

UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mémoire de Master

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique

SUJET :

Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira

Préparé par :

Alimatou DIALLO

Sous la direction du Professeur Diouma KOBOR

Soutenu publiquement le : 13/08/2024, devant le jury composé de :

Nom et Prénom (s)	Grade	Qualité	Etablissement
THIAME Moustapha	Professeur Assimilé	Président Jury	UASZ
FAYE Issa	Assistant	Rapporteur	UASZ
MBAYE Mamadou Lamine	Professeur Assimilé	Examineur	UASZ
DIEDHIOU Ansoumane	Maître - Assistant	Examineur	UASZ
KOBOR Diouma	Professeur Titulaire	Directeur	UASZ

Année Universitaire 2022/2023

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d’abord ALLAH ‘le Tout Puissant le Tout Miséricordieux’ de m’avoir donné la foi, la santé et la détermination d’entamer et de terminer ce mémoire.

Je remercie tout particulièrement **Professeur Diouma KOBOR**, mon directeur de mémoire. Merci pour votre aide et votre compréhension dans les moments décisifs. Vos qualités humaines et scientifiques m’ont permis de mener ces travaux dans de bonnes conditions.

Je tiens également à remercier tous les membres du jury pour l’intérêt qu’ils ont porté à notre recherche en acceptant d’examiner notre travail et de l’enrichir par leurs propositions en commençant par M. **Moustapha THIAME** d’avoir accepté de présider ma soutenance. Je remercie également M. **Issa FAYE** pour avoir accepté d’examiner nos travaux en tant que rapporteur et M. **Mamadou Lamine MBAYE** et M. **Ansoumane DIEDHIOU** d’avoir accepté de faire partie du jury en tant qu’examineur.

Je tiens également à remercier le Professeur **Lat Grand NDIAYE**, Responsable et Coordonnateur du Master Interuniversitaire en Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique de l’université Assane Seck de Ziguinchor, pour son soutien inestimable et son engagement exceptionnel tout au long de nos années. Je tiens également à remercier **UNESCO-TWAS-SIDA** pour leur soutien financier.

Je voudrais remercier M. **Aliou Badji** qui a lui aussi contribué à la réussite de ce travail grâce à sa disponibilité, à son savoir-faire et à son soutien apporté. Je tiens également à remercier l’ensemble des chercheurs, doctorants et techniciens du LCPM. Je ne saurai oublier tous mes amis et mes camarades de promotion qui de près ou de loin ont toujours été là pour me conseiller.

Je voudrais remercier mes Co-locatrices, **Marième Aissatou Ndiaye Diop** et **Aissata Hanne** pour tous les conseils et les bons moments passés ensemble durant ces 6 années.

Un remerciement particulier va à ma famille qui m’a soutenu tout au long de cette épreuve, malgré la distance qui nous sépare. En commençant par ma mère **Salimata DIALLO**, mon père **Souleymane**, à mes frères et sœurs je les remercie pour leur soutien et leurs encouragements durant tout mon parcours universitaire.

Enfin, je remercie tous ceux qui nous ont apporté leur soutien moral, matériel ou financier pour la réalisation de ce modeste travail.

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
TABLES DES MATIERES	ii
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
RESUME	viii
Abstract	ix
INTRODUCTION GENERALE	2
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES TRANSPORTS FERROVIAIRES	
INTRODUCTION	5
I. LE TRANSPORT FERROVIAIRE	5
I.1. LES TYPES DE TRAIN	6
I.1.1 LES TYPES DE TRAIN SELON LE TRAJET	6
I.1.1.1 Les trains à grande vitesse : TGV	6
I.1.1.2 Les trains pour le transport régional : RER (réseau express régional) et TER (transport express régional)	7
I.1.1.3 Les trains pour le transport de marchandises : fret	9
I.1.2 LES TYPES DE TRAIN SELON L'ALIMENTATION	10
I.1.2.1 Train électrique en 1500 V DC	10
I.1.2.2 Train diesel-électrique	11
I.1.2.3 Train Bimode	12
I.1.2.4 Train Bicourant	12
I.2 Les trains électriques	13

I.2.1	Mode de fonctionnement	13
I.2.2	Fourniture énergétique des trains électriques	14
I.2.3	Le train électrique dans sa version la plus simple	17
I.2.4	Version améliorée des trains électriques	17
I.3	Avantages et Inconvénients des systèmes d’électrification ferroviaire existants:.....	18
I.4	Systèmes de stockage d’énergie	21
	CONCLUSION	22
	CHAPITRE II : Nouveau concept d’un Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire appliqué au transport ferroviaire	23
	INTRODUCTION	24
II	DESCRIPTION DES DIFFERENTES INSTALLATIONS DE LA CPCL ..	24
II.1	Description du Champ photovoltaïque.....	26
II.2	Description technique des onduleurs et transformateurs	29
II.3	Descriptif du réseau de câblage	30
II.3.1	Des modules aux boîtes de jonction.....	31
II.3.2	Des boîtes de jonction au complexe onduleurs-transformateurs	31
II.4	Système de Surveillance et télécommunication.....	31
II.5	Méthodologie d’exécution des travaux	31
II.5.1	Installations fixes de chantier	31
II.5.2	Exécution physique des travaux	32
II.5.3	Installation du conteneur de stockage et de la structure de livraison.....	32
II.5.4	Maintenance et Entretien.....	33
	CONCLUSION	34
	CHAPITRE III : Etude technique et financière du nouveau concept CPCL appliqué à	

la ligne Dakar-Kidira	35
INTRODUCTION.....	36
III Contexte énergétique et environnemental.....	36
III.1 Principe de dimensionnement d’une centrale photovoltaïque.....	36
III.1.1 La puissance crête du champ PV	37
III.1.2 Détermination du nombre de panneaux en série et en parallèle	37
III.1.3 Choix de l’onduleur	38
III.1.4 Choix du stockage.....	38
III.1.5 Choix de la section des câbles	39
III.2 Dimensionnement manuel du concept CPCL et simulation avec le logiciel PV_{SYST}.....	39
III.2.1 Dimensionnement manuel du concept solaire photovoltaïque linéaire	39
III.2.2 Simulation avec le logiciel PV_{SYST}	44
III.3 La faisabilité financière du projet.....	49
III.3.1 Présentation du logiciel RETScreen Expert.....	49
III.3.2 Les mesures financières.....	49
 III.3.2.1 Temps de Retour (TR) et Temps de Retour Actualisé (TRA).....	50
 III.3.2.2 Valeur Actuelle Nette (VAN).....	50
 III.3.2.3 Taux de Rentabilité Interne (TRI).....	50
 III.3.2.4 Coût du Cycle de Vie (CCV)	51
III.3.3 Étude financière du nouveau concept de la centrale photovoltaïque curviligne et linéaire.....	51
III.4 Analyse Emission GES et Risque du projet	52
III.4.1 Analyse Emission GES du projet	52
III.4.2 Risque du projet.....	53

9

**Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le
domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira**

CONCLUSION	54
CONCLUSION GENERALE	55
REFERENCES	57
ANNEXES	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Train à Grande Vitesse	7
Figure 2: Réseau Express Régional (RER)	8
Figure 3: Train Express Régional (TER)	9
Figure 4: Transport de marchandise le FRET	10
Figure 5: Architecture d'un train électrique en 1500V DC	10
Figure 6: Architecture d'un train diesel-électrique	11
Figure 7: Architecture d'un train Bimode	12
Figure 8: Architecture d'un train bicourant	13
Figure 9: Alimentation électrique d'un train	15
Figure 10: Schéma d'un pantographe moderne	18
Figure 11 : schéma conceptuel du nouveau concept CPCL	25
Figure 12 : schéma conceptuel du nouveau concept CPCL	25
Figure 13: Bloc de panneaux solaires photovoltaïques	27
Figure 14: pylône	29
Figure 15: onduleur	30
Figure 16: Carte du réseau ferroviaire du Sénégal	45
Figure 17: Irradiation horizontale globale	46
Figure 18: Température ambiante en degré C	47
Figure 19: configuration du concept CPCL	48
Figure 20: missions de gaz à effets de serres	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Bilan comparatif des systèmes d'électrifications existant	18
Tableau 2: Classification des méthodes de stockage d'énergie	21
Tableau 3: Energie et puissance caractéristique par cellule des batteries et super- condensateurs.....	22
Tableau 4: Caractéristiques d'un panneau 550 Wc	28
Tableau 5: Caractéristiques du pylône	29
Tableau 6: caractéristiques du conteneur de stockage	32
Tableau 7: dimensionnement avec Excel du concept CPCL	39
Tableau 8: dimensionnement des différents composants du concept CPCL	42
Tableau 9 : Comparaison du nouveau concept CPCL avec une centrale classique	43
Tableau 10: données de l'irradiation globale horizontale, de la température ambiante et du rapport de performance	46
Tableau 11 : facteurs de pertes.....	49
Tableau 12: rentabilité du projet	51
Tableau 13: Equivalences de gaz à effet de serres	53
Tableau 14 : Risque du projet	54

RESUME

Actuellement, dans le monde industriel la traction existe sous différentes formes que sont: thermique, hybride et électrique. Elles sont appliquées dans plusieurs cas (voiture, bus, train, tramway, etc.). Ces applications sous la première et la deuxième forme sont responsables d'une pollution inquiétante et dangereuse pour la santé des personnes grâce à leur forte émission de gaz à effet de serre. En effet, au Sénégal, le secteur de l'énergie génère plus de deux tiers d'émissions de gaz à effet de serre, lesquelles contribuent aux changements climatiques qui inquiètent l'humanité. L'État Sénégalais vise à encourager une croissance économique ayant un impact important sur le développement humain. Ainsi le trafic au Sénégal est assuré pour la plupart par des trains diesel et seule la ligne du TER est électrifiée. Cependant, le système ferroviaire a la réputation d'être performant, comparé aux autres modes de transport.

Partant de ce constat, l'objectif de ce mémoire est de proposer un concept de Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) appliqué au système ferroviaire. Les logiciels tels que PV_{sys} et RETScreen ont permis d'obtenir les résultats qui suivent. La centrale CPCL de 25 MW par sous-station requiert 45 450 panneaux solaires installés sur deux rangées de part et d'autre le long de la voie ferrée. Ainsi, un total de 116 172 m² soit 11,6 ha d'espace est nécessaire pour le transport et la génération d'électricité renouvelable avec un rendement Photovoltaïque surfacique de 2,15 comparé à la surface d'une centrale classique qui est d'environ 63 ha pour 25 MWc soit un rendement photovoltaïque surfacique de 0,39. Le coût d'investissement de 9 106 234 608 FCFA offre une économie et des revenus annuels de 3 465 000 000 FCFA par sous-station, une énergie produite qui est égale à 137,5 MWh par jour (soit 3025 MWh/j pour les 22 centrales) et le TRI avant impôts-capitaux propres est de 72,1 %.

Mots clés : champ solaire curviligne et linéaire, photovoltaïque, autonomisation des trains électriques

Abstract

Currently, in the industrial world, traction exists in different forms: thermal, hybrid and electric. They are applied in several cases (car, bus, train, tram, etc.). These applications in the first and second form are responsible for worrying and dangerous pollution for people's health thanks to their high greenhouse gas emissions. Indeed, in Senegal, the energy sector generates more than two thirds of greenhouse gas emissions, which contribute to climate change that worries humanity. The Senegalese State aims to encourage economic growth that has a significant impact on human development. Thus, traffic in Senegal is provided for the most part by diesel trains and only the TER line is electrified. However, the railway system has a reputation for being efficient, compared to other modes of transport.

Based on this observation, the objective of this thesis is to propose a concept of Curvilinear and Linear Photovoltaic Field (CPCL) applied to the railway system. Software such as PVSyst and RETScreen have enabled the following results to be obtained. The 25 MW CPCL plant per substation requires 45,450 solar panels installed in two rows on either side along the railway line. Thus, a total of 116,172 m² or 11.6 ha of space is required for the transmission and generation of renewable electricity with a surface photovoltaic efficiency of 2.15 compared to the surface area of a conventional plant which is approximately 63 ha for 25 MWc or a surface photovoltaic efficiency of 0.39. The investment cost of 9,106,234,608 FCFA offers an annual saving and income of 3,465,000,000 FCFA per substation, an energy produced which is equal to 137.5 MWh per day (i.e. 3025 MWh/d for the 22 power plants) and the IRR before taxes-equity is 72.1%.

Keywords: curvilinear and linear solar field, photovoltaic, autonomy of electric trains

INTRODUCTION GENERALE

Du point de vue mondiale, la consommation énergétique est d'environ 0,8 MJ/p-km soit 0,22 kWh/p-km pour un projet de train à grande vitesse en Californie [1] et la consommation d'un train à l'usage par kilomètre est de 19 kWh/km pour le TGV français et 22 kWh/km pour l'ICE (train à grande vitesse allemand) [2]. Mais ces différentes énergies consommées proviennent de ressources non renouvelables à l'échelle humaine et contribuent en partie aux émissions de gaz à effet de serre. Traiter ces problèmes sous l'angle énergétique et environnemental implique une vue transversale du système ferroviaire tout en accompagnant la transition énergétique en intégrant plus facilement des sources d'énergies renouvelables et des éléments de stockage d'énergie.

Le réseau du chemin de fer du Sénégal, d'une longueur totale de 1086 km dont 934 km de voies principales et 152 km de voies secondaires, est composé de deux axes principaux : l'axe Ouest-Est, long de 645 km qui va de Dakar à Kidira en passant par Thiès et Tambacounda. Cet axe se prolonge au Mali, jusqu'à Bamako puis Koulikoro. Et l'axe Ouest-Nord qui a une longueur de 193 km, parcourt le long du trajet Dakar-Saint-Louis en passant également par Thiès. Ces dernières années, le système ferroviaire du Sénégal a fait de nombreux progrès grâce à l'introduction du Train Express Régional (TER) [3].

Dans ce contexte, le Sénégal envisage de réduire conditionnellement ses émissions de gaz à effet de serre (GES) d'au moins 23 % d'ici 2030, selon sa Contributions Déterminée au niveau National (CDN). Dans le cadre de l'Accord de Paris deux objectifs clés sont établis pour la transition énergétique : atteindre 40 % d'énergies renouvelables dans le mix énergétique national d'ici 2030 en augmentant la capacité de production d'énergie renouvelable [4].

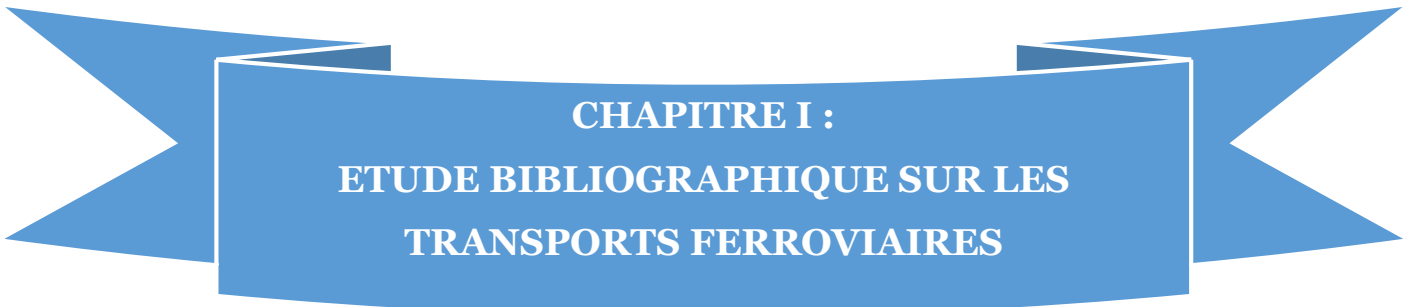
Cependant, le transport ferroviaire électrique doit jouer un rôle clé dans le déplacement des personnes. Ce système doit accompagner la transition énergétique du Sénégal en s'interfaçant facilement avec le développement des énergies renouvelables, particulièrement le solaire PV, pour réduire la facture énergétique de ces infrastructures et les rendre plus économique. En effet, les émissions par passager au kilomètre sont de loin les plus faibles par rapport aux autres moyens de transport, le problème principal est le coût de production du kWh qui rend ce moyen de transport de masse non rentable au Sénégal. Par exemple, pour une distance de 661 km à vol d'oiseau, l'application permettant de mesurer l'empreinte carbone (exemple: ImpactCO2.fr) indique les résultats suivants (en équivalent CO₂) : 1,1 kg en train, 13,1 kg en voiture électrique, 23,3 kg en autocar, 111 kg à moto, 127,6 kg en voiture thermique, 152 kg en avion [5]. Au même moment,

le TER qui relie Dakar à Diamniadio est un réel bourbier économique pour l'Etat du Sénégal qui est obligé de payer chaque mois une somme d'environ de 35 Milliards au concessionnaire afin de pallier aux pertes enregistrées [6]. Ainsi, pour améliorer ses performances énergétiques et économiques, les nouvelles lignes et les autres ajustements du réseau ferroviaire national et international devront améliorer leur efficacité énergétique. Ainsi le principal défi est comment effectuer une transition énergétique douce, durable et rentable pour ce mode de transport en Afrique et particulièrement au Sénégal, en utilisant les énergies renouvelables, spécifiquement le solaire PV.

L'objectif général de ce mémoire est de faire l'étude d'un nouveau concept nommé Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) qui sera appliqué au transport ferroviaire Dakar-Kidira. Ce mémoire se compose de trois chapitres. Sur le plan spécifique, les objectifs sont :

- Etudier la fourniture énergétique des trains électriques et de leur mode de fonctionnement ;
- Faire une étude comparative des systèmes d'électrification ;
- Fournir une conception énergétique optimale des lignes ferroviaires et
- Estimer les coûts nécessaires à cette autonomisation énergétique.

Tout d'abord, le premier chapitre propose une revue bibliographique sur le système ferroviaire, de leur apport énergétique et un bilan comparatif des différents types d'alimentation existants. Ensuite dans le chapitre II, nous présentons le nouveau concept CPCL et enfin dans le chapitre III, nous avons fait une étude technique et financière du nouveau concept.



