

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université KASDI Merbah d'Ouargla

ooOoo



Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière

Département de physique

ooOoo

Mémoire Présenté pour l'obtention du Diplôme de

## MASTER ACADEMIQUE

Filière: physique

Spécialité: physique Énergétique et Énergies Renouvelables

Thème:

**Modélisation et gestion d'un réseau électrique à partir d'une route solaire sur une voie de tramway application à la ville de Ouargla**

Présenté et soutenu publiquement par :

**Badidja Sara et Mansouri Zahia**

**Soutenu Publiquement Le: 25/06/2019**

**Devant Le Jury :**

MOHCENE Hocine

M .C.A

Président

BOUGUETTAYA Hamza

Professeur

Examinateur

SETTOU Noureddine

Professeur

Encadreur

**Année Universitaire : 2018 /2019**

## **Remerciements**

Avant tout, nous remercions ALLAH, le Tout Puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr **SETTOU Noureddine** pour son orientation, ses conseils, ses encouragements, son aide précieux, et le temps qu'il nous a accordé tout au long de notre travail, nous exprimons notre profond remerciement et respect.

Nous remercions infiniment monsieur **MOHCENE Hocine**, de l'université Kasdi Merbah Ouargla Faculté des mathématiques et sciences de la matière, d'avoir fait l'honneur de présider notre jury de ce mémoire.

Nos meilleurs remerciements vont au Professeur **BOUGUETTAYA Hamza**, de l'université Kasdi Merbah Ouargla Faculté des mathématiques et sciences de la matière, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nos sincères reconnaissances à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

## Dédicace

Nos remerciements les plus sincères vont à tous les professeurs du département physique de l'université d'Ouargla qui n'ont pas hésité un instant pour nous orienter, et d'être à notre disposition à tout moment pour la réussite et la réalisation de notre travail.

À nos Nous adressons nos plus sincère remerciements à Mr SETTOU Belkhir pour son suivi, son soutien et conseils judicieux tout au long de ce travail.

Nos chères parents, pour leurs patience et leurs sacrifices pour voir ce jour. Ils ont tout donné pour notre réussite.

Nos fidèles amis(es), tous nos remerciements pour vous, pour avoir participé soit de près soit de loin à la réalisation de ce travail.

## **Sommaire**

Liste des abréviations	i
Liste des tableaux	ii
Liste des figures	iii
Introduction générale	1

### **Chapitre 1 : Contexte énergétique**

1.1. Introduction	4
1.2. Contexte énergétique algérien	4
1.2.1. Réserves nationale de combustibles fossiles	5
1.2.2. Consommation d'énergie finale par secteur	6
a .Secteur résidentiel	7
b. Secteur industriel	8
c. Secteur du transport	8
1.3. Le développement des infrastructures et des transports	10
1.3.1. Transport routier	10
1.3.2. Transport maritime	11
1.3.3. Transport aérien	11
1.3.4. Transport urbain	12
1.3.5. Transport ferroviaire	13
1.4. Conclusion	14

### **Chapitre 2: Description énergétique du transport ferrovier par tramway à Ouargla**

2.1. Introduction	16
2.2. Réseau ferroviaire (Tramway)	16
2.3. Présentation du Tramway de Ouargla	16
2.3.1. Caractéristiques des rames	20
2.3.2. Détails du projet de tramway d'Ouargla	18
2.3.3. Construction	19
2.3.4. Matériel roulant pour le tramway d'Ouargla	19
2.4 . Système électrique du tramway	20
2.4.1 .Alimentations par le sol (APS)	21
2.4.2. Lignes aériennes de contact (LAC)	22

2.5. Sous-système SCADA	23
2.6. Description technique du matériel roulant	24
2.7. Les pièces utilisables	25
2.8. Les avantages et les inconvénients de tramways	27
2.8.1. Les avantages	27
2.8.2. Les Inconvénients	27
2.9. Conclusion	28
<b>Chapitre 3: Modélisation d'un réseau électrique à partir d'une route solaire sur une voie de tramway application à Ouargla</b>	
3.1. Introduction	30
3.2. Energie solaire photovoltaïque	30
3.3. Route Solaire	30
3.3.1. Définition	30
3.3.2. Le premier revêtement routier photovoltaïque au monde	31
3.3.3. Lieux d'application	31
3.4. Description des panneaux PV utilisées	32
3.5. Modélisation électrique de générateur photovoltaïque	33
3.5.1. Principes de calcul de l'énergie solaire	33
3.5.2. Rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère	35
3.6. Organigramme	38
3.7. Résultats de la simulation	38
3.7.1. Données environnementales	38
3.7.2. Consommation énergétique	39
3.7.3. production photovoltaïque mensuelle des panneaux disposés sur la route du tramway	41
3.7.4. Rendement photovoltaïque	43
3.8. Etude économique de système photovoltaïque	43
3.8.1. Tarification de l'énergie à l'échelle nationale	44
3.8.2. Coût d'investissement total	44
3.8.3. Coût moyen actualisé de l'électricité photovoltaïque	48
3.8.4. Bilan économique( Dépense et revenus)	46
3.8.5. Influence du cout initial	48
3.9. Conclusion	48
Conclusion générale	50

## Sommaire

---

Références

Résumé

Annexes

## Liste d'abréviations

### Nomenclature

NOCT	Température de fonctionnement normale de la cellule	C
$P_{max}$	Puissance nominale	W
$P_{PV}$	Puissance fournie par le champ PV	W
$\mu_{P-max}$	Coéfficient de température	% /°C

### Acronymes internationales

AC	Courant alternatif (Alternative current)
APRU	Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'énergie
APS	Alimentations Par le Sol
BP	British Petroleum
BT	Basse Tension
BTP	Bâtiment et Travaux Publics
DC	Courant continu (Direct Current)
FPEG	Forum des Pays Exportateurs de Gaz
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
LAC	Lignes Aériennes de Contact
OPEP	Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole
PIB	Produit Intérieur Brut
PV	Photovoltaïque
EMA	Enterprise métro d'Alger
BOS	balance of system

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Caractéristiques tramway CITADIS bordeaux .....	20
<b>Tableau 2</b> : Liste des jours types par mois proposés par Klein .....	35
<b>Tableau 3</b> : Valeurs de l'irradiation journalière moyenne mensuelle hors atmosphère ..	36
<b>Tableau 4</b> : Récapitulatif d'éclairement solaire reçu sur une surface horizontal et la moyenne mensuelle de la température ambiante de la région d'Ouargla. ....	39
<b>Tableau 5</b> : Surplus énergétique de la route solaire (en MWh).....	42

## Liste des figures

<b>Figure 1 :</b> Structure de la consommation finale par secteur 2017 .....	6
<b>Figure 2:</b> Synthèse des flux énergétique (M Tep) année 2017 .....	7
<b>Figure 3 :</b> Evolution de la consommation d'énergie finale par produits .....	9
<b>Figure 4 :</b> Evolution de la consommation d'énergie finale par secteur .....	9
<b>Figure 5 :</b> Carte des projets .....	13
<b>Figure 6 :</b> Vue générale de la ligne du tramway d'Ouargla.....	18
<b>Figure 7 :</b> Tramway Ouargla.....	19
<b>Figure 8 :</b> Illustration d'un réseau de tramway .....	21
<b>Figure 9 :</b> Mode alimentations par le sol (APS) .....	22
<b>Figure 10 :</b> Mode lignes aériennes de contact (LAC) .....	23
<b>Figure 11 :</b> Système de contrôle et d'acquisition de données .....	23
<b>Figure 12 :</b> Exemple des cabines du tramway CITADIS 402 ALSTOM .....	24
<b>Figure 13 :</b> Bogie moteur(à droite) , Bogie porteur (à gauche) .....	25
<b>Figure 14 :</b> Les pièces utilisables .....	26
<b>Figure 15 :</b> Exemples d'application route solaire.....	32
<b>Figure 16 :</b> Installation des panneaux sur la route .....	32
<b>Figure 17 :</b> Variation de la température ambiante et de l'ensoleillement solaire reçu sur une surface horizontal pour la région d'Ouargla. .....	39
<b>Figure 18 :</b> Evaluation de la consommation mensuelle de tramway d'Ouargla en MWh. ....	40
<b>Figure 19 :</b> Evaluation de la consommation journalière du tramway de Ouargla .....	40
<b>Figure 20 :</b> Evaluation de la production mensuelle de l'électricité photovoltaïque dans la route tramway d'Ouargla en MWh.....	41
<b>Figure 21 :</b> Comparaison entre production et consommation en MWh.....	42
<b>Figure 22 :</b> Rendement mensuel global.....	43
<b>Figure 23 :</b> Dépense et revenus issus du système proposé. ....	47
<b>Figure 24:</b> influence du cout initial.....	48

## Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie et dans notre pays ne cesse d'augmenter. La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre. En effet, la grande préoccupation du monde actuel est d'atténuer cette pollution par l'adaptation des sources d'énergie classiques à des critères très sévères et par l'utilisation des énergies renouvelables [1].

Les transports constituent aujourd'hui la cause majeure du dérèglement climatique et l'un des premiers postes de consommation d'énergie fossile dans le monde. En 2017, La structure de la consommation finale reste dominée par le secteur des « Ménages & autres » (44%), suivi par le transport (33%) et enfin le secteur de « l'industrie et BTP » avec une part de 22%. Cependant, il est à signaler le recul de près de 2 points de la part du secteur des transports en 2017, suite à la baisse de la consommation des carburants [2].

Le contexte énergétique actuel qui connaît une crise profonde nécessite une remise en cause de nos modes de gestion et de consommation de l'énergie. Ceci implique de réinventer un système énergétique plus durable qui puisse proposer à tous un approvisionnement énergétique fiable, abordable et peu polluant. Cet objectif peut être atteint grâce à une plus grande sobriété, une meilleure efficacité et une utilisation plus rationnelle de l'énergie, doublées de la substitution des énergies "conventionnelles" par des énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables comprennent l'énergie éolienne, la biomasse et l'énergie solaire, cette dernière sera utilisée dans le secteur des transports grâce à la technologie de la route solaire.

Le travail présenté ici s'organise selon trois chapitres :

Le premier chapitre présente en premier lieu le contexte énergétique actuel à l'échelle nationale, en termes de ressources, de production, de consommation par

secteur et aussi les réserves nationales de combustibles fossiles. En second lieu, le développement des infrastructures et des transports.

Le deuxième chapitre sera consacré dans à la présentation du secteur des transports ferroviaire, et description énergétique du transport ferrovier par tramway à Ouargla.

Le troisième chapitre est consacré à la description du concept de la route solaire, ensuite une modélisation électrique de générateur photovoltaïque est présentée.

Finalement, une conclusion termine le manuscrit et rappelle les principales contributions élaborées tout au long de ce travail. Elle présente également les perspectives et implications relatives aux résultats obtenus.

# Chapitre 1 :

## Contexte énergétique

## 1.1. Introduction

L'énergie depuis le commencement des âges a été le moteur de l'activité humaine, et c'est un élément qui intervient dans tous les actes quotidiens de l'homme. Les énergies jouent un rôle significatif dans le développement des secteurs technologiques, industriels, économiques et sociaux d'un pays.

Dans un monde où la croissance de la démographie et de l'économie tire à la hausse les besoins énergétiques et où les émissions de gaz à effet de serre induites par ces besoins sans cesse accrus conduisent au changement climatique de la planète, les enjeux énergétiques deviennent cruciaux. La croissance des besoins soulève la question de la sécurité d'approvisionnement, le changement climatique et celle de la durabilité du système énergétique, l'ensemble devant être appréhendé en tenant compte des enjeux économiques et notamment de compétitivité que les choix énergétiques impactent directement.

Nous présentons dans ce chapitre le contexte énergétique en Algérie, Réserves nationale de combustibles fossiles, ainsi que de recherche expose une analyse de l'évolution de la consommation énergétique par secteur d'activité et par source d'énergie. Elle se focalise ensuite particulièrement sur le secteur transport.

## 1.2. Contexte énergétique algérien

La production de pétrole a commencé en 1958, en 1969 l'Algérie est devenue membre de l'organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP) et du le forum des pays exportateurs de gaz (FPEG), l'Algérie est le premier producteur de gaz naturel et pétrole en Afrique et un important fournisseur de gaz naturel de l'Europe.

Le gaz naturel qui constitue 60% de ses réserves en énergie fossile, alimente à hauteur de 30% les revenues en devises, d'où la nécessité d'une réglementation de maîtrise de l'énergie qui s'impose en faisant valoir les arguments suivants [3]:

- La préservation des ressources énergétiques conventionnelles
- La réduction des coûts des investissements énergétique, notamment en matière de chauffage et de climatisation
- La réduction de l'impact des énergies fossiles sur l'environnement

Le contrôle de la croissance de la consommation domestique, l'intensification des investissements et la mise en service de nouveaux sites de production (le pays dispose d'importantes réserves, notamment en gaz de schiste), constituent les principaux enjeux à moyen terme de ce secteur.

L'Algérie est le 10ème exportateur mondial de pétrole brut. Entre 2010 et 2013, les exportations de pétrole brut annuel algériennes ont représenté en moyenne environ 750,000 barils/j de pétrole brut, y compris du condensat.

Les principaux importateurs du gaz naturel Algérien sont : l'Italie, le premier importateur avec 61%, ensuite l'Espagne avec 27%, la France et la Turquie avec 13 et 14% et l'USA avec 3%, le reste concerne les autres pays avec 14%. La plupart des exportations du GNL vont également vers l'Europe occidentale, particulièrement la France, l'Espagne et la Turquie. D'autres pays européens tels que le Portugal, l'Angleterre, la Grèce, et la Slovénie sont importateurs du gaz Algérien [1].

### **1.2.1. Réserves nationale de combustibles fossiles**

En 2017, l'Algérie a tenu un taux estimatif de 12,2 milliards de barils( 1,5 milliards de tonnes) de réserves prouvées de pétrole, ce chiffre qui a été inchangé depuis plusieurs années. Ces réserves classaient l'Algérie au 17<sup>ème</sup> rang mondial avec 0,7 % du total mondial, et au 4<sup>ème</sup> rang en Afrique derrière la Libye, le Nigeria et l'Angola [4].

A l'échelle mondiale, les capacités gazières algériennes sont très significatives. Le pays possède environ 4,3 Tm<sup>3</sup> des réserves mondiales de gaz, et a produit en 2017, 78,5 Million tep de gaz naturel commercialisable, soit 2,5% de la production mondiale, ce qui place l'Algérie au 10<sup>ème</sup> rang des pays producteurs de gaz [4].

Le gaz naturel joue un rôle fondamental, non seulement parce qu'il est considéré comme l'énergie fossile la moins polluante, mais aussi en raison de son abondance et de sa disponibilité. Ces réserves classaient l'Algérie au 2<sup>ème</sup> rang en Afrique derrière le Nigeria [4].

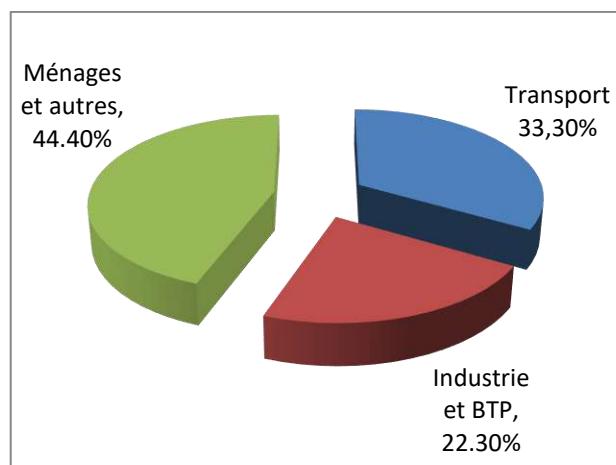
Les réserves d'hydrocarbures non conventionnels (gaz de schiste) sont estimées pour leur part à 700 trillions de m<sup>3</sup> ce qui correspond à quatre fois le niveau des réserves

gazières actuelles et représentant ainsi la troisième réserve plus importante au monde[1].

