



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Energie et environnement

*Présenté par :*

*M. Chellal Majd et Melle. Belkhir Chaimaa*

Thème

**Modélisation d'un réseau électrique de  
tramway de Tlemcen**

Soutenu publiquement, le 27 / 09 / 2020 , devant le jury composé de :

M. Merad. L	Professeur	ESSA. Tlemcen	Président
Mme Sebbagh. H	MCB	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mme Chakroune. S	MCA	UAB. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Mme. Bousmaha. I	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M. Abdellaoui. G	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Invité: M. Megnafi. H      MCB      ESSA. Tlemcen

Année universitaire : 2019 / 2020



## *Dédicace :*

*Je dédie ce travail :*

*À la prunelle de mes yeux, À vous : « Mes chers  
parents ».*

*À celle qui m'a donné la vie, qui a bercé mes nuits, à mon  
soleil qui brille, le symbole de tendresse, à ma chère  
mère : « Fatima »*

*À celui qui a épuisé sa jeunesse et sa vie, qui n'a vécu que  
pour me voir un jour réussir, À mon premier encadrant  
depuis ma naissance, À mon cher père : « Mohammed »*

*À toutes mes sœurs et mon frère, à qui je souhaite  
beaucoup de réussite et de bonheur.*

*À celui qui ont été toujours prêt à mon appel, qui ont  
sacrifié leur temps et leurs efforts à mon secours, À mes  
encadrants « Mme. Sebbagh » et « Mme. Chekroun »*

*Chaimaa*



## *Dédicace :*

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ce qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arrive jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

*À l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon adorable père.*

*À la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux : mon adorable mère.*

*À mes chers et adorable frères et sœurs.*

*En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.*

*Majd*



## *Remerciements :*

*Nous remercions ALLAH le clément le miséricordieux  
De nous avoir donné, toujours la patience et la foi pour atteindre nos buts.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude envers nos encadreurs "Mme Sebbagh.H" et "Mme Chaïroune.S" pour leur grande disponibilité et encouragements tout au long de l'élaboration de ce mémoire.*

*Nos vifs remerciements vont à "Mme Bousmaha.I" pour leur précieuses informations*

*Nous remercions monsieur "Merad.L", madame" Bousmaha.I " et monsieur "Abdellaoui.G" pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Nos remerciements vont également à tous les enseignants de l'ESSAT de Tlemcen, qui ont contribué à notre formation.*

*Nos remerciements vont également au groupe de courant fort de la filiale de CITAL à Sétif, qui ont contribué à notre thèse.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans ce projet de fin d'études.*



## Résumé

La wilaya de Tlemcen a connu récemment une population dense d'une manière répartie dans toute la région, d'autre part l'effectifs scolaires et universitaires deviennent des grands influenceurs sur la mobilité de la wilaya, cette raison mène à insérer un système de transport durable et écologique qui est le tramway. En 2014, l'entreprise portugaise **FERCONSSULT** a défini des corridors à court et long terme qui englobe toute l'agglomération de Tlemcen, malheureusement ce projet était prolongé jusqu'à maintenant à cause de plusieurs occupations et contraintes techniques et économiques.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la faisabilité de ce système. Dans ce contexte, l'évaluation de faisabilité nécessite une connaissance précise du projet dans son intégralité tout en garantissant le bon fonctionnement du système dans les conditions critiques.

Pour répondre à cette problématique, deux itinéraires en conformité avec les normes internationales sont proposés à l'aide de l'étude abordée par l'entreprise. Les caractéristiques de ces deux itinéraires proposés nous ont permis d'estimer le nombre de rames nécessaires et le besoin énergétique en heures de pointe sachant que cette énergie est assurée par le fournisseur d'énergie (**SONELGAZ**) en la transformant en énergie captée par le tramway via des sous-stations de traction tout en respectant les normes nationales et internationales de la conception.

**Mots clés :** Tramway ; Sous-station ; Réseau électrique ; Itinéraires ; Puissance.

---

## Abstract

The city of Tlemcen has recently experienced a dense population distributed throughout the region, on the other hand, the school and university population are becoming great influencers on the mobility of the city, these reasons lead to insert a sustainable and ecological transport system, which is the tramway. In 2014, the Portuguese company **FERCONSSULT** has defined short and long-term corridors which include all the agglomeration of Tlemcen. Unfortunately, this project was extended until now because of several occupations and technical and economic constraints.

The objective of this study is to assess the feasibility of this system. In this context, the feasibility assessment requires a precise knowledge of the project in its entirety while guaranteeing the proper functioning of the system under critical conditions.

To answer this problem, two routes in conformity with international standards are proposed with the help of the study approached by the company. The characteristics of these two proposed routes have allowed us to estimate the number of trains needed and the energy requirement at peak hours knowing that this energy is provided by the energy supplier (**SONELGAZ**) by transforming it into energy captured by the tramway via traction substations while complying with national and international design standards.

**Keywords:** Tram; Substation; Power grid; Itinerary; Power

## ملخص

شهدت ولاية تلمسان مؤخرًا كثافة سكانية منتشرة في جميع أنحاء المنطقة، ومن ناحية أخرى أصبح التعداد البشري في المدارس والجامعات من المؤثرين الرئيسيين على النقل في الولاية، وهاذه الاسباب شجعت إدخال نظام نقل مستدام ويتمشى مع البيئية النظيفة و هو الترام. في عام 2014 ، حددت شركة **FERCONSSULT** البرتغالية ممرات على المدى القصير والبعيد تشمل التكتل السكاني لولاية تلمسان بأكملها ، وللأسف تم تمديد هذا المشروع حتى الآن بسبب العديد من القيود التقنية والاقتصادية.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم إمكانية إدخال هذا النظام. في هذا السياق ، يتطلب تقييم الجدوى معرفة دقيقة بالمشروع بأكمله مع ضمان السير الصحيح للنظام في ظل الظروف الحرجة. لمعالجة هذه المشكلة ، تم اقتراح مسارين وفقاً للمعايير الدولية باستخدام الدراسة التي أجرتها الشركة. سمحت لنا خصائص هذين المسارين المقترحين بتقدير عدد القطارات اللازمة واحتياجات الطاقة في ساعات الذروة. مع العلم أن هذه الطاقة يتم توفيرها من قبل مورد الطاقة (**SONELGAZ**) من خلال تحويلها إلى طاقة يتم التقاطها بواسطة الترام عبر محطات الجر الفرعية مع احترام معايير التصميم الوطنية والدولية.

**الكلمات المفتاحية :** ترام ; محطة فرعية ; شبكة كهربائية ; مسارات ; استطاعة

# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Résumé en arabe</b>	<b>ix</b>
<b>Table des figures</b>	<b>xi</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xii</b>
<b>Liste d'abréviations</b>	<b>xiv</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Réseau d'alimentation de tramway</b>	<b>3</b>
Introduction . . . . .	3
1.1 Structures d'alimentation du tramway . . . . .	3
1.1.1 Système caténaire . . . . .	4
1.1.2 Le captage du courant . . . . .	7
1.2 Présentation des équipements . . . . .	9
1.2.1 Sous stations de traction . . . . .	9
1.2.2 Matériel roulant . . . . .	10
1.2.3 Chaîne de traction de démarrage et de freinage du tramway . .	12
1.2.4 Retour des courants de traction (courants vagabonds) . . . . .	14
1.3 Stockage énergétique et production embarquée . . . . .	15
1.3.1 Domaines d'applications . . . . .	15
1.3.2 Techniques modernes pour le stockage énergétique en trac- tion . . . . .	16
Conclusion . . . . .	17
<b>2 Itinéraire et infrastructures statiques</b>	<b>19</b>
Introduction . . . . .	19
2.1 FERCONSULT . . . . .	19

2.1.1	Prévision des données socio-économiques . . . . .	20
2.1.2	Définition du réseau par FERCONSULT . . . . .	21
2.1.3	Description des différents scénarios . . . . .	22
2.2	La disponibilité et l'assurance d'énergie . . . . .	25
2.2.1	Le fournisseur d'électricité (SONELGAZ) . . . . .	25
2.2.2	Gestionnaire du Réseau de Transport de l'Electricité . . . . .	26
2.2.3	Réseaux d'électricité (SONELGAZ) . . . . .	26
2.3	Les infrastructures statiques du système ferroviaire . . . . .	27
2.3.1	Poste Haute Tension (PHT) . . . . .	27
2.3.2	Les sous stations de traction (SST) . . . . .	35
	Conclusion . . . . .	40
<b>3</b>	<b>Dimensionnement des itinéraires proposés du tramway</b>	<b>41</b>
	Introduction . . . . .	41
3.1	Choix d'itinéraire . . . . .	41
3.1.1	La normalisation d'itinéraire . . . . .	43
3.2	Dimensionnement des sous stations de traction . . . . .	46
3.2.1	Données d'entrée du premier tronçon : . . . . .	46
3.2.2	Demande du courant de traction . . . . .	47
3.2.3	La puissance nécessaire pour dépasser la résistance de démarrage . . . . .	47
3.2.4	La puissance moyenne demandée par une rame . . . . .	48
3.2.5	Nombre total des rames sur la ligne aux heures de pointes . . . . .	49
3.2.6	Puissance totale de traction aux heures de pointes . . . . .	49
3.2.7	Sous station de traction . . . . .	50
3.2.8	Évaluation de la capacité du courant de la ligne aérienne de contact . . . . .	52
3.2.9	Évaluation de la LAC dans les conditions critiques (cas d'une sous station hors tension) . . . . .	53
3.3	Choix de l'alimentation d'arrivée . . . . .	54
3.3.1	Bilan de puissance . . . . .	55
3.3.2	Capacité d'énergie disponible dans les postes sources . . . . .	55
3.3.3	Le moment électrique . . . . .	56
3.4	Schéma unifilaire du PHT . . . . .	58
3.5	La topologie de raccordement de la boucle . . . . .	59
3.6	Réseau d'alimentation de traction . . . . .	60
	Conclusion . . . . .	61
	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>64</b>



<b>Bibliographie</b>	<b>64</b>
<b>A Annexe A :</b>	<b>67</b>
A.1 NF C 63-130 . . . . .	67
A.2 CEI 60044-1 . . . . .	67
A.3 CEI 60044-2 . . . . .	67
A.4 IEC 60076-1 . . . . .	67
A.5 EN 50123-X . . . . .	68
A.6 NFEN60146 . . . . .	68
A.7 NF F 41-023 . . . . .	68
A.8 CEI 60255 . . . . .	68
A.9 EN 50122-1 . . . . .	68
A.10 NF C15-100 . . . . .	69
A.11 EN 50163 . . . . .	69
A.12 EN 50329 classe de service V . . . . .	69
A.13 EN/IEC 60146-1-1 classe de service V . . . . .	69
A.14 EN 60044 . . . . .	70
A.15 NF C 52-100 . . . . .	70
A.16 EN 50 119 . . . . .	70
A.17 IEC 60502 . . . . .	70
<b>B Annexe B :</b>	<b>71</b>
B.1 Légende du schéma unifilaire des SST : . . . . .	71
B.2 Légende du schéma unifilaire du PHT : . . . . .	72
<b>C Annexe C :</b>	<b>73</b>
C.1 Code matlab (Dimmensionnement des sous stations de traction ) . . .	73
C.2 Chute de tension sur la ligne aérienne de contact . . . . .	74