**CHAPITRE I :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES
TRANSPORTS FERROVIAIRES**

INTRODUCTION

Aujourd'hui, il existe divers modes de transport qui peuvent être routiers, maritimes, aériens, fluviaux, ferroviaires, etc. Ils jouent un rôle indispensable dans notre mode de vie. Cependant, à l'échelle mondiale, le transport routier est le mode le plus répandu, en grande partie grâce à un vaste réseau de routes nationales et internationales qui se connectent [7]. Mais, ces moyens de transport ont des effets négatifs considérables, notamment l'émission de gaz à effet de serre nuisibles à l'environnement et à la santé, des encombrements routiers, des accidents, la cherté des billets d'avion etc. Dans l'optique de diminuer les effets sur le changement climatique et pour trouver des moyens de transport plus propres, plus rentables et plus économiques, afin de répondre aux besoins des personnes et à la hausse continue de la demande énergétique, il est important de se tourner vers le système de traction ferroviaire. C'est un moyen de transport fiable et tout à fait écologique en raison d'une faible émission de CO₂ [8]. Dans ce chapitre nous allons faire un petit rappel bibliographique sur le transport ferroviaire.

I. LE TRANSPORT FERROVIAIRE

Lorsque l'on parle de transport international on évoque souvent le transport routier et maritime. Or le système ferroviaire permet un transport à la fois économique, efficace et écologique en toute sécurité sur de longue distance. Cependant, l'essor du transport maritime, la révolution des containers et le tout-routier ont lentement supprimé le rail dans certaines régions, et surtout en Afrique et plus particulièrement au Sénégal. Mais, depuis quelques années le ferroviaire reprend sa place dans le monde du transport au niveau mondial. En effet, d'anciennes voies ferrées sont réouvertes, plusieurs progrès et innovations techniques ont été réalisés. C'est l'exemple du regain de la fameuse Route de la soie et son réseau de lignes ferroviaires pour des échanges Europe-Asie Centrale-Russie-Chine facilités. Le chemin de fer le plus long relie l'Europe et la chine directement, soit plus de 10 000 km par rail. En 2016, l'opérateur en charge du trajet Wuhan-Lyon en 18 jours à estimer que le fret est 80 % moins cher que par avion [9].

Cependant, en Afrique on assiste toujours à un retard du système ferroviaire qui persiste à l'échelle du continent. Mais, ces dernières années, les investissements dans les projets ferroviaires ont conduits à une multiplication des constructions d'infrastructures de transport. Aujourd'hui, en Afrique le réseau ferroviaire total est évalué à environ 75 000 km sur une superficie de 30,2 millions de km², ce qui représente une densité d'environ 2,5 km pour 1 000 km², cela est nettement inférieur

à la densité observée dans d'autres continents et régions, ainsi qu'à la moyenne mondiale qui est de 23 km pour 1 000 km² [10].

Il existe plusieurs types de traction ferroviaire qui peuvent être distingués selon le trajet et selon l'alimentation. La section suivante présente les différents types de trains.

I.1. LES TYPES DE TRAIN

I.1.1 LES TYPES DE TRAIN SELON LE TRAJET

En fonction du trajet, nous pouvons identifier plusieurs types de trains. Pour chaque type il y a une alimentation spécifique.

I.1.1.1 Les trains à grande vitesse : TGV

C'est un type de train qui peut parcourir au moins 200 km par heure et peut rouler jusqu'à 540 km par heure (figure 1). Plusieurs pays disposent des réseaux ferroviaires à grande vitesse principalement en Asie, en Europe, en Afrique (Maroc), etc. La ligne Shinkansen japonaise de 515 km fut le premier train à grande vitesse [11]. En Afrique, seul le Maroc dispose d'un TGV depuis 2018. Elle relie Tanger à Casablanca avec une distance d'à peu près de deux heures. En 2022, 4,16 millions de personnes ont utilisé le TGV nommé Al Boraq contre 3 millions en 2019, l'établissement public vise 5 millions de voyageurs à la fin de 2023 [12].

Ce type de transport présente plusieurs avantages:

- ✓ Plus rapide plus confortable et plus vert ;
- ✓ Favorise le développement économique et la prospérité ;
- ✓ Diminue les émissions de GES et réduit les nuisances des aéroports ;
- ✓ Relie les régions ;
- ✓ Soulage les aéroports ;
- ✓ Des routes moins encombrées.

Mais aussi il présente plusieurs inconvénients:

- Consommation d'espace ;
- Contraintes d'implantations ;
- Perturbation des trafics routiers et ferroviaires ;
- Utilisation d'explosifs dans les secteurs rocheux.

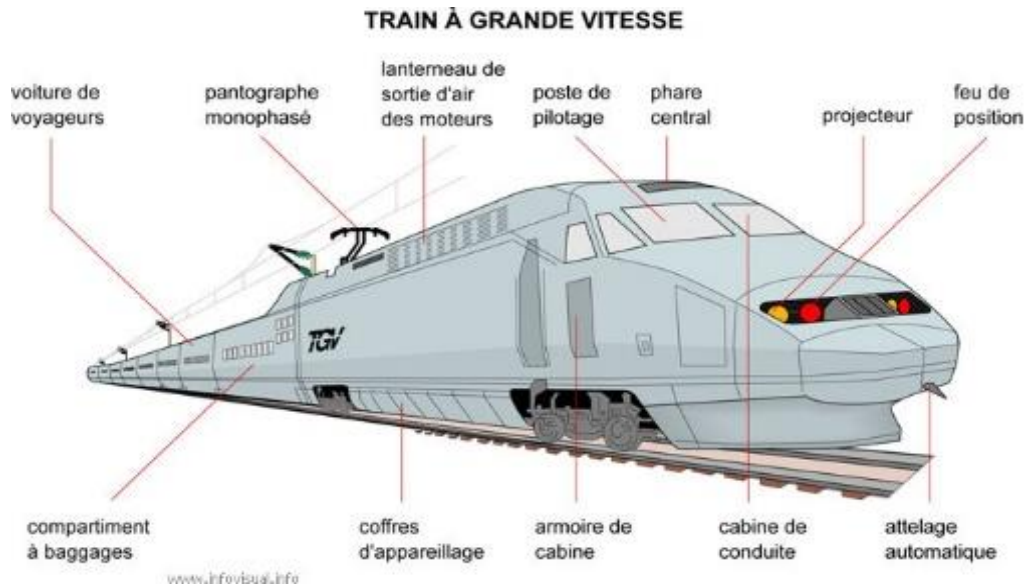


Figure 1: Train à Grande Vitesse [13]

I.1.1.2 Les trains pour le transport régional : RER (réseau express régional) et TER (transport express régional)

a) Le Réseau Express Régional (RER)

Le réseau express régional (RER) est un système de transport ferroviaire qui dessert une zone fortement urbanisée (figure 2). Il est constitué de lignes de train de banlieue reliées par des segments. Des RER peuvent être trouvés un peu partout dans le monde, notamment en Ile-de-France, à Bruxelles, en Allemagne, en Autriche, en Suisse, au Maroc (surnommé Al Bidaoui) et à Dakar (train express régional) [14].... Tout comme le TGV, ce mode de transport présente des atouts et des inconvénients.

Nous pouvons citer plusieurs avantages que sont:

- ✓ Améliorer les échanges entre les banlieues ;
- ✓ Soulager les routes aux heures de pointes ;
- ✓ Etablir une liaison rapide.

De même que pour les inconvénients nous pouvons citer:

- Horaire cadencé ;
- Difficulté à desservir en heure de pointe.



Figure 2: Réseau Express Régional (RER) [15]

b) Le Train Express Régional (TER)

Le train express régional (TER) regroupe les lignes régionales à travers un pays. Ceux sont des trains à vitesse classique permettant un maillage territorial plus important que le réseau à grande vitesse (figure 3). Ce type de transport peut rouler jusqu'à 160 km par heure [16].

Comme le RER, le TER présente aussi des avantages qui sont:

- ✓ Valorisation foncière autour de la ligne ;
- ✓ L'accompagnement de la croissance démographique de l'agglomération des villes ;
- ✓ L'augmentation du transport de marchandises ;
- ✓ La diminution de l'engorgement routier, tant en termes de circulation qu'en stationnement.

Et des inconvénients tels que:

- Indemnisation des maisons environnant la ligne ;
- Consommation d'espace ;
- Contraintes d'implantations ;
- Perturbation des trafics routiers et ferroviaires.



Figure 3: Train Express Régional (TER) [17]

D'après l'auteur Marie Pauline, pour le TGV, l'unique source d'alimentation est le 25 kV AC. En revanche, pour les TER et le fret, différentes options d'alimentation sont disponibles (1 500 VDC, 25 kV AC, diesel), et certains trains peuvent utiliser plusieurs de ces sources. [18]

I.1.1.3 Les trains pour le transport de marchandises : fret

Ce type de transport consiste à utiliser un réseau de chemin de fer et des trains pour transporter des marchandises (figure 4). C'est un système de transport guidé constitué d'infrastructures spécifiques, de matériel roulant et de méthodes d'exploitations qui nécessite souvent une intervention humaine.

Parmi ces avantages, nous pouvons citer:

- Pour les articles volumineux et lourds sur de longues distances ;
- Moins bruyant, moins polluant et moins dangereux ;
- La solution la plus rentable.

Mais aussi nous avons comme inconvénients:

- ✓ Peu de souplesse d'exploitation ;
- ✓ Les ruptures de charges souvent nécessaires ;
- ✓ Limité au réseau ferroviaire ;
- ✓ Horaire défini par l'exploitant du chemin de fer.



Figure 4: Transport de marchandise le FRET [19]

I.1.2 LES TYPES DE TRAIN SELON L'ALIMENTATION

Selon l'alimentation nous pouvons distinguer plusieurs types de tractions.

I.1.2.1 Train électrique en 1500 V DC

Dans les années 1920, le 1500 V DC a été choisi pour les lignes électriques ferroviaires. Pourquoi le courant continu 1500V ? En effet, à l'époque les moteurs alternatifs présentaient un faible couple à faible vitesse or c'est à faible vitesse qu'un train a besoin de couple pour rouler de manière efficace. Sans compter, les redresseurs qui étaient des cuves à mercure ou des groupes tournant, le tout difficilement embarquable. Il était opportun d'utiliser du courant continu et se limiter à une tension caténaire directement utilisable par les moteurs [20]. D'ailleurs, l'auteur Marie PAULINE explique dans sa thèse que dans le cas du 1500 V, le moteur reçoit son alimentation d'un réseau électrique qui est connecté au moyen d'un pantographe. L'énergie reçue est traitée à travers un système de conversion comprenant un hacheur rhéostatique et d'un onduleur. Ensuite, le moteur utilise la puissance fournie à la sortie de cette chaîne de conversion, puis la transmet aux roues via un réducteur. La figure 5 ci-après illustre l'architecture du modèle électrique 1500 V DC.

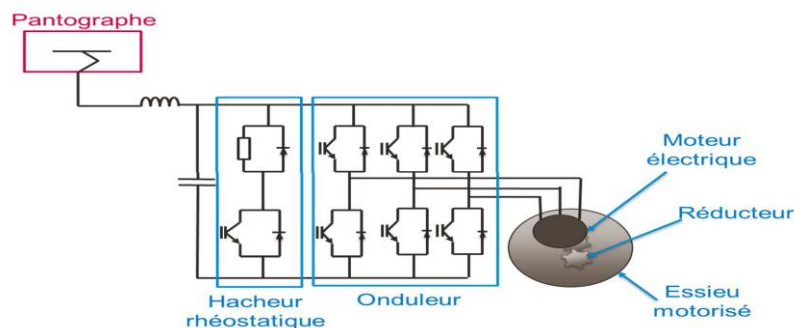


Figure 5: Architecture d'un train électrique en 1500V DC [21]

L'équation de la puissance du train liée à ce circuit électrique est donnée par la relation suivante :

$$P_{train}(k) = P_{cat}(k) + P_{ESS}(k) + P_{rheostat}(k) \quad (eq.1)$$

$P_{train}(k)$ la puissance du train au pas de temps d'indice k

$P_{cat}(k)$ la puissance fournie ou reçue par la caténaire au pas de temps k

$P_{ESS}(k)$ la puissance du système de stockage embarqué dans le train au pas de temps k

$P_{rheostat}(k)$ la puissance distribuée dans le rhéostat du train au pas de temps k

k indice du pas de temps de discrétisation temporelle

I.1.2.2 Train diesel-électrique

Dans ce type de train le moteur diésel entraîne une génératrice électrique dont le courant alimente les moteurs électriques qui animent les roues. C'est une locomotive électrique dans laquelle la centrale a été embarquée. Les moteurs de traction étant alimentés en courant continu, il est nécessaire d'utiliser un bloc redresseur lorsque le générateur est un alternateur [22]. La figure 6 montre l'architecture d'un train de type diesel-électrique.

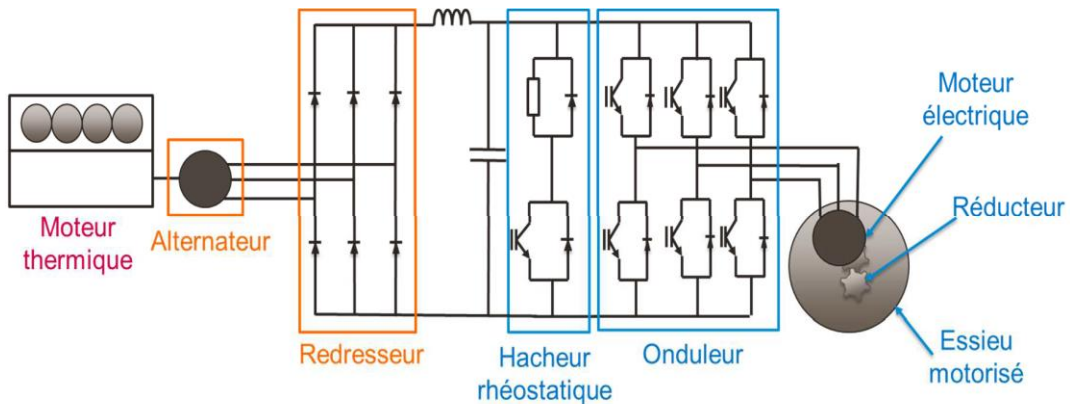


Figure 6: Architecture d'un train diesel-électrique [21]

L'équation de la consommation du groupe diesel liée à ce circuit diesel-électrique est donnée par la relation suivante :

$$f_c(P_{genom}, P_{ge}(k), C_{sn}) = C_{sn} \times \left[-5,58x \left(\frac{P_{ge}(k)^5}{P_{ge,nom}^5} \right) + 19,7x \left(\frac{P_{ge}(k)^4}{P_{ge,nom}^4} \right) - 27,22x \left(\frac{P_{ge}(k)^3}{P_{ge,nom}^3} \right) + 18,57x \left(\frac{P_{ge}(k)^2}{P_{ge,nom}^2} \right) - 6,44x \left(\frac{P_{ge}(k)^1}{P_{ge,nom}^1} \right) + 1,94 \right] x \left(\frac{P_{ge}(k)}{1000 \times 3600} \right) \quad (eq.2)$$

Avec :

C_{sn} (en g/kWh) est la consommation nominale

$P_g(k)$ (en W) est la puissance qui est générée par le groupe diesel au pas de temps d'indice k

$P_{ge,nom}$ (en W) est la puissance nominale du groupe diesel

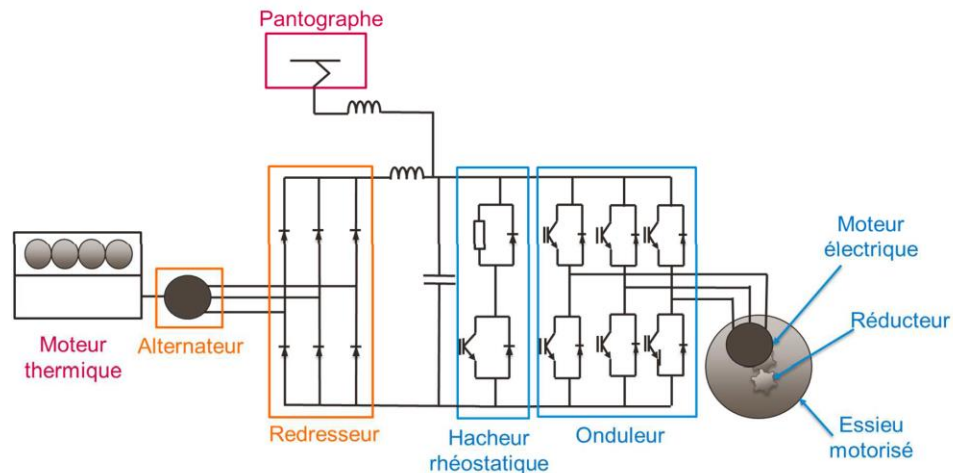
$f_c(P_{genom}, P_{ge}(k), C_{sn})$ représente la consommation du groupe diesel au pas de temps d'indice k

k est l'indice du pas de discrétisation temporelle

I.1.2.3 Train Bimode

Pour les trains Bimodes, la génération d'énergie peut être produite par deux sources différentes que sont: la source d'alimentation électrique et la source thermique. Ici le pantographe est relié au bus continu (1500 V) du système de traction diesel, qui transmet la puissance au moteur électrique via une chaîne de conversion [23]. La figure 7 montre la conversion énergétique d'un train Bimode.

Figure 7: Architecture d'un train Bimode [21]



I.1.2.4 Train Bicourant

Ce sont des trains qui peuvent circuler sur du 1500 V DC et sur du 25 kV AC. Ces locomotives possèdent:

- D'une part, un équipement complet à courant continu ;
- D'autre part, un ensemble transformateur redresseur à tension réglable par gradateur haute tension.