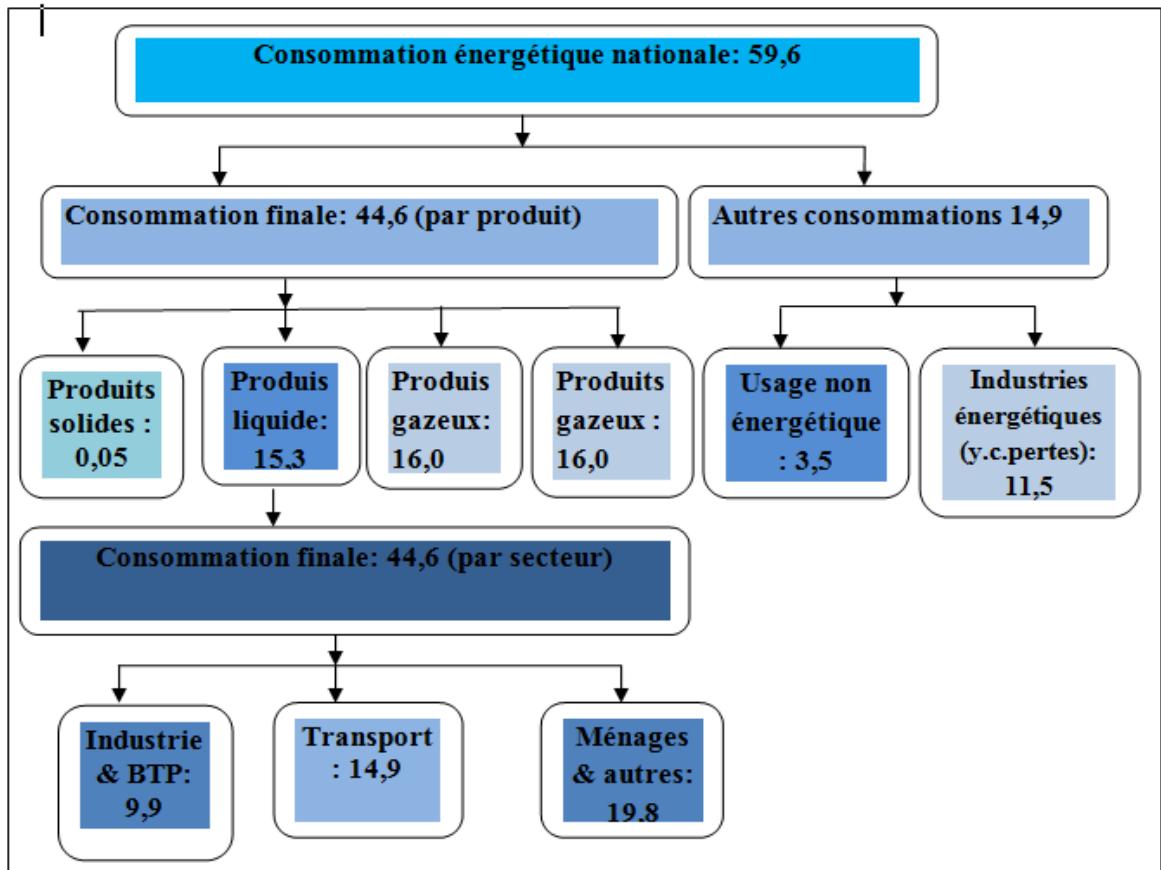
### 1.2.2. Consommation d'énergie finale par secteur

L'analyse énergétique dite sectorielle distingue usuellement secteurs d'activité au sein desquels l'énergie est consommée de manière sensiblement différente: l'industrie, le transport et les bâtiments [1].

D'après l'agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE), dans son rapport sur la consommation énergétique finale de l'Algérie, pour l'année 2017, le secteur le plus consommateur d'énergie est le secteur de ménager plus de 44%, ensuite l'industrie avec plus 22% et enfin le transport avec plus 33% [2].



**Figure 1 :** Structure de la consommation finale par secteur 2017 [2].



**Figure 2:** Synthèse des flux énergétiques (M Tep) année 2017 [2].

### a. Secteur résidentiel

La consommation d'énergie dans le secteur résidentiel inclut (le chauffage, le refroidissement, l'eau chaude sanitaire (ECS), la cuisson et les appareils électroménagers tels que : réfrigérateur, lave-linge, éclairage, téléviseur etc.). Pour estimer la demande d'énergie finale, il est nécessaire de déterminer l'utilisation d'énergie pour chacun de ses composants [1].

Les facteurs déterminants de la demande d'énergie sont de nature démographique (population, nombre de ménages, etc.), donc la demande d'énergie du secteur est calculée en considérant la nature et les conditions de vie de personnes ainsi que les caractéristiques climatiques. Cela permet une meilleure représentation des besoins réels des individus, de leur style de vie, de même une définition plus adéquate des marchés potentiels des différentes formes d'énergie finale envisageables [1].

La consommation des (ménages et autres) de 44.4% de la consommation finale. Elle a augmenté de 6,6% pour s'établir à 19,8M Tep en 2017 (contre 18,6 M tep en

2016), tirée par celle du sous-secteur résidentiel (5,7%) et notamment des besoins en gaz et en électricité induits par l'augmentation du nombre des clients de Sonelgaz (notamment BT et BP) [2].

### **b. Secteur industriel**

De manière générale, la demande d'énergie de chaque sous-secteur économique est déterminée par son niveau d'activité économique, évaluée par sa valeur ajoutée, et par l'intensité énergétique de chaque catégorie d'usage final de l'énergie. Le niveau d'activité économique de chaque sous-secteur est obtenu à partir des données spécifiées par l'utilisateur relatives au PIB total et à sa structure [5].

Pour chaque sous-secteur, la demande d'énergie est calculée séparément pour trois catégories d'utilisation finale: l'électricité pour ses usages spécifiques (éclairage, force motrice, électrolyse etc.), les usages thermiques (chauffage et eau chaude sanitaire, production de vapeur, fours et usage direct des combustibles), et les carburants [6].

La consommation du secteur Industries et BTP a connu une croissance de 7,6%, passant de 9,2 M Tep à 9,9 M Tep en 2017, suite à la hausse de la consommation du sous-secteur des matériaux de construction (+7,5%) et ISMME (45,9%) [2].

### **c. Secteur du transport**

Le transport représente un des piliers fondamentaux du développement durable et de la prospérité de tout pays. Des systèmes de transport efficaces et des réseaux modernes sont donc une nécessité pour le développement économique, le bien-être social, la production à grande échelle, et la préservation de l'environnement.

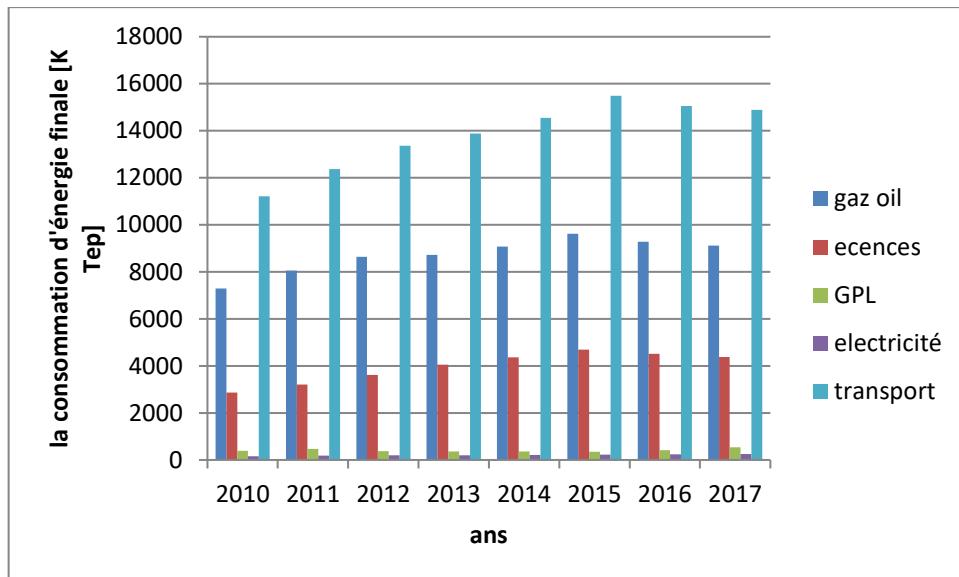
En Algérie, le secteur du transport connaît une véritable mutation. Un grand nombre de projets ont été réalisés où sont en phase de réalisation, afin de rendre ce secteur plus performant et plus efficace dans sa contribution dans le développement économique du pays [7].

La demande d'énergie de ce secteur est calculée directement en termes d'énergie finale, en fonction de la demande totale de transport. Le taux de motorisation et la distance moyenne parcourue par une voiture par an sont des variables du scénario pour

le calcule de la consommation énergétique. De plus, 6 carburants différents sont admis pour le secteur transport: Electricité, gasoil, essence, GPL, bunker et le kérostone [6].

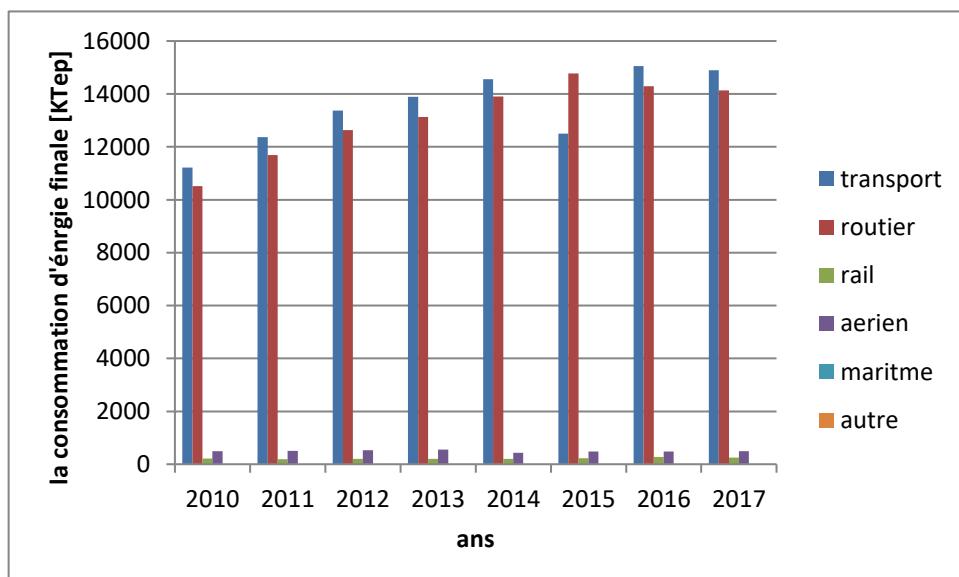
La baisse de la consommation du secteur des transports de 1,1% en 2017 qui est (de 15,1 M Tep) par rapport à l'année précédente estimée à 14,9 M Tep, tirée par celle des carburants routiers, suite à la hausse des prix sur le marché intérieur [2].

La figure 3 précise l'évolution de la consommation d'énergie finale par produits



**Figure 3 :** Evolution de la consommation d'énergie finale par produits [2].

La figure 4 précise l'évolution de la consommation d'énergie finale par secteur



**Figure 4 :** Evolution de la consommation d'énergie finale par secteur [2].

### **1.3. Le développement des infrastructures et des transports**

Les infrastructures de transport sont l'ensemble des installations fixes qu'il est nécessaire d'aménager pour permettre la circulation des véhicules et plus généralement le fonctionnement des systèmes de transport routiers, ferrés, fluviaux, ou multimodaux[8].

L'Algérie dispose d'infrastructures de transport et de communication ainsi que des services associés. Toutefois, leur organisation doit maintenant être en cohérence avec les besoins de l'économie et la mondialisation. L'extension et la mise en réseau des infrastructures ainsi qu'un profond renouvellement des services et des démarches de planification associé s'apparaissent nécessaires pour appuyer la compétitivité et l'attractivité du territoire par secteur d'activité.

Les infrastructures de base en Algérie sont à la dimension du territoire. Leur développement sera un atout pour l'économie. Avec environ 117,498 km en 2014, le réseau routier algérien est le plus important du Maghreb, dont; 30,828 km routes nationales, 24,705 km chemins de Wilayas, 60,733 km chemins communaux, et 1,132 km autoroutes et voies express [1].

Le réseau ferroviaire couvre une grande partie du pays. La vétusté du parc et de l'infrastructure a nécessité des plans de modernisation et de développement du trafic interurbain ainsi que la restructuration de la compagnie nationale SNTF [9].

#### **1.3.1. Transport routier**

Le transport routier assure en Algérie 90% des mouvements des marchandises et plus de 80% des déplacements des personnes. est le mode le plus utilisé aussi bien pour le transport des voyageurs que des marchandises. Ce mode a connu un réel essor depuis sa libéralisation en 1988, d'où la nécessité d'une adaptation des infrastructures routières [10].

Le réseau routier algérien demeure l'un des plus denses du continent africain, sa longueur est estimée à 112 696 km de routes dont 29 280 km route nationale et plus de 4 910 ouvrages d'art. Ce réseau devrait être complété par un important tronçon de 1 216 km qui est en voie de réalisation, et qui devrait à terme relier la ville d'Annaba de l'extrême Est jusqu'à la ville de Tlemcen à l'extrême Ouest [11].

Le réseau routier algérien est en plein développement grâce au programme de modernisation des autoroutes. Nous citons la réalisation de l'autoroute Est-Ouest totalisant 1 216 km et le lancement prochain des travaux de réalisation de l'autoroute des hauts plateaux de 1020 km il existe aussi la route transsaharienne (nord-sud) qui a été promu par le gouvernement pour accroître le commerce entre les six pays traversés par cette route (Algérie, Mali, Niger, Nigeria, Tchad et Tunisie) [7].

### **1.3.2. Transport maritime**

L'Algérie est dotée d'une structure portuaire mixte et spécialisée, héritée de l'époque coloniale, à l'exception du port de Djendjen. L'organisation des ports n'a pas cessé d'évoluer depuis l'indépendance. Au cours de la première décennie, l'organisation portuaire repose sur une autonomie des grands ports (Alger, Annaba et Oran) et un régime de concession accordé par les chambres de commerce des wilayas sur lesquelles les autres ports sont situés [11].

Le quasi totalité du commerce international est réalisé par la voie maritime, via onze ports de commerce à savoir: Alger, Oran, Annaba, Skikda, Arzew/Bethioua, Béjaïa, Mostaganem, Ghazaouet, Jijel, Ténès et Delys.à l'exception des terminaux gaziers et pétroliers, il y eut très peu de travaux d'aménagements des infrastructures portuaires [7].

La compagnie nationale algérienne de navigation (CNAN) et l'entreprise nationale de transport maritime de voyageurs sont les acteurs du transport maritime en Algérie. Plusieurs transbordeurs (navire traversier) font la liaison des passagers vers les côtes européennes ainsi que le transport de marchandises à travers le monde [11].

