perçu. Ces scintillements peuvent être une source de fatigue, d'inconfort voire de maux de têtes. En s'approchant très près de l'éclairage, il est assez facile d'observer ces scintillements à l'aide d'un smartphone utilisé comme caméra, illustrés par des bandes claires/sombres alternées.

Mélanopique: Grandeurs photométriques définies par rapport à la sensibilité des cellules à mélanopsine, qui ont un pic de sensibilité à 480 nm (pour mémoire, les cônes qui permettent de définir les grandeurs photométriques utilisées (lm, lx, cd) ont un pic de sensibilité à 555 nm).

Mélatonine: Hormone responsable du rythme circadien, souvent appelée hormone du sommeil.

Mésopique (vision): Vision sous luminosité moyenne (type crépusculaire) combinant la vision photopique et la vision scotopique utilisant à la fois les cônes et les bâtonnets.

Métamères (lumières ou rayonnements): Deux lumières/rayonnements sont dit(e)s métamères si l'œil humain ne peut les différencier alors qu'elles/ils ont des spectres électromagnétiques distincts.

Modulation temporelle: Fluctuation du niveau lumineux de l'éclairage potentiellement perceptible visuellement selon sa fréquence. Ses effets les plus connus sont le papillotement et l'effet stroboscopique.

Nerf optique: Nerf crânien qui relie le globe oculaire au cerveau. Il permet de transmettre l'information visuelle captée par les cônes et bâtonnets pour être interprétée par le cerveau.

Œil: Organe de la vision du règne animal qui permet de capter la lumière. D'un point de vue optique, l'œil humain est composé de la cornée, du couple iris/pupille, du cristallin puis de la rétine et est relié au cerveau par le nerf optique.

Papillotement: Impression d'instabilité visuelle due à un flux lumineux variable dans le temps, que ce soit de manière naturelle (passage d'un nuage par exemple) ou artificielle (passage dans un tunnel avec une grande distance entre les luminaires, source et/ou réseau électrique de mauvaise qualité…). Également couramment appelé flicker ou scintillement.

Photopique (vision): Vision sous forte luminosité (donc de jour) utilisant les cônes, avec un pic de sensibilité maximal à 555 nm (vert/jaune).

Pupille: Trou variable au centre de l'iris qui permet de réguler l'intensité lumineuse entrant dans l'œil.

Purkinje (phénomène ou effet de): Variation de la perception de la couleur en fonction de la luminosité. En vision diurne (vision photopique), le pic de sensibilité maximale est à 555 nm (vert/jaune, utilisation des cônes) alors qu'en vision nocturne (vision scotopique), le pic de sensibilité maximale est à 507 nm (vert bleu, utilisation des bâtonnets).

Rétine: Paroi qui constitue le fond de l'œil en contact avec le corps vitré, sur laquelle se concentrent les rayons lumineux. La rétine contient des cellules photosensibles de deux types et en son centre la macula et la fovéa.

Scotopique (vision): Vision sous faible luminosité (donc de nuit) utilisant les bâtonnets avec un pic de sensibilité maximale est à 507 nm (vert bleu). Vision opposée à la vision photopique.

Stroboscope: Source de lumière intermittente qui peut de fait – et suivant sa fréquence – générer des effets stroboscopiques.

Stroboscopique (effet): Effet visuel généralement non désiré dû à une prise de vue ou à un éclairage intermittent d'un objet un mouvement. Par exemple une roue qui donne l'impression de tourner à l'envers dans un film ou une source d'éclairage artificiel de mauvaise qualité qui peut donner l'impression qu'une pièce est immobile alors qu'elle est en mouvement (ce qui peut générer des risques de sécurité au travail).

Visibilité: Propriété de ce qui est visible (indépendamment des caractéristiques de l'observateur). La visibilité permet de caractériser de manière absolue la performance visuelle en fonction de l'éclairage.

Couleurs

CCT (Correlated Colour Temperature): Traduction de température de couleur proximale en anglais.

CMJ (Cyan Magenta Jaune): Couleurs primaires en synthèse soustractive.

CMJN (Cyan Magenta Jaune Noir): Système des couleurs primaires en synthèse soustractive auquel le noir est ajouté, ce qui permet des impressions de qualité en économisant de l'encre. Ce système est également appelé quadrichromie.

Composition spectrale: Répartition des longueurs d'onde d'un rayonnement (visible pour la lumière).

Couleur: Perception de l'œil humain des différentes ondes électromagnétiques de longueurs d'onde visibles (comprises entre 380 et 780 nm). Cette perception prend en compte la lumière incidente, la réflexion de la surface et la sensibilité de l'œil de l'observateur (la couleur n'est donc pas un absolu).

Couleur primaire: Couleur permettant avec ses nuances associées d'exprimer une grande partie des couleurs visibles, idéalement la totalité. En synthèse additive, il s'agit du système RVB – Rouge (700 nm), Vert (546,1 nm) et Bleu (435,8 nm). En synthèse soustractive, il s'agit du système CMJ – Cyan, Magenta et Jaune.

Couleur secondaire: Couleur obtenue par combinaison, en proportions égales, de couleurs primaires dans leurs ensembles respectifs (additif ou soustractif). Il s'agit du cyan, magenta et jaune en synthèse additive et du rouge, vert et bleu en synthèse soustractive (soit l'opposé des couleurs primaires).

Couleur tertiaire: Couleur obtenue par combinaison d'une couleur secondaire et la couleur primaire non contenue dans cette couleur secondaire.

CQS (Colour Quality Scale): Indice (différent de l'IRC) pour qualifier le rendu des couleurs avec des sources monochromatiques comme les LED. Cet indice a été mis au point au milieu des années 2000 par Yoshi Ohno et il se base sur 15 échantillons de couleurs hautement saturées.

D65: Etalon spectral correspondant à une lumière naturelle en plein jour (blanc froid de température de couleur 6500 K) servant de référence pour la colorimétrie et également pour la conformité au rythme circadien.

Diagramme de chromaticité: Représentation bidimensionnelle permettant de caractériser une perception de couleur. Cet espace colorimétrique a été défini pour la première fois en 1931 par la Commission internationale de l'éclairage (CIE) et recense dans un système de coordonnées toutes les couleurs perceptibles. Il prend en compte les différentes manières dont l'être humain perçoit les différentes couleurs. Les couleurs sont décrites dans l'espace colorimétrique par une valeur x et une valeur y.

Irisation: En éclairage, phénomène qui voit apparaître des couleurs (celles de l'arc-en-ciel) suite à la décomposition de la lumière. Ce phénomène peut s'observer par exemple en réflexion sur de l'aluminium optique ou en transmission au travers d'un plastique (phénomène du prisme ou de l'arc-en-ciel).

Luminosité: Appelée également clarté, cette propriété correspond à l'apparence lumineuse d'une couleur. Si une couleur est sombre par exemple, sa luminosité sera faible. Cette notion se rapproche – sans être équivalente – de la luminance. Pour la modifier il suffit de mélanger une teinte avec du noir ou du blanc.

Ra: Valeur moyenne de l'IRC, bien noter qu'elle n'est calculée que sur les 8 premiers échantillons (et que du coup elle ne prend pas en compte notamment le rouge intense R9)

RGB (Red Green Blue): Traduction de RVB (Rouge Vert Bleu) en anglais.

Mélange des couleurs: À partir des couleurs Rouge (R), Vert (G) et Bleu (B) et selon le luminaire, il est possible de produire jusqu'à 2 millions de couleurs réglables différentes, mais aussi d'obtenir un changement de couleur continu.

RGBA (Red Green Blue Amber): Association de l'ambre aux trois couleurs primaires en synthèse additive (RGB).

RVB: Couleurs primaires en synthèse additive.

Saturation: Appelée également pureté, il s'agit de l'intensité d'une teinte.

Synthèse additive: Opération consistant à combiner la lumière de plusieurs sources émettrices colorées afin d'obtenir une nouvelle couleur (la couleur est produite par la lumière). En synthèse additive, les couleurs primaires sont le rouge (700 nm), le vert (546,1 nm) et le bleu (435,8 nm). Il s'agit du système RVB (ou RGB pour les anglophones). L'addition de ces trois couleurs donne du blanc et l'absence de couleur donne du noir. Cette synthèse trouve ses applications dans l'éclairage, la vidéo-projection ou les écrans.

Synthèse soustractive: Opération consistant à combiner l'effet d'absorption de plusieurs couleurs afin d'obtenir une nouvelle (la couleur est obtenue par des pigments). En synthèse soustractive, les couleurs primaires sont le cyan, le magenta et le jaune. Il s'agit du système CMJ (ou CMY pour les anglophones). La soustraction de ces trois couleurs donne du noir et l'absence de couleur donne du blanc (si le support est blanc). Cette synthèse trouve ses applications surtout dans l'impression couleur (dans ce cas le noir est généralement ajouté, il s'agit de CMJN).

Optique

Aberration optique: Défaut d'un système optique qui provoque une déformation des images.

Angle de défilement: Angle dans lequel la source lumineuse ne peut être vue par l'utilisateur. Dans la pratique, cet angle est généralement défini à partir de la verticale jusqu'à la première ligne de vision.

Anisotrope: Caractérise la dépendance à la direction. Cela peut s'appliquer à une propriété ou à une matière. Par exemple, un rayon lumineux peut avoir une réflexion qui dépend de son angle d'incidence.