Ces locomotives sont équipées de deux pantographes spécialisés à commande pneumatique, l'un bi-palette destiné à capter le courant continu et l'autre uni-palette qui est destiné à capter le courant monophasé [24]. La figure 8 montre le schéma de conversion :

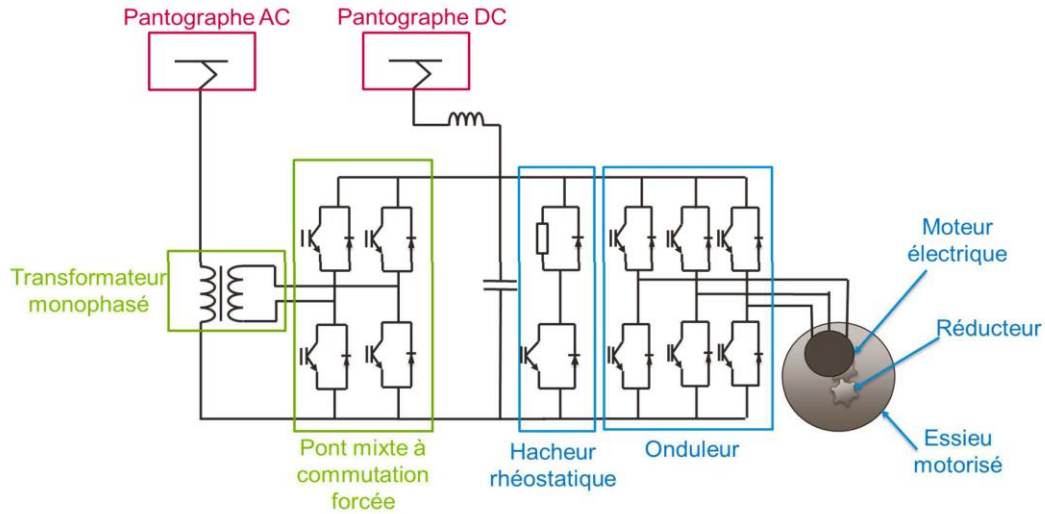


Figure 8: Architecture d'un train bicourant [21]

I.2 Les trains électriques

Dans l’optique de diminuer les effets du changement climatique, le système ferroviaire ne peut se tenir à l’écart de s’inscrire dans la neutralité carbone des économies nationales. Cela requiert un effort important de l’ensemble des transports en commun, en particulier du secteur ferroviaire.

Ainsi dès le début du 20^{ème} siècle, plusieurs systèmes d’électrification ferroviaire utilisant le courant continu et le courant alternatif ont été mis en place en Europe affirme Mr Andrea VERDICCHIO [25]. Il explique, dans sa thèse intitulée « la nouvelle électrification en courant continu à moyenne tension pour les réseaux ferroviaires », la manière dont le courant est capté par les trains électriques.

I.2.1 Mode de fonctionnement

Le système de traction électrique ferroviaire comprend des infrastructures fixes (sous-stations, caténaires, rails) ainsi que du matériel roulant (train de fret ou de voyageurs tiré par une locomotive). Sous-stations: dans sa thèse Mr Andrea VERDICCHIO, nous explique le concept des sous-stations; elles ressemblent à de gros transformateurs, les sous-stations sont installées au bord des voies. Elles constituent des Postes de transformation charger de réduire la tension électrique et de distribuer l’électricité au réseau ferroviaire. Les distances entre sous-station peuvent aller de 30 km à 90 km et même, voire plus, en fonction du trafic sur la ligne. La ligne aérienne peut être simplifiée à la caténaire (fil de contact plus un porteur principal) avec une section d’environ 200 mm². Pour les lignes les plus fréquentées, un feeder est ajouté. Le potentiel du rail est mise à la terre [25]. Les composants de la sous-station électrique sont : batteries, Barres de bus, Banque de

condensateurs, Disjoncteurs, Transformateurs de courant, Transformateurs d'instruments, Isolants, Isolateurs dans la sous-station, Paratonnerre, Transformateurs de puissance, Poste de départ, Transformateur de tension, Vague-Trappeur [26].

La caténaire est un ensemble de câbles qui fournit l'alimentation électrique aux trains. Elle se compose de câbles porteurs en bronze ou en aluminium et de câbles conducteurs en cuivre. En général, elle est installée à une hauteur moyenne de 5.20 mètres, pouvant descendre à 4.31 mètres sous les ponts et dans les tunnels, et atteindre 6.20 mètres aux passages à niveau [27].

Pour faire fonctionner une locomotive électrique il faut:

- Un système propulseur électrique
- Un système de variation de la vitesse
- Un système de production et de transport de l'énergie électrique.

Dans les trains électriques, l'énergie des lignes aériennes se dirige finalement vers le câble de mise à la terre de la voie après avoir circulé dans les roues. La conversion de l'énergie en courant triphasé, le freinage par régénération et les lignes aériennes en zig-zig confèrent à la technologie des trains électriques un caractère unique [28].

I.2.2 Fourniture énergétique des trains électriques

De nombreuses études, tant théoriques que pratiques, ainsi que des expériences coûteuses, ont été réalisées, et la plus part ont donné lieu à diverses applications [29]. Les locomotives électriques obtiennent leur énergie de l'extérieur sous forme de courant électrique. Elles offrent plusieurs atouts, comme un coût d'entretien inférieur à celui des locomotives diesel, une accélération significative et un freinage régénérateur. L'auteur M. TRUFFAT affirme aussi que l'électrification des tronçons situés dans les villes et des gares terminus peut bénéficier de l'augmentation de la valeur des propriétés situées à proximité des gares électrifiées [29]. Ils sont très appréciés pour le transport de passagers dans les zones à forte densité de population. Et ils sont régulièrement utilisés pour les trains à grande vitesse tel que le TGV, Thalys, Eurostar ICE car les moteurs à forte puissance massique nécessaires peuvent être facilement embarqué à l'intérieur du train [30]. En effet, le système électrique ferroviaire se compose de divers conducteurs métalliques. Gabriel papaiz Gabrini [31] nous révèle que cet ensemble de conducteurs est intégré dans un environnement complexe comprenant plusieurs autres éléments.

Ainsi, au début du 20^{ème} siècle, divers systèmes d'électrification ferroviaire utilisant le courant continu et le courant alternatif ont été mis en place en Europe affirme Mr Andrea VERDICCHIO

[32]. Il explique, dans sa thèse intitulée la nouvelle électrification en courant continu à moyenne tension pour les réseaux ferroviaires, le processus de captage du courant des trains électriques. En effet, la distribution de l'électricité s'effectue généralement via une ligne de contact aérienne, à caténaire suspendue. Le pantographe monté sur la locomotive frotte continuellement sur les fils, permettant ainsi le captage du courant avec retour par les rails. Pour réduire les pertes en ligne, la tension à la caténaire doit être maintenue à la valeur maximale possible. La figure 9 donne la structure d'une alimentation électrique d'un train.

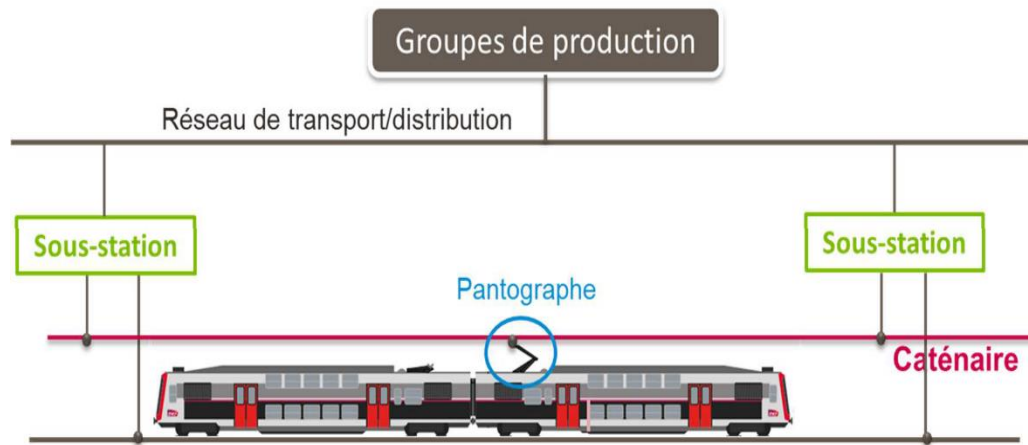


Figure 9: Alimentation électrique d'un train [23]

La chaîne de traction vise à transformer l'énergie électrique recueillie par le pantographe en énergie mécanique appliquée aux roues. L'équation 1 donne la relation entre la puissance électrique et la puissance motrice par l'expression suivante :

$$P_p = P_a + P_e + P_m \text{ (eq.3)}$$

Avec :

P_p : la puissance active électrique échangée au pantographe

P_m : la puissance mécanique de traction

P_a : la puissance des auxiliaires (climatisation, chauffage, éclairage, prises de recharge pour les passagers etc.)

P_e : la puissance dissipée dans la chaîne de traction

Par définition :

$$P_p = U_p \times I_p \times \cos(\varphi) \text{ (eq.4)}$$

$$P_m = F_m \times V \text{ (eq.5)}$$

$$P_e = P_F + (D_u \times I_p) + (R_x \times I_p^2) + (K_{m1} \times V) + (K_{m2} \times V^2) \text{ (eq.6)}$$

Avec :

U_p et I_p la tension et le courant efficace du pantographe, (φ) le déphasage associé ;

F_m est l'effort moteur total fourni par les motrices, V est la norme de la vitesse du train;

P_F, K_{m1}, K_{m2} : constantes représentant les pertes fer, D_u : constante des pertes redresseur/onduleur ;

R : constantes des pertes cuivres ;

A partir de ces équations, nous obtenons le modèle complet du train électrique suivant :

$$P_p = P_{co} + (D_u \times I_p) + (R \times I_p^2) + [(A \times m) + (B \times V) + \rho \times (V + V_{vent})^2] \times V + (m \times k \times \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (V^2)) + (m \times g \times V \times \sin(\alpha))$$

(eq.7)

Avec :

$P_{co}, D_u, R, A, B, C, m, k$ sont les paramètres caractérisant le train

ρ, V_{vent} représentent les conditions météorologiques et α la déclivité locale de la voie

Les systèmes de tractions électriques peuvent être classés selon différents critères :

- Tension électrique ;
- Fréquence (en courant alternatif) ;
- Courant monophasé ou triphasé ;
- Type de courant (courant continu ou courant alternatif) ;
- Mode d'alimentation (troisième rail ou caténaire).

a) 1500 V DC

A l'époque, les trains étaient dotés de moteurs à courant continu. L'auteur Marie POLINE explique, dans sa thèse, que l'utilisation de cette tension permettrait de contrôler la vitesse des locomotives électriques sans nécessiter d'étage de conversion électronique. Dans ce cas, les sous-stations sont espacées de 8 à 15 km et ne sont pas réversibles. Mais ce type d'alimentation a une puissance faible ce qui va entraîner que les sous-stations seront placées en bordure de voies régulièrement.

b) 25 kV AC

Marie POLINE notifie que dans ce système d'alimentation en alternatif, le courant est plus faible ce qui a pour avantage de réduire les pertes en ligne. Les sous-stations seront espacées de 40 à 100 km, ainsi la section de la caténaire est réduite. Contrairement au 1500 V DC les sous-stations sont réversibles dans ce cas. Elle affirme aussi que les trains sont toujours alimentés par une caténaire monophasée [23].

Les machines électriques dans le cas du ferroviaire ont l'avantage d'être réversible. En effet les machines électriques peuvent être utilisées aussi bien en moteur qu'en générateur. Cependant l'utilisation des machines en mode générateur permet un freinage efficace, présentant l'avantage d'une faible usure et d'une efficacité proportionnelle à la vitesse, éliminant ainsi le risque de blocage des roues. Ce type de freinage, appelé freinage régénératif, nécessite cependant une évacuation de l'énergie. Celle-ci peut être soit consommée à bord du train via des rhéostats, soit réinjectée dans le réseau électrique à travers la caténaire, comme c'est le cas pour les TGV, ou via le troisième rail pour le métro. Dans le cas de la réinjection, cette énergie doit être absorbée par le réseau, que ce soit par un autre consommateur à proximité (un autre train en phase de traction par exemple) comme dans un réseau électrique amont via la sous-station, ou par la sous-station elle-même. Les énergies en jeu sont considérables, atteignant 1,3 GJ (355 kWh) pour l'énergie cinétique d'un train de 400 t circulant à 80 m/s (290 km/h) [33].

I.2.3 Le train électrique dans sa version la plus simple

Un seul fil coulissant recueille l'énergie électrique des lignes aériennes, cette puissance est transmise à un moteur à induction monophasé. Le moteur à induction est relié aux roues. Pour compléter le circuit l'autre borne du moteur à induction est reliée à la terre, ce qui est réalisable car le fil est d'abord relié aux roues par une brosse d'essieu. La roue est toujours en contact avec la voie et cette dernière est reliée à la terre [28].

I.2.4 Version améliorée des trains électriques

La tension utilisée dans les lignes aériennes est de 25 kV, en Inde et dans la majorité des Etats-Unis, cela peut varier d'un pays à un autre. Cependant les moteurs ont besoin de beaucoup moins de tension pour fonctionner (entre 1000 et 3000 V). Pour cette raison, l'alimentation se fera à partir d'un transformateur abaisseur de tension, qui transforme la tension au niveau souhaité. L'alimentation en ligne aérienne passe d'abord par le primaire du transformateur et ici le circuit est complet grâce à la mise à la terre. Grâce à l'action du transformateur le courant est induit dans l'enroulement secondaire et une puissance à tension réduite est fournie aux moteurs. Pour une traction élevée, comme le train, le moteur doit fournir un couple élevé. De plus la courbe de couple doit être uniforme même si la vitesse du moteur varie. Les moteurs à induction triphasés sont le choix idéal pour répondre aux exigences de couples élevés et uniformes. Tendre un fils triphasé pour alimenter le moteur n'est pas une bonne idée car ce n'est pas rentable. C'est pourquoi un redresseur et un onduleur sont utilisés pour convertir l'alimentation monophasée en triphasée. Un

redresseur transforme le courant alternatif monophasé en courant continu, puis l'onduleur convertit le courant continu en courant alternatif triphasé. Ainsi le moteur est prêt à rouler sur la voie. L'énergie est ainsi transférée au train à l'aide d'un seul fil suspendu. Toutefois cette méthode n'est pas pratique, parfois il n'est pas possible de maintenir la même distance entre le train et la ligne aérienne. Ce qui signifie que pour une collecte d'énergie adéquate il faut utiliser un mécanisme de variation de hauteur. Les pantographes accomplissent cette tâche [28]. La figure 10 montre un pantographe moderne:

Pantographe (*pantin*)

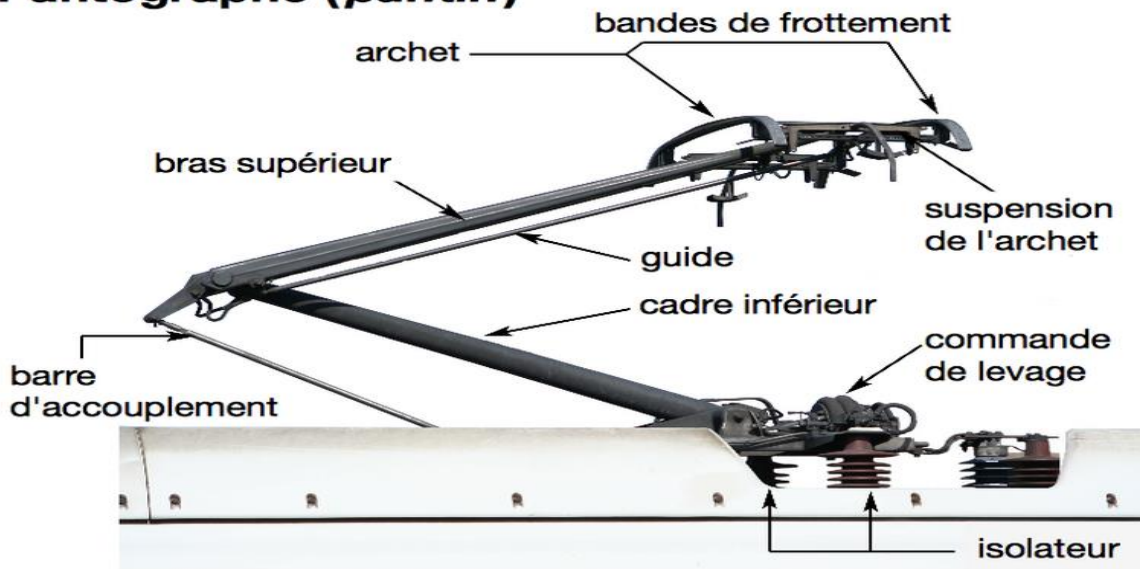


Figure 10: Schéma d'un pantographe moderne [34]

I.3 Avantages et Inconvénients des systèmes d'électrification ferroviaire existants:

Mr Andrea VERDICCHIO [25] présente un bilan comparatif des différents systèmes d'électrification existants. Le tableau 1 donne une vue d'ensemble des différents aspects liés à l'alimentation en énergie et aux infrastructures de transport. Les couleurs verte, orange et rouge indiquent si chaque système d'électrification présente des avantages (verte) ou des inconvénients (orange et rouge).

Tableau 1: Bilan comparatif des systèmes d'électrifications existant [25]

Système d'électrification	Courant continu: 1,5 kV ou 3 kV	Courant alternatif à fréquence spéciale 15 kV / 16,7 Hz	Courant alternatif à fréquence industrielle 25 kV/50 Hz
---------------------------	---	---	--

Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira

Fourniture d'énergie	L'alimentation en énergie est réalisée en triphasé à partir du réseau public	L'alimentation en énergie provient d'un réseau spécifique de production et de transport d'électricité, comprenant des alternateurs et des transformateurs de grande taille	Dans ce cas, l'alimentation en énergie est réalisée entre deux phases du réseau public, avec un raccordement offrant une puissance de court-circuit élevée
	Groupe transformateur-redresseur en Station de transformation	Station de transformation complexe si l'alimentation provient du réseau public	Station de transformation: Transformateur monophasé
Infrastructure	Une section significative de la ligne aérienne (jusqu'à 1 000 mm ²)	Caténaire légère (fil de contact et porteur, Section d'environ 270 mm ²)	Caténaire légère (fil de contact et porteur, Section d'environ 270 mm ²)
	Appareillage de coupure pour le courant continu, courant de court-circuit élevé (10 kA)	Appareillage de coupure en alternatif mais niveau de courant court-circuit plus important qu'en 50 Hz	Appareillage de coupure pour le courant alternatif
	Distance entre sous-stations: 10 à 30 km	Distance entre sous-stations: 60-80 km	Distance entre sous-stations: 40-60 km

Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira

	Inapte à l'alimentation des LGV	Sous-station équipée par un seul transformateur qui est très volumineux	Complexité de l'alimentation des LGV en 2 x25 kV
Circuit électrique de traction	Chute de tension importante – Pertes joules	Chute de tension inductive	Chute de tension inductive, compensation de puissance réactive parfois nécessaire
	Pas de section neutre, continuité du circuit électrique	Pas de section neutre, continuité du circuit électrique	Sectionnement du circuit électrique : perte de puissance pour la traction
	Partage de la puissance entre les sous-stations	Partage de la puissance entre les sous-stations	Puissance totale fournie par une seule sous-station
Matériel Roulant	Circuit de puissance très simple : filtre + onduleur de traction	Conversion AC/DC à bord de l'engin : transformateur et filtre à 2.f très volumineux.	Conversion AC/DC à bord de l'engin : transformateur et filtre à 2.f volumineux.