### **1.3.3. Transport aérien**

L'Algérie a développé son secteur du transport aérien de manière à en faire un véritable moyen d'intégration au niveau régional et international. Les aéroports ouverts à la circulation aéronautique civile sont de 32 platesformes. Depuis des années un programme de modernisation et de réhabilitation touche les aéroports du pays. une enveloppe de 60 milliards de dinars (600 millions d'euros) sera consacrée pour renouveler la flotte d'air Algérie durant la période 2013-2017 [11]. L'Algérie compte

35 aéroports, dont 13 internationaux. Le plus important est l'aéroport d'Alger avec une capacité, de plus de 6 millions de passagers par an [7].

#### **1.3.4. Transport urbain**

Les transports urbains ont un rôle crucial à jouer dans le développement des villes à travers le monde et booster le bien-être des populations résidentes dans une optique de développement durable des aires urbaines. Le transport occupe dans la sphère économique une place de premier ordre, il est l'épine dorsale de toute économie, il permet de dynamiser les échanges dans toutes leurs dimensions spatiales (nationale, régionale et internationale) [12].

##### **a. Métro d'Alger**

L'Algérie a vu l'ouverture du métro d'Alger le 31 octobre 2011 d'une longueur de 9 km et desservant 10 stations, ce dernier fera d'Alger la 1ere ville du Maghreb à être équipée d'un métro souterrain. Son exploitation est assurée par RATP El Djazaïr filiale de la Régie autonome des transports parisiens (RATP) pendant huit ans avec l'entreprise du métro d'Alger.

L'entreprise du Métro d'Alger a lancée un appel d'offres national et international pour la réalisation des études préliminaires relatives aux extensions de la ligne 1 du métro d'Alger. L'Algérie vient aussi de lancer un autre projet phare dans le cadre du plan quinquennal 2010-2014, qui est le Métro d'Oran.

##### **b. Tramway**

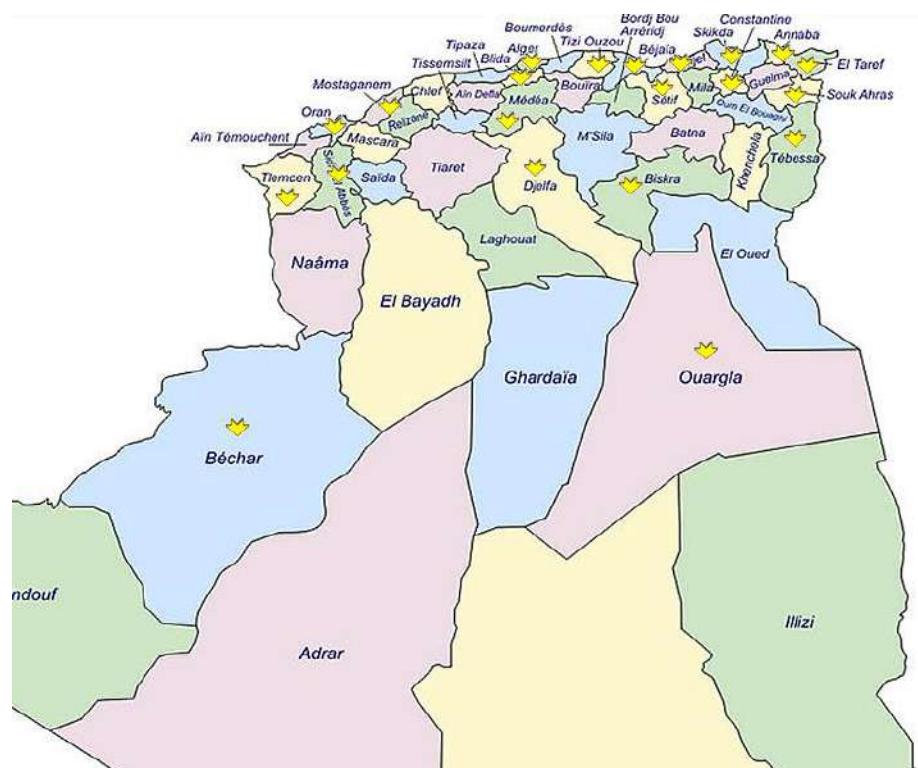
Dans le cadre du plan quinquennal (2010-2014), l'Algérie a lancé un autre plan de développement et modernisation du transport en commun urbain ou interurbain circulant sur des voies ferrées, le Tramway.

Le tramway d'Alger est un système de transport en commun desservant l'agglomération d'Alger. En 2012, il a compris une ligne de 16,2 km et 28 stations et il devrait s'étendre sur 23 km et comprendre 38 stations.

Le tramway de Constantine est un projet de transport en commun desservant l'agglomération de Constantine, il est en construction depuis 2008. Les premiers essais

techniques du tramway de Constantine ont été effectués en 2012, son tracé comprend une ligne de 9 km et 10 stations [11].

Le tramway d'Ouargla est un projet de transport en commun desservant l'agglomération d'Ouargla, son tracé comprend une ligne de 9,6 km et 16 stations.



**Figure 5 :** Carte des projets [13].

### 1.3.5. Transport ferroviaire

Le secteur du transport ferroviaire a connu ces cinq dernières années un développement remarquable porté par la volonté des pouvoirs publics de désenclaver les régions éloignées du pays et d'assurer une croissance économique et sociale équilibrée. Parmi les projets ferroviaires en cours figurent notamment l'électrification de 1 000 km de voies ferrées, la réalisation de 3 000 km de chemins de fer [7].

Le réseau ferroviaire de l'Algérie est de 2,150 km, il connaît depuis peu une électrification au niveau de certains tronçons, ce qui doit conduire incessamment à l'installation de trains à grande vitesse qui devraient relier les villes les plus importantes

du pays. Le réseau ferroviaire est géré par la société nationale des transports ferroviaires (SNTF). Ce réseau est doté de plus de 200 gares couvrant surtout le nord du pays dont :

- 299 km de voies électrifiés
- 305 km de voies doubles
- 1 085 km de voies étroites

L'Algérie prévoit de multiplier par 3 son réseau ferré en 15 ans, pour parvenir à 10 000 km (3 200 km actuellement) de voies ferrées. La plus grosse partie des 47 milliards de dollars réservée aux transports sera consacrée au développement du rail[11].

#### **1.4. Conclusion**

Ce chapitre présente un aperçu du secteur de l'énergie en Algérie et l'état actuel de l'énergie au niveau national en termes de ressources, de production et de consommation dans différents secteurs (industrie, logement et transports), ainsi que l'état des infrastructures et des moyens de transport régionaux existants .Notre étude approfondie porte sur les transports et leur consommation intensive de combustibles fossiles.

# Chapitre 2 :

Description énergétique du transport  
ferroviaire par tramway à Ouargla

## 2.1. Introduction

Les transports en commun sont une solution pour limiter la consommation énergétique et les dépenses liées au transport. C'est tout particulièrement le cas du tramway qui est devenu un moyen de transport que plusieurs villes adoptent de nos jours. C'est un moyen de transport écologique qui offre une alternative intéressante notamment pour désengorger les centres villes. Ce chapitre est élaboré dans le but de fournir une description claire et concise de la première ligne de tramway d'Ouargla.

## 2.2. Réseau ferroviaire (Tramway)

Partout dans le monde, le tramway est devenu le symbole du renouveau des transports publics urbains. Avec environ 400 réseaux en exploitation dans 50 pays, et 260 en construction ou à l'étude, ce mode connaît un nouvel âge d'or dans les villes qui font le choix d'une mobilité plus durable. Les voyageurs plébiscitent le retour en force d'un système de transport métamorphosé par un design de qualité et un haut niveau de service commercial. S'il modernise l'offre de mobilité, le tramway contribue également à donner une nouvelle respiration aux espaces urbains [14].

## 2.3. Présentation du Tramway de Ouargla

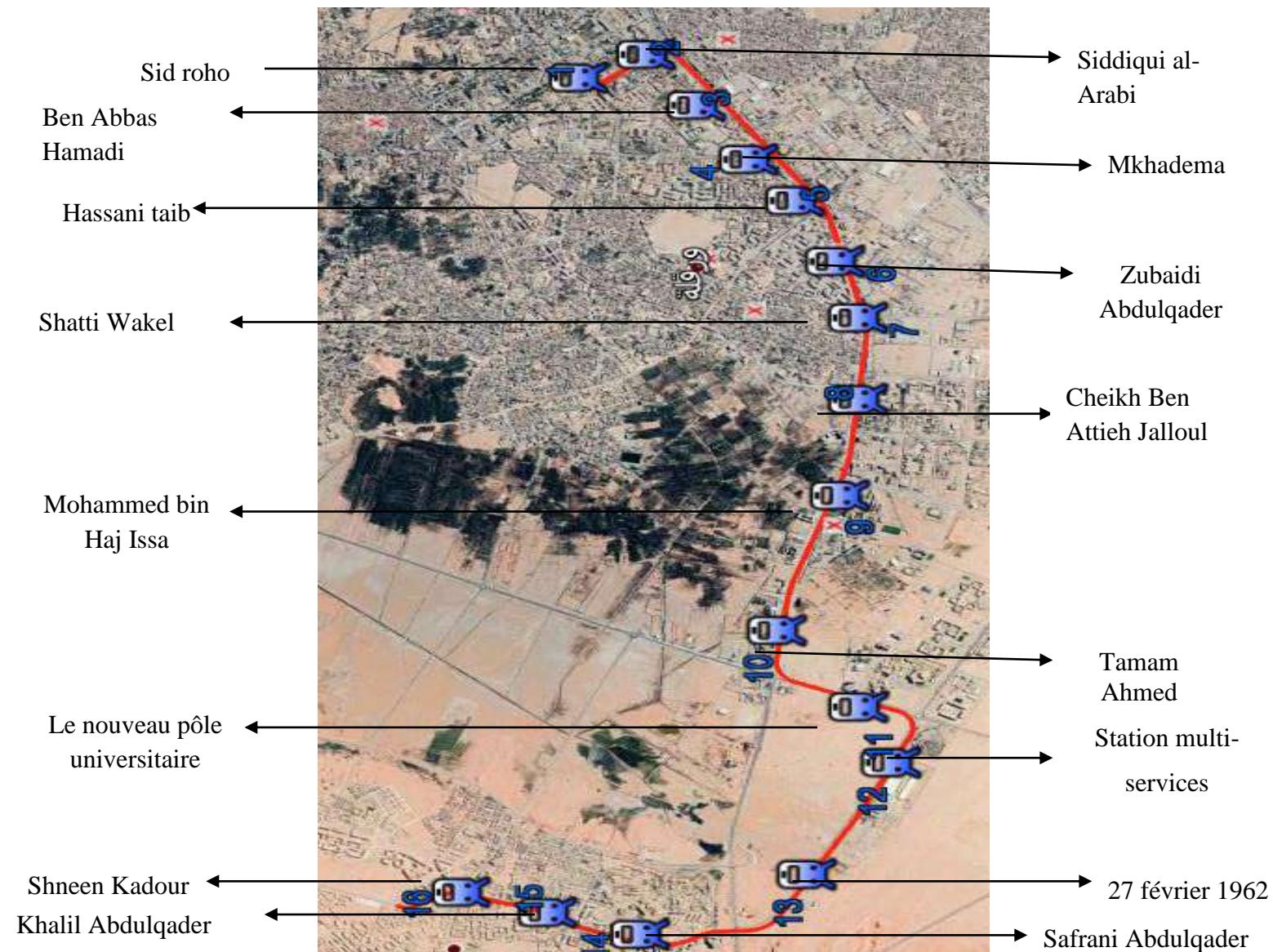
Le tramway d'Ouargla, construit dans la ville d'Ouargla en Algérie, est le tout premier tramway du désert, conçu pour résister aux conditions climatiques extrêmes liées à la proximité du désert. La ligne relie la vieille ville d'El Ksar (gare de Sid Rouhou) à la nouvelle ville de Hai Nasr (gare de Chenine Kadour) en passant par la nouvelle ville ainsi que la nouvelle gare routière, faisant du tramway une ligne centrale le centre-ville d'Ouargla. Le tramway a été inauguré en mars 2018, exploité par Enterprise métro d'Alger (EMA). La ligne permet le transport de 3 450 passagers par heure dans chaque direction. Le nombre annuel moyen de passagers sur la ligne devrait atteindre 34 millions de passagers. La ligne de tramway de Ouargla s'étend sur 9,6 km et 16 stations et comprend également [15]:

- 05 Sous-stations électriques
- (01) Centre de courant fort
- 19 carrefours
- Un hangar
- (01) échange pivotant
- 02 agences commerciales
- 16 guichets
- (01) pont
- Vitesse commerciale: 20,6 km / h
- Fréquence des locomotives: 4 minutes aux heures de pointe

Tramway de Ouargla sont utilisés avec 23 locomotives, desservant plusieurs zones urbaines de l'état de Ouargla, ainsi que des structures social et économique, notamment la rue principale de la ville de Ouargla, le quartier des institutions publiques, les trois pôles universitaires et la nouvelle gare terrestre.

### **2.3.1. Caractéristiques des rames**

- Nombre de rames : 23 rames, type Ctdis 402.
  - Longueur de la locomotive : 45 m
  - Largeur de la rame : 2,5 m
  - Capacité de la rame: 414 passagers
  - Capacité de transport aux heures de pointe: 5000 passagers / heure / dans une direction



**Figure 6 :** Vue générale de la ligne du tramway d’Ouargla.

### 2.3.2. Détails du projet de tramway d’Ouargla

Le ministère algérien des transports a dévoilé ses plans pour la construction du tramway d’Ouargla en 2011. Les études détaillées concernant le tracé, la voie, les travaux de terrassement et les ouvrages hydrauliques ont commencé la même année.

Parmi les autres constructions nouvelles figurent un centre de maintenance et de dépôt, un poste de commande central et un bâtiment administratif. Les réseaux de télécommunications et d’électricité situés le long du tracé ont également été modernisés dans le cadre du projet.

### 2.3.3. Construction

La construction du tramway d'Ouargla a débuté par une cérémonie de lancement officielle en juillet 2013. Les travaux ont atteint la phase finale à la fin de 2016. Les activités de test et de mise en service ont commencé à la fin de 2017 et le tramway a été ouvert pour les passagers en mars 2018.

### 2.3.4. Matériel roulant pour le tramway d'Ouargla

Le tramway d'Ouargla est desservi par une flotte de 23 tramways Citadis 402. Le premier train a été livré au centre de maintenance du nouveau réseau d'Ouargla en décembre 2016. Chaque tramway fonctionne à une vitesse moyenne de 20,6 km / h et parcourt la distance entre l'origine et la destination en 34 minutes.

Le tram a été conçu par le département Design & Styling d'Alstom. Le design reflète l'image de la ville d'Ouargla. Le schéma de peinture externe ressemble aux couleurs du soleil et du désert, tandis que l'intérieur vert ressemble aux palmeraies.

Le tramway peut fonctionner à des températures allant jusqu'à 49 ° C et survivre à un rayonnement solaire important, ainsi qu'à de grandes quantités de poussière et de particules de sable dans l'air. La climatisation puissante et les fenêtres recouvertes d'un film de protection solaire assurent un haut niveau de confort pour les passagers[15].