Brillant: Caractéristique d'une surface particulièrement plane d'un point de vue microscopique, ce qui lui confère des propriétés optiques de réflexion spéculaires importantes (qui donne à cette surface un effet "miroir"). En ce sens, ce terme est opposé à mat.

Coefficient de réflexion: Propriété d'une surface définie par l'intensité du rayon réfléchi, divisée par celle du rayon incident.

Coefficient de transmission: Propriété d'une matière définie par l'intensité du rayon transmis, divisée par l'intensité du rayon incident.

Collimateur: Dispositif optique permettant d'obtenir un faisceau de rayons parallèles à partir d'une source de lumière, typiquement grâce à une lentille convergente (par exemple une lentille de Fresnel) en matière transparente. Des collimateurs d'un ou deux centimètres de diamètre peuvent être utilisés dans les luminaires à LED.

Cylindro-parabolique: Type de réflecteur qui permet d'obtenir un faisceau de rayons parallèles à partir d'une source de lumière. Ces réflecteurs, réalisés généralement en aluminium spéculaire (brillant), sont donc très intensifs et typiquement utilisés pour éclairer les voies ferrées.

Défilement: Principe optique consistant à cacher la source lumineuse à la vue de l'observateur sous un certain angle.

Diffus: propriété d'une surface ou d'une matière qui dirige les rayons lumineux incidents dans tous les sens. En réflexion, ce terme est opposé à spéculaire et en réfraction/ transmission, cela correspond à l'effet d'une matière opale.

Dioptre: surface qui sépare deux milieux différents (d'indices de réfraction différents) et qui engendre de la réfraction et de la réflexion au passage d'un rayon lumineux.

DLOR (Downward Light Output Ratio): Partie directe du rendement en service d'un luminaire, c'est à dire dirigée au-dessous du plan horizontal. Cette notion est notamment utilisée en éclairage public pour traiter de la pollution lumineuse.

Eblouissement: Conditions de gêne ou inconfort (voire diminution de l'aptitude à distinguer des objets) provoquées par des luminances ou des contrastes de luminances trop élevés.

Extensif: Propriété d'un flux lumineux à être large ou aptitude d'un système optique à élargir un flux lumineux.

Facteur de réflexion: Rapport du flux lumineux réfléchi par une surface au flux lumineux incident sur cette surface.

FFR: Rapport entre le flux supérieur (ULOR) et inférieur (DLOR) d'un luminaire. Si le luminaire n'éclaire que "vers le bas", son FFR sera nul.

Indice de réfraction: Grandeur sans dimension propre à un milieu (eau, air, verre, PMMA…) caractérisant le comportement de la lumière dans ce milieu. Cet indice permet de calculer le trajet des rayons lumineux en fonction des milieux traversés et peut dépendre de la longueur d'onde, ce qui permet par exemple de décomposer la lumière blanche par un prisme ou les gouttes d'eau (arc-en ciel).

Intensif: Propriété d'un flux lumineux à être concentré ou aptitude d'un système optique à concentrer un flux lumineux.

Isotrope: Il s'agit du fait de ne pas dépendre de la direction. Cela peut s'appliquer à une propriété ou à une matière, par exemple le déplacement de la lumière dans l'air.

Lentille: Dispositif optique composé d'une matière transparente et dont la forme est étudiée pour diriger la lumière d'une façon spécifique, convergente ou divergente.

Lentille de Fresnel: Lentille spécifique qui consiste à garder les propriétés de la lentille convergente plan/convexe en enlevant de la matière pour diminuer les coûts et le poids. Cette lentille très utilisée (notamment dans les phares maritimes) a été inventée par Augustin Fresnel, scientifique français né en 1788.

LOR (Light Output Ratio): Exprime le rendement en service d'un luminaire.

Luminance: Quantité de lumière reçue dans un angle solide donné divisée par la surface éclairante, voir la page dédiée. Cette notion qui s'exprime en cd/m² est très utile pour mesurer et anticiper les éventuels problèmes d'éblouissement.

Mat: Caractéristique d'une surface non plane d'un point de vue microscopique, ce qui lui confère des propriétés optiques de réflexion diffuses importantes. En ce sens, ce terme est opposé à brillant.

Opale: Se dit d'une matière homogène d'aspect blanc (souvent laiteux) non opaque. Dans l'éclairage cette matière est généralement du verre. Suivant les matériaux, l'opalescence peut être obtenue soit dans la masse, soit par un traitement de surface type sablage.

Opaque: Se dit d'une matière qui ne laisse pas passer la lumière, c'est-à-dire les ondes électromagnétiques de longueurs d'onde comprises entre 380 et 780 nm.

Optique géométrique: Partie de la science physique, qui étudie l'optique en prenant comme postulat le fait que les rayons lumineux se déplacent selon des règles définies.

Parabole: Forme géométrique correspondant à une équation du second degré en mathématique. Cette forme possède un point singulier appelé foyer qui a la propriété d'être le point où se concentrent tous les rayons parallèles à l'axe de la parabole.

Polycarbonate: Plastique très résistant, utilisé dans l'industrie du luminaire pour ses propriétés de transparence.

Rayon absorbé: En optique géométrique, rayon qui est absorbé par la matière étudiée.

Rayon incident: En optique géométrique, rayon qui arrive sur la matière étudiée.

Rayon réfléchi: En optique géométrique, rayon qui se réfléchit sur la matière étudiée.

Rayon réfracté: En optique géométrique, rayon qui est dévié par la matière étudiée.

Rayon transmis: En optique géométrique, rayon qui sort de la matière étudiée

Réflecteur: Système optique généralement en aluminium, qui réfléchit la lumière. Il en existe de multiples variétés: asymétrique/symétrique, intensif/extensif, cylindro-parabolique.

Réflexion: Phénomène physique correspondant à ce qui se passe lorsque des rayons incidents interfèrent avec une surface et reviennent dans leur milieu d'origine.

Réfraction: Changement de direction que subissent les rayons lumineux incidents en passant à travers du verre ou du plastique transparent, sans revenir à leur milieu d'origine.

Rendement optique: Rendement théorique d'un système optique exprimé par le rapport entre le flux sortant du système divisé par la somme des flux des sources.

Satiné: Se dit d'une surface dont l'état est entre brillant et mat, c'est-à-dire avec des composantes de réflexion spéculaires et diffuses.

Transparent: Propriété d'une matière translucide, c'est-à-dire incolore et non opaque. Une matière transparente plane d'épaisseur homogène ne transformera pas ce qui est vu. Dans le cas contraire (matière non plane ou épaisseur non homogène), les modifications peuvent être voulues et sensibles (lentille, prisme…).

ULOR (Upward Light Output Ratio): Partie indirecte du rendement en service d'un luminaire, c'est à dire dirigée au-dessus du plan horizontal. Cette notion est notamment utilisée en éclairage public pour traiter de la pollution lumineuse.

Sources lumineuses

Durée de vie: La durée de vie d'une lampe indique le nombre d'heures de fonctionnement jusqu'à ce qu'elle devienne inutilisable, soit elle ne fonctionne plus ou elle n'assure plus ses performances initiales.

Efficacité lumineuse: Quotient du flux lumineux total (en lumens) de la source de lumière, par la puissance en watts absorbée par celle-ci et s'exprime en lumens par watt (lm/W).

Lampe: Terme générique pour une source lumineuse électrique. Une lampe comprend généralement un élément générateur de lumière (tube à arc ou filament), du matériel de fixation, une enveloppe générale et un culot.

Lampes à incandescence: Ce sont les lampes «classiques» utilisées pour l'éclairage intérieur. L'ampoule contient un filament de tungstène qui, porté à haute température (environ 2500°C) par le passage d'un courant électrique, émet de la lumière. Généralement l'ampoule est remplie d'un gaz inerte comme l'argon ou le krypton, qui permet d'éviter la détérioration du filament. Ces lampes

ont un rendement lumineux faible, car la plus grande partie de l'énergie électrique est convertie en chaleur ou rayonnement infrarouge plutôt qu'en lumière (visible).

Lampes halogènes: Ce sont des lampes à incandescence dans lesquelles est ajouté un gaz de la famille des halogènes ou un de leurs dérivés. Ce gaz régénère le filament de tungstène (cycle halogène) et augmente ainsi fortement sa durée de vie. Les lampes halogènes ont un meilleur rendement que les lampes à incandescence classiques, car elles fonctionnent à plus haute température (environ 2900°C). L'ampoule doit alors être réalisée dans un matériau résistant à ces hautes températures: quartz ou verres spéciaux (d'où l'appellation courante de lampe quartz-iode). A cause de leur température plus élevée, les lampes halogènes émettent plus de rayonnements ultraviolets, qui ne sont pas absorbés par le quartz de l'ampoule; pour cette raison, on place généralement devant la lampe une fenêtre en matière plastique transparente ou en verre dont la fonction est d'absorber ces radiations nocives.

Lampes à décharge: ce sont des lampes électriques constituées d'un tube ou d'une ampoule en verre remplis de gaz ou de vapeur métallique, sous haute ou basse pression, au niveau desquels un arc électrique (décharge) est provoqué en les soumettant à une tension appropriée, d'où l'émission par luminescence d'une lumière dont la couleur dépend du gaz utilisé.