Selon ce rapport, les systèmes d'électrification en courant alternatif permettent l'utilisation de lignes aériennes de faible section. Dans ce contexte, la chute de tension est causée par la réactance du circuit de traction et des dispositifs de compensation de puissance réactive sont parfois employés pour rehausser la tension en ligne. Le système 15 kV/16,7 Hz requiert un réseau d'alimentation en énergie spécifique, mais il permet la connexion parallèle des sous-stations. L'auteur fait savoir que la puissance consommée par les trains est mieux distribuée entre les sous-stations, assurant une alimentation continue des trains tout au long de la ligne. Dans le système 25 kV/50 Hz, une puissance de court-circuit élevée est nécessaire pour les sous-stations monophasées au point de raccordement afin d'éviter les déséquilibres de tension sur le réseau triphasé. Par conséquent, les sous-stations doivent être équipées de systèmes pour compenser les déséquilibre [35]. Les

Locomotives modernes à courant alternatif sont équipées d'un transformateur abaisseur monophasé, d'un redresseur, d'un filtre basse fréquence (accordé sur 33,4 Hz ou 100 Hz) et d'un onduleur de tension triphasé alimentant le moteur de traction à courant alternatif [36]. En revanche, le convertisseur de traction embarqué dans une locomotive à courant continu est beaucoup plus simple, se limitant à un filtre d'entrée et à un onduleur de tension triphasé.

I.4 Systèmes de stockage d'énergie

Il existe plusieurs types de stockage d'énergie qui sont caractérisés principalement par la quantité d'énergie pouvant être stockée et celle pouvant être fournie. Ces différents types de stockage sont principalement: électrochimique, électrique, mécanique et thermique. Dans le tableau 2 qui suit seulement trois types de stockages sont donnés.

Tableau 2: Classification des méthodes de stockage d'énergie [23]

Stockage électrochimique	Stockage électrique (électromagnétique et électrostatique)	Stockage mécanique
<ul style="list-style-type: none"> - Batteries (Plomb, NiMH, Li-ion, ...) - Batteries redox - Système hydrogène (pile à combustible avec électrolyseur) 	<ul style="list-style-type: none"> - Condensateurs - Super-condensateurs - Bobines magnétiques supraconductrices 	<ul style="list-style-type: none"> - Système de stockage par pompage - Volant d'inertie - Air comprimé

D'après l'auteur, pour qu'un système de stockage soit adapté à un train hybride, plusieurs caractéristiques sont essentielles (masse et volumes raisonnables). Parmi ces systèmes ci-dessus, les batteries et les super-condensateurs sont les plus utilisés pour de plus grandes applications industrielles.

Ils existent 4 grandes familles de batteries avec des performances différentes que sont: lithium, nickel, plomb et sodium. Ils existent aussi 3 catégories de super-condensateurs: double couches, les plus courants, faradiques (moins fréquents) qui fonctionnent de manière similaire à des batteries et hybrides (technologie récente) combinant les caractéristiques des deux types précédentes [23]. Le tableau 3 donne les formules pour calculer la puissance et l'énergie caractéristique par cellule pour chacun des 2 systèmes de stockage les plus utilisés.

Tableau 3: Energie et puissance caractéristique par cellule des batteries et super-condensateurs [23]

Système de stockage	Energie caractéristique par cellule (Wh)	Puissance caractéristique par cellule (W)
Batteries	$E_{bt} = C_o \times V_o$ (eq.8)	$P_{bt} = I_{dcho} \times V_o$ et $P_{bt} = I_{cho} \times V_o$ (eq.9)
Super-condensateurs	$E_{sc} = \frac{c}{2 \times 3600} \times V_r^2$ (eq.10)	$P_{sc} = \frac{0,12}{ESR} V_r^2$ (eq.11)

Avec :

C_o (en Ah/cellule) est la capacité nominale d'une cellule de batterie ;

V_o (en V/cellule) est Tension nominale d'une cellule de batterie ;

I_{dcho} (en A/cellule) est le Courant de décharge nominale d'une batterie ;

I_{cho} (en A/cellule) est le Courant de charge nominale d'une batterie ;

V_r (en V/cellule) est la Tension nominale d'un super-condensateur ;

ESR_{dc} (en Ω /cellule) est la Résistance interne d'un super-condensateur ;

C (en F/cellule) est la Capacité d'un super-condensateur.

CONCLUSION

Dans le cadre actuel de la promotion du développement durable et de diminution des gaz à effet de serre, plusieurs études sur les systèmes d'électrification ferroviaire ont été réalisées. Les avancées récentes en électronique de puissance ouvrent la voie au développement de réseaux électriques à courant continu de moyenne tension, facilitant ainsi la transition énergétique en intégrant plus aisément les sources d'énergies renouvelables et les dispositifs de stockage d'énergie. Ce chapitre permet de voir et de comprendre d'une part le mode de fonctionnement et l'apport énergétique des trains électriques et d'autre part de l'importance de verdir ce système. Le principal défi consiste à réduire la dépendance aux combustibles fossiles. Pour y parvenir, il est essentiel de diminuer en priorité la production d'énergie électrique à partir de ces combustibles fossiles en augmentant la part des énergies renouvelables. Face à ce constat, il nous a donc paru logique d'étudier une nouvelle électrification pour les lignes ferroviaires alimentée par un parc photovoltaïque linéaire avec un faible impact surfacique. Au regard de ce contexte énergétique, notre étude porte sur le cas de l'autonomisation du système d'électrification ferroviaire en lui fournissant le maximum de puissance demandée soit 25 MW.

Ce dernier fera l'objet de notre étude dans le chapitre II.

**CHAPITRE II :
Nouveau concept d'un Champ Photovoltaïque
Curviligne et Linéaire appliqué au transport
ferroviaire**

INTRODUCTION

Ces dernières années, l'urbanisation rapide a engendré des problèmes majeurs dans de nombreux pays, notamment en ce qui concerne la congestion du trafic, la pollution de l'air et la pollution sonore. Une solution efficace à ces problèmes est de privilégier le développement des transports publics, où les tramways modernes seront fortement priorités [37]. Traditionnellement, le système ferroviaire est alimenté par des lignes caténares aériennes, cependant certaines lignes ne sont pas électrifiées et fonctionnant toujours au diésel. Ce dernier a de nombreux inconvénients tels que le dégagement de GES, favorise le changement climatique, engendre des problèmes sanitaires ..., se tourner vers des sources d'énergies renouvelables est une étape essentielle pour remédier à ces problèmes. Cependant, l'énergie photovoltaïque (PV) est apparue comme une source bénéfique si l'on considère plusieurs facteurs, telles que la production d'énergie propre, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la compétitivité coût de l'approvisionnement en électricité par rapport aux autres sources d'énergie [38]. Mais, la production d'énergie photovoltaïque nécessite une grande quantité de surface qui peut être utilisée dans le domaine de l'agriculture ou de création de fermes pour l'élevage ou la pisciculture. Ici le plus grand défi est de limiter la dépendance énergétique vis-à-vis des combustibles fossiles et aussi de conserver les ressources terrestres. Conscients de cela, nous allons donc présenter un nouveau concept d'un Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL).

II DESCRIPTION DES DIFFERENTES INSTALLATIONS DE LA CPCL

Ce nouveau concept consiste à ce que les deux côtés de l'autoroute ferroviaire soient pourvus de piliers, et des modules de cellules solaires (en séries, en parallèles ou en strings) sont disposés sur les piliers pour générer de l'électricité et des câbles de différentes sections sont mises en disposition pour relier les modules solaires.

Ce concept apporte une réponse bénéfique pour les décideurs africains, particulièrement sur l'utilisation de l'énorme potentialité de la ressource solaire dans la construction des grandes infrastructures comme les réseaux ferrés nationaux et transnationaux sans avoir à utiliser de grandes surfaces. Outre de libérer le potentiel foncier, la sécurité de fonctionnement de la centrale électrique est garantie et la condition d'environnement de trafic routier et analogue est améliorée. Ce concept a pour objectif de régler le problème d'accès à une énergie fiable grâce au potentiel solaire du Sénégal avec l'utilisation d'espaces libres (voies ferrées) sur des centaines de kilomètres. Cette énergie va permettre d'alimenter des dizaines de sous-stations. Ces sous-stations peuvent

Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira

ainsi constituer de vraies centrales locales avec un système de stockage pour palier à l’intermittence. Ce nouveau concept va faciliter l’interconnexion à l’intérieur du pays et même en dehors du pays avec une énergie renouvelable et inépuisable. Les figures 11 et 12 montrent le schéma conceptuel du nouveau concept CPCL.

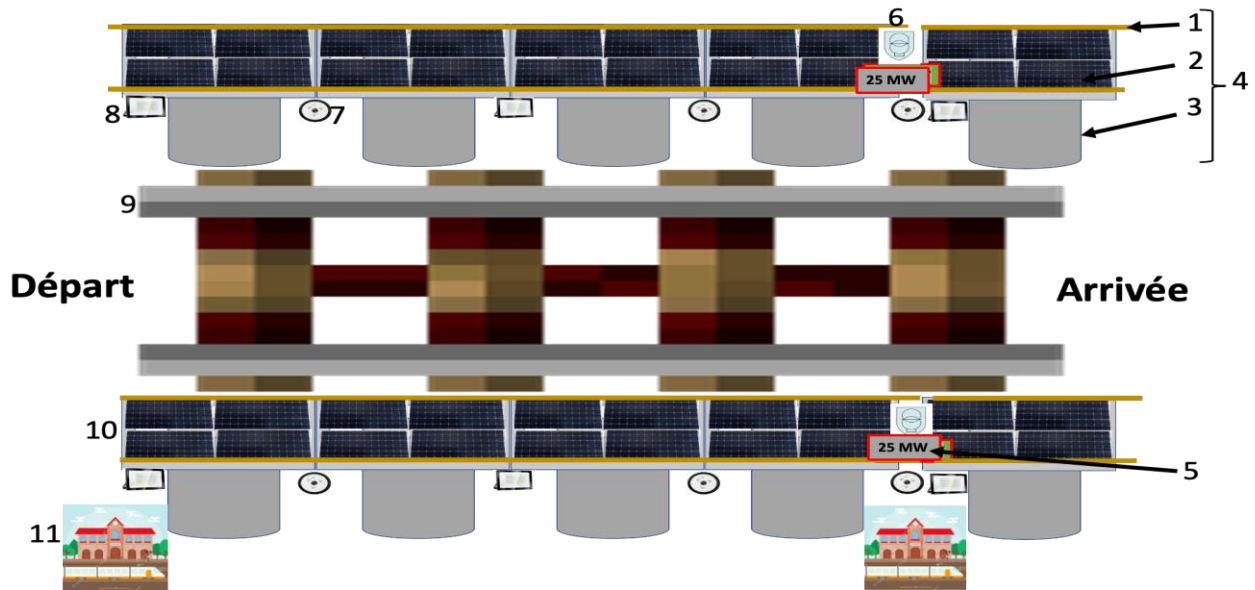


Figure 11 : schéma conceptuel du nouveau concept CPCL [39]

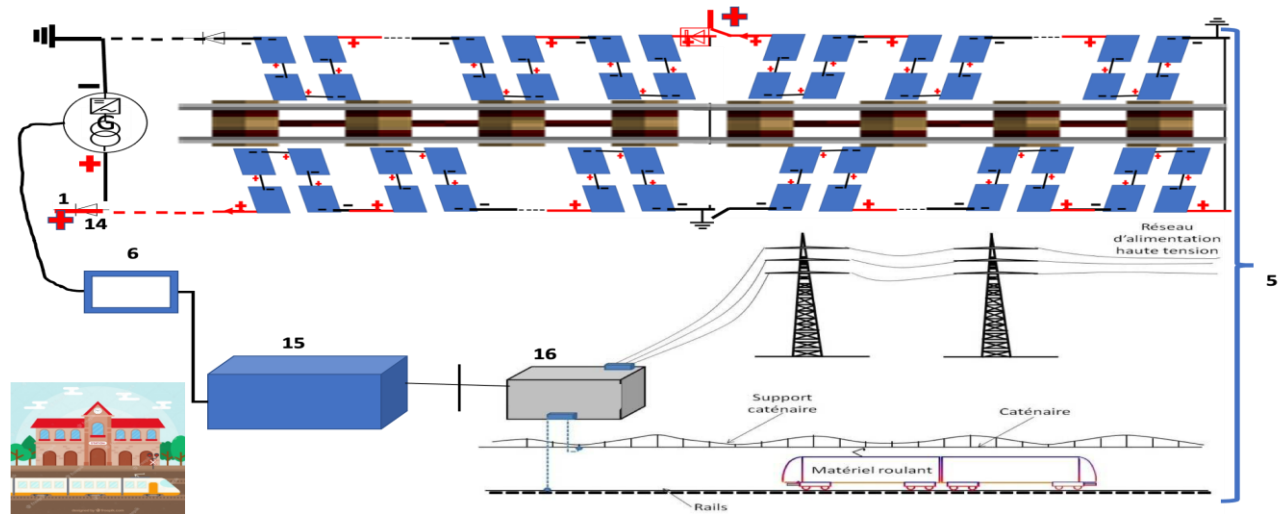


Figure 12 : schéma conceptuel du nouveau concept CPCL [39]

1- Câble de conduction courant DC des PV, 2- Panneau solaire, 3- Pilonne support de 4 panneaux, 4- Bloc PV = 4PV + Pilonne, 5- Sous-station/stations de recharges électriques ultra-rapides, 6- Convertisseur - Régulateur DC-DC, 7- Caméra de surveillance, 8- Ecran de surveillance, 9- Rails, 10- Champ Linéaire PV (CL-PV), 11- Gare, 14- Diode antiretour, 15- Stockage et 16- centrale d’acquisition/transformatrice si nécessaire.

Sa conception inclura les installations et équipements suivants :

- un ensemble de panneaux solaires ;
- un système d'onduleurs et de transformateurs ;
- un réseau de câblages ;
- un système de surveillance.

La description des différents constituants sera traitée dans la partie suivante.

II.1 Description du Champ photovoltaïque

Une centrale solaire photovoltaïque est une installation qui génère de l'électricité en utilisant la lumière du soleil, de la même manière que les centrales solaires thermodynamiques. Également connue sous le nom de centrale solaire domestique, la centrale solaire photovoltaïque fournit chaleur ou électricité à une maison, servant ainsi au chauffage ou à la production d'eau chaude.

Les installations photovoltaïques utilisent des cellules pour transformer la lumière solaire en électricité. Ces cellules sont composées de couches de matériaux semi-conducteurs. Lorsque la lumière éclaire ces dernières, elle génère un champ électrique à travers les couches, produisant ainsi un courant électrique. L'intensité de la lumière influe directement sur l'ampleur du courant généré.

Les photons, ou particules de lumière, qui alimentent la surface du matériau photovoltaïque, que ce soit sous forme de cellules ou de couches minces, transfèrent leur énergie aux électrons présents dans le matériau. Cela provoque le déplacement des électrons dans une direction spécifique.

Le courant électrique continu généré par le mouvement des électrons est capté par de fins fils métalliques connectés entre eux, puis transféré à la cellule photovoltaïque suivante.

Le courant s'accumule en passant d'une cellule à l'autre jusqu'à atteindre les bornes de connexion du panneau. D'après la loi de Kirchhoff, l'équation du courant de sortie de la cellule est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_L - \mathbf{I}_D \quad (\text{eq.12})$$

Le flux de photons dépend de l'éclairement, de la température et du flux de photons mesurés dans les conditions de référence, et est exprimé par :

$$\mathbf{I}_L = (\mathbf{G} / \mathbf{G}_{\text{réf}}) (\mathbf{I}_{L,\text{réf}} + \mathbf{U}_{\text{IsC}}(\mathbf{T}_c + \mathbf{T}_{c,\text{réf}})) \quad (\text{eq.13})$$

Avec :

\mathbf{G} , $\mathbf{G}_{\text{réf}}$: l'éclairement réel et les conditions de référence [w/m^2] ;

\mathbf{T}_c , $\mathbf{T}_{c,\text{réf}}$: température des cellules, réelles et en condition de référence ;

U_{isc} : coefficient de température du courant de court-circuit [A/°C] ;

$I_{L,ref}$: le courant photonique en conditions de référence.

Le courant de la diode est décrit par l'équation de Shockley suivante :

$$I_D = I_0 [\exp (q (v + IR_s) / ykT_c) - 1] \quad (\text{eq.14})$$

Avec :

V : la tension de sortie [V] ;

I : est le courant traversant la diode (A) ;

y : représente le facteur de qualité ;

R_s : est la résistance série [Ω] ;

q : la constante de charge d'électron, $1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$;

K : la constante de Boltzmann, $1,381 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$;

I_0 : est le courant de saturation inverse de la diode.

Le courant continu (DC) généré par le champ photovoltaïque sera converti en courant alternatif (AC) grâce à un onduleur/transformateur, puis acheminé au réseau via un système d'évacuation.

a) Caractéristiques des panneaux solaires photovoltaïques choisis

Pour le CPCL, le choix des panneaux se fera sur des panneaux de 550 Wc Silicium monocristallin.

En fonction du module photovoltaïque choisi, il est donc facile de déterminer le nombre de modules en série ainsi que le nombre de branches en parallèle. La figure 13 montre un exemple de panneaux solaires sur un pylône:

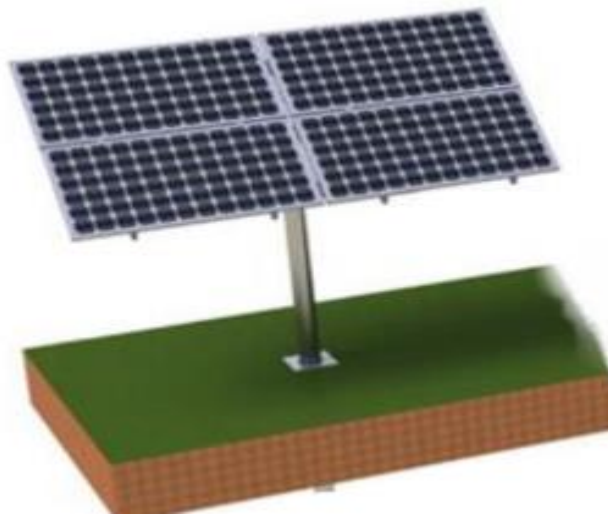


Figure 13: Bloc de panneaux solaires photovoltaïques [40]

Le tableau 4 présente les caractéristiques techniques du type de panneau choisi.