# Table des figures

1.1	<i>Vision globale d'un réseau de tramway</i>	4
1.2	<i>Schéma de l'alimentation par le sol</i>	5
1.3	<i>Système d'alimentation par le sol par ANSALDO</i>	5
1.4	<i>Système APS d'INNORAIL</i>	6
1.5	<i>Coupe transversale d'ALISS</i>	6
1.6	<i>Ligne aérienne de contact</i>	7
1.7	<i>Le pantographe</i>	8
1.8	<i>Illustration d'une sous station</i>	9
1.9	<i>Bogie au cours de construction.</i>	11
1.10	<i>Schéma électrique simplifié du tramway</i>	12
1.11	<i>Effort de traction d'un CITADIS 402 en fonction de sa vitesse</i>	13
1.12	<i>Courant de traction d'un CITADIS 402 en fonction de sa vitesse</i>	13
1.13	<i>Mode opératoire en freinage électrique.</i>	14
1.14	<i>Chemin de circulation des courants vagabonds</i>	15
1.15	<i>Comparaison global entre les technologies de stockages en traction</i>	17
2.1	<i>L'évolution de la population entre 2013 et 2025</i>	20
2.2	<i>Les positions des deux grands pôles universitaires.</i>	21
2.3	<i>Les quatre corridors proposés par FERCONSULT</i>	22
2.4	<i>Le premier scénario proposé par FERCONSULT</i>	22
2.5	<i>Le deuxième scénario proposé par FERCONSULT</i>	23
2.6	<i>Le troisième scénario proposé par FERCONSULT</i>	23
2.7	<i>Le quatrième scénario proposé par FERCONSULT</i>	24
2.8	<i>Schéma unifilaire du poste répartiteur</i>	28
2.9	<i>Architecture du PHT à double antenne avec double jeux de barres</i>	29
2.10	<i>Sectionneur</i>	30
2.11	<i>Disjoncteur</i>	31
2.12	<i>Parafoudre</i>	31
2.13	<i>Transformateur de tension</i>	32
2.14	<i>Transformateur de courant</i>	33
2.15	<i>Schéma simplifier du point neutre artificiel (PNA).</i>	33

2.16	<i>Transformateur de puissance</i>	34
2.17	<i>Jeux de barres de puissance</i>	34
2.18	<i>Circuit bouchon</i>	35
2.19	<i>Système d'alimentation sans interruption passive sur AutoCAD)</i>	38
2.20	<i>Schéma unifilaire de la SST en T</i>	39
2.21	<i>Schéma unifilaire de la SST en II</i>	40
3.1	Le premier itinéraire proposé	42
3.2	Le deuxième itinéraire proposé	43
3.3	Calcul de la pente entre A et B.	44
3.4	Calcul de la pente entre C et D.	45
3.5	Calcul de la pente entre E et F.	46
3.6	Résultats du programme pour la première ligne.	52
3.7	Résultats du programme pour le deuxième tronçon	52
3.8	La distance entre les deux postes sources et le poste haute tension de tramway.	57
3.9	Schéma unifilaire d'un PHT [annexe B.2]	59
3.10	Raccordement des sous stations	60
3.11	Schéma général du système d'alimentation de traction.	61

# Liste des tableaux

2.1	L'évolution de la mobilité 2025/2030 . . . . .	21
2.2	Classification des tensions pour les réseaux électriques. . . . .	26
2.3	Les équipements d'une SST . . . . .	36
3.1	La puissance installée . . . . .	55
3.2	La puissance totale en heure de pointe . . . . .	55
3.3	Les exigences du raccordement au réseau. . . . .	56

# Liste d'abréviations

APS	Alimentation Par le Sol
BTA	Basse Tension A
BTB	Basse Tension B
CPI	Contrôleur Permanent d'Isolemen
DA	Disjoncteur d'Arrivée
DHTA-R	Disjoncteur HTA de groupe de traction
DS	Disjoncteur de départ
DS-S	Disjoncteur boucle Secours
DUR	Disjoncteur ultra Rapides
GRTE	Gestionnaire du Réseau de Transport de l'Electricité
h	Heure
HPS	Heure de Pointes du Soir
HTA	Haute Tension A
HTB	Haute Tension B
JdB	Jeux de Barres
LAC	Lignes Aériennes de Contact
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PHT	Post Haute Tension
PNA	Point Neutre Artificiel
s	Seconde
SIA	Sectionneur d'Isolément Automatique
Sonelgaz	Société Nationale de l'Electricité et du Gaz

SST Sous-Station de Traction

SSTD Sous-Station de Traction au Dépôt

STREAM Système de Transport Electrique à Attraction Magnétique

TBT Très Basse Tension

TC Transformateur de Courant

TGBT Tableau Général de Basse Tension

TPT Tableau de Protection Traction

TRA Transformateur Auxiliaire

TRT Transformateur de Traction

TT Transformateur de Tension

# Introduction générale

Le tramway est redevenu aujourd'hui le mode de transport collectif urbain le plus répandu dans le monde. La politique Algérienne en matière de transport collectif dans les grandes agglomérations, adoptée depuis quelques années, a retenu ce mode de transport pour nos villes pour sortir de l'impasse des encombrements sur les routes occasionnées par des milliers de véhicules. La forte croissance démographique semble la cause principale de ce désagrément où le transport traditionnel par bus est devenu inadapté car il contribue à aggraver les conditions de circulation et ne répond pas aux exigences des voyageurs en matière de confort et de sécurité. C'est dans ce contexte que le projet du tramway de Tlemcen a été élaboré dans le but de désengorger cette ville de très forte densité de population.

En 2014, la société portugaise FERCONSULT a proposé des corridors et des itinéraires pour la circulation du tramway de la wilaya de Tlemcen sans modéliser le réseau d'alimentation électrique. D'un point de vue électrotechnique, la réalisation du tramway nécessite une bonne modélisation du réseau d'alimentation de traction, ce dernier sera l'objectif de ce projet de fin d'études.

L'étude d'un réseau de traction électrique du tramway nécessite une vision et une connaissance du système dans son intégralité. Les analyses de son comportement, lors des scénarios de fonctionnement, requièrent toutefois un regard précis et localisé sur les composants du système.

Ce mémoire est partagé en trois chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous donnerons des généralités sur le réseau de tramway électrique en présentant ses structures et ses équipements. De plus, nous parlerons du stockage énergétique et de la production embarquée.

Dans le chapitre qui le suit, nous aborderons d'abord l'étude du projet du tramway à Tlemcen, les corridors et les scénarios proposés par FERCONSULT. Ensuite, après avoir présenté le fournisseur d'électricité en Algérie (SONELGAZ), nous fe-

rons une description du réseau de traction électrique et les équipements utilisés pour assurer un bon fonctionnement de tramway.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons d'abord les itinéraires que nous avons proposés. Ensuite, par une approche de consommation spécifique, nous ferons un dimensionnement des besoins énergétiques des tronçons proposés pour le but de schématiser et modéliser le réseau d'alimentation de traction électrique.

Nous terminons le travail par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.



# Réseau d'alimentation de tramway

## Introduction

Les machines à courant continu ont été les premières machines électriques utilisées dans le domaine ferroviaire, et puisqu'elles étaient les premières machines inventées alors l'alimentation ferroviaire doit être continue. Mais avec l'apparition des machines à courant alternatif et des convertisseurs statiques, la possibilité offerte pour la traction électrique s'est élargie, mais la base de l'alimentation en continue est restée inchangée.

Sachant qu'en Algérie le réseau électrique est en alternatif et le captage du courant est en continu, alors l'assurance d'énergie aux motrices du système doit être garantie par une structure de transformation énergétique robuste et permanente soit en mode générateur ou en mode moteur, cela assure la protection humaine d'une part et améliore les performances du système en exploitation normal, dégradée et en heures de pointe.

On va abordé dans ce premier chapitre les points cités précédemment en détail.

## 1.1 Structures d'alimentation du tramway

Cette section présente différents moyens de distribution de l'énergie électrique pour les applications du transport électrique urbain tramway. Notamment, les variantes aux Lignes Aériennes de Contact (LAC) rendues viables grâce aux avancées technologiques ainsi que les différentes méthodes d'alimentation par le sol, le rôle de la sous station et ses éléments, le matériel roulant ferroviaire, le courant de traction Vagabonds de retour, et la manière de captage de courant par le moyen du pantographe.

La figure 1.1 [1] donne une vision globale d'un réseau d'alimentation électrique de tramway doté d'une LAC et d'une Alimentation Par le Sol (APS).

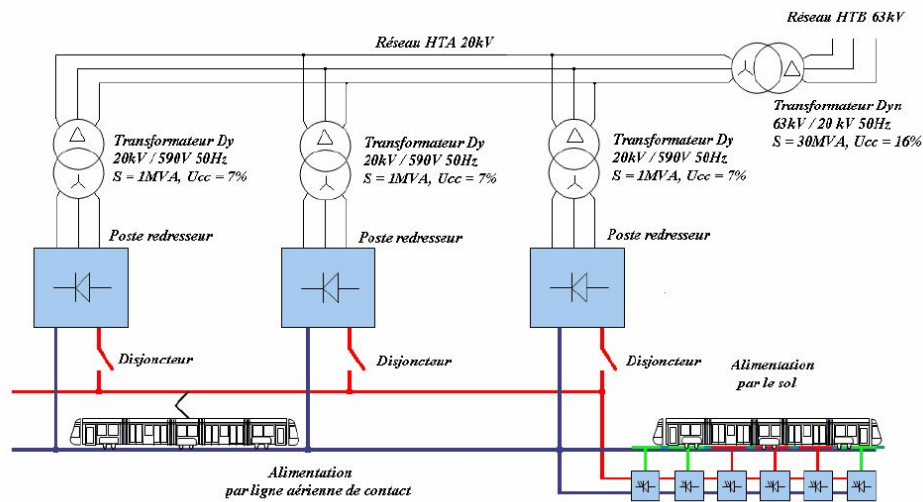


FIGURE 1.1: Vision globale d'un réseau de tramway

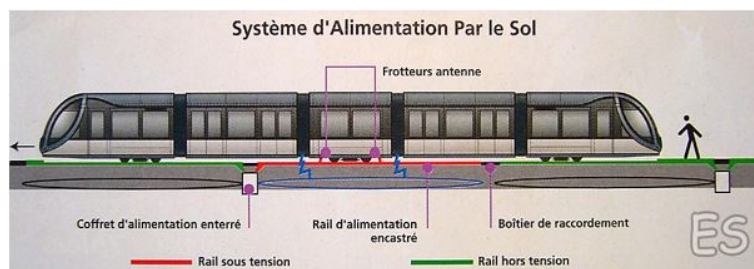
### 1.1.1 Système caténaire

Le système caténaire permet de répartir le courant fourni par les sous stations et de l'acheminer jusqu'à la motrice. Il y a deux catégories de sous-système caténaire :

#### 1. Alimentation par le sol :

Elle a été introduite à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Aujourd'hui, elle est réalisée par un troisième rail encastré au milieu des voies et l'énergie électrique (750 V) est captée par l'intermédiaire de deux frotteurs situés au-dessous et au milieu de la rame. Ce rail est constitué par des segments de 8 m séparés par des joints isolants de 3 m.

Chaque tonçon est contrôlé par des coffrets d'alimentation, disposés dans l'entrevoie tous les 22 m. Une antenne proche des frotteurs permet aux coffrets de détecter la présence du tramway : C'est alors que le segment concerné se met sous tension [2].