**Figure 7 :** Tramway Ouargla.

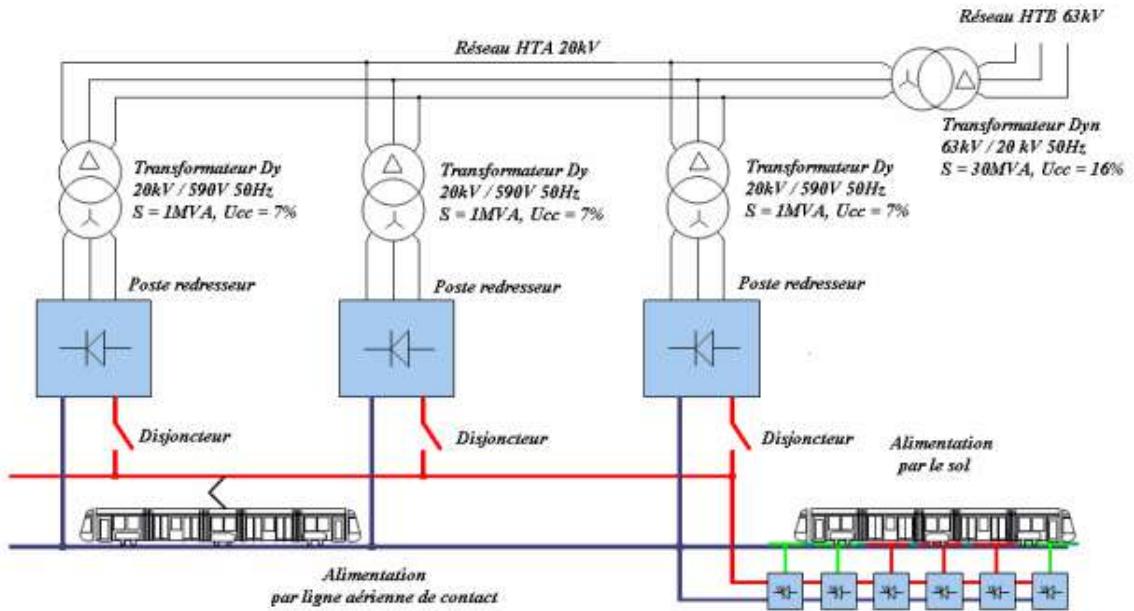
**Tableau 1 :** Caractéristiques tramway CITADIS bordeaux [16].

Caractéristiques	Rames 402
<b>Largeur d'une rame</b>	2,4 m
<b>Longueur d'une rame</b>	44m
<b>charge à l'essieu</b>	12,5t
<b>Capacité maximale d'une rame (à 4 passagers/m<sup>2</sup>)</b>	230 places debout et 70 assises
<b>Nombre de voitures par train</b>	7
<b>Nombre de portes doubles par rame</b>	10
<b>Par cotés</b>	2 en C1;1 en CC;2 en C2
<b>Nombre de portes simples par rame</b>	4
<b>Par cotés</b>	2: une en M1 une en M2
<b>Largeur de passage des portes simples</b>	800mm
<b>Largeur de passage des portes doubles</b>	1300mm
<b>Contrôleur automatique de dépassement de vitesse</b>	Non
<b>Contrôle automatique de vitesse pour les courbes serrées</b>	Non
<b>Accélération (performances contractuelles)</b>	1,09/s <sup>2</sup>
<b>Décélération (performances contractuelles)</b>	FMS 1,13 m/s <sup>2</sup> FU 40 km/h 2,66 m/s <sup>2</sup> FS 1,69 m/s <sup>2</sup>
<b>Temps de réaction du système de freinage</b>	700ms en FS
<b>Distances de freinage</b>	FMS 40km/h 55m50 FU 40 km/h 23m 58
<b>Vitesse maximale du train (spécifications techniques)</b>	60km/h
<b>Vitesse maximale en exploitation</b>	?
<b>Marches sous les portes</b>	Seuils Fixes
<b>Moteur</b>	6*120 kW = 720 kW
<b>distance entre patins APS</b>	3,2m
<b>Capacité maximale d'une rame (à 6 passagers/m<sup>2</sup>)</b>	345 places debout et 70 assises

## 2.4. Système électrique du tramway

Les réseaux de transports en commun électriques intra-muros actuels sont principalement basés sur des alimentations à courant continu, alors que les réseaux de desserte des banlieues utilisent des structures à courant alternatif [17].

Le système caténaire est un ensemble de câbles permet de répartir le courant fourni par les sous stations et de l'acheminer jusqu'à la motrice. Il y a deux catégories de sous-système caténaire sont alimentations par le sol (APS), lignes aériennes de contact (LAC). Pour la sécurité a été abandonné alimentations par le sol et compter sur lignes aériennes de contact.



**Figure 8 :** Illustration d'un réseau de tramway [17].

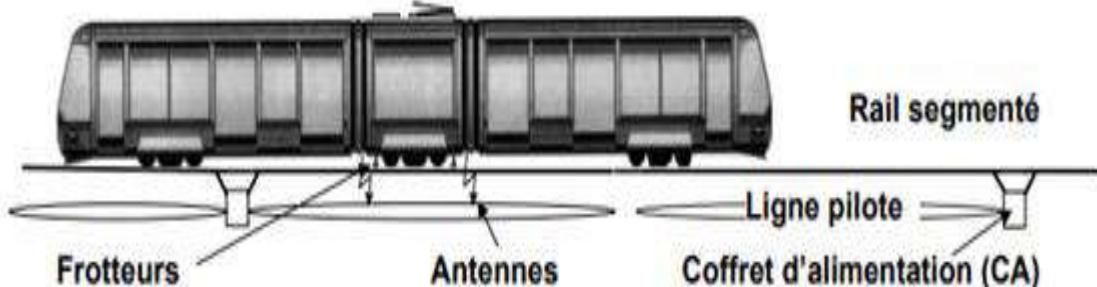
La Figure 8 représente une vision globale d'un réseau d'alimentation électrique de tramway doté d'une ligne aérienne de contact (LAC) et d'une alimentation par le sol (APS).

#### 2.4.1 .Alimentations par le sol (APS)

Initialement introduite à la fin du 19ème siècle, l'alimentation électrique des tramways par le sol avait été abandonnée pour des raisons de sécurité. Des câbles de puissance étaient placés au fond d'un caniveau, et un capteur situé sous chaque tramway y descendait afin d'établir le contact électrique [17]. Il s'agit d'un système d'alimentation innovant pour la ligne de tramway qui tire l'énergie électrique du sol. Sans préjudice des performances du tramway, grâce à ce système, les lignes de contact en hauteur peu attrayantes ne surplombent plus les centres-villes anciens. Ce système, constitué d'un rail en fibre de verre avec des conducteurs en acier et des pièces isolantes, garantit la sécurité même lorsqu'il est posé sur le sol.

Ce système éprouvé d'alimentation sans caténaire permet l'autonomie du tramway sans limite de distance. Il peut même être mis en place sur la totalité de la ligne. Le moteur est alimenté en 750 V DC par un rail segmenté intégré à la plate-forme de roulement, la connexion au rail se fait par l'intermédiaire de 2 patins frotteurs, le retour du courant se fait par les rails de roulement à 0 V [18].

A l'approche d'une rame, celle ci émet un signal radio, par l'intermédiaire d'antennes reliées aux frotteurs, autorisant ou non l'alimentation du segment par le coffret (AC) par l'intermédiaire de la ligne pilote [18].



**Figure 9 :** Mode alimentations par le sol (APS) [18].

### a. Batteries

Des batteries installées à bord du tramway garantissent une autonomie sur de courtes distances.

### b. Condensateurs

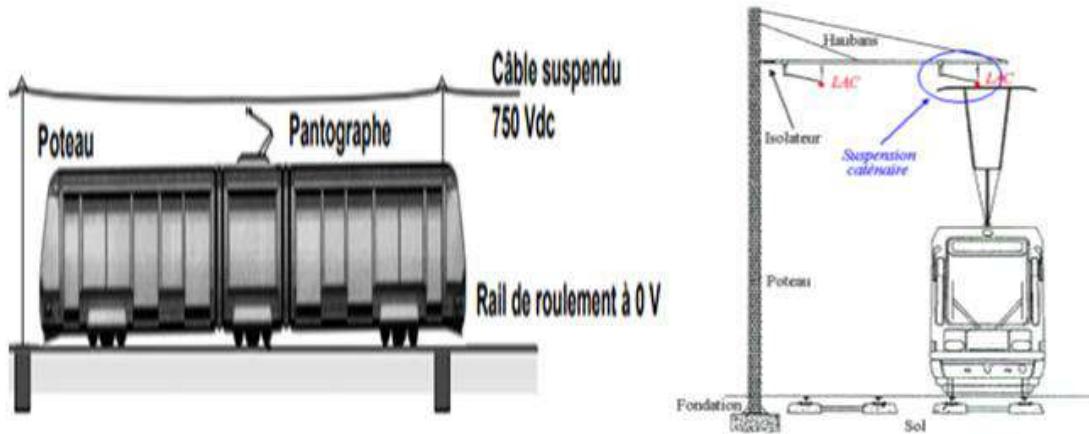
Une solution exclusive maximisant l'efficacité énergétique du tramway et permettant aux rames de fonctionner sans caténaire.

#### 2.4.2. Lignes aériennes de contact (LAC)

Le moteur est alimenté en 750 V DC par un câble suspendu, la connexion au câble se fait par l'intermédiaire d'un pantographe, le retour du courant se fait par les rails de roulement à 0 V [18].

Une LAC est constituée de :

- Fils de contact,
- Câbles d'alimentation et connexions électriques
- Supports et ancrages LAC
- Equipements/Armements (Isolateurs, Consoles, Transversaux, Suspensions, Rappels, Parafoudres, Feux de Présence Tension...)
- Protections (Parafoudres...)



**Figure 10 :** Mode lignes aériennes de contact (LAC) [15, 16] .

La Figure représente un type de support pour la ligne aérienne de contact.

## 2.5. Sous-système SCADA

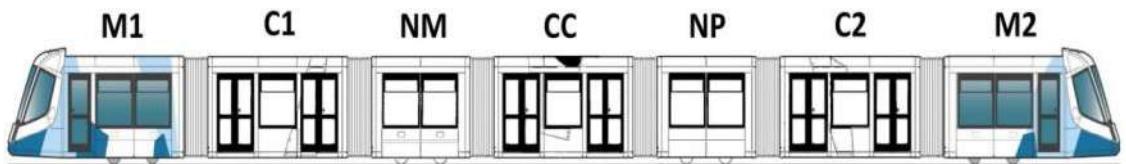
Le système SCADA (système de contrôle et d'acquisition de données) est un système de télégestion à grande échelle permettant de traiter en temps réel un grand nombre de télémesures et de contrôler à distance les installations de circuit électrique ferroviaire [19].



**Figure 11 :** Système de contrôle et d'acquisition de données [19].

## 2.6. Description technique du matériel roulant

Les rames sont composées de 7 modules articulés reposants sur 4 bogies dont 3 moteurs. Les bogies moteurs sont situés sous les caisses d'extrémité, dites motrices 1 et 2 (M1 et M2), et une caisse intermédiaire dite nacelle motrice (NM). Le bogie porteur est implanté sous une des caisses centrales dite nacelle porteuse (NP). Enfin, entre chaque motrice et nacelles (motrice et porteuse) s'intercalent des caisses suspendues. C1 du côté M1, caisse centrale (CC) entre NM et NP, et C2 du côté M2. Les rames sont équipées à leurs deux extrémités de systèmes permettant d'installer une barre de remorquage. Ces systèmes ne sont utilisés que pour des secours ou des déplacements en atelier, assurés par un engin rail-route ou une autre rame [20].



**Figure 12 :** Exemple des cabines du tramway CITADIS 402 ALSTOM [19].

Sur chaque face de la rame, on trouve 2 portes simples de 0,8 mètres de large situées à proximité des cabines de conduite, et 6 portes de 1,3 mètre d'ouverture à deux vantaux disposées à raison de deux par modules C1, CC et C2. Les portes sont vitrées sur toute leur hauteur. Elles sont louvoyantes-coulissantes à commande électrique, et disposent d'un bouton de commande électrique sur chaque face à disposition des passagers pour en assurer l'ouverture à la demande lorsque les rames sont à quai. Cette disposition, avec une fermeture temporisée, vise à assurer le confort climatique à l'intérieur de la rame [20].

Le bogie ARPEGE est le cœur de la technologie ‘plancher bas’. Il porte les roues, Les freins à disque, les patins de freinage magnétique, ainsi que les différentiels et moteurs de traction (2 machines asynchrones de 120 kW par bogie moteur). Les bogies sont de type Alstom Arpège de type 350M (bogies moteurs) et 350P (bogie porteur) à cadre articulé en acier mécano-soudé. Leur empattement est de 1,6 mètre. Le diamètre des roues (neuves) est de 590 millimètres. Les essieux sont calés pour circuler sur une voie à l'écartement standard. La liaison caisse-bogies est assurée par des bielles et les 4 appuis de la suspension secondaire. La suspension primaire est assurée par des roues élastiques dont le rôle est aussi de réduire les bruits de roulement. La suspension

secondaire est assurée par des ressorts hélicoïdaux. L'amortissement fait appel à des amortisseurs transversaux et verticaux entre la caisse et les bogies, ainsi qu'à des barres anti-roulis [20].



**Figure 13 :** Bogie moteur (à droite), Bogie porteur (à gauche) [19].

Les trois bogies moteurs sont équipés chacun de 2 moteurs asynchrones triphasés à refroidissement par eau d'une masse de 335 kg et d'une puissance de 175 kW. Leur vitesse de rotation maximale est de 4550 tours par minute. La transmission de l'effort de traction est assurée par des engrenages et un pont moteur formant un essieu coudé virtuel. La lutte contre les phénomènes de patinage est assurée par des sablières qui disposent de tuyaux éjecteurs face à chaque roue du côté de l'extrémité du bogie. Seuls les éjecteurs à l'avant dans le sens de la marche sont actifs, nous donnons ci-dessous les photos des 02 bogies moteur et porteur [19].

## 2.7. Les pièces utilisables

**Bogies :** Au cœur de la dynamique du train, le bogie est la pièce maîtresse en matière de contact roue-rail et de traction/freinage. Grâce à la gamme de bogies Alstom, les trains, quel que soit leur type, offrent un maximum de confort aux passagers et roulent en toute sécurité, à des vitesses correspondant à des applications urbaines ou grandes lignes.

**Moteurs :** Les moteurs convertissent l'électricité fournie par le système de traction en énergie mécanique pour faire avancer le train.