Tableau 4: Caractéristiques d'un panneau 550 Wc [41]

Type d'installation	Type de production
Dimensions Modules	2,279m x 1,134m x 0,035m
Poids	29 kg
Puissance nominale P_{MPP} (tolérance +/- 3%)	550 Wc
Tension à puissance max. V_{MPP}	40,98 V
Courant à puissance max. I_{MPP}	13,42 A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	49,68 V
Courant de court-circuit I_{cc}	14,01 A
Efficacité module	21,28 %
Tolérance de puissance	0+5
Caractéristiques électriques selon STC valeurs aux Conditions de Test Standardisées (STC): irradiation 1000W/m ² (ensoleillement maximal), température des cellules 25 °C, coefficient de Masse d'air de 1,5	

b) Les pylônes

Les modules solaires photovoltaïques seront montés sur des supports appelés pylônes. Les structures métalliques qui soutiennent ces modules seront en acier et peuvent être fixes ou équipés de trackers. La hauteur des tables sera de 4 à 5 m du sol. Ils seront inclinés et orientés de façon à maximiser l'utilisation de la surface disponible de manière optimale (ils auront une pente de 15° et seront orientés plein sud en suivant la direction du terrain, pour maximiser l'occupation de celui-ci) et produire un maximum d'énergie tout au long de l'année.

La figure 14 est un exemple de support:



Figure 14: pylône [42]

Le tableau 5 montre les caractéristiques du type de support choisi.

Tableau 5: Caractéristiques du pylône [43]

Pylône	
Matériaux	Acier galvanisé à chaud/Aluminium
Surface	10,7576 m ²
Nombre de colonnes	3
Nombre de lignes	4
Type de fondation	Base en béton ou vis de terre
Vitesse de vent max	45 m/s

II.2 Description technique des onduleurs et transformateurs

L'onduleur a pour fonction de convertir le courant continu produit par le champ photovoltaïque en courant alternatif. Cependant, il doit être soigneusement sélectionné pour remplir pleinement sa fonction dans l'installation, en tenant compte des différentes technologies et configurations disponibles. De plus, une caractéristique essentielle d'un onduleur est d'optimiser la production d'énergie de l'installation en fonction du rayonnement solaire incident, grâce au réglage MPPT (Maximum Power Point Tracker). Il y a 3 types d'onduleurs à savoir:

- Onduleur de chaîne ou onduleur par groupe de panneaux (OGP) : comme le nom l'indique, chaque chaîne de modules est connectée à un onduleur.

- Onduleur intégré par panneau (OIP) ou micro-onduleur : chaque panneau solaire est équipé de son propre onduleur ou micro-onduleur.
- Onduleur multi-chaîne (OMC) : cette configuration implique de connecter les chaînes à des entrées MPPT distinctes, puis de relié l'ensemble à un onduleur.

La figure 15 présente un exemple d'onduleur.



Figure 15: onduleur [44]

Le transformateur a pour rôle de veiller à la transformation du courant en moyenne ou basse tension et au transport de l'électricité sans risque ni perte. Il permet d'interconnecter deux réseaux de niveaux de tension différents. Les postes onduleurs et les postes de transformation peuvent être regroupés pour réduire la longueur des câbles, minimisant ainsi les pertes de puissance et la dispersion des locaux techniques sur le site. Ainsi leur maintenance sera simplifiée et effectuée de manière ponctuelle.

Les locaux techniques seront situés dans les sous-stations et seront dotés d'un revêtement métallique interne, avec un plancher amovible en plastique pour protéger les fils sous tension et les câbles. Les postes onduleurs/transformateurs seront équipés de dispositifs de découplage (disjoncteurs) et de protections contre les surtensions provoquées par la foudre (parafoudres). Les locaux techniques abritant les transformateurs seront équipés d'un bac de rétention (fosse en béton armé) destinée à recueillir l'huile contenue dans le transformateur.

Pour le CPCL le choix se fera sur des onduleurs de type 30 kVA AS-ICO1-30000-2 (triphase) chez AEG industrial solar Gff.

II.3 Descriptif du réseau de câblage

Le câblage permet de relier tous les composants du système PV, c'est un point essentiel de toute installation. En effet, chaque conducteur installé dans une connexion électrique engendre des pertes

et une chute de tension, en raison de la résistance du conducteur lors du passage du courant. Dans le système PV la chute de tension maximale ne doit pas dépasser les 3 % pour les petites puissances et de 8 % pour les grandes puissances. Cependant plus le câble est épais, moins forte sera la résistance induisant une augmentation du prix du câble.

II.3.1 Des modules aux boîtes de jonction

Les modules seront reliés en série et en parallèle par câblage en sous face du module le long des châssis de support. Les boîtes de jonction seront placées au milieu des séries, elles peuvent regrouper jusqu'à 24 modules en séries. Les strings (groupés en parallèle) seront reliés au boîte de jonction grâce à un câble de sorte qu'à la sortie de la boîte de jonction l'intensité sera de 100 A.

II.3.2 Des boîtes de jonction au complexe onduleurs-transformateurs

Cette connexion sera réalisée par des câbles de section bien définie qui pourra transporter les 100 A au poste onduleur/transformateur.

Les câbles électriques nécessaires au transport de l'énergie vers les sous-stations de même que les réseaux de communication vont suivre le long des pylônes. Leurs dimensions (longueur et section) seront éclaircies au niveau du chapitre III.

II.4 Système de Surveillance et télécommunication

La centrale CPCL aura un système d'alerte d'incendie qui inclura également la délimitation des zones, les affiches et indications requises seront fournies, accompagnées des équipements de protection nécessaires. De plus une bande coupe-feu sera installée le long de la centrale. Des systèmes de détection d'intrusion seront installés.

Le système de télécommunication comprenant la fibre optique, le GPRS ou les satellites, sera mis en place pour transmettre les données de suivi de l'exploitation du CPCL et pour gérer les appels d'urgence issus du système de surveillance.

II.5 Méthodologie d'exécution des travaux

Cette phase de réalisation des travaux sera organisée autour des activités suivantes.

II.5.1 Installations fixes de chantier

Durant cette période l'entreprise responsable des travaux installera une base technique sur le site de la centrale solaire. Ces installations consisteront en :

- ✓ L'installation d'un espace de stockage pour les équipements et les matériaux,
- ✓ L'installation de bureaux, de dortoirs pour le personnel ;
- ✓ L'aménagement d'une zone de déchets ;

- ✓ L'aménagement d'un bloc sanitaire.

II.5.2 Exécution physique des travaux

Pendant cette période il y aura :

- Des travaux de préparation du site ;
- Transport des matériaux et équipement sur site ;
- Une mise en place des locaux techniques ;
- La pose des pylônes et des modules selon la technique la plus adaptée à la typologie choisie ;
- La préparation des chemins de câbles enterrés ;
- Le déblaiement des voies d'accès et de zones de circulation du site concerné....

II.5.3 Installation du conteneur de stockage et de la structure de livraison

L'assemblage du conteneur de stockage étant déjà fait, sa pose sera beaucoup plus simple que la structure de livraison. Cette dernière nécessitera une excavation de 90 cm d'épaisseur. À l'aide d'une grue de déchargement, ces deux seront installés et enterrés à quelques centimètres. Le tableau 6 donne les caractéristiques du conteneur de stockage.

Tableau 6: caractéristiques du conteneur de stockage [45]

Système de stockage d'énergie 1 MW/2,5 MWh		
Puissance de sortie nominale		1000 kW
Capacité nominale		2500 kWh
Phases c.a.		Triphasé, quatre fils
Mode de décharge de la grille	Tension nominale	380 V.
	Plage de tension	380 ±15 % V.
	Fréquence nominale	50 Hz
	Plage de fréquence	47.5 à 51,5 Hz
	Forme d'onde de courant total	<5 %
	Taux de distorsion (THD)	
	Facteur de puissance de sortie	≥ 0.99
Mode de fonctionnement réseau isolé	Tension nominale	380 V.
	Précision de la tension	<±3 %
	Distorsion de la tension de sortie	<5 %

	Fréquence de sortie nominale	50 ±2 % Hz
	Plage de transition de tension	<10 %
	Peut supporter un déséquilibre de charge triphasé	100 %
Mode de charge connecté au réseau	Tension nominale	400 V.
	La plage de tension est autorisée	380 ±15 % V.
	Plage de fréquence	47,5 À 51,5 H
	Facteur de puissance	≥ 0.99 (valeur absolue)
Bruit		<70 dB
CLASSE IP		IP54
Communication externe		Ethernet
Dimensions		12192 mm (L) x 2438 mm (l) x 2591 mm (H)
Poids		22 T

II.5.4 Maintenance et Entretien

D'habitude, de faibles frais de maintenance sont entraînés par un générateur photovoltaïque. Néanmoins, pour générer le maximum d'énergie, les panneaux doivent fonctionner à pleine capacité et cela va nécessiter d'une maintenance préventive mise en place par le service d'exploitation. Un système de détection de défaillance sera installé le long du concept pour des opérations de maintenance corrective. L'exploitation de la centrale pourra se faire à travers :

- Un contrôle visuel des modules et des structures, la détection d'éventuels objets masquant les cellules
- Une analyse des données enregistrées (l'énergie solaire incidente, température, l'énergie produite, l'énergie injectée...)
- Une vérification de l'état des câbles, des connecteurs, des boites de connexion, de la thermographie infrarouge des armoires de protections, de la continuité des masses et des liaisons à terre...

CONCLUSION

Ce nouveau concept est une innovation unique qui permettra de résoudre de façon durable le problème d'accès à l'énergie et à moindre impact carbone. L'accès à l'énergie garantit une vie meilleure et aussi c'est un puissant levier de développement pour l'économie et les industries. Avec le CPCL, le problème lié à l'occupation de grands espaces ne se pose plus, plusieurs centrales peuvent être ainsi créées le long des voies ferrées ou autoroutes avec un aménagement de conteneur de stockage d'énergie adapté pour remédier au problème d'intermittence. Ce type de champ, étant linéaire et installé sur des voies dégagées non utilisées, offre une opportunité de valorisation de ces espaces libres sans occuper d'autres zones qui pourraient entraîner des conflits et des réticences. Le chapitre III donne un aperçu beaucoup plus synthétique avec le dimensionnement des matériels de l'installation et de l'estimation financière du concept CPCL appliqué à la ligne ferroviaire Dakar-Kidira.

**CHAPITRE III :
Etude technique et financière du nouveau
concept CPCL appliqué à la ligne Dakar-
Kidira**

INTRODUCTION

Dans ce chapitre une analyse technique et financière du nouveau concept du Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire appliqué à la ligne Dakar-Kidira sera faite. Cette étude permettra de dire si le projet est techniquement faisable et économiquement viable. Pour ce faire nous allons utiliser des logiciels comme PVsyst pour le dimensionnement et RETScreen expert pour tout ce qui est de l'étude économique.

III Contexte énergétique et environnemental

L'Afrique est la région du monde où l'accroissement rapide de la population crée d'une part, une augmentation du nombre de personnes vivant sans électricité et d'autre part une augmentation de la mobilité des personnes et des biens. Au Sénégal, face à l'incapacité à satisfaire les besoins de transport, évalués à 124 000 passagers pendant l'heure de pointe du matin à Dakar, l'Etat du Sénégal a mis en place le projet Train Express Régional (TER). C'est un projet visant à contribuer au réaménagement et au rééquilibrage de l'espace urbain dans la capitale, en atteignant les objectifs de croissance du PIB établis dans le Plan Sénégal Émergent (PSE) [46]. En effet cette conception de la ligne du Train Express Régional n'exclut pas l'objectif d'économiser de l'énergie pour le Sénégal. En plus l'usage de ce train nécessite une énergie électrique fortement dépendant des énergies fossiles. Cette situation n'est pas viable car ces énergies comportent des inconvénients tels que: rejet de gaz à effet de serre, émissions de particules, elles sont épuisables, coûteuses, etc. Ces différents éléments conduisent aujourd'hui à une réflexion sur l'optimisation à long terme de la consommation d'énergie fossile par les individus et les états.

Cependant, l'Afrique doit recevoir un soutien pour sa transition vers une croissance à faible émission de carbone et une résilience au changement climatique. Les énergies renouvelables pourraient permettre l'accès à l'énergie, à l'électricité. C'est le continent le plus ensoleillé au monde avec une moyenne de 320 jours d'ensoleillement par an pour les zones les plus favorisées. Le présent projet (CPCL) permettra de répondre aux problématiques soulignées,

III.1 Principe de dimensionnement d'une centrale photovoltaïque

Le dimensionnement d'un champ photovoltaïque consiste d'abord à connaître les besoins en électricité et le profil de consommation des appareils. Les appareils, quels qu'ils soient, doivent remplir leur fonction de manière efficace qui leur ait assignée. Pour notre étude, la puissance totale de la centrale sera de 25 MWc afin de répondre à la demande énergétique. En connaissant la puissance totale à installer, il faut ensuite définir les paramètres du champ, choisir le panneau PV

puis déterminer le nombre de panneaux et leur agencement en série et en parallèle. Le champ de panneaux est enfin connecté sur une entrée d'onduleur régulateur.

III.1.1 La puissance crête du champ PV

La puissance crête correspond à la quantité d'énergie solaire convertie en électrique dans des conditions idéales, elle est mesurée en watt-crête (Wc). Elle se calcule suivant la formule :

$$P_c = \frac{E_p \times P_i}{E_i} \quad (\text{eq.15})$$

Avec :

E_p : l'énergie produite ;

P_c : la puissance crête du champ photovoltaïque ;

P_i : la puissance radiative dans la condition standard de test (conditions STC), exprimée en kW/m² ;

Donc, $P_i = 1 \text{ kW/m}^2$;

E_i : l'irradiation solaire journalière reçue par une surface unitaire (1 m²) du champ photovoltaïque, en prenant en compte l'orientation et l'inclinaison de celui-ci.

III.1.2 Détermination du nombre de panneaux en série et en parallèle

A partir de la puissance crête du champ, le nombre de panneaux nécessaire à l'installation, peut-être déterminé par:

$$N_{pv} = \frac{P_c}{P_d} \quad (\text{eq.16})$$

Avec :

P_c : la puissance crête totale

N_{pv} : le nombre de PV à utiliser

P_d : la puissance disponible d'un panneau

Le nombre de panneaux en série est obtenu par la formule suivante:

$$N_{ms} = \frac{U_{maxond}}{V_{oc}} \quad (\text{eq.17}) ;$$

Et Le nombre de blocs en parallèle est aussi obtenu par la formule suivante:

$$N_{mp} = \frac{N_{pv}}{N_{pvmaxseries}} \quad (\text{eq.18}) ;$$

Avec:

N_{ms} : Nombre de PV max en série ;

U_{maxond} : tension maximale d'entrée que peut supporter l'onduleur ;

V_{oc} : la tension de circuit ouvert ;

N_{mp} : le Nombre de blocs de PV max en parallèle.

III.1.3 Choix de l'onduleur

En général, les charges fonctionnent en courant alternatif, étant donné que l'installation est connectée au réseau, le courant distribué doit nécessairement être converti en courant alternatif. Le courant injecté doit présenter une forme sinusoïdale parfaite. La sélection des onduleurs pour l'installation sera basée sur le nombre et le type de raccordement des panneaux solaires. La relation qui lie la puissance maximale DC et la puissance maximale AC est la suivante:

$$P_{DCmax} = \frac{1}{\varepsilon} \times P_{ACmax} \quad (\text{eq.19})$$

ε : le rendement de l'onduleur

III.1.4 Choix du stockage

L'énergie générée est conservée dans des batteries solaires de stockage pour une utilisation future. Les batteries peuvent être connectées en série ou en parallèle. La capacité de stockage des batteries est déterminée par le nombre de jours d'autonomie requis (sans production des panneaux) souhaité. Ce nombre de jours d'autonomie des batteries est basé sur des données météorologiques du lieu. La capacité de stockage tient aussi compte des profondeurs de décharge maximale autorisée et de la température. Elle se calcule par la formule:

$$C_j = \left(\frac{N_j \times E_j}{D_p \times U_{syst}} \right) \times 1,25 \quad (\text{eq.20})$$

Avec:

C_j : La capacité journalière de la batterie en Ah

N_j : Nombre de jours d'autonomie

E_j : Energie journalière en Wh/J

D_p : profondeur de décharge de la batterie

U_{syst} : Tension du système en V

Le nombre de batteries total peut être déterminé par la formule suivante:

$$N_{batt} = \frac{C_j}{C_d} \quad (\text{eq. 21})$$

Et le nombre de batteries en série peut être déterminé par la formule suivante:

$$N_{battsérie} = \frac{U_{syst}}{U_{batterie}} \quad (\text{eq.22})$$

Avec:

N_{batt} est le nombre de batteries total

C_d est la capacité disponible

U_{sys} est la tension du système

III.1.5 Choix de la section des câbles

Grace à un abaque (en annexe 1 et 2) de sélection de câble, le choix de la section des câbles est facile à déterminer. Le choix des câbles se fait suivant le courant circulant au niveau de la section, la distance et la tension. Cette section peut être déterminée à l'aide de la formule suivante:

$$s = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta U_{\text{max}}} \quad (\text{eq.23})$$

S: section du conducteur [m²] ;

ΔU_{max} : chute de tension [V] ;

I : le courant de sortie [A] ;

ρ : résistivité linéaire du matériau conducteur [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$] ;

L : la longueur du câble [m] que l'on considère 2 fois aller et retour lors du calcul.

III.2 Dimensionnement manuel du concept CPCL et simulation avec le logiciel PV_{SYST}

Dans un premier temps une étude de dimensionnement manuel sera faite avec le logiciel Excel et en deuxième temps faire la modélisation avec le logiciel PV_{sys} qui prend en compte les panneaux solaires, onduleurs, compteurs, câbles, puissance nécessaire, puissance de sortie, estimation du ratio de performance, données météorologiques pour le site choisi (KIDIRA) et optimisation de l'angle d'inclinaison.

III.2.1 Dimensionnement manuel du concept solaire photovoltaïque linéaire

La puissance de l'installation du nouveau concept de Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire prévue est de 25 MWc. Le tableau 7 présente les différents résultats avec un dimensionnement basé sur des calculs théoriques.