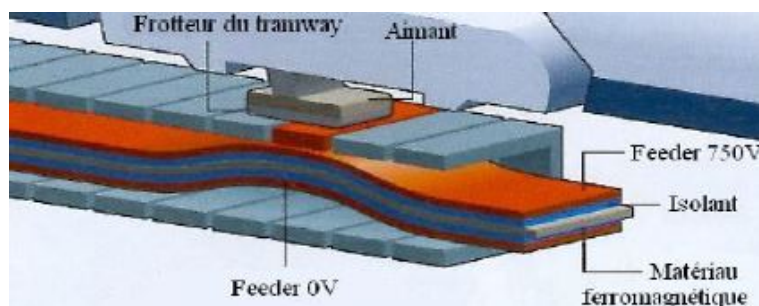
**FIGURE 1.2:** Schéma de l'alimentation par le sol

Sur le schéma dans la figure 1.2 [37], les segments rouges représentent la partie sous tension qui se déplace avec le véhicule et ne débore jamais du tram. Les segments verts représentent la partie hors tension et ils sont sans danger.

Il existe actuellement trois procédés de mise sous tension de secteurs conducteurs au passage du tramway.

— **Le procédé STREAM d'ANSALDO :**

Sous chaque véhicule, un aimant permanent est associé au frotteur positif. Lors du mouvement du véhicule, le matériau ferromagnétique est ainsi attiré vers le haut, mettant en contact le feeder positif et un ou deux secteurs conducteurs. Le frotteur du véhicule passe alors au potentiel 750 V (figure 1.3) [3].



**FIGURE 1.3:** Système d'alimentation par le sol par ANSALDO

— **INNORAIL :**

Le principe de base du procédé d'APS d'INNORAIL est le même que celui développé par ALSTOM<sup>1</sup>. Ces systèmes sont composés d'un ensemble de secteurs conducteurs, isolés électriquement les uns des autres. Ces

1. Société basée en France, spécialisée dans les secteurs des transports, principalement ferroviaires (trains, tramways et métros)

secteurs se situent entre les rails de roulement, au milieu de la voie. Chez INNORAIL, les secteurs sont commutés au fur et à mesure de l'avancement du tramway par des contacteurs. La présence du véhicule est signalée grâce à une boucle d'induction [4].

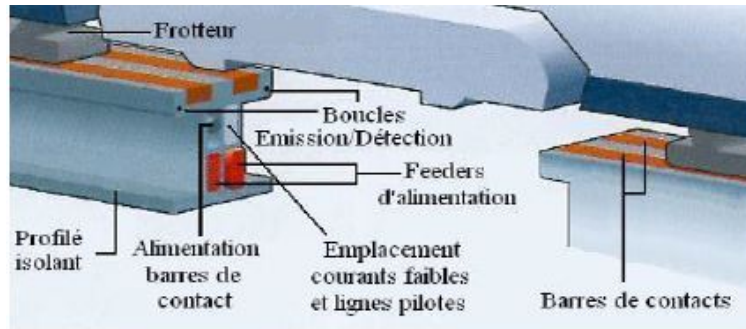


FIGURE 1.4: Système APS d'INNORAIL

— **Le procédé ALISS :**

Breveté par ALSTOM en 1998 à la différence d'INNORAIL, la localisation des tramways est réalisée grâce à l'émission réception d'un signal porteur, hautement sécurisé, issu de chaque véhicule. Ce signal transite via le frotteur du véhicule est analysé par le module de commutation à l'aplomb du secteur en contact avec le frotteur. La mise sous tension est assurée grâce à la commutation d'interrupteurs de puissance IGBTs [1].

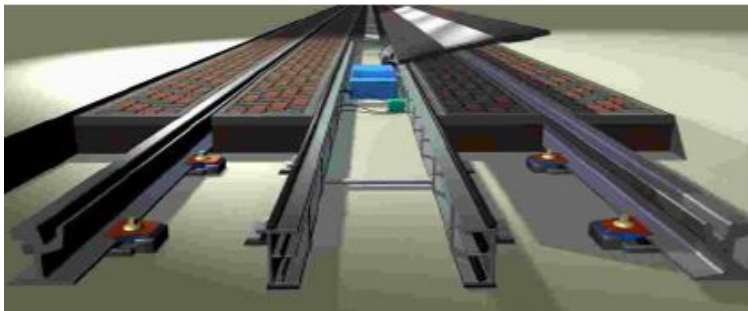
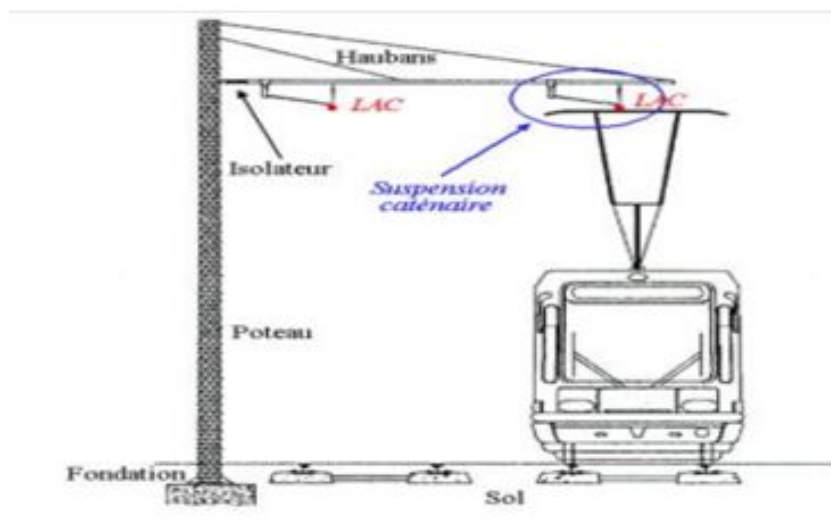


FIGURE 1.5: Coupe transversale d'ALISS

2. **La ligne aérienne de contact (LAC) :** La ligne aérienne de contact (figure 1.6) [6] est composée d'un fil de contact suspendu à un câble porteur par une série de pendule, le fil de contact est tendu mécaniquement de part et d'autre sur des poteaux installés à un intervalle régulier ou accroché aux façades des immeubles [5].



**FIGURE 1.6:** *Ligne aérienne de contact*

La LAC a une section de 102 à 150  $mm^2$  suivant la valeur des courants prévus dans les conditions les plus défavorables, a une section ronde ou ovale et comporte dans sa partie supérieure un talon formé à la tréfilerie permettant au fil d'être pris dans une pince de suspension.

Les fils de contact sont généralement en cuivre électrolytique à haut degré de pureté pour avoir la résistance électrique la plus faible. La ligne aérienne est divisée en section ce qui permet d'isoler une portion de réseau en cas de défaut [5].

### 1.1.2 Le captage du courant

Que l'alimentation soit aérienne ou au sol, son principe reste le même : un frotteur vient en contact avec un rail ou un fil pour capter le courant. La liaison entre le frotteur et l'alimentation permet un débattement vertical pour absorber les irrégularités de la ligne. Le troisième rail permet d'avoir un gabarit plus réduit et demande une infrastructure moins lourde que le contact aérien. Il a par contre l'inconvénient de limiter la tension utilisable et d'être dangereux pour la sécurité des gens qui marchent à côté de la voie. Les tensions les plus utilisées sont :

- Rail conducteur : 600  $V$  à 750  $V$  continu ;
- Aérien : 750  $V$  continu ;
- Aérien : 1 500  $V$  continu ;
- Aérien : 3 000  $V$  continu ;
- Aérien : 15 000  $V$  alternatif en 16.67  $Hz$
- Aérien : 25 000  $V$  alternatif 50  $Hz$  (fréquence industrielle).

1. **Fil de contact aérien** : Pour la ligne aérienne, la captation du courant sur la ligne est assurée par un appareil dit pantographe comprenant une structure articulée fixée sur le toit d'une rame ferroviaire.

— **Pantographe** :

Le pantographe est un assemblage de tubes articulés ou non, fixé sur le toit d'une locomotive au moyen d'isolateurs. Il assure un contact permanent quel que soit la hauteur du fil de contact grâce à son déploiement variable [?].



FIGURE 1.7: *Le pantographe*

Les premiers pantographes avaient la forme symétrique d'un losange, tandis que les pantographes modernes ne comportent qu'un seul bras articulé. Ils mesurent environ  $2\text{ m}$  repliés et assurent un débattement qui peut atteindre  $3,20\text{ m}$ . Le contact avec la caténaire se fait par une pièce horizontale appelée l'archet. Le bras articulé est formé de deux éléments, le bras inférieur et le bras supérieur. Le pantographe peut être pneumatique ou électrique.

- (a) Pour les pantographes pneumatiques, le déploiement du bras est assuré par un vérin pneumatique qui permet de maintenir une certaine pression sur la caténaire. Le pantographe se replie par gravité lorsque la pression d'air est annulée.
- (b) Pour les pantographes électriques, les mouvements de montée et de descente sont assurés par un moteur électrique annexe.

Des bandes de carbone (en général 2) sont fixées sur l'archet, elles frottent sur le fil de contact et permettent ainsi de capter l'énergie.

Afin de maintenir une pression la plus constante possible des bandes de carbone sur la LAC, un système d'amortissement est implanté sur le pantographe. Cet amortissement est généralement constitué de ressorts mécaniques et/ou des vérins pneumatiques [8].

2. **Rail conducteur** : Le troisième rail est généralement alimenté en courant continu avec une tension ne dépassant pas  $750\text{ V}$ , ce qui entraîne une double limitation :

- En puissance : Les intensités sont importantes.
- En vitesse : À cause de la rupture des contacts électriques aux aiguillages, aux croisements et aux passages à niveau.

Le captage du courant se fait par des frotteurs ou patins qui viennent appuyer en dessous, au-dessus ou sur le côté du rail conducteur.

## 1.2 Présentation des équipements

### 1.2.1 Sous stations de traction

Une sous station de traction est l'interface entre le réseau HTA local ( $10\text{ kV}$  à  $50\text{ kV}$ ) et le réseau continu à  $750\text{ V CC}$ . Le nombre d'arrivées de niveau de tension HTA peut varier selon la construction du réseau de tramway. Au même titre que les réseaux d'alimentation électrique des métros, plusieurs connexions à des réseaux HTA distincts permettent de garantir un service de fonctionnement minimum lors d'un défaut électrique majeur sur un des réseaux HTA (figure 1.8) [9].



FIGURE 1.8: Illustration d'une sous station

Les sous stations sont réparties et installés le long des lignes en fonction des revendications de l'exploitant. Ces revendications sont ordonnées par les performances souhaitées pour la gestion de son exploitation (adéquation entre les grilles horaires et les puissances à installer), mais aussi par les contraintes d'implantation dans la ville. En effet, les emplacements susceptibles d'accueillir les sous-stations dans une ville sont assez restreints. La distance entre les sous-stations se révèle être un facteur à mettre en adéquation avec la structure utilisée pour le transport et la distribution du courant continu. Les tensions de lignes minimales acceptables en fonctionnement normal et dégradé (disjonction d'une sous-station par exemple) sont primordiales. En exploitation normale, par exemple, la tension minimale acceptable sur une ligne d'alimentation de tramway est de  $525 V CC$ .

Les sous stations peuvent toutefois être relativement éloignées les unes des autres ( $5 km$ ) si des moyens de maintien de la tension sont installés. Pour cela, les solutions les plus utilisées consistent à utiliser des Feeders (généralement des conducteurs en aluminium de section importante) en parallèle des voies ou à doubler certaines LAC afin de limiter les chutes de tension. Ils peuvent également être dotées de deux groupes redresseurs connectés en parallèle ou en série, si les besoins en puissance du réseau ou les contraintes d'implantation le nécessitent.