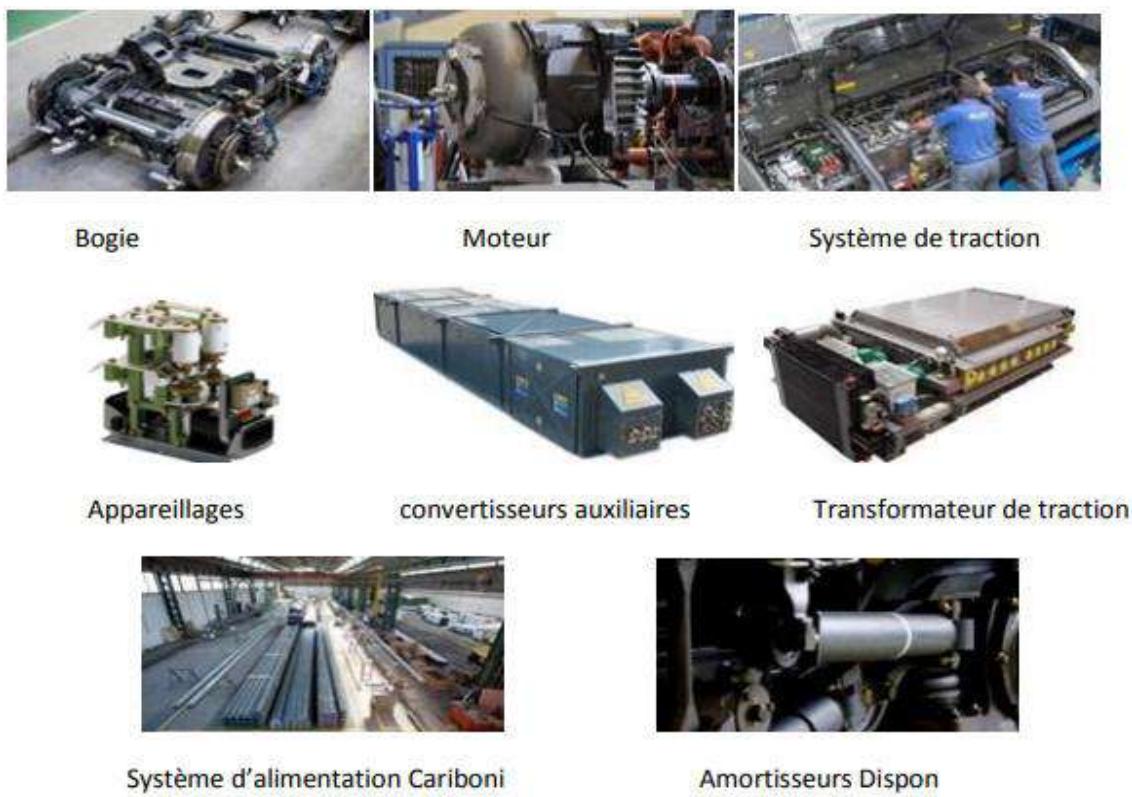
**Appareillage :** Alstom propose une large gamme de composants d'appareillages de haute qualité et les services associés : contacteurs, sectionneurs, disjoncteurs rapides courant continu, disjoncteurs monophasé 22CBNG avec ampoule à vide, contacteurs triphasés à ampoule à vide, commutateurs, équipements de toiture multifonctions et systèmes de mesure d'énergie.

**Convertisseurs auxiliaires** : Alstom produit des convertisseurs auxiliaires à la pointe de la technologie pour les métros, les trains régionaux, les trains à grande vitesse et les locomotives, fabriqués ou non par Alstom.

**Transformateurs de traction** : Avec 50 ans d'expérience à son actif et plus de 5 000 inductances de ligne et transformateurs embarqués refroidis à l'huile, Alstom fait figure de référence en matière de conception de transformateurs sur mesure destinés aux trains régionaux, aux trains à grande vitesse et aux locomotives.

**Systèmes d'alimentation Carboni** : Alstom est l'un des leaders européens de la conception, du développement et de la fabrication de composants pour les systèmes d'électrification des transports ferroviaires et routiers.

**Amortisseurs Dispen** : Les amortisseurs jouent un rôle clé dans la maîtrise du comportement dynamique du train et participent à la sécurité et au confort des passagers[21].



**Figure 14** : Les pièces utilisables [21].

## 2.8. Les avantages et les inconvénients de tramways

### 2.8.1. Les avantages

- L'attractivité du tramway pour les usagers passe par les meilleures performances: rapidité, ponctualité, régularité, accessibilité, confort, ...
- D'un point de vue économique, il a dynamisé les villes dans lesquelles il a été implanté.
- Alimenté par l'énergie électrique, il est écologique et silencieux puisque, contrairement aux voitures qui émettent du monoxyde et du dioxyde de carbone en consommant de l'essence, le tramway ne rejette ni gaz, ni fumée, et ne pollue pas.
- Durée de vie supérieure à celle de bus (30ans contre environ 15 ans) et Capacité supérieure à celle des bus.

Enfin le tramway est un outil séduisant et moderne qui peut embellir l'espace public et la vie quotidienne des usagers. Il transporte ses passagers dans des conditions modernes de confort (espace luminosité - éclairage ambiance - design intérieur - isolation - phonique - climatisation - vision panoramique - accès facile pour les handicapés) [19].

### 2.8.2. Les inconvénients

- Il n'est pas à la portée des petites agglomérations.
- Occupation de l'espace urbain du niveau zéro, ce qui nécessite une nouvelle gestion des flux ; en outre c'est un bon prétexte pour mener une politique anti-voiture.
- Réduction des échanges conducteurs –voyageurs.
- La construction de l'infrastructure nécessite des travaux qui gênent les riverains et la circulation.
- L'impact visuel de l'infrastructure aérienne (notamment caténaire) est conséquent, particulièrement dans les villes où tous les autres fils aériens ont été supprimés [19].

## 2.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés la motorisation des tramways nous avons commencé par parler du réseau d'alimentation électrique des tramways urbains où nous avons appris que les lignes des tramways sont Alimentées par des réseaux a courant continu sous une tension qui est généralement de 750 V. cette tension est convertie en tension alternative pour être utiliser a la motorisation de la machine asynchrone cette dernière responsable de la traction de tramway, La deuxième partie défini le tramway de Ouargla.

# Chapitre 3:

Modélisation d'un réseau électrique  
à partir d'une route solaire sur une  
voie de tramway application à  
Ouargla

### **3.1. Introduction**

L'objectif de cette étude est de développer une méthode de modélisation du profil quotidien de consommation d'énergie des transports et la conception stratégique d'un système d'alimentation en énergie électrique pour le tramway sous forme d'énergie renouvelable (route solaire) dans la ville d'Ouargla. Nous donnons en premier lieu l'ensemble des données relatives au fonctionnement du tramway, et ensuite la modélisation du système énergétique global, y compris la source renouvelable comme alternative et aussi appoint à la consommation du tramway.

### **3.2. Energie solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire par une cellule photovoltaïque. Les cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque, ces derniers sont regroupés pour former une installation solaire chez un particulier ou dans une centrale solaire photovoltaïque.

Les rayons du soleil stimulent les électrons qui entrent en mouvement et produisent de l'électricité. Cette production peut alors être stockée dans des batteries ou convertie à l'aide d'un onduleur pour être distribuée sur le réseau. Hormis ses avantages, l'énergie solaire présente quelques inconvénients, par son intensité variable, son caractère intermittent et son coût, la simulation de ses énergies est donc nécessaire pour optimiser son rendement.

### **3.3. Route Solaire**

#### **3.3.1. Définition**

La route solaire est aujourd'hui sans équivalent dans le monde. Nés, les dalles photovoltaïques sont collées directement sur des chaussées classiques et peuvent accueillir la circulation de tout type de véhicule. Ainsi la route est désormais capable de produire localement de l'énergie propre et renouvelable [22].

### **3.3.2. Le premier revêtement routier photovoltaïque au monde**

Wattway est une innovation française brevetée au terme de 5 années de recherche menées par Colas, leader mondial de la route, et l'INES, institut National de l'Energie Solaire. En associant les techniques de la construction routière avec celles de la production photovoltaïque, wattway fournit une énergie propre et renouvelable, tout en permettant la circulation de tout type de véhicule. La première route solaire est née.

### **.3.33. Lieux d'application**

La première application sur le terrain du panneau de route solaire a été utilisée dans la chaussée des États-Unis, un prototype de parking solaire financé par la Fédéral Highway Administration (FHWA) en 2009 [23].

L'idée a également été concrétisée en 2014; Par une section de piste cyclable de 70 mètres qui produit de l'électricité à partir de panneaux solaires aux Pays-Bas [22].

en 2016, le tronçon de 1 km traversant la petite ville de Tourouvre-au-Perche, en Normandie. Colas, le groupe mondial d'infrastructures de transport, a achevé l'installation d'un système de revêtement de panneaux solaires appelé "Wattway" [24]; Cette génération de collecteurs solaires a une efficacité de 15% [25].

En décembre 2017; la Chine a également construit une autoroute à deux voies et une voie de secours, conçue pour la production d'électricité et les transports en commun. Cette route s'étend sur 1 km et couvre une superficie de 5 875 m<sup>2</sup> [26].

B. Settou et al [27], étude la possibilité d'intégrer la technologies routes solaire dans le secteur de transport Algerian pour alimenter les véhicules électriques qui à utiliser l'électricité et / ou à l'hydrogène comme carburant . la route Est-Ouest (route E-O) de l'Algérie a été considéré comme case d'étude pour estimer la quantité d'électriques hydrogène produit à partir ce route et les émissions de CO<sub>2</sub> éviter quand utilisation les véhicules électriques.



**Figure 15 :** Exemples d'application route solaire.



**Figure 16 :** Installation des panneaux sur la route [28].

### 3.4. Description des panneaux PV utilisées

Les dalles Wattway comprennent des cellules photovoltaïques enrobées dans un substrat multicouche composé de résines et de polymères, suffisamment translucide pour laisser passer la lumière du soleil et assez résistant pour supporter la circulation de poids lourds. Ces cellules captent l'énergie solaire au travers d'une très fine feuille de silicium polycristallin qui transforme l'énergie solaire en électricité. Les dalles sont connectées à un boîtier latéral en sous-face intégrant des composants de sûreté électrique. De quelques millimètres d'épaisseur, antidérapante et conçues pour durer, les dalles Wattway sont posées et collées directement sur les chaussées existantes des routes, des parkings, des pistes cyclables, etc., sans avoir à refaire les revêtements ou repenser les structures routières [22].

### 3.5. Modélisation électrique de générateur photovoltaïque

Ce modèle fait usage des spécifications du module offertes par le fabricant, donc il offre une manière simple de détermination de la production maximale du module [29].

$$T_c = T_a + G_i \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right) \quad (3.1)$$

$I_{mp}$  Intensité du courant au point de fonctionnement maximal (A)

$V_{mp}$  Tension du module au point de fonctionnement maximal (V)

$T_c$  Température de la cellule photovoltaïque ( $^{\circ}$  C)

$T_a$  Température ambiante ( $^{\circ}$ C)

$G_i$  Eclairement solaire sur un plan incliné (W/m<sup>2</sup>)

$NOCT$  Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire ( $^{\circ}$ C)

$T_r$  Température de référence de la cellule photovoltaïque (25 $^{\circ}$ C)

$G_0$  Eclairement solaire de référence (1000 W/m<sup>2</sup>)

Alors la puissance optimale à la sortie du module est définie par :

$$P_{mp} = V_{mp} I_{mp} \quad (3.2)$$

Pour un générateur constitué de N modules en séries et M en parallèles, la puissance maximale produite est déterminée par [29] :

$$P_{PV} = N M P_{mp} \quad (3.3)$$

#### 3.5.1. Principes de calcul de l'énergie solaire

Avant d'entrer dans le calcul de l'irradiation solaire, certains principes de base et définitions méritent d'être rappelés.

##### a. Déclinaison du soleil

L'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. Sa valeur en degrés est donnée par l'équation de Cooper [29].

$$\delta = 23,45^{\circ} \sin \left[ 2\pi \frac{284+n}{365} \right] \quad (3.4)$$

$\delta$  La déclinaison ( $^{\circ}$ )

$n$  Numéro de jour de l'année à partir du premier Janvier

La déclinaison varie entre  $-23,45^{\circ}$  (le 21 décembre) et  $+23,45^{\circ}$  (le 21 juin).

### b. Temps solaire vrai

Le temps solaire vrai est défini à partir de la rotation de la terre sur elle même. Il est donc directement lié à l'angle horaire. La terre fait un tour complet en 24 heures. Il est midi (12h) lorsque le soleil est au zénith, on a donc [29] :

$$TSV = 12 - \frac{\omega}{15} \quad (3.5)$$

$\omega$  Angle horaire ( $^{\circ}$ )

### c. Angle horaire du soleil

C'est l'angle compris entre la méridienne origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel. La valeur de l'angle est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après midi et augmente de  $15^{\circ}$  par heure (donc un tour de  $360^{\circ}$  en 24 heures) [29] :

### d. La durée et le taux d'insolation

Par ciel clair et pendant la durée de jour d'ensoleillement  $S_0$  (de lever au coucher du soleil), le sol reçoit le rayonnement solaire maximal. Mais la durée effective d'ensoleillement  $S$  d'une journée ordinaire est inférieure à cette durée maximale. Le taux d'insolation est donné par l'expression [29] :

$$\sigma = S/S_0 \quad (3.6)$$

$\sigma$  Taux d'insolation

$S$  Durée d'insolation journalière (mesurée) (h)

$S_0$  Durée astronomique du jour (h)

$$S_0 = (2/15) \cos^{-1}(-\tan \psi \tan \delta) \quad (3.7)$$

$\psi$  La latitude du lieu ( $^{\circ}$ )

### e. Position du soleil

La direction du soleil dans le ciel est repérée par l'intermédiaire de deux angles :

- Hauteur de soleil ( $h$ ) : c'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. Cette angle s'annule à la lever et au coucher du soleil et prend sa valeur maximale au midi solaire. Elle calculée à partir de la relation suivante [29] :

$$\sin(h) = \sin(\psi)\sin(\delta) + \cos(\psi)\cos(\delta)\cos(\omega) \quad (3.8)$$

L'angle horaire au lever du soleil ( $\omega_s$ ) s'obtient en écrivant  $\sin(h) = 0$  [29] :

$$\cos \omega_s = -\tan(\psi)\tan(\delta) \quad (3.9)$$

- Azimut du soleil ( $a$ ) : c'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest [29] :

$$\sin(a) = \cos(\delta)\sin(\omega)/\cos(h) \quad (3.10)$$

#### 3.5.2. Rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère

Le rayonnement solaire extraterrestre est en fonction de la constante solaire  $G_{sc}$  et de la correction de la distance entre la terre et le soleil. La constante solaire est le flux énergétique reçu par une unité de surface. Dans notre cas, la valeur qui a été retenue en 1980 est :  $G_{sc} = 1367$  (W/m<sup>2</sup>).