Lampes à haute intensité de décharge ou HID (High Intensity Discharge): Ce sont des lampes à décharge utilisant généralement de la vapeur de mercure, du sodium ou halogénures métalliques comme mélange gazeux sous haute pression, pour y générer une décharge électrique à haute intensité, émettrice de lumière avec de grandes puissances d'éclairage.

Lampes à tubes fluorescents: Les tubes appelés couramment «néons», renferment un mélange d'argon et de vapeur de mercure très raréfié. Une décharge électrique au travers de ce gaz, d'un bout à l'autre du tube, fait briller le mercure d'un rayonnement ultraviolet, qui excite une substance fluorescente (composés phosphorés) déposée sur la paroi interne du tube, qui émet en retour une lumière blanche. Les lampes dites économiques ou LBC, sont également des tubes fluorescents, dits compacts.

Lampes fluorescentes compactes (LFC): Appelées aussi lampes fluocompactes ou LBC (Lampes Basse Consommation), elles sont équipées d'un tube fluorescent (parfois dissimulé dans une seconde ampoule) et d'un ballast électronique.

Lampes à vapeur de mercure: Autrefois utilisées en abondance pour l'éclairage public, elles sont de plus en plus remplacées par les lampes au sodium, qui ont un meilleur rendement lumineux. Elles produisent une lumière blanc-bleuté, grâce à une décharge électrique à travers la vapeur de mercure à haute pression (500 fois la pression des tubes fluorescents) contenue dans l'ampoule. A cause de cette pression plus élevée, elles émettent plus de lumière visible et moins d'ultraviolet que les tubes fluorescents.

Lampes à vapeur de sodium à basse pression ou LPS (Low Pressure Sodium): Le tube est rempli d'un mélange de néon, d'argon et de parcelles de sodium. Une décharge électrique dans ce mélange fournit une lumière orange monochromatique (longueur d'onde 589 nm). Le néon, avec sa couleur rouge caractéristique, sert à démarrer la décharge et à chauffer le sodium. Ces lampes sont surtout utilisées pour l'éclairage des routes. De toutes les sortes de lampes actuellement disponibles, ce sont celles qui ont la plus grande efficacité lumineuse. C'est le type de lampe idéal quand le rendu des couleurs n'est pas important. Dans les régions qui ont établi des règlements sur l'éclairage extérieur, c'est le seul type de lampe autorisé à proximité des observatoires astronomiques, car le rayonnement qu'elles émettent peut facilement être filtré.

Lampes à vapeur de sodium à haute pression ou HPS (High Pressure Sodium): Egalement des lampes à décharge, elles émettent une lumière jaune-orange, plus éblouissante que celle des lampes au sodium à basse pression, avec un rendu des couleurs un meilleur. Actuellement, c'est ce type de lampes qui est le plus couramment installé pour l'éclairage public, bien que son efficacité lumineuse soit moins bonne que celles des lampes au sodium à basse pression.

Lampes aux halogénures métalliques ou MH (Metal Halide): Lampes à décharge à haute pression, qui contiennent de la vapeur de mercure haute pression à laquelle sont ajoutées des halogénures (ou iodures) métalliques. Elles émettent une lumière blanche avec un rendu de couleur bien meilleur que les lampes au sodium, avec cependant un rendement lumineux plus faible.

Lampes à électroluminescence où à LED (Light Emitting Diode): lampe à diodes électroluminescentes, dont la structure est simple et son intégration dans un circuit électrique s'avère facile. Dans le principe de son fonctionnement, le mouvement des électrons provoque une émission de lumière selon le phénomène d'électroluminescence.

LED SMD: Une LED est dite SMD lorsqu'elle est directement soudée sur le circuit imprimé. On distingue plusieurs types de LED SMD :

- la LED SMD 2835 contient une LED, elle doit son nom à sa dimension de 3,5mm * 2,8mm.
- la LED SMD 5050 contient trois LED, elle doit son nom à sa dimension de 5,0mm * 5,0mm
SMD 2216, 3528 etc..
De façon générale, une LED SMD 5050 est plus lumineuse qu'une LED SMD 2835.

LED COB: C'est la version la plus performante des LED. COB est l'acronyme de « Chip On Board », en français puce sur circuit. Techniquement, cette technologie n'est pas tellement éloignée des LED SMD (les modules qui sont utilisés sur les bandeaux LED, par exemple, mais que l'on retrouve aussi dans les ampoules). La grande différence est que la LED COB est en mesure d'accueillir davantage de diodes que la SMD.

LED COB filament: Ce dispositif reprend la même technologie que la COB classique, à la différence que le module, au lieu de se présenter dans la configuration d'une puce, prend la forme d'un filament. Techniquement, il s'agit simplement d'une enfilade de LED COB le long d'un conducteur. Le tout est recouvert de silicium afin d'obtenir une lumière homogène et créer ainsi des ampoules LED rétro originales.

Luminaires

Applique: Luminaire généralement horizontal, installé sur une surface verticale (un mur par exemple). Il a bien souvent une partie directe (éclairage vers le sol) et une partie indirecte (éclairage vers le plafond).

Borne: Luminaire extérieur généralement en forme de colonne de hauteur d'environ 80cm.

CEM (Compatibilité Electro Magnétique): Aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner de façon satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans générer des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement.

Classe électrique (Classe de protection électrique): Pour un appareil électrique, elle caractérise le niveau de protection électrique pour l'homme. Il existe quatre classes numérotées de 0 à 3. (simple, liaison à la terre, double isolation sans terre ou alimentation par transformateur TBT).

Corps: Partie structurante du luminaire d'un point de vue mécanique, c'est en général la partie qui est fixée sur le support (sol, mur ou plafond).

Culot: Correspond à la partie de la lampe qui assure la cohérence mécanique, tout en et garantissant le contact électrique au niveau de la douille. Il existe 3 sortes de culots: A petite vis (E14), à grande vis (E27) et à baïonnette (B22).

Diffuseur: Dispositif couramment installé à la base ou sur les côtés d'un luminaire pour rediriger ou diffuser la lumière provenant d'une source.

Diffusion: Dispersion de la lumière qui tombe sur une surface.

Douille: Dispositif pour l'installation de sources lumineuses (lampes) dans les luminaires

Downlight: Luminaire de petites dimensions (de 10 à 20 cm environ), le plus souvent non modulaire, à encastrer dans un faux plafond et sont très courants dans les couloirs par exemple. Ils existent en version fluo compacte ou plus avantageusement maintenant en version LED.

Eclairage direct: La lumière est entièrement dirigée vers le bas.

Eclairage fonctionnel: Éclairage répondant à des critères de fonctions (le travail, la présentation d'objets, etc.).

Eclairage indirect: La lumière est totalement dirigée vers le haut.

Efficacité d'un luminaire: Rapport du flux total en lumens du luminaire au flux lumineux émis.

Encastré: Luminaire encastré, généralement dans un faux plafond (mur, sol..), tout en étant modulaire avec ossature métallique et dalles.

Facteur de puissance: Par définition c'est le rapport qui existe entre la puissance active et la puissance apparente. Pour faire très simple c'est le pourcentage d'énergie qui profite au système électronique. Plus il est grand plus l'énergie consommée est exploitée pour éclairer. Les tubes fluorescents avec ballast ont un facteur de puissance très faible de l'ordre de 0,4 – 0,5.

Gamelle: Luminaire caractérisé par un réflecteur en forme de cloche (généralement en aluminium repoussé) avec une lampe à décharge haute pression (sodium ou halogénures métalliques) voire des lampes fluo compactes ou LED. Ces luminaires sont très présents dans les lieux de grandes hauteurs comme les usines ou les halls.

Hublot: Luminaire généralement vertical et étanche, installé sur une surface verticale (un mur par exemple). Il éclaire généralement à l'horizontal et possède bien souvent des qualités mécaniques élevées (IP et IK). Ces luminaires sont régulièrement utilisés dans des endroits techniques type escaliers, couloir ou en extérieur.

Indice de protection IP: Permet de connaître le niveau de protection d'un matériel face à des intrusions de corps solides et liquides. Pour cela, il est suivi de deux chiffres x et y (IPxy) dont le premier représente le pouvoir de protection

contre les corps étrangers solides (poussière…) et le second contre les l'humidité ou les liquides.

Indice de protection IK: Indique le niveau de protection procuré par l'enveloppe des matériels électriques contre les impacts mécaniques externes (code IK) selon les normes.

Lanterne: Partie éclairante d'un lampadaire extérieur rattachée au mat (ou à un mur) par une console ou une crosse.

Luminaire: Appareil d'éclairage complet constitué d'une ou plusieurs lampes et de pièces conçues pour diffuser la lumière. Il sert à positionner et protéger la ou les lampes, tout en les raccordant à une source d'alimentation électrique.

Luminaires pour espaces humides: Sont des luminaires dotés d'un degré de protection supérieur, dont la protection contre la pénétration de l'humidité doit être caractérisée par l'indice IP44 au minimum.

Luminaire de sécurité: Luminaire de secours qui permet d'assurer la protection des personnes qui contribuent à l'évacuation d'une zone ou qui tentent de terminer un travail dangereux avant de quitter les lieux.

Projecteur: Vaste famille de luminaires, généralement en fonte d'aluminium et avec un flux dirigé, de petites ou grandes dimensions, pour des applications aussi variées que les magasins de vêtements ou stades de football.