Aujourd'hui, il est favorable de construire des petites sous stations de  $800$  à  $1200 kW$ , espacées de  $500 m$  à  $2,5 Km$ . En dehors de l'artère ou de la boucle d'alimentation HT du réseau électrique général, il n'y a pratiquement plus de feeders  $750 V$  reliant les sous stations entre elles. Cette technique rend le système de la succession des sous stations indépendant, non gardiennées mais télé-surveillées et télécommandées par un automate programmable depuis un Poste de Commande Énergie.

Il existe ainsi une redondance entre les sources d'alimentation, ce qui permet pour des opérations de maintenance et d'entretien d'isoler une sous station afin d'éviter que le système d'exploitation n'en souffre [1].

### 1.2.2 Matériel roulant

Le matériel roulant ferroviaire est constitué de l'ensemble des véhicules, moteurs ou remorqués, conçus pour se déplacer sur une voie ferrée et qui n'a pas cessé d'évoluer avec le temps, afin de répondre aux attentes des usagers et des exploitants des réseaux de tramway.



L'élément principale de l'ensemble du matériel roulant est le bogie qui est un chariot situé sous un véhicule ferroviaire, sur lequel sont fixés les essieux (les roues). Il est mobile par rapport au châssis du véhicule (locomotive par exemple) et destiné à s'orienter convenablement dans les courbes. Outre son rôle de liaison entre les essieux et la caisse le bogie assure les rôles de freinage, d'interface entre la signalisation sur voie et la caisse de suspension de l'ensemble du tramway. On distingue donc deux grandes familles de bogies [11] :

- Les bogies moteurs : Avec moteurs dans le cas d'une traction directe ou avec les pignons dans le cas d'une traction indirecte.
- Les bogies porteurs : (pas de moteur) Généralement plutôt dédiés au freinage et assurent la répartition des charges et le guidage.

Grâce aux progrès et recherches effectués dans le domaine des matériaux et des chaînes de traction, les rames sont à plancher bas intégral et permettent un accès de plein pied aux voyageurs. Il existe des tramways à plancher ultra-bas sans bogies. L'amélioration des performances des bogies est un élément important pour accroître la fiabilité, la sécurité et le confort du matériel roulant [1].



**FIGURE 1.9:** *Bogie au cours de construction.*

La chaîne de traction est constituée de deux ou trois bogies moteurs selon la technologie utilisée dont chacun comporte un onduleur à IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor). La commande des onduleurs est de type MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) à des fréquences élevées (quelques kHz) [9].

### 1.2.3 Chaîne de traction de démarrage et de freinage du tramway

On prend comme exemple la gamme CITADIS 402 composée de trois bogies moteur dont la puissance totale est approximativement 1087 KW, consomme un courant nominal de 1450 A sous la tension désirée du caténaire 750 V, et de nombreux convertisseurs électroniques et de filtres se situent dans le tramway, pour le but d'assurer le bon fonctionnement des auxiliaires comme exemple la climatisation et l'éclairage, aussi pour assurer le freinage rhéostatique. La figure 1.10 [1] représente la répartition des puissances d'un tramway [12].

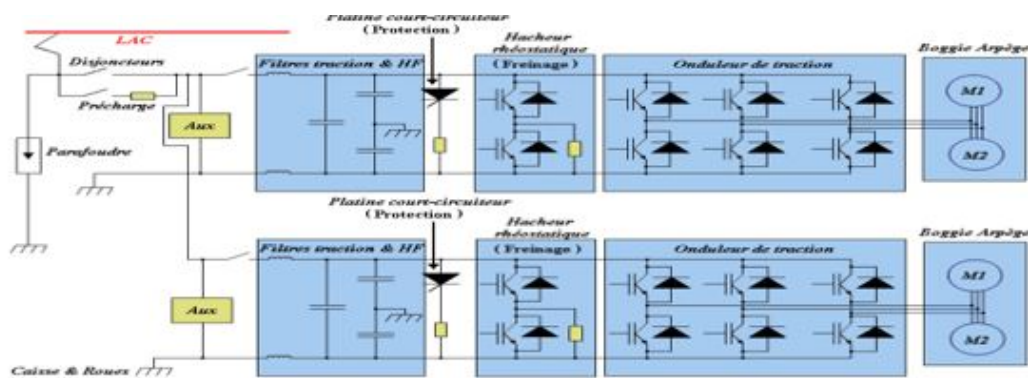
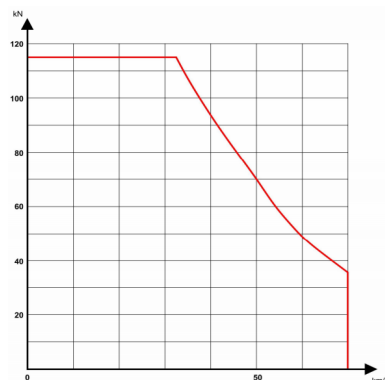


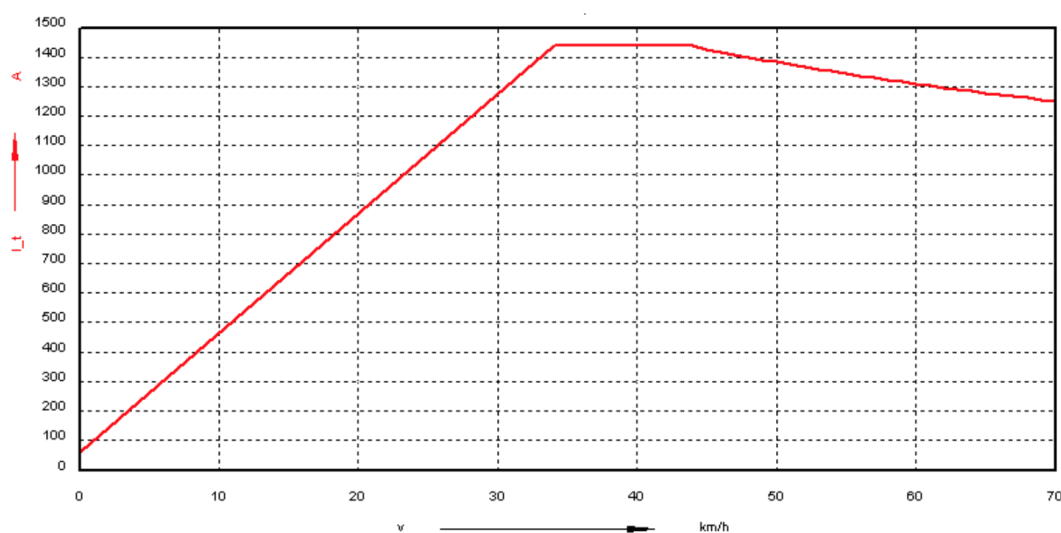
FIGURE 1.10: Schéma électrique simplifié du tramway

Durant la phase de démarrage du tramway, l'effort de traction exercé est maximal et constant jusqu'à 30 km/h environ (figure 1.11) [?]. Le tramway se dégage ainsi rapidement du trafic. Le courant débité pendant cette durée est proportionnel à la vitesse et augmente graduellement jusqu'à un courant nominal de 1450 A (figure 1.12) [?].

Une phase de fonctionnement à puissance constante succède ensuite à celle de démarrage : le courant reste égal à 1450 A. À partir de 40 km/h, la puissance du tramway est réduite. La tension au pantographe reste égale, ou ne varie peu avec la position du tramway, le courant appelé par le tramway suit la même tendance que la puissance.



**FIGURE 1.11:** Effort de traction d'un CITADIS 402 en fonction de sa vitesse



**FIGURE 1.12:** Courant de traction d'un CITADIS 402 en fonction de sa vitesse

La vitesse nominale d'exploitation d'une ligne de tramway se calcule en calculant le ratio entre la distance séparant les terminus et le temps de parcours moyen du diapositif du matériel roulant, l'ordre de grandeur est généralement de  $20 \text{ km/h}$ . Pour des tramways évoluant majoritairement en site protégé, la vitesse nominale d'exploitation peut atteindre la valeur de  $25 \text{ km/h}$ .

En freinage, pour assurer la sécurité et l'espacement de la circulation il faut prendre en considération la distance d'arrêt, car pour une vitesse donnée, elle doit être inférieure à la distance d'implantation des signaux d'avertissement et d'arrêt.

Cette obligation exige un effort retardateur, donc un moyen où l'énergie doit être dissipée d'une manière ou d'une autre, parce que pendant la phase de freinage le tramway devient un générateur de courant. Chaque véhicule remorqué doit donc participer à cette action de freinage en raison directe de sa masse [1].

Le moteur électrique situé dans les bogies est réversible, c'est à dire s'il reçoit de

l'énergie électrique alors il fournit de l'énergie mécanique, et s'il reçoit de l'énergie mécanique alors il fournit l'énergie électrique. L'énergie électrique produite peut être utilisée de deux manières :

- Dissipée dans une résistance : C'est le freinage rhéostatique. Les moteurs seront déconnectés de l'alimentation électrique et branchés sur un rhéostat (un ou plusieurs résistances variables). La régulation du couple résistant se fait par variation de la valeur du rhéostat, généralement grâce à un semi-conducteur contrôlé (thyristor).
- Utilisée par un autre récepteur : C'est le freinage par récupération. Les moteurs restent connectés à l'alimentation électrique qui devient « récepteur d'énergie », et dans ce cas il y aura lieu d'insérer un onduleur de récupération sur la ligne continue, généralement ce convertisseur se trouve dans les sous stations, l'onduleur permet de transférer l'énergie excédentaire du réseau continue vers le réseau alternatif.

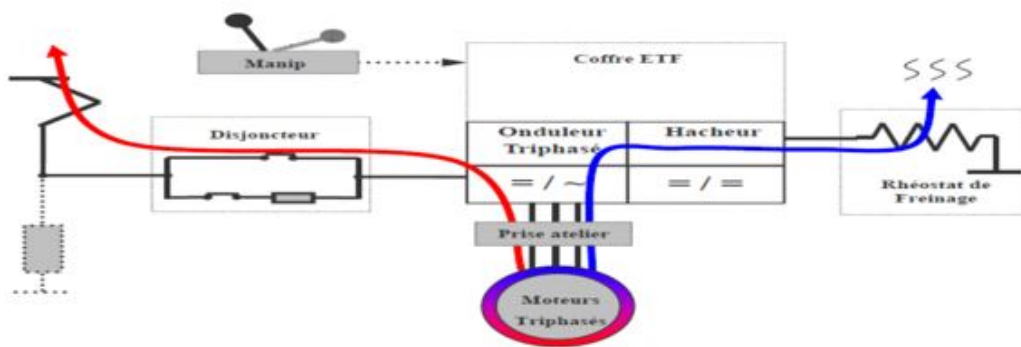


FIGURE 1.13: Mode opératoire en freinage électrique.