Tableau 7: dimensionnement avec Excel du concept CPCL

Exemple niveau national: Dakar – Kidira		
Distance 650 000 m	650	km
Puissance PV	550	W
Dimensions PV (Lxlxe)	2,279x1,134x0,035	m ³
Bloc PV/pylone	4	PV
Puissance Bloc	2 200	W
Longueur plateau de PV/pylone	5,158	m

Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira

Longueur Total des Blocs PV	644 850,065	m
largeur bloc PV	2,668	m
distance entre bloc et muraille	1,2	m
Largeur bloc + distance entre bloc et muraille	3,87	m
Distance entre deux blocs	0,041	m
Distance Total entre deux blocs	2 562,857	m
Longueur Bloc + dist-Blocs	5,199	m
Longueur Total Bloc + dist-Blocs /côté	649 975,861	m
Métrage Total Bloc PV/côté	644 850,065	m
Nombre de blocs total	250 038	blocs
nombre de blocs/centrale	11 366	blocs
Nombre de PV/centrale de 25 MWc	45 464 (4x11 366)	PV
Bloc en série: Nombre de blocs en série: blocs de 4 PV en série		
Total blocs en série	1 525	blocs
VTmax	250	kV
Imax	13,42	A
Sous Station: Blocs en parallèle: Nombre de blocs en parallèle: 8 blocs en parallèle (de 2x762,567 blocs en série)		
Total blocs en parallèle :	8	blocs
VTmax	250	kV
Imax	100	A
P_{max}	25	MW
Nombre de PV	45 464 (4x11 366)	PV
Puissance Max Totale fournie/côté du CPCL	275 042 680	W
Nombre de Centrales de 25 MW par 30 km	22	centrale
Pour les deux côtés on a 25 MW/2x30 km		
Puissance Totale	550,085	MWc
Tension/Courant par centrale = 250 kV/100 A DC		

Panneaux photovoltaïques

Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira

Puissance Fournie par les PV	25 000 000	W
Energie produite par les PV	137 500 000	Wh
Puissance crête	25 000 000	Wc
Nombre de PV	45 464	panneaux
Nombre de PV en séries	20	
Nombre de PV en parallèles	2272,75 environ 2273	
Stockage		
Capacité de stockage	1 375 000	Ah
Nombre de conteneurs de stockage 2,5 MWh	12	
Onduleur		
Puissance total des onduleurs	30 000 000	VA
Choix de l'onduleur	30 000	VA
Nombre d'onduleurs	1 000	

Le dimensionnement manuel du nouveau concept CPCL à travers Excel pour une puissance de 25 MWc donne un nombre total de panneaux de 45 464 (modules de 550 Wc). L'ensemble des panneaux est mis en bloc de 4 panneaux avec une puissance totale de 2200 W par bloc. Le nombre total de blocs par côté est de 125 019 qui seront mis en série et en parallèle le long de la voie ferrée nationale Dakar-Kidira. L'intensité de sortie pour la centrale de 25 MW étant de 100 A donc le nombre total de blocs en parallèle ne doit pas fournir une intensité supérieure à cette intensité de sortie. Ainsi 7,452 environ 8 blocs seront en parallèle, dans chaque bloc l'intensité de sortie est de 13,42 A et le nombre de blocs en série est aussi calculé de sorte que la tension, qui est de 250 KV, ne soit pas dépassée. Cependant, en tenant compte de la linéarité du concept CPCL, les blocs en parallèle (1 525 blocs) seront raccordés aux blocs en série sur la même voie. Ainsi, 12 conteneurs de 2,5 MWh sont nécessaires pour le stockage d'énergie et des onduleurs d'une puissance apparente totale de 30 MVA. Nous considérons un conteneur de stockage qui prend en compte la capacité de stockage et la puissance apparente totale des onduleurs.

Le tableau 8 donne les résultats de calculs des différents composants

Tableau 8: dimensionnement des différents composants du concept CPCL

Principaux composants		
Modules photovoltaïques GPV1 y compris rechanges	45 464	W
Modules photovoltaïques GPV2 y compris rechanges	45 464	W
Structures et éléments de fixation des champs PV/ côté	125 019	
Ensemble Câble DC PV/ côté	806 063	m
Onduleurs PV et/ou contrôleurs MPPT, y compris rechange	30	kVA
Ensembles coffrets DC (PV et batt) pour GPV1	50	m
Ensembles coffrets DC (PV et batt) pour GPV2	50	m
Ensemble câblage AC et accessoires de fixation pour GPV1	300	m
Ensemble câblage AC et accessoires de fixation pour GPV2	300	m
Parc batterie GPV1 et accessoires	20	m
Parc batterie GPV2 et accessoires	20	m

L'ensemble du câblage DC PV est obtenu en majorant de 1,25 le métrage total des blocs reliés en parallèle et en série. Ainsi chaque 300 m un ensemble de câblage AC et accessoire est mis sur place pour atténuer les pertes. La section des câbles dépend de l'intensité de sortie de chaque équipement.

Section de câble :

Soit S_1 la section des blocs en parallèle pour $I = 100$ A :

$$S_1 = 2 \times \frac{\rho \times L \times I^2}{\Delta U_{\max}} ; \text{ (eq.24)}$$

Après calcul nous obtenons $S_1 = 28,76 \times 10^{-6} \text{ m}^2$.

Pour 100 A nous avons une section plus petite comparée aux systèmes d'électrification déjà existants voir tableau 1 (Bilan comparatif des systèmes d'électrifications existant).

Champ électromagnétique :

Soit B le champ électromagnétique résultant de la combinaison entre l’onde électrique et l’onde magnétique qui se déplace à la vitesse de la lumière. Le calcul du champ magnétique permet d’examiner l’exposition aux radiofréquences sur les risques auxquels font faces les personnes dans les centrales électriques ou industries. Il peut être calculé par la formule suivante :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \quad (\text{eq.25})$$

Avec

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A : la perméabilité du vide;

I : l’intensité et d : la distance

Soit B₁ le champ magnétique pour une distance de 1 m et I₁=13.42, l’intensité d’un bloc :

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} \quad (\text{eq.26}) \text{ pour une intensité } I \text{ égale à } n \text{ fois } I_1 \text{ nous avons :}$$

$$B_n = \frac{\mu_0 n I_1}{2\pi d} = n B_1 \quad (\text{eq.27}) \text{ représentant une suite numérique de raison } n \text{ du champ magnétique généré}$$

Après calcul nous obtenons :

B₁ = 2,684 μT ; pour n = 8: B₈ = 21,472 μT. Ainsi, nous pouvons constater que plus la distance augmente et plus le champ magnétique diminue. Les risques d’exposition des personnes sont minimales comparé au seuil de 100 μT recommandée pour le grand public [47].

Comparaison du rendement par unité de surface du nouveau concept avec une centrale classique :

Le tableau 9 donne les résultats comparatifs entre le concept CPCL et une centrale classique de même puissance. Le rendement photovoltaïque par unité de surface se calcule en utilisant la formule suivante :

$$R_{pv} = \frac{P \text{ (MW ou kW)}}{S \text{ (ha ou m}^2\text{)}} \quad (\text{eq.28})$$

P est la puissance crête du champ PV

S est la surface occupée en ha ou en m²

Tableau 9 : Comparaison du nouveau concept CPCL avec une centrale classique

Système	Puissance crête (MW)	Surface occupée (ha)	Rv (MW/ha)
Concept CPCL	25	11,61	2,16

Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira

Centrale classique	25	63	0,39
--------------------	----	----	------

Le nouveau concept CPCL est plus avantageux que la centrale classique du fait que le nouveau concept donne un rendement photovoltaïque à l'hectare de 2,16 contre 0,39 pour une centrale classique. Ce concept offre 51,39 ha représentant 81,57 % en gain de surface.

III.2.2 Simulation avec le logiciel PV_{SYST}

Les paramètres techniques et le bilan environnemental ont été modélisés à l'aide de PV_{SYST} professionnel v7.2. L'étude a commencé par la sélection des options connectés au réseau pour la centrale photovoltaïque. Ensuite, l'emplacement spécifique du site du projet doit être sélectionné à partir de l'emplacement GPS, en tenant compte de la latitude et de la longitude. Les données météorologiques de la zone sont automatiquement insérées à partir de la bibliothèque intégrée de PV_{SYST}. Après l'insertion des détails des variables météorologiques dans l'option paramètre de l'installation, les autres paramètres doivent être insérés pour estimer la puissance de sortie PV.

a) Site choisi pour la simulation

Le tronçon Dakar-Kidira comporte plusieurs sites qui peuvent être considérés comme site d'étude. Mais l'outil PV_{SYST} ne prend en compte qu'un seul lieu à la fois. Donc à chaque 30 km un lieu peut être pris comme site à étudier. Ainsi, pour mener à bien notre étude le site retenu est Kidira situé dans la région de Tambacounda (Sénégal). Au cours de l'année, la température moyenne fluctue considérablement et se situe autour de 29,15° avec les coordonnées 14,458° Nord et 12,2165° Ouest. Comme cette région à un bon ensoleillement (5,72 kWh/m²/jour), les centrales solaires photovoltaïques installées le long de la voie ferrée peuvent ajouter une quantité importante d'énergie électrique au réseau national et à l'approvisionnement du réseau ferroviaire.

La figure 15 montre la carte du réseau ferroviaire du Sénégal et la diversité de son armement.

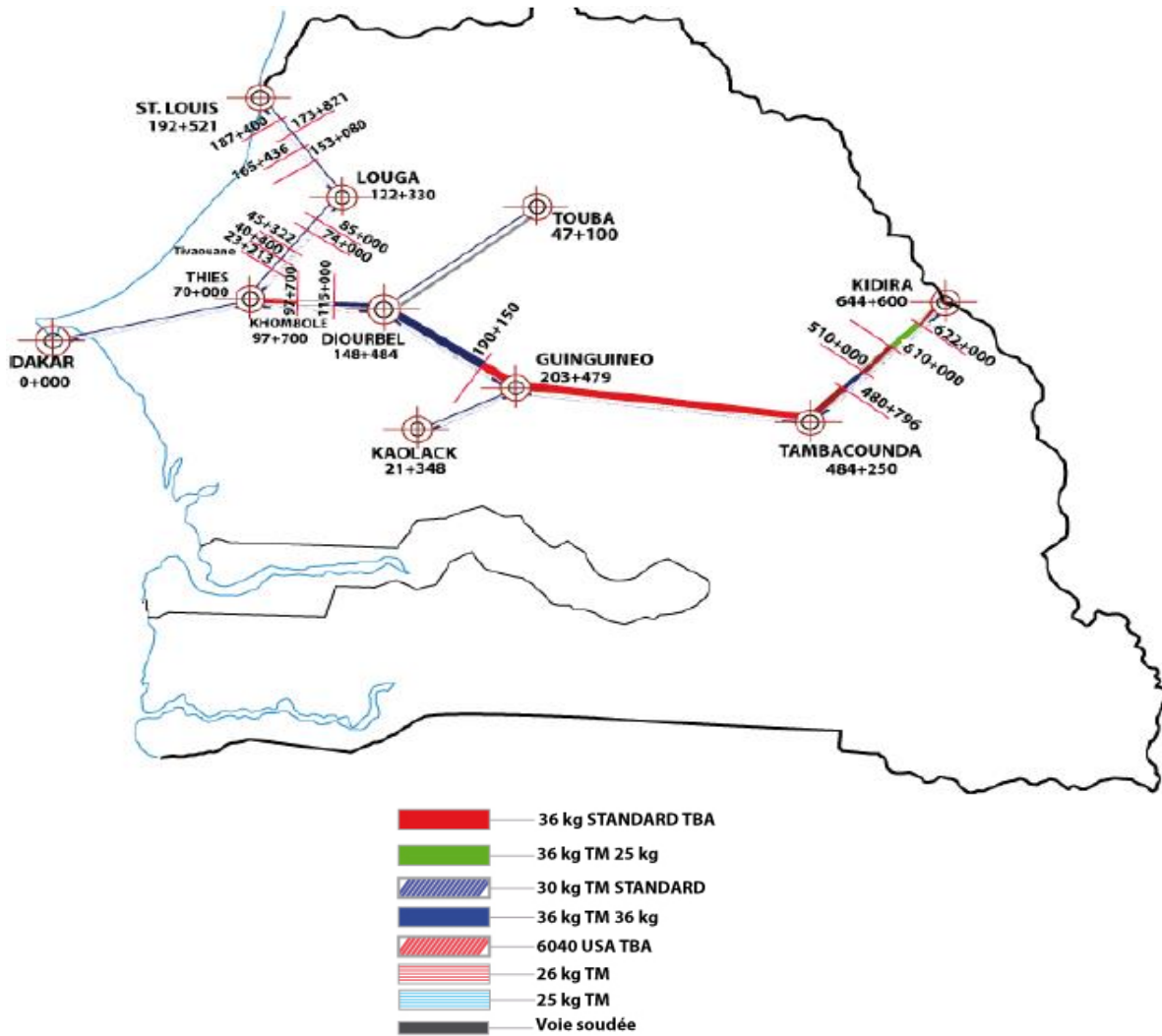


Figure 16: Carte du réseau ferroviaire du Sénégal [48]

Le tronçon Dakar-Kidira a une longueur de 644,6 km en provenance de Dakar gare d'origine. Il est constitué d'une voie double de Dakar à Thiès (70 km) ainsi que d'une voie unique Thiès à Kidira (574,6 km) [48]. La piste dispose d'un espace libre de 10 à 15 m de part et d'autre pour l'installation photovoltaïque.

b) Données climatiques

Pour l'estimation de l'irradiation globale moyenne annuelle (Irr Glob Hor), du rapport de performance (RP) et de la température ambiante (T_{amb}), l'étude a considéré la base NASA SSE comme paramètre d'entrée du rayonnement solaire de l'outils PV_{syst} . Le tableau 10 montre les principaux paramètres étudiés.

Tableau 10: données de l’irradiation globale horizontale, de la température ambiante et du rapport de performance

	Irr Glob Hor (kWh/m²)	T_amb (°C)	RP
Janvier	149,7	25,54	0,832
Février	151,5	27,84	0,819
Mars	196,2	30,34	0,797
Avril	201,6	33,00	0,797
mai	206,5	34,39	0,803
Juin	193,2	31,58	0,821
Juillet	186,3	27,66	0,841
Août	174,2	26,70	0,843
Septembre	165,0	27,25	0,825
Octobre	168,6	29,48	0,823
Novembre	154,2	29,47	0,819
Décembre	140,7	26,54	0,838
Année	2087,8	29,15	0,821

La figure17 montre l’histogramme de l’irradiation globale mensuel du site considéré.

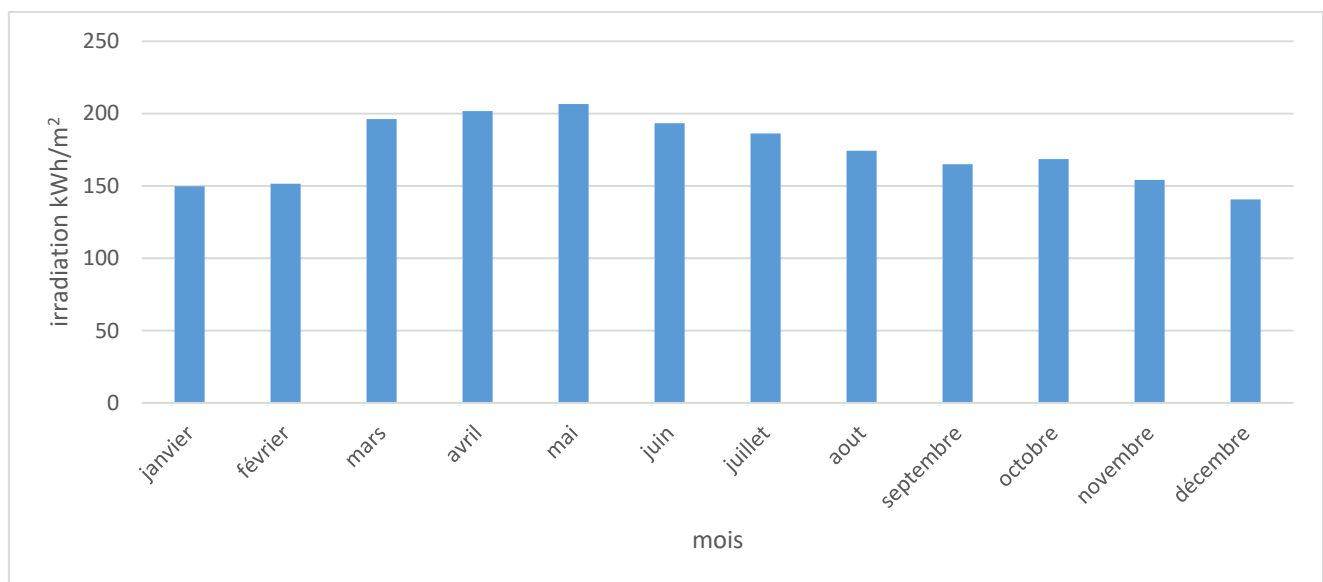


Figure 17: Irradiation horizontale globale

Le rayonnement solaire pour le site sélectionné varie de 140,7 à 206,5 kWh/m². En Mai, le rayonnement est maximum, tandis qu'en décembre le rayonnement est au minimum. Le rayonnement solaire moyen journalier étant de 5,72 kWh/m²/jour, ce qui indique un potentiel énorme pour l'utilisation de la technologie photovoltaïque. Les panneaux solaires étant sensibles à la température, les données de température ambiante sont un paramètre important. La température ambiante moyenne est de 29,2 °C comme illustré par la figure 18. Cependant, la température maximale en Mai est de 34,39 °C et la température minimale est de 25,54 °C en janvier.