Réflecteur: Dispositif servant à modifier, par réflexion, la répartition spatiale du flux lumineux émis par une source lumineuse donnée (Ampoule, …)

Réflecteur/miroir: Qui a la propriété de diriger ou d'orienter la lumière.

Réflecteur dichroïque: Appareil permettant de réfléchir la lumière avec différentes variations de couleurs.

Réglette: Luminaire fluorescent linéaire le plus basique. Il est généralement constitué d'une tôle d'acier pour le corps et une autre pour le capot avec des embouts en plastique. Ces appareils sont très bon marché et sont utilisés dans des lieux où ils sont bien souvent invisibles (comme les corniches de faux plafond).

Signalétique: Eclairage de (très) faible puissance qui n'est pas destiné à éclairer mais à signaler uniquement. Il peut s'agir par exemple d'encastré de sol à LED.

Spot: Luminaire de petite puissance, généralement directif. Il peut être encastré, en saillie ou sur rail, orientable ou fixe.

Ballasts et Drivers

Alimentation: Boîtier électronique qui permet d'alimenter les lampes en énergie électrique, avec des caractéristiques adaptées. Dans l'éclairage à LED, nom pouvant correspondre au driver.

Amorceur: Composant qui permet, à l'aide d'un ballast magnétique, de provoquer la forte différence de potentiel dans le gaz des lampes HID, afin de l'ioniser et y initier un arc électrique. Cette appellation correspond aux lampes aux halogénures métalliques ou sodium. Pour les lampes fluorescentes, le nom de starter est utilisé.

Ballast: En électricité le terme "ballast" est employé pour tout composant dont le but est de réduire l'intensité. En éclairage, ce terme a progressivement désigné la solution magnétique (ballast magnétique) permettant de régler la tension réseau à celle exigée par les lampes à décharge. A noter que le ballast magnétique génère également la forte tension d'amorçage. Pour les produits LED, les ballasts sont appelés « Driver » lorsqu'ils produisent un courant constant (tension de sortie variable) et Power supply lorsqu'ils génèrent une tension continue constante.

Bilame: Elément mécanique composé de deux lames de métaux différents, soudées entre elles. Les métaux possèdent des coefficients de dilatation différents et sensibles aux variations de température. Cet élément est présent historiquement dans les clignotants de voiture ou dans les starters conventionnels des lampes à décharge: dans ces deux cas, le passage du courant électrique chauffe le bilame qui se déforme et ouvre le circuit.

Bobine: Appelée également solénoïde, inductance voire self. Ce composant électrique est constitué d'un enroulement de fil conducteur, éventuellement autour de tôles magnétiques (qui constituent le noyau) comme c'est le cas des ballasts ferromagnétiques. Dans l'éclairage, la bobine est utilisée d'une part pour sa faculté à générer une forte tension suite à une coupure de courant et d'autre part pour constituer une impédance pouvant limiter l'intensité du courant électrique.

Chute de tension: Baisse de tension du signal électrique, due à la résistance des fils électriques (pertes en ligne). Cette baisse de tension peut avoir des conséquences lorsque le signal est trop sensible, comme par exemple pour le signal de commande 1-10V. Si le câble est trop long, les luminaires ne pourront pas varier de la même manière, ceux qui sont loin auront un signal plus faible que les premiers et donc un flux lumineux plus atténué également.

Condensateur: Composant électrique permettant de stocker des charges électriques opposées sur ses armatures. Ce composant est utilisé dans les luminaires pour compenser le déphasage provoqué par les ballasts magnétiques.

Déphasage: En électricité, différence de phase (généralement notée φ), entre deux signaux sinusoïdaux lorsque le régime est alternatif. Un circuit "inductif" (comprenant des bobines comme les ballasts magnétiques) provoque un déphasage entre la tension et l'intensité, alors qu'un circuit "capacitif" (comprenant des condensateurs) provoque un déphasage opposé. Afin d'éviter ce déphasage, souvent rencontré dans des circuits selfiques (ballasts...) qui génèrent une énergie réactive préjudiciable, des condensateurs de compensation sont utilisés.

Différence de potentiel: Soustraction mathématique entre deux potentiels électriques. De la même manière que le potentiel est comparé à l'altitude, la différence de potentiel est comparée à une différence d'altitude entre deux points et permet de déterminer l'énergie potentielle électrique, comme la hauteur d'une chute d'eau permet de déterminer l'énergie potentielle d'une retenue d'eau. La différence de potentiel électrique est appelée couramment tension et s'exprime en Volt (V).

Dimmable (ou à intensité variable): Terme caractérisant la compatibilité d'une ampoule avec un variateur d'intensité. Pour une ampoule ou un spot dimmable, il est possible de régler l'intensité lumineuse via un variateur d'intensité.

Driver: Boîtier électronique, appelé également alimentation, inséré entre le réseau électrique (230V et 50Hz) et les sources LED.

Energie: En physique, un système possède de l'énergie s'il est capable de générer un mouvement, de la chaleur, de l'électricité, de la lumière… L'énergie correspond à la puissance multipliée par le temps et s'exprime couramment en Joules (J) ou en kilowatt-heure (kWh).

Energie/puissance réactive: Energie/puissance électrique imaginaire liée au déphasage entre l'intensité et la tension apparaissant en régime alternatif dans un réseau comportant des composants capacitifs (condensateur par exemple) ou inductifs (bobine par exemple). Le fait de générer une telle puissance, peut contraindre à dimensionner de façon exagérée (donc chère et inutile) le réseau et peut provoquer son instabilité. Des composants peuvent être alors être rajoutés au circuit uniquement pour réduire le déphasage en compensant localement l'énergie réactive. C'est le cas du condensateur lorsqu'un ballast magnétique est utilisé pour les lampes à décharge.

Fréquence: En électricité, nombre de période dans une seconde lorsque le courant est alternatif. Cette grandeur s'exprime en Hertz (Hz) et prend généralement les valeurs normalisées (50 ou 60 Hz) pour l'ensemble des réseaux électriques dans le monde.

Harmonique: En électricité, les harmoniques sont des courbes sinusoïdales de plus grandes fréquences que la sinusoïde principale (représentation du courant alternatif) qui viennent se superposer à cette dernière. Cela crée des perturbations sur le réseau principal qui sont à limiter (voir THD). Elles peuvent être générées par certains types d'appareils électriques, caractérisés par une charge non linéaire comme les ordinateurs, les télévisions, les ballasts les drivers LED.....

Hertz (Hz): Unité de fréquence, 1 Hz correspondant à un événement (période) par seconde.

Intensité: En électricité, charge électrique traversant un fil pendant une seconde, mesurée en Ampère (A).

Neutre: En électricité, le neutre sert de référence aux différentes phases. La manière dont ce potentiel est relié à la terre dépend du régime du neutre (TT, IT,TN…).

Neutre (fil de): Fil électrique de couleur bleue. Dans le régime du neutre couramment utilisé, il est relié à la terre et en principe au potentiel 0V. Il est donc théoriquement inoffensif mais il est toujours déconseillé de le toucher en pratique car il peut être dangereux en cas d'inversion de fils (neutre et phase) ou non mis à la terre.

Phase: En électricité et notamment en courant alternatif, mesure angulaire d'un signal sinusoïdal. "En phase" signifie que les signaux passent au même moment par la valeur 0.

Phase (fil de): Fil électrique de couleur variable (rouge, marron, noir…) sur lequel la tension électrique est mise en évidence. C'est le fil qui porte le potentiel électrique donc celui qui peut être dangereux pour l'homme, donc à ne pas toucher.

Potentiel: En électricité, le terme "potentiel" caractérise un état électrique en un point de l'espace. Dans le langage courant, il peut être utilisé indûment pour signifier différence de potentiel. En effet, un potentiel seul est rarement intéressant et cette notion s'exprime mieux par une différence de deux points (comme l'altitude fait référence au niveau de la mer pris conventionnellement à 0).

Puissance: En physique, la puissance correspond à une énergie par unité de temps et est exprimée en Watt (W). Elle est calculée dans des conditions simples en électricité par la multiplication de la tension par l'intensité (P=U*I), tout comme dans le cas d'une chute d'eau où elle est égale à la hauteur de la chute multipliée par le débit.

SELV (Safety Extra-Low Voltage): Caractéristique de certains drivers LED, qui sont utilisés pour alimenter des barrettes LED sous basse tension de sécurité (<50V), permettant ainsi de ne pas avoir besoin de protection complémentaire contre le risque électrique (comparable à la Classe électrique III pour les luminaires). A contrario, les barrettes alimentées par

un driver NON SELV doivent avoir une protection supplémentaire contre le risque électrique: il est indispensable d'éviter tout contact direct humain lorsqu'elles sont sous tension.

Starter: Composant qui permet – à l'aide d'un ballast magnétique – de provoquer la forte différence de potentiel dans le gaz de la lampe afin de l'ioniser et d'initier l'éclairage. Cette appellation correspond aux lampes fluorescentes. Pour les lampes au halogénures métalliques ou sodium, le nom d'amorceur est utilisé.

Tension: En électricité, appellation courante de la différence de potentiel électrique entre deux points d'un réseau mesurée en Volt (V). La tension est de 230 V par exemple entre les deux bornes d'une prise, même si aucun appareil n'est branché.