### 1.2.4 Retour des courants de traction (courants vagabonds)

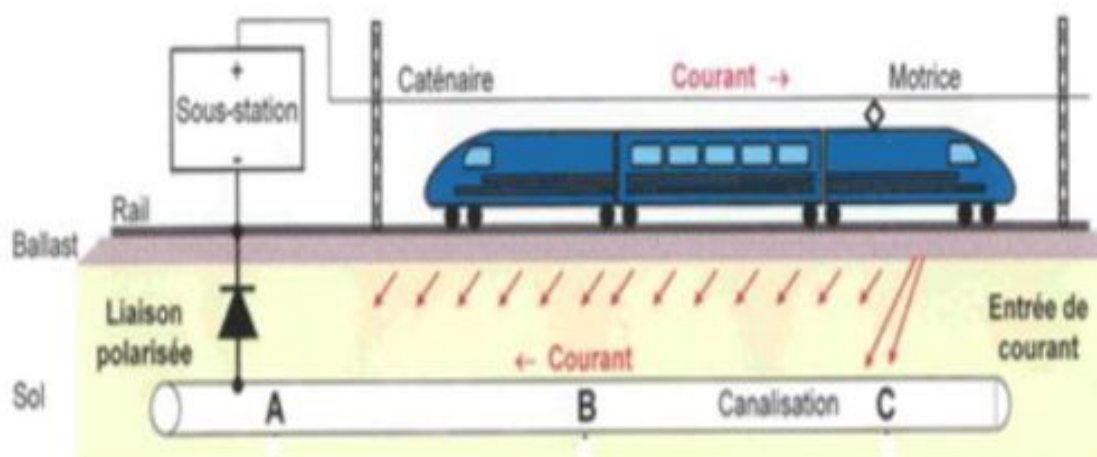
Dans les installations ferroviaires DC, le courant de traction passe par la caténaire pour alimenter la locomotive, et son retour vers les sous stations se fait par le rail. Ce dernier est un élément conducteur électrique qui a une mauvaise isolation avec le sol, donc le sol sera le chemin du retour du courant involontairement. Pour les tramways roulant sur pneus, le retour du courant se fait dans le troisième rail via un frotteur situé au-dessous des bogies.

Le courant vagabonds est particulièrement néfaste au bon vieillissement des installations, car ils engendrent la corrosion des structures métalliques enterrées à proximité des voies et des sous stations de traction.

Une meilleure isolation des rails du sol réduit les courants vagabonds, mais peut conduire à l'apparition des potentiels électriques de contact dangereux pour les

personnes. Pour assurer la protection du public et du personnel, les potentiels électriques des rails de roulement ne doivent pas dépasser les limites imposées dans la norme EN 50122-1 (120 V) (Annexe A.9).

Le contrôle de la tension rail-sol doit être surveillé d'une manière permanente et des contacteurs et autre élément de protection de mise à la terre automatisé seront placés à proximité des sous stations ou à toute endroit identifié par des modèles et simulations électrique (détection de potentiel rail-sol élevé en fonction d'une distance kilométrique) [14].



**FIGURE 1.14:** *Chemin de circulation des courants vagabonds*

Une meilleure isolation entre les rails et le sol diminue les courants vagabonds, mais peut provoquer un potentiel électrique de contact dangereux pour les personnes.

## 1.3 Stockage énergétique et production embarquée

### 1.3.1 Domaines d'applications

Les technologies actuelles des systèmes de stockage d'énergie peuvent être utilisés dans des applications ferroviaires. Les domaines d'application concernés se trouvent aussi dans :

- Les systèmes embarqués mixtes (l'utilisation n'est pas simultanée pour des différentes sources énergétiques).
- Les installations fixes.
- Les systèmes autonomes.

- Les systèmes embarqués hybrides (dotés de plusieurs sources énergétiques dont l'utilisation est simultanée).

Le domaine ferroviaire nécessite des dispositifs de stockage puissant en termes de puissance massive et en terme de durée de charge et de décharge, c'est pour cette raison la nécessité d'implanter des systèmes fixes de volants d'inertie ou du super-capacités à l'intérieure des sous stations ou implantés le long de la ligne aérienne en fonction des besoin de l'exploitant, ces système peuvent être des alternatives efficaces aux méthodes traditionnelles de renforcement des systèmes d'alimentations [1].

L'effet de l'intégration d'un dispositif de stockage sur le réseau d'alimentation peut agir à plusieurs niveaux :

- Renforcer la tension de la ligne point par point.
- Une augmentation de la distance entre les sous stations peut être envisagée
- Optimiser les pointes de charge d'un réseau électrique.
- Les sous stations de traction maintiennent la base de la puissance appelée sur le réseau
- Les dispositifs de stockage lissent le maximum de charges transitoires indésirables.
- Augmenter la récupération de l'énergie de freinage du matériel roulant [14].

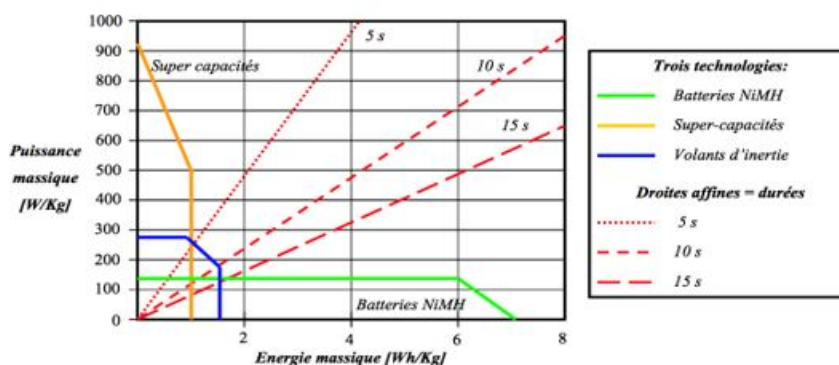
### 1.3.2 Techniques modernes pour le stockage énergétique en traction

Dans le domaine de la traction électrique, différentes technologies de stockage énergétique sont considérées comme des moyens efficaces pour ce domaine. Chacun d'entre eux a son domaine de prédilection, choisissant soit des applications où la puissance à fournir est très élevés pendant une courte période, soit des applications où la puissance à fournir est faible sur des durées plus longues.

On distingue trois types de stockage souvent utilisé dans le domaine de traction :

- Les batteries à base de Nickel Métal-Hydrure.
- Les super-capacités.
- Le stockage à base de volant d'inertie.

Dans la figure (1.15) [1] les droites affines ( $5 s$ ,  $10 s$  et  $15 s$ ) de la figure ci-dessus correspondent à des durées de fonctionnement. Plus le coefficient directeur est faible, plus la durée d'utilisation est grande. Les batteries proposent des capacités de stockage énormes, mais leur faible coefficient de rapidité dans le stockage ou dans la récupération d'énergie rend leur application dans le domaine ferroviaire très limité.



**FIGURE 1.15:** Comparaison globale entre les technologies de stockages en traction

Le principe des super-capacités est basé sur des applications de condensateurs à double couche. En plus ils ont les mêmes propriétés que les condensateurs électrochimiques. Leur puissance massique est élevée, mais leur capacité de stockage est faible. À la différence des batteries, les super-capacités servent donc à fournir une très grande puissance dans une durée très courte (quelques secondes). Leur utilisation est favorisée dans des installations fixes ou embarquées afin d'assurer une grande puissance instantanée. Les nouvelles structures servent à fournir une puissance de 1 MW pour une capacité énergétique de 2, 3 kWh.

Un volant d'inertie est une masse en métal emmagasine l'énergie cinétique. L'énergie cinétique emmagasinée par cette masse lors de l'opération de freinage est récupérée par un générateur électrique en amont de la chaîne de traction lors de l'accélération suivante. L'ensemble de ce système de stockage se charge à chaque freinage ou par un système de recharge ultra-rapide complémentaire lors de chaque arrêt en station. L'avantage de ce dispositif permet de réduire considérablement la consommation électrique, avec une durée de vie du dispositif choisis d'une manière égale à celle du tramway.

Du point de vue dynamique, la technologie du volant d'inertie se révèle être un mélange et un compromis entre les batteries et les super-capacités. Aujourd'hui les volants d'inertie disposent d'une puissance massique proche de 1 MW et d'une énergie considérable d'une valeur proche de 10 kWh.

## Conclusion

À partir de ce chapitre, une analyse de l'infrastructure primaire du système nous permet de choisir le type d'alimentation électrique du tramway en Algérie et aussi la manière adéquate de capter l'énergie.

L'adaptation entre le type de puissance du réseau et le système ferroviaire est assurée par les équipements nécessaires tels que les sous stations de traction, qui garantissent une protection et une isolation électrique suffisante.

À la fin, un diagnostic du stockage d'énergie est fait pour la préservation de l'électricité en période creuse ou même pendant la phase de freinage.



# Itinéraire et infrastructures statiques

## Introduction

En 2014, l'entreprise Portugaise FERCONSULT a proposée des itinéraires et des corridors spécifiques à la Wilaya de Tlemcen pour ce système ferroviaire, en tenant compte de plusieurs paramètres spécifiques à l'agglomération de Tlemcen.

D'une part, pour garantir l'électrification de ce system, il est strictement nécessaire de connaître le fournisseur d'énergie en Algérie et ces offres énergétiques (on s'intéresse ici à l'offre technique). D'autre part, l'acheminement d'énergie du fournisseur aux tramways nécessite une adaptation durable à court, moyen et long terme par l'intermédiaire des différents équipements électriques passant par les étages statiques nécessaires.

Dans ce chapitre, on va abordé ces points en détaillent l'offre dans son intégralité.

## 2.1 FERCONSULT

C'est une entreprise multidisciplinaire spécialisée dans les domaines du conseil et les études des projets des transports et opère sur les marchés nationaux et internationaux.

Fondée en 1991, ses origines étaient dans le département des projets et travaux du Metropolitano de Lisboa, qui a hérité d'une vaste expérience dans le domaine de l'ingénierie des transports [39].

### 2.1.1 Prévision des données socio-économiques

L'entreprise a défini un réseau de circulation satisfaisant à court, moyen et long terme en tenant compte les prévisions socio-économique (qui influe sur la mobilité) suivantes :

— **Population :**

Les zones ayant évolué de plus de 20% sont celles qui recevront le plus grand nombre de nouveaux logements, à l'exemple des zones d'Oudjlida :

- La zone numéro 1 (la nouvelle cité autour de la mosquée de Ahmed El Bassiri), qui augmente de plus de 24 400 habitants ;
- La zone numéro 2 (près de la poste de Boujlida) a une croissance de plus de 11 800 habitants.

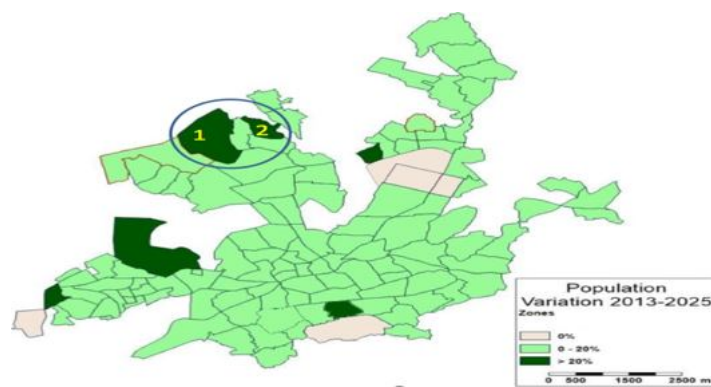


FIGURE 2.1: L'évolution de la population entre 2013 et 2025

— **Emploi :**

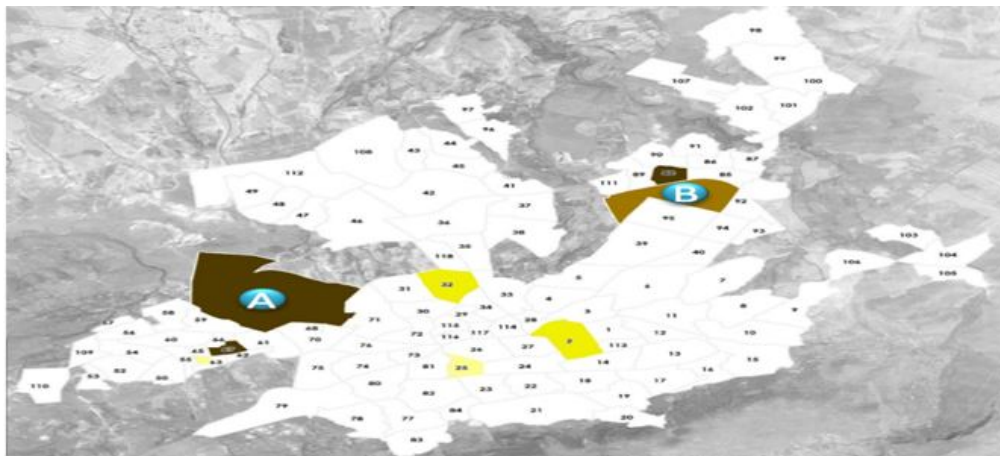
La plupart des zones vont avoir une évolution de l'emploi de plus de 20%, même si des emplois ont été délocalisés de certaines zones et injectés dans la zone de Bouhanak qui accueille le nouveau quartier administratif, cette diminution est minime et n'influence pas cette évolution.