Pour un jour n donné, l'énergie reçue sur une surface horizontale  $G_{h0}$  est obtenue par l'équation [29] :

$$G_{h0} = \frac{24}{\pi} G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos 2\pi \frac{n}{365} \right) (\cos \psi \cos \delta \cos \omega_s + \sin \psi \sin \delta) \quad (3.11)$$

#### a. Le jour type du mois

Pour une grandeur donnée, le jour type du mois est le jour du mois qui se rapprochant de la moyenne mensuelle de cette grandeur. La liste des jours types proposés par Klein [20] est reportée sur le tableau 2 :

**Tableau 2 :** Liste des jours types par mois proposés par Klein

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
Jour	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10

type												
N de jour	17	45	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344

Pour calculer l'irradiation journalière moyenne mensuelle, on utilise l'équation (3.11) avec  $n$  : le numéro de jour type du mois. Les résultats sont présentés dans le tableau 3 [29] :

**Tableau 3 :** Valeurs de l'irradiation journalière moyenne mensuelle hors atmosphère

Mois	N° de jour	$\delta$ (°)	$\omega s$ (°)	$\bar{G}_{h0}$ (Wh/m <sup>2</sup> j)
Janvier	17	-20.917	76.18	5397.325
Février	47	-12.954	81.75	6764.121
Mars	75	-2.417	88.52	8480.427
Avril	105	9.415	96.01	10206.037
Mai	135	18.792	102.36	11379.281
Juin	162	23.086	105.54	11853.239
Juillet	198	21.184	104.10	11648.300
Aout	228	13.455	98.67	10734.241
Septembre	258	2.217	91.43	9185.695
Octobre	288	-9.599	83.95	7324.952
Novembre	318	-18.912	77.64	5744.859
Décembre	344	-23.049	74.5	5026.453

### b. Indice de clarté

Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté. Les valeurs de ce dernier varient selon les endroits et les saisons. Sa moyenne mensuelle est exprimée par [29] :

$$K_T = \frac{\bar{G}}{\bar{G}_{h0}} \quad (3.12)$$

$K_T$  Indice de clarté mensuel

$\bar{G}$  Valeurs mesurées de la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière globale (Wh/m<sup>2</sup> j)

### c. Calcul de l'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface horizontale

A partir de la mesure de la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière globale, on estime l'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface horizontale  $\bar{G}h$  par la corrélation de suivante [29] :

$$\frac{\bar{G}_h}{\bar{G}_{h0}} = K_T = b + c \bar{\sigma} \quad (3.13)$$

Les valeurs des constantes ( $b = 0,3$  et  $c = 0,43$ ) sont données par Beeckman pour la région saharienne en Algérie

On considère que l'ensemble des modules composant le champ photovoltaïque est soumis aux mêmes conditions météorologiques. La puissance électrique produite par un générateur photovoltaïque est donnée par la relation [29] :

$$P_{PV} = \eta_{PV} N_{mod} A_{mod} G_i \quad (3.14)$$

$P_{PV}$  Puissance fournie par le champ PV (W)

$\eta_{PV}$  Rendement de générateur PV (%)

$N_{mod}$  Nombre de module PV (-)

$A_{mod}$  Surface de module PV ( $m^2$ )

Le rendement instantané de générateur est représenté par la relation suivante [29]

$$\eta_{PV} = \eta_r [1 - \mu_{P-max}(T_c - T_r)] \quad (3.15)$$

$\eta_r$  Rendement d'un module PV dans les conditions de références (%)

$\mu_{P-max}$  Variation de la puissance PV en fonction de la température (% /°C)

Les données météorologiques étant à présent connues, il ne nous manque plus que les données caractéristiques du constructeur du module. Nous considérerons le module Siemens, dont les caractéristiques nécessaires à notre modèle sont données ci-dessous[29] :

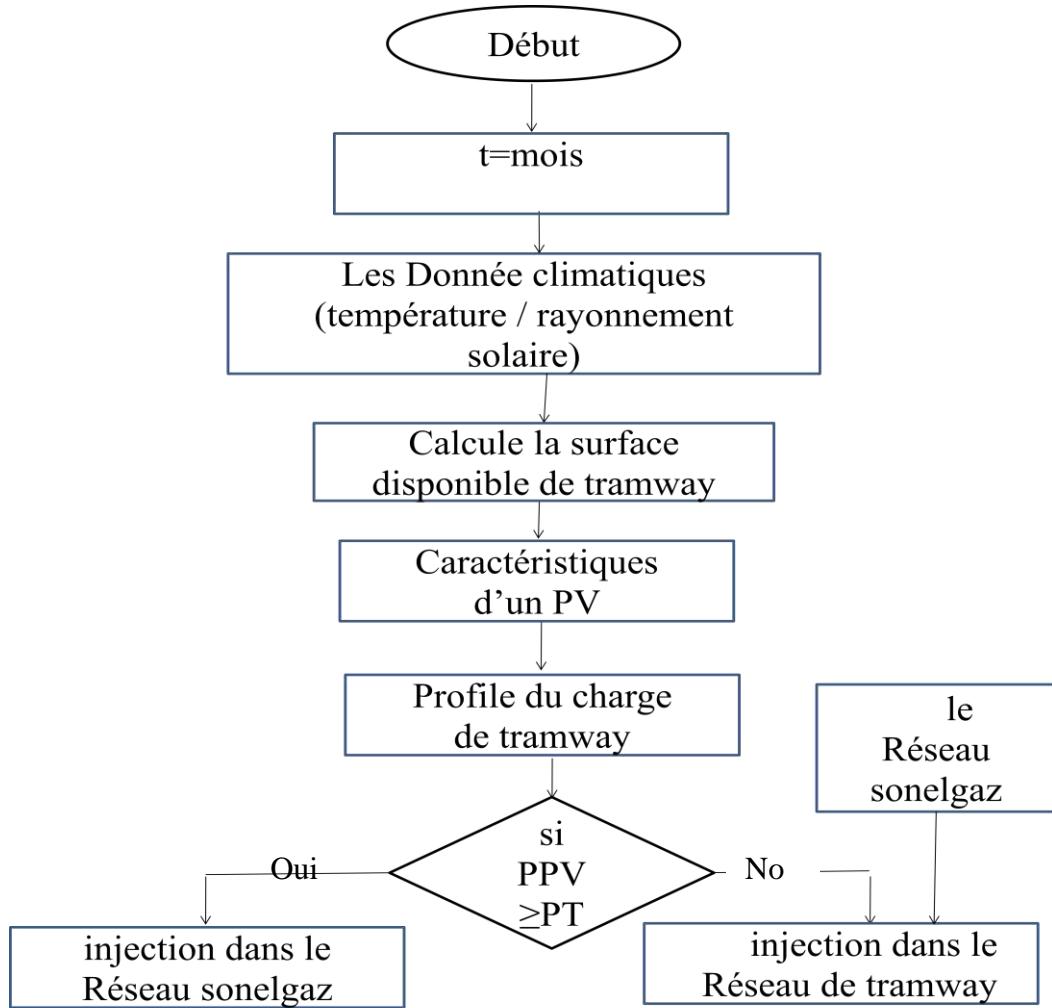
$$P_{Max} = 240 \text{ Wc}$$

$$\mu_{P-max} = -0,3 \% /^{\circ}\text{C}$$

$$NOCT = 48,3^{\circ}\text{C.}$$

### 3.6. Organigramme

Nous présentons l'organigramme qui résume l'ensemble des étapes de calcul des besoins énergétiques développés par la voie équipée par les panneaux photovoltaïques et consacrée au tramway.



### 3.7. Résultats de la simulation

D'après la simulation, on obtient les résultats suivants :

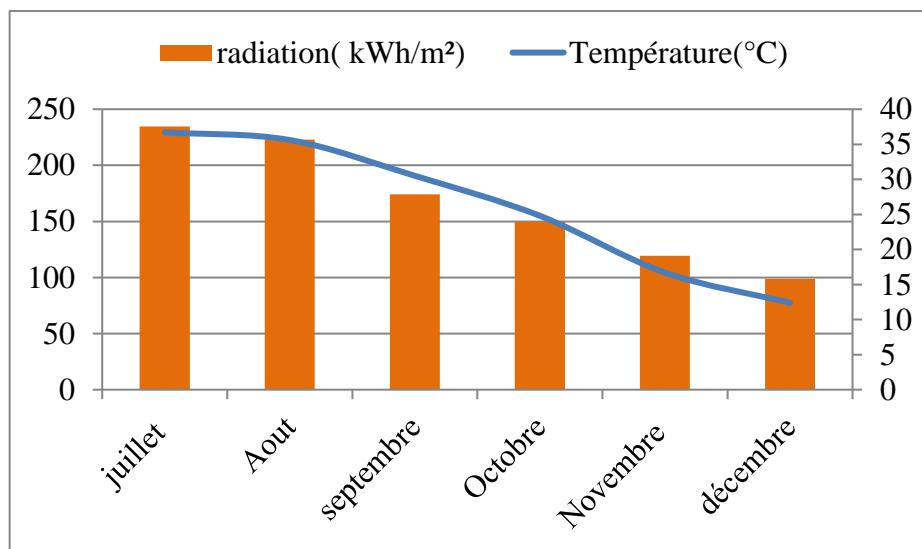
#### 3.7.1. Données environnementales

Nous présentons dans le tableau 4, les données relatives à l'éclairement solaire et les conditions environnementales de la région d'étude, en l'occurrence la ville d'Ouargla.

**Tableau 4 :** Récapitulatif d'éclairement solaire reçu sur une surface horizontale et la moyenne mensuelle de la température ambiante de la région d'Ouargla [30].

Mois	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
<b><math>Gi</math></b> ( $\text{kWh/m}^2$ )	248	227	184	155	125	111
<b><math>Ta</math> (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	36,7	35,6	30,5	24,8	16,7	12,4

La figure 17 représente la température ambiante et de l'ensoleillement solaire reçu sur une surface horizontale pour la région d'Ouargla.

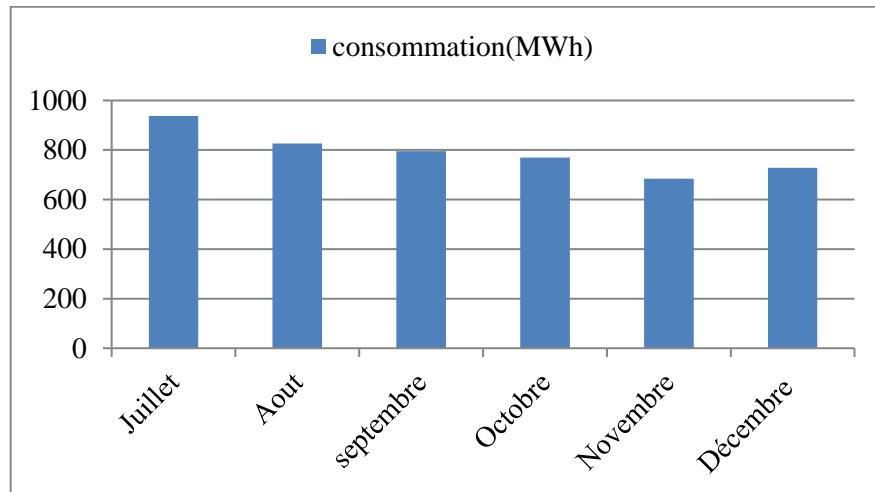


**Figure 17 :** Variation de la température ambiante et de l'ensoleillement solaire reçu sur une surface horizontale pour la région d'Ouargla.

En analysant la figure 17, on remarque que l'irradiation globale et la température ambiante ne sont pas uniformes pour tous les mois. L'irradiation est maximale au mois d'Août (223 kWh) et de Juillet (234,7kWh), et elle est moins importante pour les autres mois de l'année, décembre (98,78kWh).

### 3.7.2. Consommation énergétique

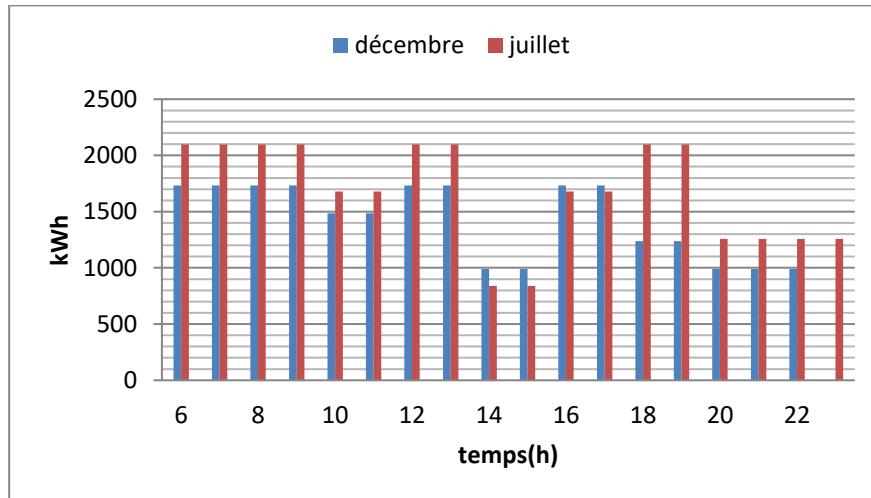
La figure 18, représente la consommation mensuelle du Tramway pour la période allant de juillet à décembre en 2018 (nous ne disposons pas des données énergétiques pour le reste de l'année).



**Figure 18 :** Evaluation de la consommation mensuelle de tramway d'Ouargla en MWh.

La consommation mensuelle énergétique est variable allant de 937 MWh à 684MWh respectivement pour les mois de juillet à novembre. Ceci est du au nombre de rames circulant sur la voie du tramway qui est variable en fonction de la fréquentation des usagers et variant de 28 à 32 selon les mois de l'année.

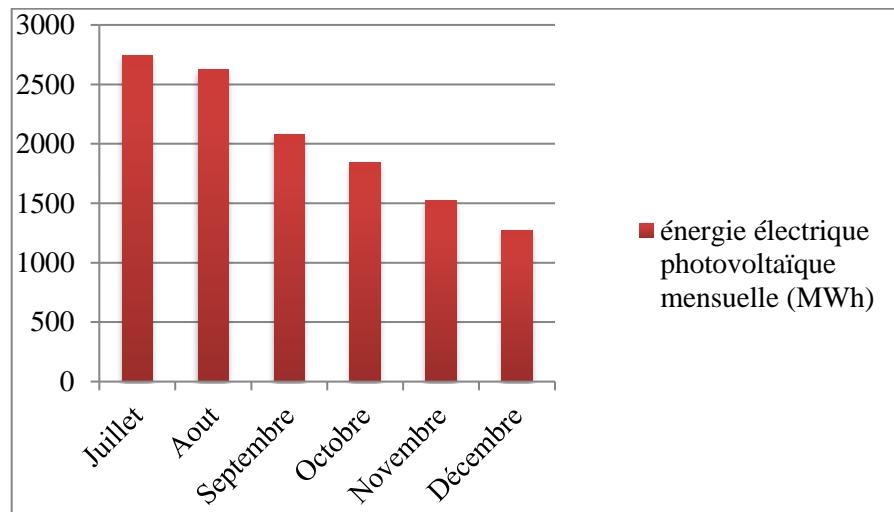
La figure 19, représente la consommation énergétique journalière du Tramway pour les deux jours que correspond à les jours typiques du ce mois caractéristiques des mois de juillet et décembre.



**Figure 19 :** Evaluation de la consommation journalière du tramway de Ouargla

### 3.7.3. Production photovoltaïque mensuelle des panneaux disposés sur la route du tramway

La figure 20 représente la production énergétique mensuelle des panneaux photovoltaïques disposés sur la route du tramway et ceci en utilisant le modèle mathématique déjà présenté pour les données météorologiques du site choisi.



**Figure 20 :** Evaluation de la production mensuelle de l'électricité photovoltaïque dans la route tramway d'Ouargla en MWh.

En analysant la figure 20, on remarque que la production d'énergie électrique n'est pas uniforme pour tous les mois, elle est maximale au mois de Août et de Juillet, et elle est moins importante pour les autres mois de l'année. Car c'est à ces deux mois qu'on obtient la valeur maximale de l'irradiation solaire. La production énergétique est maximale pour le mois de juillet avec une valeur de 2745 MWh, et minimale pour le mois de décembre avec une valeur de 1274 MWh qui représente moins de la moitié du mois de juillet.

Nous présentons dans le tableau 5 la différence entre la production électrique de la route solaire et la consommation énergétique du tramway, qui est désignée comme surplus avec un total de 14,12 GWh pour l'année d'étude.

Tableau 5 : Surplus énergétique de la route solaire (en MWh)

Mois	Consommation tramway(MWh)	Energie électrique photovoltaïque (MWh)	Surplus(MWh)
Juillet	937	2745	1763
Aout	827	2624	1773
Septembre	795	2082	1205
Octobre	770	1842	930
Novembre	684	1520	816
Décembre	728	1274	572

La figure 21 représente la consommation énergétique du tramway et l'énergie électrique photovoltaïque produite par les panneaux disposés sur la route. Nous remarquons que la production d'énergie d'origine solaire sur la surface globale de la route (environ 7 ha) dépasse les besoins énergétiques du tramway. Le surplus d'énergie est évalué à environ 14,12 GWh. Cette quantité produite durant la journée peut être cédée à l'opérateur énergétique, en l'occurrence, l'entreprise SONELGAZ et facturée selon le prix standard international qui est de 0,213€/kWh. Ce surplus annuel d'énergie peut nous rapporter la somme de 3 M€.