Terre: En électricité, concept qui assimile la terre à un conducteur électrique de potentiel 0 Volt. Concrètement, cela permet d'avoir un repère de potentiel électrique entre les différentes installations et en pratique, il suffit de mettre un conducteur suffisamment profond dans le sol pour apporter ce potentiel nul dans une installation électrique.

Terre (fil de): Fil électrique de couleur jaune et verte relié à la terre, c'est-à-dire par définition au potentiel 0 Volt. il est donc théoriquement inoffensif mais il est toujours déconseillé de le toucher en pratique car il peut être dangereux en cas d'inversion de fils (terre et phase).

THD (Taux de Distorsion Harmonique ou Total Harmonic Distortion en anglais): Mesure des harmoniques générées par un appareil électrique, typiquement un ballast ou un driver dans l'éclairage. Généralement, la valeur de 10 % est limite, ce qui signifie qu'un THD<10 % peut être jugé bon alors qu'un THD>%10 n'est pas acceptable.

Transformateur: Sert à augmenter ou réduire les tensions alternatives ainsi que la séparation galvanique simultanée des différents circuits électriques. Le rôle d'un transformateur dans la technologie halogène basse tension est de réduire la tension réseau de 230 V à une tension de 12 V.

Triphasé: Courant électrique formé par trois courants identiques mais déphasés de manière égale sur une période. Ce type de courant est très fréquent dans les installations de fortes puissances car il permet des gains importants en production et en transport d'électricité. Dans une installation électrique d'un bâtiment alimenté en "triphasé", il est important d'équilibrer les phases.

Gradation et contrôle de la lumière

1-10V: Système de commande simple (analogique).

Adresse IP: Adresse d'un composant suivant le protocole IP (Internet Protocol). Cette adresse est de type xxx.xxx.xxx.xxx, par exemple pour un réseau informatique.

Adressage: Méthode ou état qui établit une correspondance entre une adresse (comme une adresse IP) et un composant. Un réseau informatique (où les composants sont des ordinateurs, imprimantes, routeurs…) ou un bus DALI (où les composants sont des ballasts, alimentations, détecteurs, interfaces…) ont un adressage. Cela permet de gérer de manière fine un grand nombre de composants en envoyant l'information uniquement à celui destinataire et éventuellement d'avoir un flux bidirectionnel (le composant identifié par son adresse peut retourner de l'information à son tour).

AM (Amplitude Modulation): La modulation d'amplitude d'un signal électrique est utilisée pour faire varier son module, et s›applique le plus souvent à sa tension. Par exemple, la gradation PWM (Pulse Width Modulation), appliquée pour varier la tension d'alimentation des LED afin de contrôler l'intensité de la lumière émise.

API (Application Programming Interface): L'interface de programmation applicative est un logiciel qui permet de programmer ou d'accéder aux datas d'un appareil. Par exemple un driver LED gradable peut être programmé (on/off, gradation, température de couleur…) et ses informations récupérées (dysfonctionnement, consommation, gradation, température de couleur…).

Analogique: Ce terme désigne les phénomènes ou les appareils dont les variations sont analogues (d'où le terme) à la grandeur physique associée. Le système de commande de gradation 1-10V par exemple est de type analogique car les variations du potentiomètre sont analogues à celles de l'éclairage. Il en est de même pour le fonctionnement de la gradation des LED par modulation d'amplitude (AM). Ce terme est couramment opposé à numérique.

Art-net: Protocole de commande dont le but est de permettre le transfert de grandes quantités de données DMX512 vers un réseau plus large (Ethernet).

Bluetooth: Protocole permettant la transmission d'informations à courte distance sans fil (wireless).

Bouton poussoir (BP): Appelé également "Switch control", ce système de commande simple, permet de gérer la gradation de l'éclairage à partir d'un simple interrupteur de type bouton poussoir.

Broadcast: En communication et informatique, diffusion de l'information d'un émetteur à plusieurs récepteurs de manière simultanée (à la différence du pairing ou du mesch).

Bus (de commande ou de contrôle): Liaison physique reliant différents composants ou appareils (en éclairage: détecteur, interface, ballast, alimentation, relais…) à contrôler.

CCT (Constant Current Reduction): Terme anglais pour signifier la gradation de type analogique pour les LED (par contrôle de courant).

Courant faible: Réseau électrique appelé "de commande" car seules les informations y circulent (informatique, téléphonie, fax, DALI,…). Les tensions et puissances en jeu y sont faibles.

Courant fort: Réseau électrique appelé "de puissance" car il alimente en puissance les appareils installés sur le circuit, entre autres les luminaires (alimentation en général en 230V).

Courant Porteur en Ligne (CPL): La communication par courant porteur en ligne, superpose au courant d'alimentation des appareils électriques (généralement un signal sinusoïdal de 50Hz) un signal de haute fréquence et de faible énergie. Ce signal est codé à l'entrée et décodé à la sortie, permettant ainsi de transporter de l'information sans ajout de fils supplémentaires (contrairement aux bus ou autres fils de commande). Cette technique de commande est utilisée dans l'éclairage extérieur.

DALI (Digital Addressable Lighting Interface): Protocole métier (c'est-à-dire dédié à l'éclairage) de contrôle des luminaires, défini à la fin des années 1990. Ce système numérique fonctionne avec un bus de commande sur lequel sont branchés les composants à contrôler.

DALI 2 (Digital Addressable Lighting Interface): Deuxième version du DALI qui date de 2015, qui se distingue notamment par une interopérabilité plus forte des composants et la certification effective de tous les produits marqués DALI 2.

Décrochage: Seuil minimal en dessous duquel les lampes à décharge (HID) ne peuvent plus fonctionner. En effet, de par leur principe, il n'est pas possible pour certaines lampes de baisser le flux au delà d'un certain seuil relativement à celui nominal, sinon elles "décrochent" (extinction de l'arc électrique).

Découpage de phase: Système de gradation pour lampes à incandescence ou halogènes. (Exemple en utilisant un triac pour faire varier la tension AC du réseau électrique).

Détecteur de luminosité: Détecteur qui mesure la luminosité en un point, ce qui permet, en le reliant aux luminaires, d'adapter le flux de ces derniers par un système de gradation afin d'avoir toujours la même quantité de lumière.

Détecteurs de mouvement: Ont pour but d'enregistrer les mouvements au sein de leur zone de surveillance pour déclencher (ou éteindre) la lumière en fonction de la présence. On distingue les détecteurs de mouvement qui réagissent de manière passive à la diffusion de chaleur (désignés communément PIR, IR ou détecteurs de proximité) de ceux qui sont actifs et enregistrant les mouvements avec des ondes haute-fréquence (détecteurs HF). En général, les détecteurs de mouvement disposent également d'un interrupteur crépusculaire.

Détecteur de présence infrarouge: Détecteur de présence sensible à la chaleur (du corps humain par exemple).

Détecteur de mouvement hyperfréquence: Détecteur de mouvement qui peut être utilisé pour la commande de luminaires à travers des obstacles comme le verre ou le plastique.

Dimmable ou variable: Une source luminueuse (HID, LED…) est dite dimmable, signifie qu'il ya possibilité de faire varier son flux à l'aide d'un variateur d'intensité.

DMX: Protocole de gestion utilisé pour l'éclairage de scène ou la variation dynamique des couleurs.

Ethernet: Protocole de réseau local, qui fonctionne par "paquet", dont l'en-tête contient des informations sur le contenu et la destination.

Hexadécimal (système): A l'instar du système décimal qui permet de décrire les nombres sur une base de 10 chiffres (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9), le système hexadécimal les décrit sur une base de 16 chiffres et lettres (0 et 9 puis de A à F). Ce système est utilisé en informatique car il a une relation simple avec le système binaire.

Interface: Composant qui permet de faire le lien entre différents protocoles ou entre un système et un utilisateur.

Interrupteur sans fil: Interrupteur qui envoie une commande par ondes électromagnétiques. Cet interrupteur peut fonctionner avec des piles ou par pression (effet piézoélectrique).

Interrupteur crépusculaire: Déclenche la lumière en fonction de la luminosité ambiante. Au bout d'un certain délai partiellement réglable, la lumière s'éteint.

IP (Internet Protocol): Protocole utilisé par les réseaux informatiques et notamment Internet. Ce protocole peut être également utilisé en éclairage pour les systèmes de gestion complexes (GTB par exemple).

LIFI (ou LI-FI, Light Fidelity): Ce terme, à rapprocher des mots HIFI et WIFI, signifie littéralement "fidélité par la lumière". Le principe est de transmettre de l'information avec la lumière comme support, ce qui est rendu possible grâce à la possibilité de travail à très hautes fréquences des LED. En effet, l'œil ne percevant qu'une vingtaine d'images par seconde, une lumière aux variations beaucoup plus rapides, donnerait l'impression d'un éclairement continu pour l'utilisateur.. Ainsi,

une information 'binaire' peut être transmise parallèlement à un éclairage à LED variable (allumé -éteint) à hautes fréquences d'ou la possibilité d'établir un canal de communication monodirectionnel (uniquement dans le sens luminaire => récepteur, ayant comme support la lumière d'éclairage et pouvant servir à certaines applications particulières.

Mesh: Mot anglais signifiant "réseau" ou mailles" et qui exprime la possibilité de relier en réseau différents émetteurs et récepteurs (qui doivent donc être chacun identifié, voir adressage) à la différence du broadcast ou du pairing, par exemple en Bluetooth.