— **Effectif scolaire :**

La zone de Oudjlida subira la plus grosse évolution des scolaires, en concordance avec la croissance prévue des habitants. Quant au reste des zones les scolaires auront une évolution modérée.

— **Universitaire :**

Les zones A (à côté de la Rocade) et B (à Chetouane) sont les zones qui vont subir la plus forte évolution avec respectivement, une hausse de 27 000 et 5 000 étudiants.



**FIGURE 2.2:** *Les positions des deux grands pôles universitaires.*

— **Impacts sur la mobilité :**

L'heure de pointe du soir (HPS) est la période de la journée pendant laquelle un trafic est le plus important. Il peut s'agir d'un nombre important de voyageurs dans une gare et d'un grand nombre de véhicules sur la route (généralement entre 17 et 20 h). L'entreprise a pris en considération ce phénomène à court, moyen et long terme comme il est montré sur le tableau suivant [39].

**TABLE 2.1:** L'évolution de la mobilité 2025/2030

Horizon	Déplacement (à l'HPS)	Evolution par rapport à 2013	Evolution (moyenne annuelle)
2013	11621		
2025	28616	146%	7.8%
2030	33624	189%	3.3%

### 2.1.2 Définition du réseau par FERCONSULT

Sur la base de ces différents paramètres socio-économiques propres à la wilaya de Tlemcen, l'entreprise a proposée quatre corridors (mauve, vert, bleu, rouge) associés avec quatre scénarios basant sur trois critères principaux :

- La modularité des rames et la simplicité de l'exploitation des lignes ;
- Le type et la dimension de la charge estimée sur les différentes lignes du réseau ;
- Les caractéristiques des zones de manœuvre des stations d'interface et l'accès au dépôt.

Les lignes proposées dans les différents scénarios profitent parfois de connexion dans quelques endroits, ce qui engendre plus d'hypothèses lors de la configuration des services du réseau, cela offrira également la liaison d'un plus grand nombre de lignes ou tronçons de lignes pour assurer une plus grande desserte et des services plus adéquats à la demande [39].

### 2.1.3 Description des différents scénarios

Sur la base des quatre (04) corridors montrés sur la figure 2.3, la société a abouti au choix de quatre (04) scénarios :

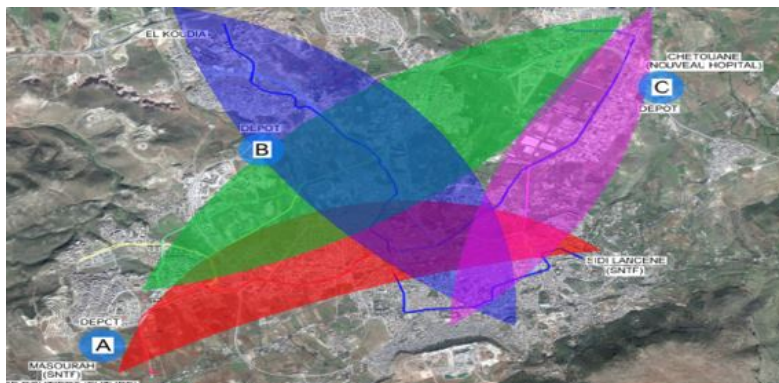


FIGURE 2.3: Les quatre corridors proposés par FERCONSULT

#### 1. Scénario 1 : Comporte quatre lignes



FIGURE 2.4: Le premier scénario proposé par FERCONSULT

## 2. Scénario 2 : Comporte trois lignes

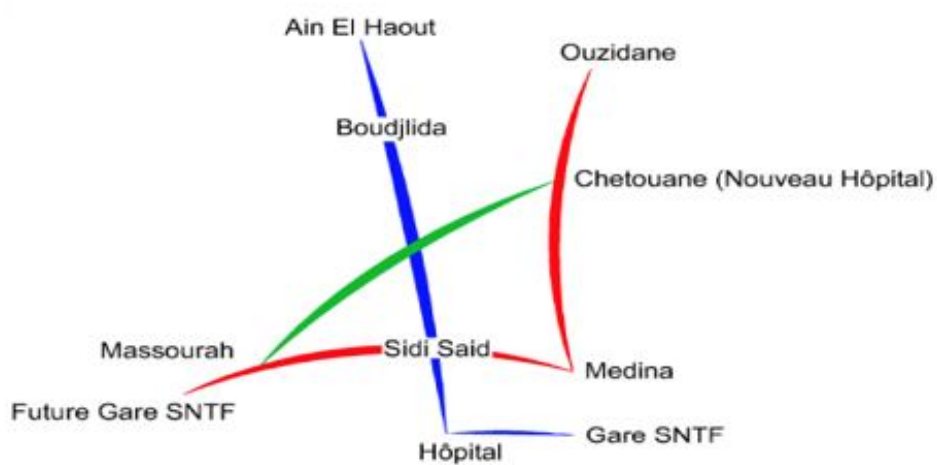


FIGURE 2.5: Le deuxième scénario proposé par FERCONSULT

## 3. Scénario 3 : Comporte quatre lignes

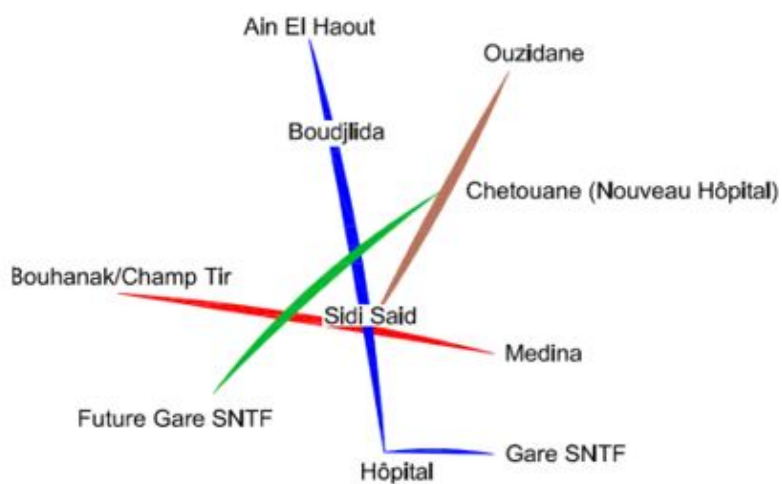
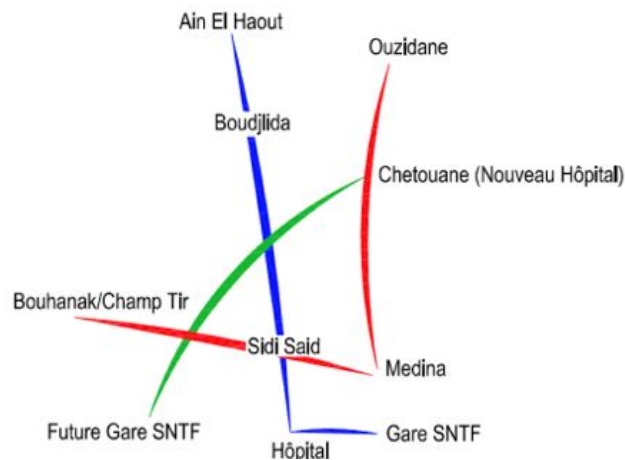


FIGURE 2.6: Le troisième scénario proposé par FERCONSULT

#### 4. Scénario 4 : Comporte trois lignes



**FIGURE 2.7:** *Le quatrième scénario proposé par FERCONSULT*

En se basant sur :

- L'existence d'une importante demande de la zone Nord Est vers le centre et aussi des pôles majoritairement résidentiels dans les extrémités du Champ de Tir, Mansourah, Boudjlida et Chetouane, générateurs de demande de tendance pendulaire dans les périodes de pointe le matin et du soir.
- Les tronçons au centre-ville, plus urbains, générant potentiellement un trafic régulier pendant toute la période de l'exploitation, sont naturellement plus chargés dans les périodes de pointe.
- Les campus universitaires le long de la ligne verte et les gares routières et la gare SNTF sur la ligne bleue sont générateurs de voyages et des points à forte demande.

Cette étude a été prolongée à cause de plusieurs occupations liées à la wilaya de Tlemcen comme les insertions urbaines, les occupations du sous sol, le patrimoine culturel et les secteurs non urbanisable, le problème de stationnement et surtout le coût de conception qui est très élevé ce qui a engendré un prolongement de la période de réalisation jusqu'à ce moment. Parmi les occupations on cite :

- Boulevard Imama : Interférence dans le rond-point du boulevard Imama avec le Boulevard 18 février, avec des arbres de grande taille et emblématiques (palmiers).
- Boulevard Kazi Aouel Med : Insertion difficile de la plateforme du tramway à cause de sa largeur étroite (10-15 m), plus la présence de la muraille historique et de la Médina.
- RN 22 : Rénovation des ronds-points dans la RN 22 avec la Rue Mourad Benchouk.
- Ain El Hout : Zone Hétérogène touchée par des désordres géotechniques.

- Bab El Kermadine : Le tracé se situe en face d'une zone du « Plan permanent de sauvegarde et mise en valeur des secteurs sauvegardés ».
- Le Boulevard Derrah Abderrahmane : Le tramway traverse deux zones de coulée verte et après d'une zone inondable.
- Champ de Tir : Le début de ce tracé se situe en face des terrains agricoles dans une extension d'environ 1.6 *km*.
- Boulevard Allem Mouloud (Abou Tachefine) : Contraintes dans la circulation routière et le tramway dans le boulevard Allem Mouloud qui pourra avoir des conséquences dans la fluidité du trafic, conjointement avec le tramway.
- Le coût très élevé à cause de l'insertion de certaines stations souterraine ou bien l'utilisation d'un matériel roulant pneumatique dans certains cas où la pente est très élevée (vers l'hôpital par exemple) [39].