La loi sur l'électricité actuellement en vigueur donne droit aux producteurs de l'électricité produite à partir d'une énergie renouvelable de vendre soit la totalité de leur production ou le surplus à Sonelgaz à un prix négocié. Cette politique n'est pas très attrayante pour les promoteurs parce que l'acheteur qui détient un monopole aura toujours une position de force dans toutes les négociations éventuelles. Le décret relatif aux coûts de la diversification promulgué dans le cadre de la loi sur la libéralisation des secteurs du gaz et de l'électricité stipule que pour l'électricité produite à partir d'installations utilisant l'énergie solaire thermique dans un système hybride solaire-gaz.

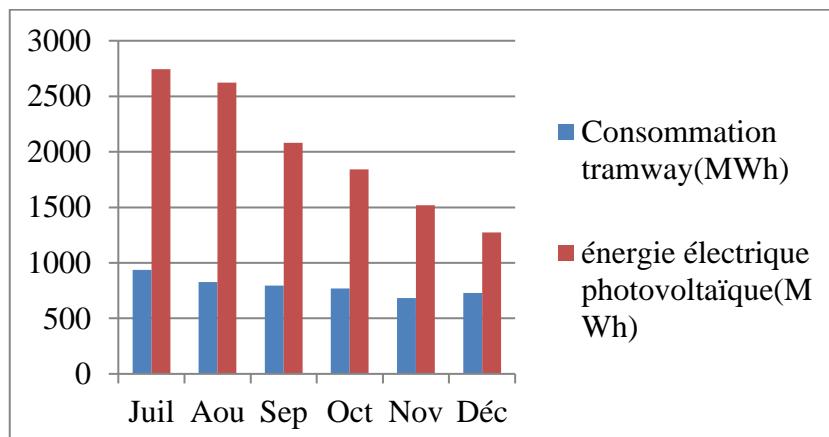


Figure 21 : Comparaison entre production et consommation en MWh.

En analysant cette figure 21, on peut conclure que la production d'électricité est supérieure à la consommation pour tout les mois, c'est-à-dire qu'il existe un surplus de production.

### 3.7.4. Rendement photovoltaïque

La figure 22 représente l'évolution du rendement mensuel photovoltaïque de l'installation sur la route solaire du tramway pour la période allant de juillet à décembre.

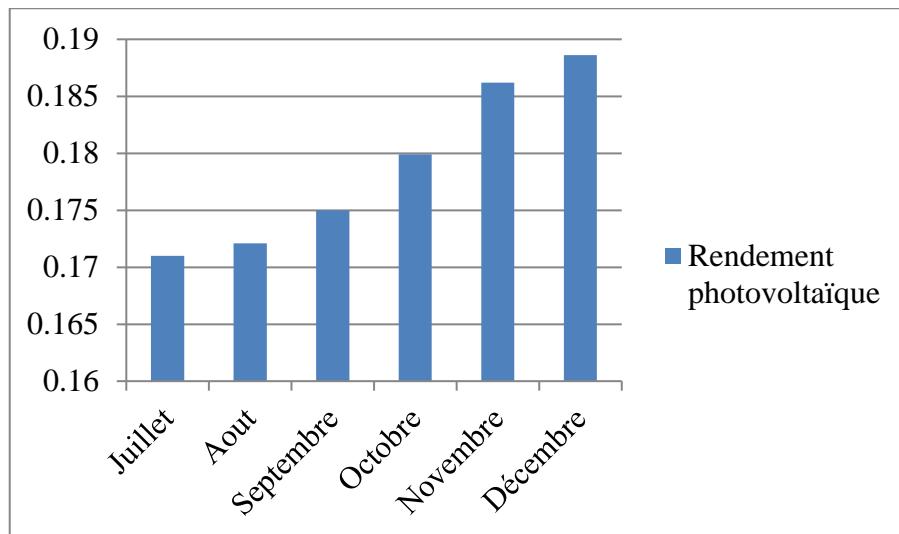


Figure 22 : Rendement mensuel global.

On remarque que le rendement mensuel global varie en fonction des mois de l'année. Il varie de 17,1 à 18,86 respectivement pour les mois de juillet et décembre. Cette variation est due principalement aux conditions environnementales de la région considérée. Le rendement photovoltaïque qui exprime la conversion énergétique est directement lié à la température ambiante du milieu. Le rendement est d'autant plus intéressant que la température est proche de 25 °C.

## 3.8. Etude économique du système photovoltaïque

A l'heure actuelle, la démarche utilisée pour apprécier l'intérêt économique d'un système énergétique s'appuie sur un schéma de fonctionnement fixé. Ensuite, à partir d'un scénario incluant la durée de vie de système, ainsi qu'un taux d'actualisation, il est possible de calculer le coût de production d'énergie. Dans le cas d'un système photovoltaïque, afin de calculer le coût de l'électricité produite, une analyse du coût de

cycle de vie (Life Cycle Cost, LCC), devra inclure le coût de financement du capital ainsi que la valeur actualisée des coûts d'exploitation, d'entretien et de remplacement sur la durée de vie prévue du système.

### **3.8.1. Tarification de l'énergie à l'échelle nationale**

Le secteur de l'énergie n'est pas encore libéralisé où les prix à la consommation pour tous les produits énergétiques dans toutes leurs formes sont subventionnés par l'état (35% du prix de l'électricité est subventionné par l'état algérien). Les prix sont fixés sur la base de critères socio-économiques. Les subventions sont indirectes, elles ne sont pas assurées à travers des transferts directs du budget de l'état mais par le biais d'une réduction appliquée sur les bénéfices des sociétés étatiques de production, SONELGAZ pour l'électricité et le gaz [31]. Les tarifs de l'énergie sont en effet réglementés par l'état. Le niveau des tarifs de l'électricité et du gaz en Algérie est fixé par décret sur la base de propositions soumises par la Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG) qui a été créée en vertu de la loi 02-01 du 05 février 2002 se rapportant à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisation, en tant qu'organisme indépendant doté de la personnalité juridique et de l'autonomie financière. Il est vrai que le principe est là, mais la mise en œuvre proposée par le CREG n'est pas appliquée. Le prix de l'électricité destiné au secteur résidentiel est de 0.017€/kWh pour le tarif algérien alors qu'il est de 0.213 €/kWh pour le prix European (le tarif européen est donné par la moyenne de 5 pays européens entourant la méditerranée qui sont le Portugal, l'Espagne, la France, l'Italie et la Grèce).

### **3.8.2. Coût d'investissement total**

Le coût global d'une installation photovoltaïque se compose de deux parties distinctes: l'investissement initial et les frais d'exploitation et de maintenance. L'investissement initial ( $I_0$ ) comprend le coût de l'installation du système photovoltaïque de production d'énergie, ce dernier pourrait être divisé en :

- Le coût capital des modules photovoltaïques
- Le coût du BOS (balance of system) qui inclut toutes les parties du système PV excepté le module photovoltaïque lui même (par exemple, le câblage, le soutirage, ainsi que d'autres coûts d'installation du système).

$$I_0 = C_{PV} + C_{BOS} \quad (3.16)$$

Les prix des modules varient considérablement selon la technologie, et sont influencés par les variations de coût de fabrication et de rendement des cellules PV. Un rendement de conversion plus élevé ordonne généralement une augmentation de prix. Des études sur l'évolution des coûts des modules PV en fonction de rendement PV, montrent qu'une augmentation de 1% de rendement compensée par une augmentation de 0,1 \$ de coût de Watt de module. Le coût de BOS du système photovoltaïque, représente 50% de coût de générateur PV.

Le cout d'un m<sup>2</sup> de surface de la technologie proposée coute 380 \$ [31]. La surface totale disponible relative au circuit du tramway a été évaluée à environ 7 ha (68369 m<sup>2</sup>). Cette surface a été déterminée grâce au tracé du tramway fourni par le logiciel Google Earth. Le cout total des capteurs photovoltaïque est donc estimé à 25 Millions \$. Le cout des équipements auxiliaires (BOS) est évalué à 12,9 M \$. Le cout total de l'investissement pour notre installation est de 39 M\$.

Le coût d'exploitation et de maintenance (O&M), représente l'ensemble des dépenses engagées pour maintenir en état de fonctionnement un système. Pour un système photovoltaïque, les frais O&M sont essentiellement :

- La surveillance périodique
- L'entretien périodique des composants de système.

### 3.8.3. Coût moyen actualisé de l'électricité photovoltaïque

Le coût d'électricité produite par le système solaire PV a été calculé en fonction de plusieurs facteurs, en utilisant la méthode dite : coût moyen actualisé d'électricité (Levelised Cost Of Electricity, LCOE). La méthodologie LCOE est une abstraction de la réalité ; elle est utilisée comme un outil d'évaluation de la rentabilité des différentes technologies de génération d'énergie.

Coût moyen actualisé d'électricité est le rapport des valeurs actualisées nettes des coûts de cycle de vie (life cycle cost) de système de production d'électricité (coût d'investissement initial, dépenses de maintenance et de remplacement), sur la quantité d'énergie électrique produite durant la vie de système.

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{n=1}^N (C_{O\&M} + C_r) / (1+r)^n}{\sum_{n=1}^N E_{el,an} (1-deg)^n / (1+r)^n} \quad (3.17)$$

$I_0$	Coût d'investissement initial (\$)
$N$	Durée de vie du système (ans)
$C_{O\&M}$	Coût de maintenance et d'exploitation (\$)
$C_r$	Coût de remplacement (\$)
$r$	Taux d'actualisation (%)
$E_{el,an}$	Production annuelle d'énergie électrique (kWh/an)
$deg$	Taux de dégradation (%)

Coût moyen actualisé de l'électricité photovoltaïque Après avoir entré le cout de surplus

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{n=1}^N [(C_{O\&M} + C_r) - surplus] / (1+r)^n}{\sum_{n=1}^N E_{el,an} (1-deg)^n / (1+r)^n} \quad (3.18)$$

Le coût des dépenses du système photovoltaïque, est la somme du coût d'investissement initial  $I_0$  et les dépenses de maintenance et de remplacement durant la durée de vie du système ( $n*(C_{O\&M} + Cr)$ ).

Les revenus issus de l'énergie électrique produite du système photovoltaïque pendant la durée de vie du système, pratiquée au prix du kWh du standard international (0,24 \$) sont retranchés au cout global de l'investissement ( $n*CE_{el,an}$ ).

Le délai de récupération correspond à la période de temps au bout de laquelle les rentrées nettes de fonds auront permis de rembourser l'investissement initial. Ceci nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_0 + n*(C_{O\&M} + Cr) = n*CE_{el,an} \quad (3.19)$$

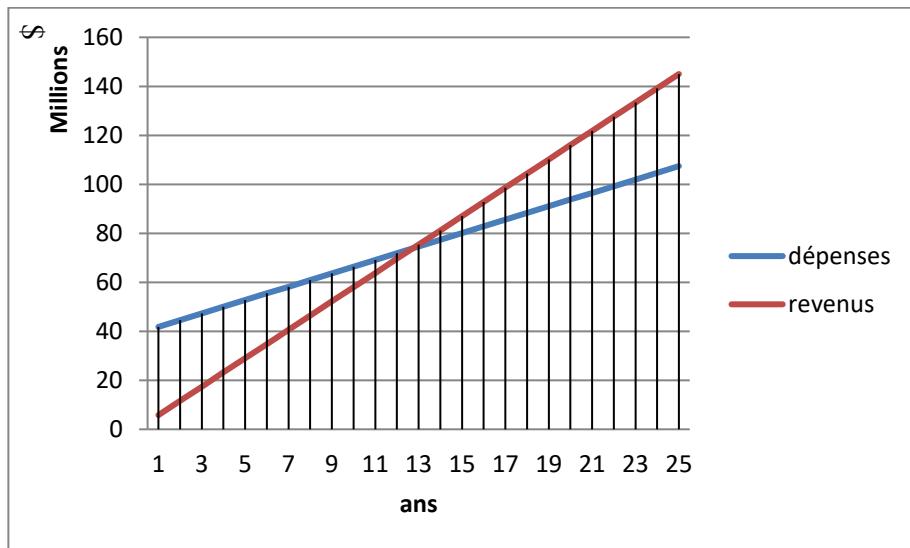
$$n = \frac{I_0}{CE_{el,an} - (C_{O\&M} + Cr)}$$

### 3.8.4. Bilan économique (dépenses et revenus)

Les critères de rentabilité choisis dans le cadre de cette analyse sont le délai de récupération et le taux de rentabilité interne (TRI). Le délai de récupération correspond à la période de temps au bout de laquelle les rentrées nettes de fonds auront permis de

rembourser l'investissement initial. Au-delà de cette période, l'énergie récupérée est considérée comme gain pour notre système. La courbe suivante montre l'évolution des revenus et des dépenses d'investissement en fonction des années.

La figure 23 représente les dépenses engagées dans la réalisation du projet de la route solaire pour les besoins énergétiques du tramway et les revenus issus des surplus de l'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïques du système proposé.



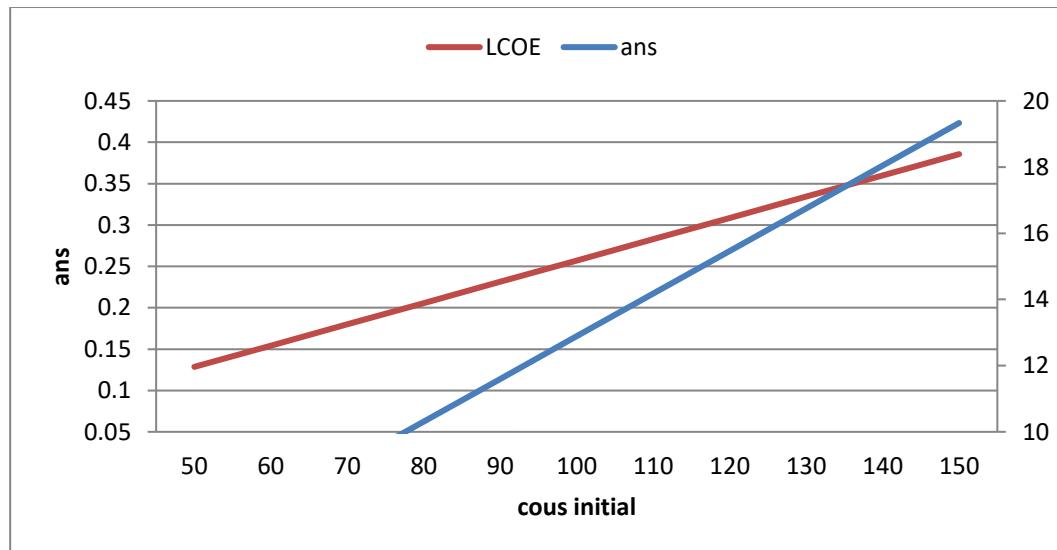
**Figure 23 :** Dépense et revenus issus du système proposé.