Numérique ("digital" en anglais): Ce terme désigne les phénomènes ou les appareils dont les informations sont découpées et échantillonnées, contrairement au signal analogique. Ce procédé nécessite un codage/décodage et permet généralement une grande précision et efficacité, notamment par l'absence théorique de pertes durant le transport de l'information, point faible de l'analogique..

Pairing: Mot anglais signifiant "couple" ou "association" et qui désigne l'association d'un unique émetteur à un unique récepteur (à la différence du broadcast ou du mesh).

PoE (Power over Ethernet): Technologie qui permet de faire passer de la puissance (environ 15W en standard et jusqu'à plus de 30W en version PoE+) par un câble Ethernet pour alimenter des composants comme des téléphones, des imprimantes ou des casques audios. Ce principe commence à s'étendre aux luminaires.

Potentiomètre: Résistance variable qui permet en éclairage de faire varier une tension, ce qui permet de commander une gradation suivant le principe du 1-10V.

Protocole: Langage standardisé pour que les différents éléments connectés se comprennent, comme par exemple le protocole Ethernet, IP, le DALI ou le DMX.

PWM (Pulse Width Modulation): Technique de modulation de largeur d'impulsions d'un signal. Elle est utilisée dans l'éclairage LED notamment (voir également AM), pour réaliser des convertisseurs, des gradateurs ou des boosters.

Relais: Composant électromécanique ou électronique qui permet de dissocier et éventuellement de passer un ordre de la partie commande à la partie puissance.

Télécommande: Interface utilisateur qui permet de transmettre de l'information (une commande en général) par ondes électromagnétiques.

Triac (TRIode for Alternating Current): Composant électronique utilisé dans les gradateurs de phase et souvent synonyme d'une gradation par phase dans le milieu de l'éclairage (halogène et LED).

Va-et-vient: Montage électrique qui permet d'allumer une lampe à partir de deux interrupteurs.

VLC (Visible Light Communication): Communication ou échange de data via la lumière, c'est à dire grâce au spectre électromagnétique compris entre 380 et 780 nm. Les possibilités d'extinction et d'allumage très rapides des LED ont donné un nouvel essor à ce secteur, comme la création de solutions de géo-localisation avec la caméra d'un smartphone ou du LIFI.

WIFI (ou WI-FI, Wireless Fidelity): Ce terme – à rapprocher des mots HIFI et LIFI – signifie littéralement "fidélité par le sans-fil". Il s'agit d'un protocole très utilisé permettant la transmission d'information sans fil (wireless), de même que le Bluetooth ou le ZigBee.

Wireless: Littéralement "sans fil électrique" en français, il s'agit de toute technique de transmission de donnée par ondes électromagnétiques, comme par exemple le Bluetooth, le WIFI ou le ZigBee.

ZigBee: Protocole permettant la transmission d'information à courte distance sans fil (wireless), inspiré du Bluetooth, avec un débit inférieur mais étant moins cher et plus simple.

Variateur d'intensité (Dimmer): Appareil électrique permettant de baisser ou d'augmenter l'intensité électrique. Pour les variateurs, il est nécessaire d'installer des ampoules compatibles « dimmables ».

Eclairage solaire

Angle d'incidence (en degrés): Il se réfère à l'angle entre le faisceau solaire direct et la normale (90 degrés) à une ligne perpendiculaire à la surface. Une surface directement face au soleil a un angle d'incidence nul, et une surface parallèle au soleil (comme au lever du soleil), correspond à un angle d'incidence de 90°.

Angle d'élévation: L'angle d'élévation (interchangeable avec l'angle d'altitude), est la hauteur angulaire du soleil dans le ciel, mesurée à partir de l'horizontale.

Arséniure de gallium (GaAs): Un composé cristallin à haute efficacité, utilisé pour fabriquer certains types de cellules solaires et matériaux semi-conducteurs.

Balance du système ou Balance Of System (BOS): Représente tous les composants et éléments, autres que les modules/panneaux photovoltaïques. Cela comprend divers éléments tels que les onduleurs, les câbles CC, les câbles c.a., les circuits de protection, la mise à la terre, etc.

Cellule solaire cristalline de silicium: Une cellule photovoltaïque, fabriquée à partir de lingots de silicium monocristallin ou polycristallin.

Charge de base: C'est la quantité moyenne d'énergie électrique qu'un service d'électricité doit fournir dans n'importe quelle période.

Concentration photovoltaïque (CPV): Une technologie solaire qui utilise des lentilles ou des miroirs pour concentrer la lumière du soleil sur les cellules solaires photovoltaïques à haute efficacité.

Concentration de l'énergie solaire ou CSP (Concentrated Solar Power): Une technologie solaire qui utilise des miroirs pour refléchir et concentrer la lumière du soleil sur des récepteurs qui convertissent l'énergie solaire en chaleur. Cette énergie thermique est ensuite utilisée pour produire de l'électricité avec une turbine à vapeur ou un moteur thermique.

Contrôleur de charge: Composant d'un système photovoltaïque qui contrôle le flux de courant vers et depuis la batterie pour la protéger contre les surcharges et les décharges profondes. Il peut également servir d'indicateur sur l'état de fonctionnement du système, qui peut être un lampadaire solaire..

Courbe I-V: Une présentation graphique du courant par rapport à la tension d'un module ou champ photovoltaïque.

Diode: Un dispositif électronique qui permet au courant de circuler dans un seul sens.

Diode de blocage: Un semi-conducteur connecté entre une ou plusieurs cellules solaires et une batterie de stockage pour empêcher cette dernière de se décharger à travers la cellule. Elle peut être considérée comme une valve à sens unique qui permet aux électrons de s'écouler dans le sens direct mais pas en inverse.

Diode de dérivation: Une diode connectée à travers une ou plusieurs cellules solaires dans un module photovoltaïque de telle sorte que lorsque celles–ci sont sous l'effet d'un ombrage, le courant généré par celles en série et mieux éclairées, soit dévié sans subir de limitation.

Ensoleillement direct: La lumière du soleil tombant directement sur un panneau solaire.

DNI (irradiance normale directe): C'est la quantité de rayonnement issu du soleil et reçue par unité de surface perpendiculaire à ce dernier.

Equinox: Les deux périodes de l'année où le soleil traverse l'équateur où la nuit et le jour sont de durées égales, survenant vers le 20 ou 21 mars (équinoxe de printemps) et les 22 ou 23 septembre (équinoxe d'automne).

Facteur de remplissage ou FF (Filling Factor): C'est un paramètre qui, en conjonction avec VOC et ISC, détermine la puissance maximale d'une cellule solaire. Le FF est défini comme le rapport de la puissance maximale de la cellule solaire au produit de VOC et ISC. Un module solaire de bonne qualité devrait avoir un facteur de remplissage de 0,7 ou plus.

IGS (Irradiance Horizontale Globale): C'est l'irradiation solaire globale reçue sur une surface horizontale. Elle englobe l'irradiation normale directe (DNI) et l'irradiation horizontale diffuse (DHI).

I_{mp} (courant à puissance maximale): Le courant de sortie d'un module solaire photovoltaïque correspondant à la puissance maximale disponible.

I_{SC}: Courant de sortie d'un module solaire en court-circuit.

Masse d'air: C'est la longueur de chemin la plus courte dans l'atmosphère que la lumière traverse (c'est-à-dire, quand le soleil est directement au-dessus). Elle quantifie la réduction de la puissance de la lumière du soleil par effet de l'air et des poussières propres à l'atmosphère. Lorsque le soleil est directement au-dessus, la masse d'air est 1.

MPPT (Maximum Power Point Tracking): Stratégie de fonctionnement assurant une puissance de sortie maximale d'un module photovoltaïque pour un ensoleillement donné.

Pyranomètre: Instrument utilisé pour mesurer la radiation solaire.

Rayonnement diffus: Radiation solaire incidente après réflexion et dispersion par l'atmosphère et la terre.

Ressources énergétiques distribuées ou DER (Distributed Energie Resources): Une variété de petites technologies modulaires génératrices de puissance, qui peuvent être combinées avec des systèmes de gestion et de stockage de l'énergie et utilisées pour améliorer le fonctionnement du système de distribution d'électricité.

Revêtement antireflet (ARC): Une couche mince d'un matériau appliqué à une surface de cellules solaires pour réduire la réflexion de la lumière. Est bénéfique pendant les périodes de faible luminosité comme le matin, le soir et par temps nuageux. Fournit habituellement environ 2 à 5% de rendement énergétique supplémentaire.

STC (conditions d'essai normalisées): Conditions dans lesquelles un module est généralement testé en laboratoire. Les conditions typiques correspondent à un rayonnement solaire de 1000 W/m^2, AM=1,5 et une température de 25° C.

Système hybride: Système de génération d'électricité à partir de deux ou plusieurs sources mises en parallèle (solaire, éolien, diésel, batteries....).

Température ambiante: La température de la zone environnante. Peut être mesurée en degrés Celsius ou Fahrenheit par l'utilisation d'équipements couramment disponibles.