## 2.2 La disponibilité et l'assurance d'énergie

L'étude du réseau d'alimentation électrique du tramway nécessite une vision et une connaissance du système dans son intégralité. Les analyses de son comportement lors des modes de fonctionnement, requièrent toutefois un regard précis et localisé sur les composants du système. Différentes technologies existent actuellement dans le domaine d'alimentation ferroviaire (dans notre cas c'est le tramway), mais en Algérie on s'intéresse beaucoup plus à l'alimentation aérienne grâce à la simplicité de conception et le coût global du système. Le système d'électrification du tramway nécessite une grande consommation d'énergie par rapport aux abonnés ordinaires, c'est pour cette raison que ce système doit être considéré comme un client et non pas comme un abonné ordinaire, donc la convention d'électrification devra être à grande échelle d'énergie.

### 2.2.1 Le fournisseur d'électricité (SONELGAZ)

SONELGAZ (Société Nationale de l'Électricité et du Gaz) est le seul fournisseur et producteur d'énergie en Algérie, spécialisé dans tous les stades d'électrification c'est à dire la production, le transport, la distribution et la commercialisation d'électricité et de l'achat. Son siège social est situé à Alger.

SONELGAZ exerce ses activités dans les secteurs déréglementés de la production d'électricité, de la fourniture de gaz naturel et d'électricité. La société dispose des installations qui ont une puissance installée totale de 21 000 *MW* à la fin de 2018. Elle gère différents types de centrale de production électrique comme des centrales hydroélectrique, thermiques classiques, à cycle combiné, à cycle ouvert et dernièrement des centrales à base des énergies renouvelables. La production

électrique en Algérie totalise un chiffre près de 72 395 *GWh* dans les dernières statistiques (2020).

La longueur du réseau de transport électrique réalisée par SONELGAZ est de 29 644 *km*, et la longueur du réseau de distribution touche les 338 380 *Km* avec un nombre de client d'électricité plus de 9 605 685 clients (07/2020). On annonce aussi que la longueur du réseau de transport du GAZ est de 21 597 *Km*, et le réseau de transport de ce dernier est de 107 792 *Km* sachant que le nombre de client du gaz naturel touche les 5 628 267 clients (07/2020) [28].

## 2.2.2 Gestionnaire du Réseau de Transport de l'Electricité

Le Gestionnaire du Réseau de Transport de l'Electricité en Algérie dénommée GRTE , filiale du groupe SONELGAZ, a été créé le 1<sup>er</sup> janvier 2004, conformément à cette loi et enregistrée sous l'appellation « SONELGAZ Transport de l'Electricité, GRTE Spa » en septembre 2004. A cet égard, le gestionnaire dispose d'une autorisation d'exploiter le réseau de transport délivrée par le ministère de l'énergie et des Mines, après avis de la Commission de Régulation de l'électricité et du gaz (CREG) [28].

## 2.2.3 Réseaux d'électricité (SONELGAZ)

Un plan de réseau électrique existant a été fourni par la SONELGAZ. Ce dernier montre les principaux types de réseaux HT/BT .

Le tableau suivant montre la nouvelle nomenclature des réseaux électriques (basse et haute tension).

**TABLE 2.2:** Classification des tensions pour les réseaux électriques.

<b>Abréviations</b>	<b>TBT</b>	<b>BTA</b>	<b>BTB</b>	<b>HTA</b>	<b>HTB</b>
<b>Dénomination</b>	Très basse tension	Basse tension A	Basse tension B	Haute tension A	Haute tension B
<b>Tension [V]</b>	$U \leq 50$	$50 < U \leq 500$	$500 < U \leq 1000$	$1000 < U \leq 50\ 000$	$U \geq 50\ 000$

Les réseaux aériens recueillis concernent exclusivement le HTA 30 *KV*, 10 *KV* et le BTA 400 *V* qui est présent essentiellement au centre-ville [28].



## 2.3 Les infrastructures statiques du système ferroviaire

La fonction principale du système d'alimentation électrique de traction est de fournir l'énergie nécessaire aux tramways circulant sur la ligne à partir :

- D'un poste Haute Tension 60 *kV*/30 *kV* (PHT).
- Des sous stations de traction (SST).
- Une SST au dépôt (SSTD) qui alimente le centre de maintenance et le remisage principal.
- De la Ligne Aérienne de Contact (LAC) alimentant le tramway [40].

### 2.3.1 Poste Haute Tension (PHT)

Selon la définition de la commission électrotechnique internationale « un poste électrique est la partie d'un réseau électrique, située en un même lieu comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution ». L'utilisation de n'importe quel niveau de tension doit être spéciale et propre à ce système pour optimiser la faisabilité du projet parce que si l'énergie utilisée fait partie des postes de distribution des habitants (le cas de tramway de la wilaya d'Alger) cela présente plusieurs inconvénients techniques et économiques, on cite :

- La dépendance, le système d'alimentation dépendra toujours des extensions relatives à ces postes qui souvent ont des coupures d'énergies à cause des chutes de tension (généralement en été) ou bien à cause des nouvelles extensions ou des opérations de maintenance.
- Les pertes non-techniques telles que les fraudes et le manque d'une stratégie de contrôle.
- L'augmentation des pertes dans le réseau accompagnées d'un faible rendement des centrales de production.
- La caractéristique électrique en Algérie dépend de la consommation résidentielle et non pas à la consommation industrielle, ce qui rend les petits consommateurs des responsables directes des défauts sur le réseau.
- Vieillesse de l'infrastructure du réseau en raison des contraintes budgétaires qui ont empêché son renouvellement et les questions de sécurité qui l'accompagnent.

Donc il est préférable d'installer un poste haute tension (PHT) entre les sources d'énergie (le fournisseur) et le réseau électrique du tramway.

Le PHT est alimenté par deux lignes aériennes provenant du réseau SONELGAZ de 60 *kV* ou 30 *kV* (dit aussi un poste répartiteur) triphasé à 50 *Hz*, à partir de deux sources indépendantes électriquement et qui sont :

- Une première ligne depuis le poste source de SONELGAZ de **Abou Techfine**.
- Une deuxième ligne depuis le poste source de SONELGAZ de **Sidi Yaacoub**.

### a- Le cas d'utilisation d'un poste répartiteur

C'est un poste alimenté par des arrivées de la part des postes sources appelés FEEDERS<sup>1</sup>, il est composé de plusieurs cellules de niveau HTA constituant deux jeux de barres avec couplage, un régleur en charge, des organes de mesure et de protection comme les sectionneurs et disjoncteurs. L'intérêt de ce poste consiste à :

- Diminuer les chutes de tension.
- Réduire l'encombrement au niveau des postes sources.

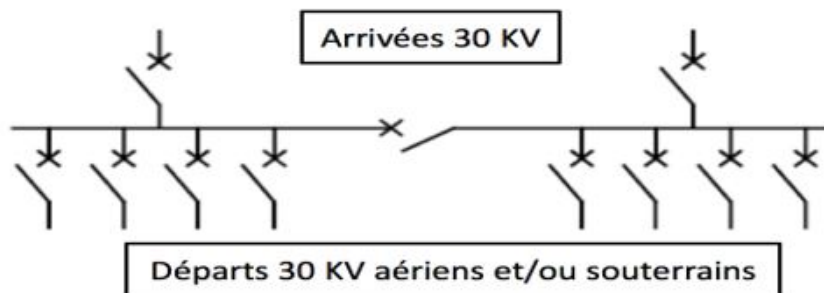


FIGURE 2.8: Schéma unifilaire du poste répartiteur

**Mode d'exploitation :** Les deux sources peuvent fonctionner au même temps (en parallèle) ou l'une en secours de l'autre source. En cas de défaut sur un des deux jeux de barres (ou maintenance), les départs liés à ce jeu de barre ne seront plus alimentés [41].

### b- Le cas d'utilisation d'un poste haute tension de transformation 60/30 kV

Le niveau de tension de l'électricité apportée par le fournisseur (le réseau) est modifié par un ou multiples transformateurs qui sont abrités dans ce poste haute de tension figure (2.9). Citons les équipements de ce type de poste (double antenne avec double jeux de barres) :

1. **Etage 60 kV :** Au niveau de tension 60 kV, le PHT est composé de :
  - Deux arrivées 60 kV.
  - Un double jeux de barres (JdB 1 et JdB 2) avec couplage.

1. mot anglais donné à un conducteur, dont le rôle est de transporter de l'énergie

- Deux départs vers les transformateurs 60/30 kV.
- Des organes de mesure et de coupure sont installés sur chacune de ces unités.
2. **Etage 30 kV** : Au niveau de tension 30 kV, le PHT est composé de :
- Un double jeu de barres 30 kV avec couplage,
  - Deux départs 30 kV pour alimenter les SST du tramway.
- Chacune de ces unités comporte des organes de coupure et autres équipements de mesure.

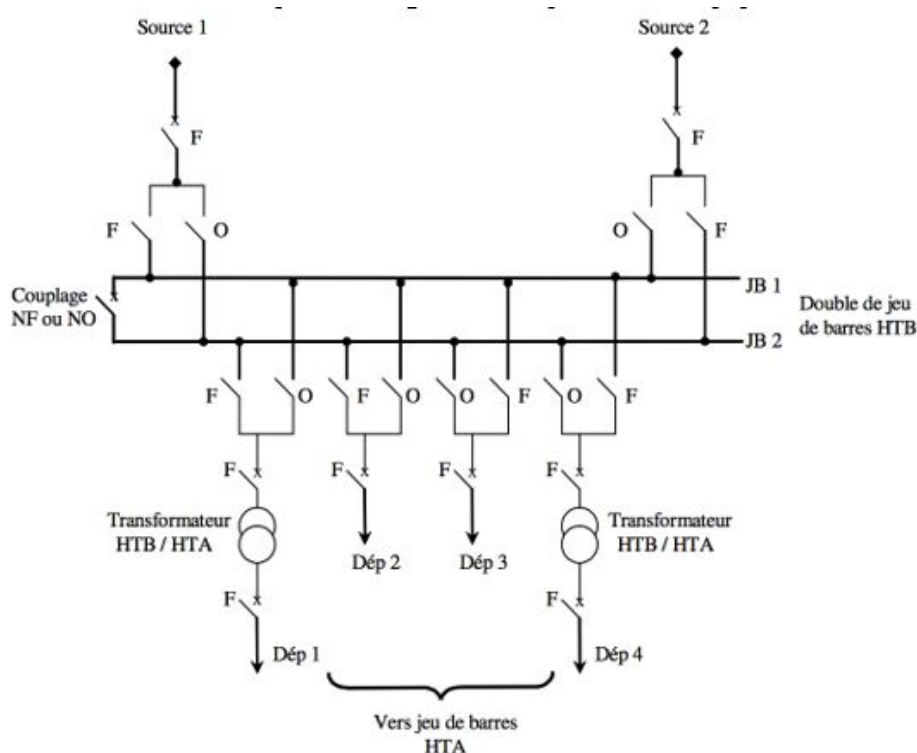


FIGURE 2.9: Architecture du PHT à double antenne avec double jeux de barres

### Mode d'exploitation

**Mode normal** : Les départs Dép 1 et Dép 2 sont alimentés par la source 1 par l'intermédiaire du jeu de barres JB1, dans l'autre côté les départs Dép 3 et Dép 4 sont alimentés par la source 2 par l'intermédiaire du jeu de barres JB2, Sachant que le disjoncteur de couplage peut être ouvert ou fermé.

**Perturbé** : — En cas de défaillance dans une source, l'autre source garantie la totalité de l'alimentation nécessaire.

- En cas de défaillance sur un jeu de barres (ou maintenance), le disjoncteur de couplage entre les deux jeux de barres sera ouvert et l'autre jeu de barres assure la totalité d'alimentation de tout les départs [41] [42].