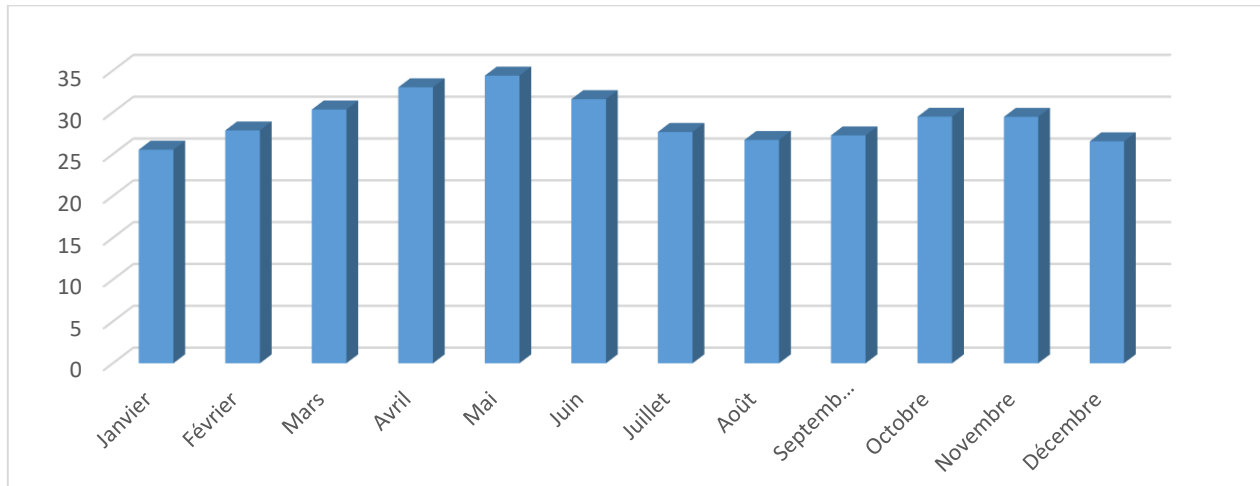


Figure 18: Température ambiante en degré C

Le dimensionnement du concept CPCL avec le logiciel PV_{sys} révèle que pour une puissance PV nominale (STC) de 25 MW_c, la puissance DC maximale est de 24 998 kW et la puissance AC nominale est de 18 450 kW_{ac}. La centrale électrique de 25 MW nécessite 45 450 panneaux de 550 W disposés sur une rangée de système de montage le long de la voie ferrée. Ainsi une surface de 116 172 m² est nécessaire pour l'implantation de la centrale.

Ces résultats entrent en étroite corrélation avec les résultats trouvés au niveau du dimensionnement manuel mais à quelques différences près qui peuvent être dus aux arrondis effectués et les pertes prises en compte par le logiciel.

La figure 19 illustre les configurations du concept CPCL avec PV_{sys}.

Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira

Définition d'un système réseau, Variante VC1: "Dakar-kidira"

Sous-champ

Nom et orientation du sous-champ
 Nom: Champ PV
 Orient.: Plan incliné fixe
 Inclinaison: 15°
 Azimut: 0°

Aide au dimensionnement
 Pas de prédim. Entrez Pnom désirée: 25000.0 kWc
 Redimens. ... ou surface disponible(modules): 116185 m²

Sélection du module PV
 Disponibles: Tous les modules PV
 Modules nécessaires approx.: 45455
 Neosun Energy: 550 Wp 36V Si-mono Neosun NS-550M-144-M8 Depuis 2021 Manufacturer 2021
 Utiliser optimiseur
 Dimens. des tensions : Vmpp (60°C) 36.5 V
 Vco (-10°C) 55.3 V

Sélection de l'onduleur

Disponibles: Tension de sortie 380 V Tri 50Hz
 50 Hz
 60 Hz
 AEG Industrial Solar Gr: 30 kW 280 - 800 V TL 50/60 AS-IC01-30000-2 (30kw, three-phase with 2 Depuis 2017
 Utilise multi-MPPT
 Nbre d'onduleurs: 615
 Tension de fonctionnement: 280-800 V Puissance globale ond.: 18450 kWac
 Tension entrée maximale: 1000 V onduleur avec 2 MPPT

Dimensionnement du champ

Nombre de modules et chaînes
 Mod. en série: 18 entre 8 et 18
 Nb. chaînes: 2525 entre 1900 et 2525
 Perte surpuissance: 0.4 %
 Rapport Pnom: 1.33

Cond. de fonctionnement
 Vmpp (60°C): 657 V
 Vmpp (20°C): 768 V
 Vco (-10°C): 995 V

Irradiance plan: 1000 W/m²
 Impp (STC): 33396 A
 Isc (STC): 34896 A
 Isc (aux STC): 34896 A

Puiss. max. en fonctionnement: 22846 kW (à 1000 W/m² et 50°C)
 Max. données STC
Puiss. nom. champ (STC): 24998 kWc

Nbre modules: 45450 Surface: 116172 m²

Figure 19: configuration du concept CPCL

L'outil a estimé un ratio Pnom de 1,33, un ratio de performance de 82,1 % et les différentes pertes qui affectent l'installation Photovoltaïque. L'outil a pris en compte 1 % de perte d'encrassement du réseau, 2 % de perte de non-concordance de module, 1 % de perte de dégradation induite par la lumière et d'autres fractions de perte telles que la perte de non-concordance de chaîne, la perte de dégradation de module, la perte de câblage CC, etc. Les résultats détaillés ont été présentés dans le tableau 11.

Tableau 11 : facteurs de pertes

Facteurs de pertes	Pourcentage de pertes
Facteur IAM sur le monde	-1,95 %
Perte photovoltaïque due au niveau d'irradiation	-0,43 %
Perte PV due à la température	11,83 %
Perte de qualité des modules	+0,75 %
Perte de non-concordance, modules et chaînes	-2,10 %
Perte de câblage ohmique	1,16 %
Perte de l'onduleur pendant le fonctionnement (efficacité)	-1,62 %
Perte de l'onduleur par rapport à l'inv. pouvoir	-1,12 %

III.3 La faisabilité financière du projet

Elle illustre le processus permettant de déterminer la valeur économique de l'investissement du projet. Dans cette partie il sera question de faire un plan de financement prévisionnel et un bilan économique pour évaluer la rentabilité du projet énergétique à l'aide du logiciel RETScreen. L'analyse financière permettra d'évaluer les flux de trésorerie du nouveau concept, qui détermine sa valeur [49]. Pour cela plusieurs critères tels que le lieu d'installation, la puissance demandée, le coût de l'installation seront pris en compte par le logiciel.

III.3.1 Présentation du logiciel RETScreen Expert

Le logiciel **expert RETScreen**[®] est un outil de décision avancé qui aide les parties prenantes à identifier, évaluer, optimiser et surveiller efficacement la performance des investissements dans les énergies renouvelables tout au long du cycle de vie du projet. Le logiciel peut servir à évaluer [50]:

- Alternatives d'énergie renouvelables
- Économies et coûts liés à la production d'énergie
- Rentabilité financière et risques associés aux énergies renouvelables et aux technologies d'efficacité énergétique
- La performance des projets réalisés

III.3.2 Les mesures financières

Pour un projet donné, l'investisseur a besoin d'un outil pour déterminer si le projet est ou non rentable. Ainsi, une variété étendue de mesures financières est disponible pour évaluer et comparer les projets énergétiques. Parmi celles-ci figurent des Temps de Retour Actualisé (TRA), du Taux

de Rentabilité Interne (TRI), des Coûts du Cycle de Vie (CCV) et des Valeur Actuelle Nette (VAN).

III.3.2.1 Temps de Retour (TR) et Temps de Retour Actualisé (TRA)

C'est la durée requise pour rembourser le coût de l'investissement, c'est-à-dire pour récupérer le montant initial du projet à travers les flux de trésorerie. Il indique le nombre d'années à partir desquelles l'investissement est rentable, c'est-à-dire, durant lesquelles l'investisseur court un risque [51]. La période de remboursement peut être calculée par la formule suivante :

$$\mathbf{TR} = \frac{F_c}{F_{no}} \quad (\text{eq. 29})$$

- F_c : capital initial associé à l'investissement (hors subventions)
- F_{no} : flux de trésorerie annuels nets d'exploitation (réels et non-actualisés)

III.3.2.2 Valeur Actuelle Nette (VAN)

La valeur actuelle nette permet d'évaluer le bénéfice de l'investissement après une période déterminée, en prenant en compte les investissements et les gains annuels du projet. Elle peut être calculée par la formule suivante [52] :

$$\mathbf{VAN} = \sum_{n=0}^N \frac{(B_n - C_n)}{(1+d)^n} \quad (\text{eq. 30}) \text{ ou}$$

$$\mathbf{VAN} = \sum_{n=0}^N \frac{F_{n,n}}{(1+d)^n} \quad (\text{eq. 31})$$

Où :

- B_n : revenus de l'année n (flux de trésorerie entrants pour l'année n) ;
- C_n : dépenses de l'année n (flux de trésorerie sortants pour l'année n) ;
- $F_{n,n}$: cash-flow net à l'année n (flux de trésorerie année n) ;
- N : durée de vie économique du projet ;
- d : taux d'actualisation annuel.

III.3.2.3 Taux de Rentabilité Interne (TRI)

Le TRI est le taux d'actualisation qui rend la valeur actuelle nette des flux entrants et sortants égale à zéro. Le TRI mesure le rendement et la rentabilité de l'investissement, en supposant que chaque gain financier est réinvesti à un taux fixe [53]. Le TRI est exprimé comme suit :

$$\mathbf{TRI} = \sum_{n=0}^N \frac{F_{i,n}}{(1+irr)^n} = \sum_{n=0}^N \frac{F_{o,n} + F_{c,n}}{(1+irr)^n} \quad (\text{eq. 32})$$

Où :

- $F_{i,n}$: flux de trésorerie entrants pour l'année n ;
- $F_{o,n}$: flux de trésorerie sortants pour l'année n ;
- $F_{c,n}$: flux de trésorerie d'investissement pour l'année n ;
- N : durée de vie économique ;
- irr : le taux d'actualisation qui satisfait l'égalité.

III.3.2.4 Coût du Cycle de Vie (CCV)

Le coût du cycle de vie d'un projet correspond à la somme de tous les coûts actualisés pendant la durée de vie du projet. Le CCV englobe les flux de trésorerie sortants associés à l'investissement, les coûts d'installation et d'exploitation, les frais de maintenance ainsi que les subventions et autres dépenses financières liées au projet. Cependant, cet indicateur ne considère pas les flux monétaires entrants (vente et économie d'énergie) ni le coût de l'énergie [54]. Ce coût peut être calculé par la formule suivante :

$$CCV = \frac{\sum_{n=0}^N (F_{c,n} + F_{o,n})}{(1+d)^n} \quad (\text{eq. 33})$$

Où :

- CCV : la valeur actuelle du coût du cycle de vie ;

III.3.3 Étude financière du nouveau concept de la centrale photovoltaïque curviligne et linéaire

A cette étape de l'étude du projet, une estimation économique du concept CPCL sera faite grâce aux logiciels Excel et RETScreen. Le tableau 12 donne les différents calculs réalisés sur Excel et des résultats obtenus sur RETScreen.

Tableau 12: rentabilité du projet

Rentabilité du Projet		
Compte d'exploitation		Unité
Estimation recettes sur les 20 ans	59 400 000 000	FCFA
Charges prévisionnelles sur les 20 ans (Y Compris coût d'investissement)	34 870 744 587	FCFA

Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira

Bénéfice du Projet sur 20 ans	24 529 255 413	FCFA
Bénéfice du Projet annuel	1 226 462 770,65	FCFA
Compte d'exploitation -10% Recettes		Unité
Estimation recettes sur les 20 ans	53 460 000 000	FCFA
Charges prévisionnelles sur les 20 ans (Y Compris coût d'investissement)	34 870 744 587	FCFA
Bénéfice du Projet sur 20 ans	18 589 255 413	FCFA
Bénéfice du Projet annuel	929 462 770,65	FCFA
Compte d'exploitation -10% Charges		Unité
Estimation recettes sur les 20 ans	59 400 000 000	FCFA
Charges prévisionnelles sur les 20 ans (Y Compris coût d'investissement)	31 383 670 128,3	FCFA
Bénéfice du Projet sur 20 ans	28 016 329 871,7	FCFA
Bénéfice du Projet annuel	1 400 816 493,585	FCFA
VAN	TRI avant impôts-capitaux propres	TRI simple
20 579 219 701 FCFA	72,1 %	3,7 ans

La rentabilité du projet est estimée avec un bénéfice de 24 529 255 413 FCFA au cours de la durée de vie du projet soit un bénéfice annuel de 1 226 462 770,65 FCFA par sous-station. La VAN du projet est de 20 579 219 701 FCFA et le taux de rendement interne égale à 72,1 % supérieur au taux d'endettement qui est de 70 %. Nous obtenons après actualisation des coûts de l'énergie, un LCOE de 60 FCFA (Prix de vente du kilowattheure du Concept CPCL). Le coût d'investissement du projet est estimé à 9 106 234 608 pour une centrale avec une économie et revenus annuels de 3 465 109 618 FCFA, un TRI avant impôts-capitaux propres de 72,1 % et un retour simple sur les capitaux propres de 3,7 ans (annexe 2 tableau).

III.4 Analyse Emission GES et Risque du projet

III.4.1 Analyse Emission GES du projet

Le bilan de gaz à effets de serre permet de faire un diagnostic des émissions de GES du projet en comparant les émissions en tonnes équivalent carbone du projet aux émissions des combustibles fossiles.

Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira

Dans la figure 20 et tableau 13, le bilan est de 16 568 tCO₂ contre 236 685 tCO₂ de litres d'essences qui permet ainsi de faire une réduction brute de 220 117 tCO₂ sur les 20 ans.

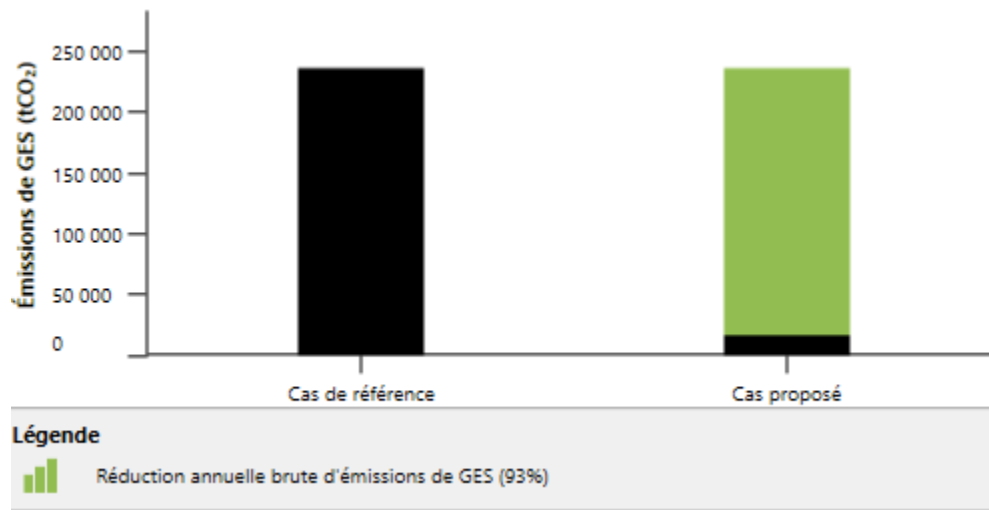


Figure 20: missions de gaz à effets de serres


Tableau 13: Equivalences de gaz à effet de serres

Analyse des émissions				
Réseau électrique de référence (Niveau de référence)		Facteur d'émissions GES (avant pertes)	Pertes t-d	Facteur d'émissions GES
Pays - région	Type de combustible	tCO ₂ /MWh	%	tCO ₂ /MWh
Sénégal	Tous les types	0,802	7,0%	0,862
Électricité exportée au réseau		MWh	274 467	Pertes t-d
				7,0%
Émissions de GES				
Cas de référence		tCO ₂	236 685	
Cas proposé		tCO ₂	16 568	
Réduction annuelle brute d'émissions de GES		tCO ₂	220 117	93%

III.4.2 Risque du projet

Les installations de centrales solaires photovoltaïques génèrent le plus souvent des risques du point de vue professionnel, incendie, électrique, etc. Dans notre cas d'étude, le risque du projet est évalué à 10 % (voir annexe 5). Le tableau 14 donne les marges à prendre en compte lors de la réalisation du projet.

Tableau 14 : Risque du projet

Analyse de risque					
Effectuer l'analyse sur	Retour sur les capitaux propres ▼				
Nombre de combinaisons	500 ▼				
Valeur de départ aléatoire	Non ▼				
Paramètre	Unité	Valeur	Plage (+/-)	Minimum	Maximum
Coûts d'investissement	XOF	9 106 234 608	25%	6 829 675 956	11 382 793 260
Exploitation et entretien	XOF	1 014 397 789	25%	760 798 342	1 267 997 236
Électricité exportée au réseau	MWh	1,03	25%	0,77	1,28
Prix de l'électricité exportée	XOF/MWh	60 000,00	25%	45 000,00	75 000,00
Coût implicite du carbone Crédit pour réduction	XOF/tCO ₂	58 500,00	25%	43 875,00	73 125,00
Ratio d'endettement	%	70,0%	25%	52,5%	87,5%
Taux d'intérêt sur la dette	%	7,00%	25%	5,25%	8,75%
Durée de l'emprunt	an	20	25%	15	25 

CONCLUSION

L'analyse technique et financière du projet nous a fourni une estimation du coût requis pour sa réalisation. Cependant un investissement de 9 106 234 608 FCFA est nécessaire pour l'installation et le bon fonctionnement du concept CPCL pour une sous-station et donc un total de 200 337 161 376 FCFA pour les 22 centrales. Ainsi, le prix du kilowattheure de la nouvelle centrale CPCL qui est de 60 FCFA est bénéfique comparé au prix du kilowattheure de la SENELEC qui tourne au tour de 90,41 FCFA aux heures pleines et de 144,65 F CFA aux heures de pointe. La centrale photovoltaïque curviligne et linéaire produit par jour une énergie de 3025 MWh qui a pour bénéfice annuelle de 1 226 462 770,65 FCFA par sous-station soit 26 982 180 954,3 FCFA pour les 22 centrales sur une courte période de temps de retour sur investissement égal à 1,4 ans pour chaque centrale de 25 MWc.

CONCLUSION GENERALE

Dans notre étude, face aux défis sociétaux et environnementaux auxquels le secteur ferroviaire doit faire face (émissions de GES avec le train de type diesel-électrique ou problèmes de chutes de tension pour les trains électriques), nous nous sommes intéressés à la viabilité technique et financière en utilisant le nouveau concept d'un Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL). Un tel système va permettre de moins solliciter la source primaire qu'est groupe diesel, de diminuer les impacts négatifs et de placer le système ferroviaire au cœur de la transition énergétique.

L'objectif général de notre travail était de contribuer au renforcement énergétique des infrastructures ferroviaires en Afrique particulièrement au Sénégal, en mettant des Champs Photovoltaïques Curviligne et Linéaire (CPCL) pour l'autonomie énergétique des sous-stations de voies ferrées distantes de moins de 40 km en énergie avec des puissances allant jusqu'à 25 MWc/sous-station.