Processus Czochralski: Une méthode de croissance de lingots de grande taille de cristaux semi-conducteurs de haute qualité

Batteries

Absorbent Glass Mat (AGM): Batterie dont l'électrolyte est absorbé par une membrane en fibre de verre, utilisée pour filtrer l'acide sulfurique dans les batteries au plomb. Il s'agit d'une technologie de séparation utilisée dans certaines batteries au plomb-acide scellées, dans lesquelles le coussinet séparateur en fibre de verre absorbe 100 % de l'électrolyte. En raison de l'immobilisation de l'électrolyte, les batteries AGM ne fuient pas et ne nécessitent pas l'ajout d'eau. Ce type de batterie est utilisé pour des applications à décharge profonde et de spécialité, comme le domaine des télécommunications, les fauteuils roulants et les systèmes d'alarme, ainsi que pour le démarrage d'automobiles.

Acceptation de charge: C'est la quantité d'électricité (en ampère-heure, Ah) qu'une batterie peut absorber à un niveau de charge pour une tension et une température déterminées pendant une durée donnée.

Ampère-heure (Ah): Unité de mesure de la capacité de stockage électrique d'une batterie. Elle résulte du produit de l'intensité du courant (exprimée en ampères) par sa durée de décharge (exprimée en heures). Exemple: une batterie délivrant 5 ampères durant 20 heures a une capacité de 5 ampères x 20 heures = 100 Ah.

Anode: La borne positive (+) d'une batterie à électrolyte. La borne négative (-) d'une pile primaire.

Autodécharge: Décharge d'une batterie se produisant lorsque celle-ci n'est pas utilisée. Plus la température est élevée, plus le rythme d'autodécharge est élevé.

Bac: Boîtier en caoutchouc dur ou en polypropylène contenant les plaques de la batterie, les connexions et l'électrolyte.

Batterie: Dispositif permettant de produire et de stocker de l'énergie électrique grâce à une réaction chimique. Une batterie de 12 volts est composée de six cellules de 2 volts chacune contenant des plaques positives (+) et négatives (-) qui génèrent le courant électrique. Une batterie de 12 volts complètement chargée génère une tension électrique d'au moins 12,66 volts.

Batterie au plomb-acide: Batterie de stockage d'électricité ayant comme matière active le plomb et le peroxyde de plomb, avec une solution électrolyte d'eau et d'acide sulfurique. Les batteries sans entretien ou à faible entretien et les batteries à électrolyte gélifié sont des types de batteries au plomb-acide.

Batterie à décharge profonde: Batterie conçue pour supporter des décharges répétitives jusqu'à une profondeur de décharge de 20 % ou inférieure et continuer à fonctionner selon sa capacité nominale après des centaines de cycles.

Batterie au plomb-acide régulée par soupape (VRLA): Batterie au plomb-acide scellée à l'exception d'une valve unidirectionnelle qui s'ouvre lorsque la pression de gaz interne de la batterie dépasse la pression atmosphérique par une certaine valeur prédéterminée. Les batteries au plomb-acide régulées par soupape, sont parfois aussi appelées batteries recombinantes.

Batterie plomb ouvert: Batterie dans laquelle les produits gazeux de l'électrolyse et de l'évaporation peuvent s'échapper dans l'atmosphère au fur et à mesure qu'ils sont générés. Ces batteries sont généralement appelées batteries à cellules noyées.

Batterie à électrolyte gélifié (GEL): Batterie au plomb-acide à formule chimique recombinante dans laquelle l'électrolyte est immobilisé par l'ajout d'un agent gélifiant. Les batteries de ce type sont entièrement scellées et sont régulées par soupape. Elles sont à l'épreuve des fuites et ne nécessitent pas l'ajout d'eau. Les batteries à électrolyte gélifié sont utilisées pour des applications de spécialité comme le domaine des télécommunications, les fauteuils roulants et les systèmes d'alarme.

Batterie lithium: Les batteries primaires au lithium sont non-rechargeables, utilisées dans des appareils nécessitant une source de courant faible mais stable et durable, comme les montres numériques, les ordinateurs et les détecteurs de fumée. Certains types de batteries au lithium sont conçues expressément pour les applications nécessitant beaucoup de courant, comme les micros sans fil et les appareils-éclair.

Batterie lithium-ion (Li-ion): Batterie rechargeable dotée d'une très forte capacité pour sa taille et son poids, contrairement à d'autres types de batteries rechargeables. Les batteries lithium-ion sont utilisées dans des appareils mobiles comme les ordinateurs portables, les téléphones cellulaires et les caméscopes.

Batterie à l'hydrure métallique de nickel (NiMH): Sorte de batterie rechargeable utilisée dans les appareils portatifs comme les caméscopes, les téléphones cellulaires, les téléphones sans fil et les ordinateurs portables. Présente une capacité supérieure à celle des batteries nickel-cadmium, mais elle est conçue pour fonctionner à un régime de décharge inférieur.

Batterie à faible entretien: Il s'agit habituellement d'une batterie plomb-acide, pouvant nécessiter l'ajout périodique d'eau dans des conditions normales d'utilisation. Cette batterie

double alliage comporte en général un alliage faiblement allié d'oxyde d'antimoine et de plomb dans la grille positive (+) et un alliage calcium-plomb dans la grille négative (-).

Batterie sans entretien: Batterie ne nécessitant aucun ajout d'eau dans des conditions normales de fonctionnement. La grille positive (+) et la grille négative (-) sont toutes deux faites de plomb/calcium.

Capacité: Elle définit l'aptitude d'une batterie entièrement chargée à délivrer une quantité spécifique d'électricité (ampère-heure, Ah) à un niveau donné (ampères, A) pendant une durée déterminée (heures, h).

Capacité de démarrage à froid (Cold Cranking Rating): Elle correspond au nombre d'ampères que peut délivrer une batterie à -17,8 °C durant 30 secondes en maintenant une tension minimale de 1,2 V par élément.

Capacité nominale (cellules sèches): Capacité moyenne d'une cellule ou d'une batterie à une charge et une température données, jusqu'à une tension de coupure déterminée par le fabricant. La capacité nominale est généralement déterminée au moyen d'un essai accéléré donnant une approximation de la capacité de la cellule ou de la batterie lors d'une utilisation typique.

Capacité nominale (cellules noyées): L'intensité du courant au démarrage à froid, la capacité de stockage ou les ampères-heures qu'une batterie est à même de fournir selon un régime de décharge, une tension finale et une température spécifiques. Ces valeurs figurent souvent sur le boîtier de la batterie.

Cathode: La borne négative (-) d'une batterie à électrolyte ou la borne positive (+) d'une pile primaire.

Chargeur de batterie à courant constant: Chargeur de batterie dont le courant de sortie demeure relativement constant tandis que l'état de charge de la batterie augmente.

Chargeur de batterie à tension constante: Chargeur de batterie régulé par tension permettant une diminution du courant de charge au fur et à mesure que l'état de charge de la batterie augmente.

Charge forcée: Recharge à une intensité très élevée (de 50 à 300 A). Cette méthode permet principalement de recharger rapidement une batterie (en un temps allant de quelques secondes à cinq minutes) pour être en mesure de démarrer rapidement un véhicule.

Cellule sèche: C'est l'unité fondamentale dont la fonction est de convertir directement l'énergie chimique en énergie électrique. La cellule est généralement constituée de deux électrodes faites de matériaux différents et isolées électroniquement l'une de l'autre dans l'électrolyte immobilisé..

Cellule noyée: C'est l'unité fondamentale dont la fonction est de convertir directement l'énergie chimique en énergie électrique. Une batterie à cellules noyées est généralement constituée d'un ensemble de plaques positives (+) et négatives (-), d'électrolyte liquide, de séparateurs et d'un boîtier. Une batterie de 12 volts est constituée de six cellules.

Charge d'égalisation: Méthode de recharge permettant d'égaliser la densité relative ou les niveaux de tension des cellules individuelles dans une batterie ou un groupe de batteries connectées en série.

Charge d'entretien: Charge faible, de courant constant ou de tension constante, compensant l'autodécharge d'une batterie utilisée habituellement dans une application en attente.

Circuit: C'est le chemin que suit un flux d'électrons. Un circuit fermé est un chemin complet. On parle de circuit ouvert lorsque le chemin suivi est interrompu ou déconnecté.

Corrosion: Réaction chimique destructrice provoquée par le contact de l'électrolyte liquide avec un matériau réactif, comme par exemple le fer au contact de l'acide sulfurique dilué. La rouille est l'un des résultats de la corrosion.

Courant: Le taux de circulation de l'électricité, ou le mouvement des électrons le long d'un conducteur. L'unité de mesure du courant est l'ampère.

Court-circuit: Dérivation non intentionnelle dans un appareil ou un circuit électrique, généralement de faible résistance, qui génère un courant de forte intensité. Un court-circuit dans un élément de batterie peut durer suffisamment longtemps pour décharger l'élément et rendre la batterie inutilisable.

Conditionnement: Processus de restauration de la capacité d'une batterie nickel-cadmium ou à l'hydrure métallique de nickel en appliquant plusieurs cycles de décharge poussée et de recharge. Ceci est également le cas pour la préparation d'une batterie au plomb-acide à soumettre à une série de tests électriques standards en appliquant un régime de charge précis.

Conductance: La capacité relative avec laquelle un circuit laisse passer un courant électrique. Il s'agit du réciproque mathématique de la résistance électrique.

Cycle: Une décharge suivie d'une charge constitue un cycle de batterie.