Nous avons étudié la durée de vie de chaque composant du système, et nous avons pris la plus grande durée de vie qui est de 25 ans. La courbe bleue qui représente les dépenses engagées pour réaliser le projet comprenant un cout initial (cout des équipements et auxiliaires) et des dépenses variables au cours des années (maintenance, exploitation et remplacement). La deuxième courbe en jaune représente les revenus issus de la production d'énergie électrique à partir des panneaux photovoltaïques. Le point d'intersection des deux courbes représente l'égalité entre les dépenses et les revenus. La durée nécessaire à la récupération des investissements engagés est de 12 ans et 9 mois. L'énergie récupérée au-delà de cette période est estimée à 1Million GWh et qui correspond à un gain net estimé à 249 M\$ sur la base du tarif standard international. Les revenus peuvent être calculés à partir de la formule suivante :

$$Revenus = \sum_{n=1}^{N=25} [(E_{vente}) \times P_{vente}]$$

### 3.8.5. Influence du cout initial

Dans ce travail, une analyse de sensibilité a été réalisée pour prédire l'efficacité future du système, en l'occurrence la variation de l'investissement initial est examinée. L'effet de la variation du coût initial du système varie de 50 % à 150 % du coût actuel utilisé. Son effet sur le LCOE est présenté sur la figure 24.



**Figure 24:** influence du cout initial.

La courbe montre l'évolution du délai de récupération de l'investissement en termes d'années et du LCOE en fonction de la variation du coût initial. La valeur 100% représente le cout initial proposé dans cette étude qui correspond à un coût initial environ de 39 M\$ et environ 12 ans et 9 mois le délai de récupération de l'investissement avec un prix du kWh de 0,25 \$.

Nous remarquons que plus le coût d'investissement initial devient important, plus la valeur du prix du kWh (LCOE) prend de l'ampleur dans le temps. Lorsque la variation du coût initial dépasse 100%, le taux d'inflation augmente et retardé donc le recouvrement des pertes. Si la variation du coût initial est inférieure à 100%, le taux d'inflation diminue et donc le temps de récupération des pertes sera réduit.

### 3.9. Conclusion

Nous avons tout d'abord décrit brièvement les méthodes utilisés pour le traitement des données météorologiques dont le but est d'estimer la production

d'énergie électrique produite par une la technologie route solaire installé dans un vois du tramway d'Ouargla comme case d'étude . Les résultats obtenus indiquent, que l'énergie pourrait être apportée pour une installation d'énergie (route solaire) répondre à nos besoins.

La deuxième partie de ce chapitre a été consacré à l'évaluation de la performance de système PV à l'aide d'un critère économique. Nous avons estimé le coût d'investissement total par la méthode d'analyse du coût sur cycle de vie. Il est important de mentionner pour terminer que le surplus présente une influence sur le coût de l'électricité produite. Dans une durée de vie de 25 ans de ce projet , le coût de production est estimé à 0,25 \$/kWh, et 0,08 \$/kWh après vente le surplus.

## Conclusion générale

L'énergie fossile constitue actuellement la principale source de production énergétique, mais aujourd'hui la consommation énergétique dans toutes ses formes a atteint son extrémité, ce qui nous incite à repenser les sources de production énergétique renouvelable. Le développement des infrastructures et des transports en Algérie représente le secteur le plus énergivore. Nous proposons dans ce travail l'application de la technologie des routes solaires pour le tracé du tramway de la ville de Ouargla.

Nous avons modélisé l'ensemble du système de production de l'énergie électrique du générateur photovoltaïque et la consommation du tramway dans les conditions appliquées pour le tracé de Ouargla. Les calculs nous ont permis de déterminer l'irradiation globale pour tous les mois de l'année. L'irradiation est maximale au mois d'Août (223 kWh) et de Juillet (234,7kWh), et elle est moins importante pour les autres mois de l'année, décembre (98,78kWh). La production d'énergie électrique n'est pas uniforme pour tous les mois, elle est maximale au mois de Août et de Juillet, et elle est moins importante pour les autres mois de l'année. Car c'est à ces deux mois qu'on obtient la valeur maximale de l'irradiation solaire. La production énergétique est maximale pour le mois de juillet avec une valeur de 2745 MWh, et minimale pour le mois de décembre avec une valeur de 1274 MWh qui représente moins de la moitié du mois de juillet.

La consommation mensuelle énergétique est variable allant de 937 MWh à 684MWh respectivement pour les mois de juillet à novembre. Ceci est du au nombre de rames circulant sur la voie du tramway qui est variable en fonction de la fréquentation des usagers et variant de 28 à 32 selon les mois de l'année.

La production d'énergie d'origine solaire sur la surface globale de la route (environ 7 ha, cette surface a été déterminée grâce au tracé du tramway fourni par le logiciel Google Earth) dépasse les besoins énergétiques du tramway. Le surplus d'énergie est évalué à environ 14,12 GWh. Cette quantité produite durant la journée peut être cédée à l'opérateur énergétique, en l'occurrence, l'entreprise SONELGAZ et facturée selon le prix standard international qui est de 0,213€/kWh. Ce surplus annuel d'énergie peut nous rapporter la somme de 3 M€.

Le rendement mensuel global varie en fonction des mois de l'année. Il varie de 17,1 à 18,86 respectivement pour les mois de juillet et décembre. Cette variation est due principalement aux conditions environnementales de la région considérée.

Le cout d'un  $m^2$  de surface de la technologie proposée coute 380 \$. Le cout total des capteurs photovoltaïque est donc estimé à 25 Millions \$. Le cout des équipements auxiliaires (BOS) est évalué à 12,9 M\$. Le cout total de l'investissement pour notre installation est de 39 M\$

La durée nécessaire à la récupération des investissements engagés est de 12 ans et 9 mois. L'énergie récupérée au-delà de cette période est estimée à 1 Million GWh et qui correspond à un gain net estimé à 249M \$ sur la base du tarif standard international.

Dans ce travail, une analyse de sensibilité a été réalisée pour prédire l'efficacité future du système, en l'occurrence la variation de l'investissement initial est examinée. Nous remarquons que plus le coût d'investissement initial devient important, plus la valeur du prix du kWh (LCOE) prend de l'ampleur dans le temps. Lorsque la variation du coût initial dépasse 100%, le taux d'inflation augmente et retarde donc le recouvrement des pertes. Si la variation du coût initial est inférieure à 100%, le taux d'inflation diminue et donc le temps de récupération des pertes sera réduit.

Nous terminons cette conclusion en évoquant les différentes perspectives d'étude que nous envisageons d'aborder dans le futur :

- Utilisation du la climatisation solaire dans les rames du tramway pour réduire la quantité d'énergie consommée dans le mois du juillet.
- Comparez des semaines de chaque saison jusqu'au week-end.

# Références

---

## Références

- [1] A. Gouareh, “Maîtrise et optimisation de la gestion énergétique en Algérie,” Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2017.
- [2] Ministère de l’Energie, “Bilan Energétique,” 2018.
- [3] N. SAIFI, “CONTRIBUTION A LA CONCEPTION DES BATIMENTS A FAIBLE CONSOMMATION D’ENERGIE DANS LES ZONES ARIDES,” KASDI MERBAH OUARGLA, 2015.
- [4] BP, “BP Statistical Review of World Energy.”  
<http://www.bp.com/statisticalreview>, 2018.
- [5] L. BERRACHED, “Etude Prospective de la Demande d’Energie Finale pour l’Algérie a l’Horizon 2030.,” M’Hamed BOUGUARA, Boumerdes, 2011.
- [6] A. Benatmout, “Etude Prospective De La Demande D ’ Energie a L ’ Horizon 203 0,” pp. 1–138, 2013.
- [7] “Agence Nationale de D’éveloppement de l’investissement.” [Online]. Available: <http://wwwandi.dz>. [Accessed: 08-Mar-2019].
- [8] “infrastructure de transport -Wikipédia.” [Online]. Available: <https://fr.wikipedia.org>. [Accessed: 18-Mar-2019].
- [9] KPMG Algérie SPA, *Guide Investir en Algérie*. 2017.
- [10] R. Algerienne, D. Et, C. National, and E. Et, “Rapport Le développement de l ’ infrastructure routière : Nécessité de choix économiques et de meilleure sécurité des transports .,” 2005.
- [11] “L ’ Algérie et les perspectives de développement dans le secteur des transports et de la logistique.”
- [12] M. M. Slimane and M. B. Aimadedine, “LA PROBLEMATIQUE DU FINANCEMENT DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT Á LA LUMIERE DE LA CRISE FINANCIERE MONDIALE: CAS DE L’ALGERIE.”
- [13] “metroalger.” [Online]. Available: <http://www.metroalger-dz.com>. [Accessed: 07-Jun-2019].
- [14] L. E. S. Cahiers, “Tramways.”
- [15] SETRAM, “Tramway de Ouargla.” [Online]. Available: <https://www.setram.dz>. [Accessed: 11-Jun-2019].
- [16] “Caractéristiques tramway CITADIS bordeaux Rames,Rames 402 Rames.”

## Références

---

- [17] E. Morin, “Modélisation d ’ un réseau électrique de tramway : du composant au système,” Joseph Fourier, 2006.
- [18] D. Techniques, *ETUDE D ’ UN SYSTEME PLURITECHNIQUE TRAMWAY : ALIMENTATION PAR LE SOL*. 2007, pp. 1–16.
- [19] B. Wahiba, “La commande de tramway Cas de tramway de constantine,” Larbi Ben M’Hidi-Oum El Bouaghi, 2016.
- [20] G. Y. Mr FEDILA Farouk. Mr, “Contribution Au Dimensionnement D’une Chaîne De Traction D’un Tramway (Citadis 402),” A.MIRA-BEJAIA, 2018.
- [21] A. Transport, “Rame citadis et matériel roulant.” .
- [22] TNO Annual Report, “Solaroad: sustainable energy from a SMART Road Surface,” 2014.
- [23] X. Wang, Hao & Jasim, Abbas & Chen, “Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review,” *Appelied Energy*, vol. 212, pp. 1083–1094, 2018.
- [24] P. Sonal, “New solar roads unveiled,” *Power*, vol. 161, no. 2, 2017.
- [25] Colas, “Wattway.” .
- [26] T. Xplore, “China’s solar highway ambitions are seen in Jinan stretch.”
- [27] B. Settou, N. Settou, A. Gouareh, B. Negrou, C. Mokhtara, and D. Messaoudi, “GIS-Based Method for Future Prospect of Energy Supply in Algerian Road Transport Sector Using Solar Roads Technology,” vol. 162, pp. 221–230, 2019.
- [28] Southwark Council, “TNO ANNUAL REPORT,” 2014.
- [29] G. Rebha, “Elaboration d’un matériau de construction en vue de l’isolation thermique des batiments,” Kasdi Merbah ouargla, 2013.
- [30] Meteotest and Impressum, “Meteonorm Software.” 2016.
- [31] R. C. for R. E. and E. E. (RCREEE), “Appui technique/prestations de services pour l’évaluation de l’impact économique, technologique et environnemental de la réglementation nationale et des incitations relatives aux énergies renouvelables et à l’efficacité énergétique,” 2010.

## Résumé

Les transports constituent aujourd'hui la cause majeure du dérèglement climatique et l'un des premiers postes de consommation d'énergie fossile dans le monde et représentant 33% de l'énergie globale. Le contexte énergétique actuel qui connaît une crise profonde nécessite une remise en cause de nos modes de gestion et de consommation de l'énergie. Ceci implique de réinventer un système énergétique plus durable qui puisse proposer à tous un approvisionnement énergétique fiable, abordable et peu polluant. Nous modélisons l'ensemble des équipements énergétiques pour la production ou la consommation afin d'évaluer les bilans nécessaires à la conception de la solution choisie.

La production d'énergie d'origine solaire sur la surface globale de la route (environ 7 ha, cette surface a été déterminée grâce au tracé du tramway fourni par le logiciel Google Earth) dépasse les besoins énergétiques du tramway. Le surplus d'énergie est évalué à environ 14.12 GWh. Ce surplus annuel d'énergie nous permet de rapporter la somme de 3 M€. Le cout total de l'investissement pour notre installation est de 39 M\$ incluant le cout total des capteurs photovoltaïque qui est estimé à 26 M\$. La durée nécessaire à la récupération des investissements engagés est de 12 ans et 9 mois. L'énergie récupérée au-delà de cette période est estimée à 1 Million GWh et qui correspond à un gain net estimé à 249 M\$ sur la base du tarif standard international.

## الملخص.

اليوم ، يعتبر النقل السبب الرئيسي لتغير المناخ وأحد أبرز محطات استهلاك الوقود الأحفوري في العالم ، حيث يمثل 33 % من الطاقة العالمية. إن سياق الطاقة الحالي ، الذي يمر بأزمة عميقة ، يشكك في أساليبنا في إدارة واستهلاك الطاقة. وهذا يعني إعادة اختراع نظام طاقة أكثر استدامة يمكن أن يوفر للجميع إمدادات طاقة موثوقة وبأسعار معقولة ومنخفضة التلوث. نقوم بتصميم جميع معدات الطاقة للإنتاج أو الاستهلاك من أجل تقييم الميزانيات اللازمة لتصميم الحل المختار.

إنتاج الطاقة الشمسية على السطح العام للطريق ( حوالي 7 هكتار ، تم تحديد هذه المنطقة من خلال مسار الترام الذي يوفره برنامج Google Earth ) يتجاوز احتياجات الطاقة للترايم. يقدر الفائض الطاقة بحوالي 14.12 جيجا وات ساعة. هذا الفائض السنوي من الطاقة يسمح لنا بإعادة مبلغ 3 مليون يورو. تبلغ التكلفة الإجمالية للاستثمار التركيب لدينا 39 مليون دولار بما في ذلك التكلفة الإجمالية لهواة جمع الضوئية ، والتي تقدر بنحو 26 مليون دولار. المدة المطلوبة لاسترداد الاستثمارات المتکبدة هي 12 سنة و 9 أشهر. تقدر الطاقة المستردة بعد هذه الفترة ب 1 مليون جيجا وات ساعة وتنتوافق مع صافي ربح يقدر ب 294 \$ على أساس المعدل القياسي الدولي.

# Annexes

## Annexes

### Electrical Specifications

Model	VBHN240SA11
Rated Power (Pmax) <sup>1</sup>	240W
Maximum Power Voltage (Vpm)	43.7V
Maximum Power Current (Ip)	5.51A
Open Circuit Voltage (Voc)	52.4V
Short Circuit Current (Is)	5.85A
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.30%/°C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.126 V/°C
Temperature Coefficient (Is)	1.76 mA/°C
NOCT	118.9°F (48.3°C)
CEC PTS Rating	223.5W
Cell Efficiency	21.6%
Module Efficiency	19.0%
Watts per Ft. <sup>2</sup>	17.70W
Maximum System Voltage	600V
Series Fuse Rating	15A
Warranted Tolerance (-/+)	-0%/+10%

### Mechanical Specifications

Model	VBHN240SA11
Internal Bypass Diodes	3 Bypass Diodes
Module Area	13.56 Ft. <sup>2</sup> [1.26m <sup>2</sup> ]
Weight	33.1 Lbs. [15kg]
Dimensions LxWxH	62.2x31.4x1.4 in. [1580x798x35 mm]
Cable Length +Male/-Female	40.55/34.64 in. [1030/880 mm]
Cable Size / Type	No. 12 AWG / PV Cable
Connector Type <sup>3</sup>	Multi-Contact® Type IV (MC4™)
Static Wind / Snow Load	50 PSF (2400 Pa)
Pallet Dimensions LxWxH	63.2x32x65 in. [1607x815x1650 mm]
Quantity per Pallet / Pallet Weight	40 pcs./1388.7 Lbs. (630 kg)
Quantity per 40' Container	560 pcs.
Quantity per 20' Container	280 pcs.