Dans ce travail, d'abord nous avons fait dans le chapitre I une étude de l'état de l'art du transport ferroviaire avec les différents types de traction ainsi que leurs types d'alimentation. Ensuite, dans le chapitre II, la présentation technique du nouveau concept CPCL est faite ainsi que les technologies nécessaires pour la production énergétique. Enfin dans le chapitre III, nous avons fait le dimensionnement de la nouvelle centrale ainsi que l'étude financière. Ainsi, les résultats montrent que le coût d'investissement qui est de 9 106 234 608 FCFA, soit 200 337 161 376 FCFA pour les 22 centrales, offre une économie et revenus annuels de 3 465 000 000 FCFA pour une sous-station, un TRI avant impôts-capitaux propres de 72,1 % et un retour sur les capitaux propres de 1,4 an sur une durée d'exploitation de la centrale de 20 ans. Avec un tel investissement, la rentabilité a été évaluée en estimant le prix de revient du kilowattheure à 60 FCFA pour une génération du système de 3 025 MWh par jour.

Compte tenu des résultats obtenus, nous pouvons affirmer que l'installation de la centrale à proximité des voies ferrées constituerait une solution viable. Cette typologie de projet serait non seulement faisable au niveau technique, elle présenterait aussi un intérêt sur le plan commercial.

Toutefois, la génération d'électricité à l'aide de panneaux solaires installés le long de la voie ferrée pose plusieurs défis, notamment les vibrations de la voie dues au mouvement du matériel roulant réduisant ainsi les performances et la durée de vie des modules solaires et aussi il peut y avoir des obstacles juridiques et réglementaires.

Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira

Donc en guise de perspectives : il serait nécessaire de mener une étude d'impact environnemental et social, d'utiliser ce nouveau concept de Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire dans le domaine aérien.

Une étude plus complète avec un logiciel plus adapté dans un tel système sera nécessaire et donnerait plus d'informations sur les avantages et inconvénients d'un tel concept.

Une étude sur les effets des vibrations dues au passage des trains à une grande vitesse provoquant des contraintes mécaniques énormes sur les installations doit être effectuée.

Nous pouvons étudier un système hybride de production en tenant compte de la possibilité d'hybridation avec de l'énergie issue de la biomasse, de l'hydroélectricité, de l'hydrogène vert ou des batteries.

REFERENCES

-
- [1] Chester and A. Horvath. Life-cycle assessment of high-speed rail: the case of California. *Environmental Research Letters*, 5(1) :1–8, 2010. 24, 26
- [2] High-speed rail and air passenger transport : a comparison of the operational environmental performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 217, 2003. 26
- [3] <https://www.memoireonline.com/06/12/5939/Infrastructures-de-transport-et-developpement-economique-au-Senegal.html> consulté le 23 Avril 2023
- [4] Plan d'Actions National des Energies Renouvelables (PANER) SENEGAL Période [2015-2020/2030]
- [5] <https://www.axaprevention.fr/fr/article/rechauffement-climatique-transports>. consulté le 23 Avril 2023
- [6] <https://www.agenceecofin.com/transports/2209-112048-ter-de-dakar-un-pret-de-35-milliards-fcfa-approuve-par-la-boad-pour-poursuivre-la-phase-2> consulté le 23 Avril 2023
- [7] <https://transvolando.com/fr/avantages-et-inconvenients-du-transport-route/> consulté le 23 Avril 2023
- [8] <https://c.leprogres.fr/environnement/2022/08/09/train-bus-voiture-avion-quels-sont-les-transports-les-plus-polluants> consulté le 24 Avril 2023
- [9] <https://bbi-project.com/transport-ferroviaire/> consulté le 24 Avril 2023
- [10] <https://www.morganphilips.com/fr-fra/conseils-et-actus/modernisation-des-reseaux-ferroviaires-en-afrique-favoriser-les-echanges-et-promouvoir-lintegration-regionale> consulté le 24 Avril 2023
- [11] <https://www.britannica.com/technology/unit-train> consulté le 24 Avril 2023

- [12] <https://www.geo.fr/voyage/transports-quel-est-le-seul-pays-africain-a-disposer-dune-ligne-tgv-214556#:~:text=Le%20Maroc%20demeure%20le%20seul,ouest%20au%20nord%20du%20royaume.&text=Le%20Maroc%20peut%20s'enorgueillir,sur%20tout%20le%20continent%20africain.> consulté le 24 Avril 2023
- [13] https://bdumas.fr/AIDES/THEME-TRANSPORTS/INFO_VISUELLE_TRANSPORT-Format%20HTML/www.infovisual.info/05/037_fr.html consulté le 25 Avril 2023
- [14] https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_express_r%C3%A9gional consulté le 25 Avril 2023
- [15] https://www.francetvinfo.fr/economie/transports/trafic/ile-de-france-mise-en-service-du-site-internet-dedie-au-dedommagement-des-usagers-des-rer-a-et-b_2554583.html consulté le 25 Avril 2023
- [16] <https://www.la-croix.com/Economie/RER-TER-tram-Transilien-Quels-sont-differents-reseaux-trains-2022-11-28-1201244078> consulté le 25 Avril 2023
- [17] <https://www.seneplus.com/societe/les-impactes-menacent-dempecher-le-ter-de-rouler> consulté le 25 Avril 2023
- [18] Contribution aux méthodes de conception et de gestion des systèmes énergétiques multi-sources par optimisation systémique. Application aux trains hybrides électriques et autonomes
- [19] <https://www.supplychaininfo.eu/dossier-transporteur/transporteur-ferroviaire-marchandise-mode-emploi/> consulté le 27 Avril 2023
- [20] <https://patrimoinedudauphine.fr/portfolio-item/le-choix-du-1500v-continu-pour-la-traction-ferroviaire-the-choice-of-1500v-dc-for-railway-traction/> consulté le 27 Avril 2023
- [21] J. Pouget, Matériel Roulant ferroviaire. Document interne, 2013.

- [22] https://www.histoire-des-ateliers-de-quatre-mares.fr/Theme_9.html#Les%20locomotives%20diesel-%C3%A9lectriques consulté le 27 Avril 2023
- [23] MARIE PAULINE, Contribution aux méthodes de conception et de gestion des systèmes énergétiques multi-sources par optimisation systémique. Application aux trains hybrides électriques et autonomes ; Thèse
- [24] <https://openarchives.sncf.com/archive/0582lm0052-0> consulté le 27 Avril 2023
- [25] Andrea VERDICCHIO, ‘Nouvelle Électrification En Courant Continu Moyenne Tension Pour Réseau Ferroviaire’ (unpublished These, TOULOUSE)
- [26] ‘Sous-station élévatrice’, Daelim-electric, p. page web <<https://daelim-electric.com/fr/sous-station-elevatrice/>> [accessed 2 May 2023].
- [27] ‘Incident caténaire’, SNCF, s.v. page web <<https://www.sncf.com/fr/itineraire-reservation/informations-traffic/reportages/incident-catenaire>> [accessed 2 May 2023]
- [28] ‘L’ingénierie Fascinante Qui Fait Fonctionner Les Trains Électriques ! - YouTube’, s.v. pageyoutube <https://www.youtube.com/watch?v=8KjgCyNo_1U> [accessed 8 September 2023].
- [29] ‘l’électrification des Chemins de fer Suisses et Italiens par M. TRUFFÂT, Ingénieur au Service des Grandes Forces Hydrauliques du Sud-Est
- [30] ‘🔍 Locomotive électrique : définition et explications’, Techno-Science.net <<https://www.techno-science.net/definition/1588.html>> [accessed 12 April 2023]
- [31] Gabriel papaiz Gabrini ‘VD2_PAPAIZ_GARBINI_GABRIEL_25062015.Pdf’, p. page1

[32] Traction1.Pdf, chap. page1 <<https://www.thierry-lequeu.fr/data/Traction1.pdf>> [accessed 2 Septembre 2023]

[33] Romain BOSQUET, ‘Modélisation énergétique et identification des trains pour l’écoconception des lignes ferroviaires à grande vitesse’ page54

[34]https://fr.wikipedia.org/wiki/Pantographe_%28transport%29#/media/Fichier:Pantographe_IC_E_3.png consulté le 10 Septembre 2023

[35] Philippe Ladoux, Joseph Fabre, and Herve Caron, ‘Power Quality Improvement in Ac Railway Substations: The Concept of Chopper-Controlled Impedance’, IEEE Electrification Magazine, 2.3 (2014), 6–15 (p. 6–15) <<https://doi.org/10.1109/MELE.2014.2331792>>.

[36] Yasu Oura, Yoshifumi Mochinaga, and Hiroki Nagasawa, ‘Railway Electric Power Feeding Systems’, 1998.

[37] Şafak Hengirmen Tercan, ‘Second-Hand Renovated Trams as a Novel Decision Strategy for Public Transport Investment’, Transport Policy, 114 (2021), 364–71 <<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.10.012>>.

[38] https://www.wipo.int/wipo_magazine/fr/2018/04/article_0002.html consulté le 10 Septembre 2023

[39] **Diouma Kobor**, Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) pour l’Autonomie Énergétique des Sous–Stations/sous-centrales de Voies Ferrées en Afrique, de Stations de Recharges Ultra-rapides sur Autoroutes, des Aéroports et Fermes Agricoles, deposit under n° PV 1202200099 of 17/03/2022

[40] <https://fr.brsolarstructure.com/solar-pole-mount/solar-panel-pole-mount-kit.html> consulté le 10 Septembre 2023

[41] <https://fr.ensolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/39914> consulté le 10 Septembre 2023

[42] <https://fr.brsolarstructure.com/solar-pole-mount/solar-panel-pole-mount-kit.html> consulté le 11 Septembre 2023

[43] <https://fr.brsolarstructure.com/solar-pole-mount/solar-panel-pole-mount-kit.html> consulté le 17 Septembre 2023

[44] <https://www.onduleur-photovoltaïque.com/actualites/onduleur-photovoltaïque/> consulté le 17 Septembre 2023

[45] https://www.sunpalsys.com/lithium-ion-containerised-battery-backup-solar-pv-energy-storage-system_p285.html consulté le 17 Septembre 2023

[46] RESUME DE L'ETUDE ENVIRONNEMENTALE ET SOCIALE STRATEGIQUE (EESS) de la centrale de BAKEL

[47] <https://www.who.int/fr/news-room/questions-and-answers/item/electromagnetic-fields> consulté le 19 Septembre 2023

[48] **Les voies ballastées au Sénégal : Influence des facteurs** environnementaux

[49] BRIDIER Manuel, et MICHAÏLOF Serge. 1995 (5e édition). Guide pratique d'analyse de projets. Paris : Economica

[50] Analyse de projets d'énergie propres : manuel d'ingénierie et études de cas RETscreen » archive de publication du gouvernement du Canada 24 Février 2016

[51] <https://www.l-expert-comptable.com/a/52676-le-retour-sur-investissement.html> (consulté le 29 mars 2024)

[52] <https://www.lecfomasque.com/van-valeur-actuelle-nette-projet-investissement/> consulté le 29 mars 2024

[53] <https://blog.nalo.fr/lexique/taux-de-rendement-interne-tri/> consulté le 29 mars 2024

[54] Nicholas Dodd et al (2021). Level(s)- indicateur 6.1: coûts du cycle de vie Manuel d'utilisation: note d'information introductive, instructions et orientations (Version 1.1)

Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira

ANNEXES

Annexe 1 : Tableau de dimensionnement de sections de câbles rigides utilisables en cc

Tableau Erreur ! Document principal seulement.: tableau de dimensionnement de sections de câbles rigides utilisables en cc

TABLEAU DE DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DE CABLES *RIGIDES* UTILISABLE EN COURANT CONTINU

Tension nominale (V) : 48 Chute de tension maxi : 3,00% Température de l'ame : 60°C

Ampère \ Mètre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	35	40	45	50	
1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	4	
3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	4	4	4	6
4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4	4	6	6	6	6
5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4	4	4	4	4	4	6	6	6	10	10
6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6	10	10	10	10
7	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6	10	10	10	10
8	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10
9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10
10	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10
11	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10
12	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10
13	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10
14	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
15	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	4	4	4	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
16	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	4	4	4	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
17	1,5	1,5	1,5	2,5	4	4	4	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
18	1,5	1,5	2,5	2,5	4	4	4	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
19	1,5	1,5	2,5	2,5	4	4	4	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
20	1,5	1,5	2,5	2,5	4	4	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
25	1,5	1,5	2,5	4	4	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
30	1,5	2,5	4	4	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
35	1,5	2,5	4	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
40	1,5	2,5	4	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
45	1,5	4	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
50	1,5	4	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
60	2,5	4	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
70	2,5	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
80	2,5	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
90	4	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
100	4	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Annexe 2 : Tableau de dimensionnement de sections de câbles rigides utilisables en CA

Tableau Erreur ! Document principal seulement.:6: Tableau de dimensionnement de sections de câbles rigides utilisables en CA

Application du Concept Champ Photovoltaïque Curviligne et Linéaire (CPCL) dans le domaine ferroviaire : Étude et simulation pour la ligne Dakar – Kidira

P (kw)	I (A)	section (mm ²)												
		1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150
0,5	2,3	100	165	265	395									
1	4,6	60	84	135	200	335	530							
1,5	6,8	33	57	90	130	225	355	565						
2	9,1	25	43	68	100	170	285	430	595					
2,5	11,4	20	34	54	80	135	210	340	470	630				
3	13,6	17	29	45	66	110	180	285	395	520				
3,5	16	14	24	39	56	95	155	245	335	450				
4	18	21	34	49	84	135	210	295	395	580				
4,5	20	19	30	44	75	120	190	260	350	515				
5	23	27	39	56	105	170	235	315	460	630				
6	27	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
7	32	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
8	36	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
9	41	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
10	45	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
12	55	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
14	64	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
16	73	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
18	82	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
20	91	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
25	114	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
30	136	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
35	159	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
40	182	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
45	205	23	32	48	84	140	210	295	415	580				
50	227	23	32	48	84	140	210	295	415	580				

Annexe 3: Etude de la faisabilité financière du concept CSPCL

Tableau Erreur ! Document principal seulement.7: analyse des couts du concept CSPCL

Coûts | Économies | Revenus

Coûts d'investissement			
Equipement et matériel	78,6%	XOF	7 161 230 890
Equipement et matériel de rechange	21,4%	XOF	1 945 003 718
Total des coûts d'investissement	100%	XOF	9 106 234 608
Encouragements et subventions		XOF	0
Flux monétaires annuels - An 1			
Frais annuels et paiements de la dette			
Amortissement		XOF	357 529 400
Défini par l'utilisateur		XOF	4 173 500
Salaire		XOF	51 000 000
Paiements de la dette - 20 ans		XOF	601 694 889
Total des frais annuels		XOF	1 014 397 789
Économies et revenus annuels			
Défini par l'utilisateur		XOF	3 465 000 000
Économies de réduction de GES		XOF	0
Total des économies et des revenus annuels		XOF	3 465 000 000
Flux monétaire annuel net - An 1		XOF	2 450 602 211

Cumulatif

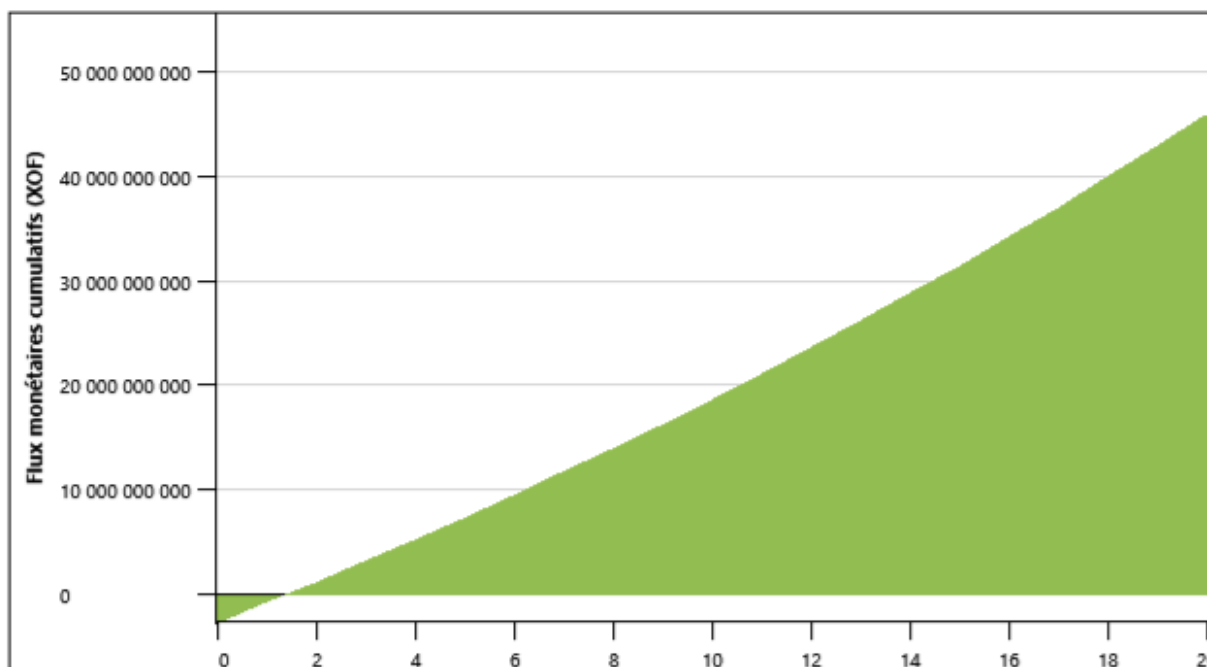


Figure Erreur ! Document principal seulement.: Analyse financière du Concept CSPCL

Annexe 4: paramètres financières

Tableau Erreur ! Document principal seulement.8: paramètres financières

Viabilité financière

Paramètres financiers

Taux d'inflation	%	2%
Durée de vie du projet	an	20
Ratio d'endettement	%	70%
Taux d'intérêt sur la dette	%	7%
Durée de l'emprunt	an	20

Tableau Erreur ! Document principal seulement.9: viabilité financier

Viabilité financière

TRI avant impôt - capitaux propres	%	72,1%
TRI avant impôt - actifs	%	22,9%
Retour simple	an	3,7
Retour sur les capitaux propres	an	1,4

Annexe 5 : Analyse risque du projet

Médiane	an	0,15
Niveau de risque	%	10%
Minimum de l'intervalle de confiance	an	0,1
Maximum de l'intervalle de confiance	an	0,22