Cycle de vie de la batterie: Le nombre de cycles, à une profondeur de décharge spécifiée, qu'une cellule ou une batterie peut subir.

Décharge: Lorsqu'une batterie délivre du courant, on dit qu'elle se décharge.

Décharge profonde: Situation résultant de la décharge lente et complète d'un élément de batterie sous un courant de faible intensité, entraînant une chute de tension en dessous de la tension finale de décharge.

Effet mémoire: État de perte de capacité engendré lorsqu'une batterie Ni-Cd ou NiMH est partiellement déchargée, puis rechargée, de façon répétitive.

Électrolyte: Dans une batterie plomb-acide, l'électrolyte est constitué d'acide sulfurique dilué dans de l'eau.

Électrolyse: Processus de dégradation chimique de l'eau présente dans l'électrolyte en hydrogène, libéré par la cathode, et en oxygène, libéré par l'anode.

Élément: L'unité de production électrochimique d'électricité au sein de la batterie est constituée d'un set de plaques positives et négatives, d'électrolyte, de séparateurs et d'un boîtier. Une batterie au plomb de 12 V comprend six éléments.

État de charge: État de la batterie du point de vue de la capacité nominale restante à un moment donné.

Float service: Un fonctionnement de la batterie dans lequel elle est normalement connectée à une source de courant externe; par exemple un chargeur de batterie, qui fournit un courant de charge inférieur à celui indiqué dans les conditions normales, tout en fournissant assez d'énergie d'entrée à la batterie pour compenser ses pertes internes de repos, la gardant ainsi prête pour le service.

Force contre électromotrice (Fcem): Tension générée au sein de la batterie, principalement par des mécanismes chimiques, qui s'oppose à la tension de charge.

Grille: C'est la structure en alliage de plomb qui porte la matière active d'une plaque de batterie et conduit le courant.

Masse: C'est le potentiel de référence d'un circuit. Dans une voiture, c'est généralement la carrosserie qui servait de masse en reliant le câble de la batterie au sol ou au châssis du véhicule pour boucler le circuit lorsqu'il n'y avait pas de raccordement direct avec un composant. Aujourd'hui, dans plus de 99 % des applications automobiles, c'est la borne négative de la batterie qui est utilisée comme masse.

Niveau de charge: Il s'agit de la quantité d'énergie électrique stockée dans une batterie à un moment donné, exprimée en pourcentage de l'énergie contenue dans la batterie entièrement chargée.

Ohm: Unité de mesure de la résistance électrique ou de l'impédance d'un circuit électrique.

Plaque négative: Cadre métallique contenant la matière active (plomb spongieux).

Plaque positive: Cadre métallique contenant la matière active (dioxyde de plomb).

Profondeur de décharge ou Depth of Discharge (DoD): Les ampères-heures retirés d'une batterie entièrement chargée, exprimés en pourcentage de la capacité nominale. Par exemple, la suppression de 25 ampères-heures d'une cellule évaluée à 100 Ah entièrement chargée, donne une profondeur de décharge de 25 %. Le DoD est un paramètre de conception important de la batterie.

Séparateur: C'est le dispositif qui sépare les plaques positives de celles négatives dans chaque élément traversé par le courant.

Sulfatation: Accumulation de sulfate de plomb sur les plaques d'une batterie plomb-acide. Lorsqu'une portion importante des plaques est affectée par la sulfatation, la batterie n'est plus à même de fournir suffisamment de courant et doit être remplacée.

Stratification d'acide: Lorsqu'une batterie au plomb se recharge, de l'acide haute densité se forme au niveau des plaques. En raison de la gravitation, cet acide lourd se dépose dans la partie la plus basse de l'élément alors que l'acide de plus faible densité remonte vers le haut. Cette stratification peut entraîner une perte de capacité et/ou une défaillance de la batterie.

Tension de circuit ouvert (OCV): Tension à vide d'une cellule ou d'une batterie, mesurée à l'aide d'un voltmètre. Voir également Tension de circuit fermé

Normes et Accréditations

ALGERAC: Organisme Algérien d'Accréditation

Accréditation de laboratoire: Procédure qui consiste à ce qu'une autorité reconnaisse formellement qu'une organisation est compétente pour assumer des tâches spécifiques.

ANSI: Organisme subventionné par la National Electric Manufacturers Association (NEMA) qui définit des politiques et des normes à l'égard de la taille des cellules, des bornes et des méthodes d'essai.

Auto-certification: La présentation d'informations sur le produit d'une entreprise dans une déclaration formelle plutôt que d'être obligé de demander à un tiers de le faire.

Certification par un tiers: Vérification par une tierce partie indépendante et compétente, de la déclaration de conformité soumise par un manufacturier ou un fournisseur.

Classe d'efficacité énergétique: Les ampoules sont également réparties par classe d'efficacité énergétique, qui est calculée à partir de la puissance d'éclairage diffusée

(flux lumineux, unité lumens) par puissance absorbée en watts.Exemple, la classe d'efficacité énergétique A (nouvelle norme européenne) désigne une lampe à très bonne performance énergétique (210lm/W), et E une performance faible.

Classe de protection: Classification de protection contre l'électrocution. Il existe les classes de protection I, II et III. La classe de protection I dispose d'une mise à la terre (marquage du câble vert-jaune). La double isolation de la classe de protection II est par exemple utilisée pour les prises sans mise à la terre en Europe. La classe de protection III concerne tous les appareils qui sont utilisés avec une très basse tension de sécurité.

Conformité: Respecter une règle, comme une loi, une politique, une spécification ou une norme. Remplir également son engagement (par un pays/une entreprise/ des individus) en matière de réduction des émissions au titre de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) ainsi que l'Accord de Paris sur le Climat.

Contrat de performance: Réaliser la mobilisation des fonds d'investissement dans l'efficacité énergétique, sur la base des économies réalisées à l'avenir. Les économies résultant de l'introduction d'une nouvelle technologie d'efficacité énergétique sont utilisées pour compenser les coûts de financement, d'installation et de fonctionnement de cette technologie.

Commission Electrotechnique Internationale (CEI): Organisme international établissant des normes dans les domaines de l'électricité et de l'électronique.

Commission Internationale de l'Eclairage (CIE): Organisation (créée en 1913) qui a pour but la coopération internationale et l'échange d'informations entre les pays membres sur toutes les questions relatives à l'art et la science de l'éclairage.

Contenu de mercure maximum: La quantité maximum du mercure ajoutée à une lampe à décharge pour permettre son fonctionnement.

CE: Marque qui prouve la conformité avec les exigences fondamentales de certaines directives de l'Union européenne. L'apposition du marquage CE sur les luminaires, l'emballage ou les documents joints, relève de la responsabilité personnelle du fabricant ou de l'importateur.

Ecotaxe: Trouvant ses origines dans les travaux de l'économiste britannique Arthur Cecil Pigou, l'écotaxe ou la taxe environnementale est présentée comme un outil permettant de préserver l'environnement. Elle a été instaurée suivant le « principe du pollueur-payeur », pour aller vers un éclairage écologique.

Etalonnage: Une série d'opérations qui établissent, en se référant à des normes, la relation qui existe, sous des conditions spécifiées, entre une indication et le résultat d'une mesure (CEI).

ENEC (European Norms Electrical Certification): est une marque de contrôle et de certification relative entre autres aux luminaires et aux composantes électriques que ceux-ci contiennent. Cette marque atteste de la conformité d'un produit avec les normes européennes en vigueur et documente le contrôle de la production par des inspecteurs de l'organisme de contrôle en question. La marque ENEC est apposée en association avec le numéro d'identification de l'institut de contrôle national et son logo propre.

GS: Marque qui atteste qu'un produit a été déclaré conforme à la loi relative à la sécurité des appareils par les organismes de contrôles agréés. La marque GS peut être uniquement utilisée en association avec le signe de l'organisme de contrôle en question. La zone d'application de cette marque est l'Allemagne. Les organismes de contrôle sont, entre autres, les centres de contrôle technique allemands et l'institut VDE à Offenbach.

IANOR: Institut Algérien de Normalisation

Label énergétique: Constitue l'étiquetage standardisé de la performance énergétique. Il contient la classe d'efficacité énergétique sous forme claire et apporte une information supplémentaire pour un déclenchement de l'achat de luminaires particulièrement écoénergétiques.

UGR: Unified Glare Rating ou Taux d'Eblouissement d'Inconfort: Il évalue la probabilité d'éblouissement dans une pièce donnée avec des luminaires donnés. Il est fixé dans les normes européennes de l'éclairage. Plus la valeur du facteur est élevée, plus la probabilité d'éblouissement d'inconfort est importante. L'UGR communiqué dans la fiche technique d'un produit est une chose mais c'est l'UGR dans le champ visuel de l'observateur, dans son environnement, qui est important. Pour cela l'étude d'éclairage est un outil précieux.

ROHS: C'est un décret en place depuis le 1er juillet 2006 qui vise à éradiquer la présence de substances dangereuses dans les équipements (mercure, plomb, cadmium, etc.). Les appareils d'éclairage qui se trouvent dorénavant sur le marché, doivent être conformes à cette norme.

CEREFE
المحافظة للطاقات المتجددة و الفعالية الطاقوية

République Algérienne Démocratique et Populaire
Premier Ministre
Commissariat aux Energies Renouvelables
et à l'Efficacité Energétique

ISSN 2716-8654