## Présentation des équipements utilisés

### — le sectionneur (Annexe A.1)

Un même réseau peut alimenter plusieurs machines, il est impératif que chacune d'entre elles puisse être mise séparément hors tension, cette opération doit être exécutée en toute sécurité. Cet isolement peut être rendu possible par la présence d'un sectionneur. Le sectionneur a une large utilisation dans plusieurs domaines nous citons quelques fonctionnalités par la suite :

- L'ouverture du sectionneur est impérative lors de toute intervention hors tension sur l'équipement électrique de la machine ou sur les parties mécaniques.
- Chaque phase doit être protégée contre les contacts accidentels (court-circuit) entre des conducteurs portés à des potentiels différents. Cette protection est assurée soit par des disjoncteurs, soit par des coupe-circuits à cartouches fusibles.
- Dans le cadre de la maintenance, il permet de réaliser la consignation des installations (mettre hors tension, isolés, condamnés) [29].



FIGURE 2.10: *Sectionneur*

### — Le disjoncteur

Un disjoncteur à haute tension est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège), selon la définition donnée par la commission électrotechnique internationale. Il opère à la fois :

- Dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique ;
- Dans des conditions anormales spécifiées, en particulier pour éliminer un court-circuit dans le réseau provoqué par la foudre ou d'autres causes [42].



**FIGURE 2.11:** *Disjoncteur*

— **Parafoudre**

Selon le vocabulaire électrotechnique international, un parafoudre est un appareil destiné à protéger le matériel électrique contre les surtensions transitoires élevées et à limiter la durée et souvent l'amplitude du courant de suite. On emploie aussi le terme parasurtenseur.



**FIGURE 2.12:** *Parafoudre*

— **Le transformateur de tension (CEI 60044-2) (Annexe A.2)**

Il permet de mesurer une tension du domaine de la H.T avec une bonne précision et sans intervention sur l'installation haute tension.

L'isolation galvanique réalisée par le transformateur isole et sécurise l'utilisateur et le matériel car la tension recueillie aux bornes du secondaire appartient au domaine B.T (100 à 110 V en général).

La précision de fonctionnement des appareils de mesure ou de protection dépend directement de la précision du transformateur de tension (TT), sachant que [33] :

- Un TT de mesure est conçu pour transmettre une image aussi précise que possible de la tension primaire assignée entre 80% et 120% de celui-ci.
- Un TT de protection est conçu pour transmettre une image aussi fidèle que possible de la tension en cas de défaut (baisse de tension ou surtension), ils doivent donc avoir une précision et une puissance adaptées aux tensions de défaut et donc distinctes de celles pour la mesure [34].



**FIGURE 2.13:** *Transformateur de tension*

— **Le transformateur du courant CEI 60044-1)(Annexe A.3)**

Les transformateurs de courant alimentent les instruments de mesure basse tension et les isolent du réseau. Ils délivrent à leur secondaire un courant normalisé proportionnel au courant primaire, ils doivent donc être adaptés aux caractéristiques du réseau en terme de tension, fréquence, courant. La précision de fonctionnement des appareils de mesure ou de protection dépend directement de la précision du transformateur du courant (TC), sachant que :

- Un TC de mesure est conçu pour transmettre une image aussi précise que possible pour des courants inférieurs à 120% du primaire assigné.
- Un TC de protection est conçu pour transmettre une image aussi fidèle que possible du courant de défaut (surcharge ou court-circuit), la précision et la puissance sont adaptées à ces courants et distinctes de celles pour la mesure.



FIGURE 2.14: *Transformateur de courant*

— **Le point neutre artificiel (PNA) :**

Un point neutre artificiel (appelé aussi transformateur de mise à la terre ou générateur homopolaire) est un dispositif utilisé dans les systèmes de distribution électrique triphasés pour fournir un point neutre au réseau électrique dans le cas où la source d'alimentation principale (générateur ou transformateur) n'a pas de connexion à la terre appropriée [34].

L'utilisation d'un point neutre artificiel (mais plutôt avec des résistances) pour pouvoir connecter un contrôleur permanent d'isolement (CPI) à un réseau sans neutre distribué sachant que le CPI doit normalement être branché entre le neutre et la terre afin de surveiller l'isolement du réseau [45].

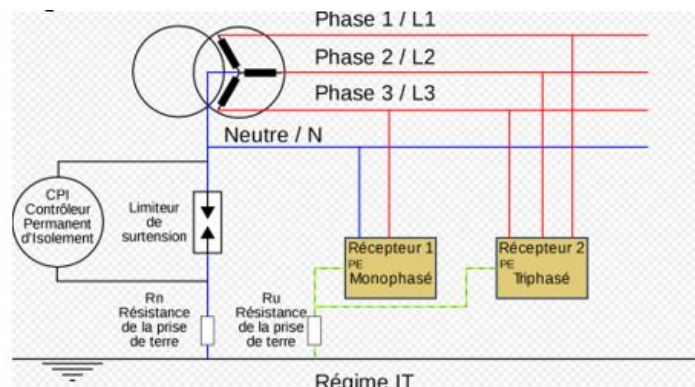


FIGURE 2.15: *Schéma simplifier du point neutre artificiel (PNA).*

— **Transformation de puissance IEC 60076-1 (Annexe A.4)**

C'est un composant électrique haute-tension essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques. Sa définition selon la commission électrotechnique internationale est la suivante : « Appareil statique à deux enroulements ou plus qui par induction électromagnétique transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement

différentes à la même fréquence dans le but de transmettre de la puissance électrique ». Sa principale utilité est de réduire les pertes dans les réseaux électriques. Il peut être monophasé ou triphasé et recevoir divers couplages : étoile, triangle et zig-zag.



**FIGURE 2.16:** *Transformateur de puissance*

#### — Les jeux de barres

Ils assurent l'alimentation et la répartition d'énergie. Ils sont généralement des barres plates ou des tubes creux en cuivre ou en aluminium, la section nécessaire des barres se détermine en fonction des courants d'utilisation, de l'indice de protection et de la contrainte thermique du court-circuit. Dans un poste électrique plusieurs jeux de barres connectés en parallèle permettent de faire la maintenance des jeux de barres sans mettre le poste entier hors tension.



**FIGURE 2.17:** *Jeux de barres de puissance*



### — Le circuit bouchon

On dispose d'un circuit bouchon au point de connexion pour empêcher les fréquences de télécommande de remonter dans l'interconnexion et pour éviter la propagation des signaux en dehors de la ligne. Il est constitué d'un circuit d'inductance et d'un condensateur pour assurer le couplage, ses composants sont dimensionnés pour supporter le courant nominal et le courant de court-circuit du réseau. Tout ça on y injecte les conversations téléphoniques et les transitions de mesures pour assurer la communication et la commande (dispatchings et ordre de fonctionnement de certains appareils) des différents postes [35] [47].

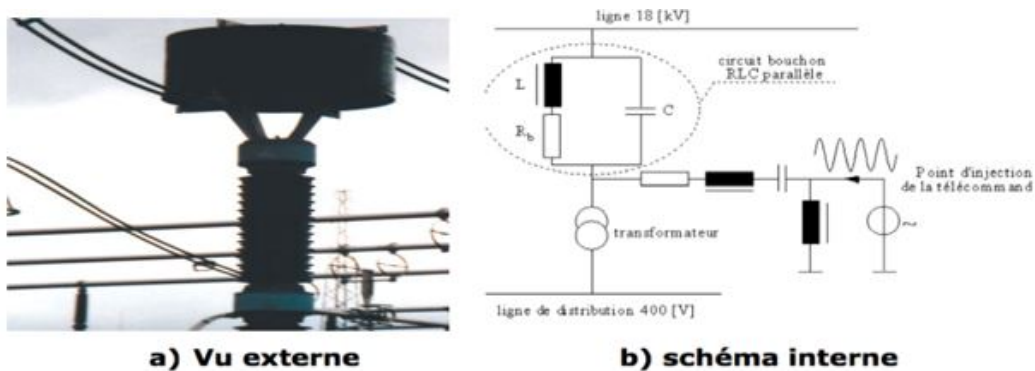


FIGURE 2.18: *Circuit bouchon*

### 2.3.2 Les sous stations de traction (SST)

La sortie du poste haute tension est une énergie transformée dans les sous-stations (SST) de manière à produire :

- L'énergie de traction  $750\text{ V CC}$  par l'intermédiaire des équipements de traction.
- L'énergie basse tension  $400/230\text{ V CA}$  par l'intermédiaire des transformateurs auxiliaires (pour l'alimentation des équipements de basse tension).

Chaque sous station de traction raccordée au réseau (boucle)  $30\text{ kV}$  du tramway de Tlemcen est alimentée par le poste haute tension motionnée précédemment.

**Les équipements d'une sous station de traction :** Les installation fixes pour les sous stations à courant continu (selon EN 50123-X) (Annexe A.5) sont regroupées dans le tableau suivant [49] [17] :

**TABLE 2.3:** Les équipements d'une SST

<b>Equipements :</b>	<b>Acronymes :</b>
<b>Un tableau HTA 30 KV comprends :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Une cellule disjoncteur d'arrivée</li> <li>• Une cellule disjoncteur de départ</li> <li>• Une cellule disjoncteur boucle secours</li> <li>• Une cellule disjoncteur HTA de groupe de traction</li> <li>• Une cellule intercepteur fusible transformateur auxiliaire</li> </ul>	<b>HTA</b> DA DS DS-S DHTA-R ITRA
<b>Un transformateur de traction de 2 000 KVA</b>	TRT
<b>Un transformateur auxiliaire de 200 KVA</b>	TRA
<b>Une armoire SIA redresseur comprenant :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Un redresseur</li> <li>• Un sectionneur d'isolement automatique</li> </ul>	RED SIA
<b>Un tableau de protection traction comprenant :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Quatre disjoncteurs Ultra rapides</li> </ul>	DUR
<b>Un tableau de distribution traction comprenant :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deux intercepteurs de secours télécommandés</li> <li>• Quatre sectionneurs de ligne</li> </ul>	IST SL
<b>Un coffret négatif</b>	NEG
<b>Un tableau général de basse tension</b>	TGBT
<b>Un tableau basse tension secours</b>	TBTS
<b>Une alimentation sans interruption</b>	ASI
<b>Un tableau basse tension courant continu</b>	TBTCC
<b>Un chargeur de batterie</b>	CB
<b>Une armoire contrôle commande / arrêt d'urgence</b>	ACC-AU

**Description de fonctionnalité des équipements des sous stations (NFEN60146)**

**(Annexe A.6) :** Le tableau HTA de 30 KV comprends cinq cellules sur le même jeu de barre, la cellule d'arrivée accueille la 30 KV de la part de la sous station précédente et envoie l'énergie vers la sous station suivante et une autre cellule secours en cas de défaillance entre deux sous stations successives.

Une autre cellule disjoncteur de haute tension vers le groupe de traction c'est à dire elle reçoit la 30 KV de la part de jeu de barre vers le transformateur de traction 2000 KVA ( $30\text{ KV}/2 * 580\text{ V}$ ) en conformité avec la norme EN 50329(Annexe A.11), la sortie de ce transformateur est liée à un redresseur (EN/IEC 60146-1-1 classe de service V)(Annexe A.13) qui va redresser la tension à 750 V continu, parce que la

ligne aérienne de contact est en continue, ce redresseur est associé à un sectionneur d'isolement selon la norme NF F 41-023(Annexe A.7) où son rôle est d'isoler la partie alternative et la partie continue automatiquement par l'intermédiaire d'une boîte négative, cette dernière boîte donne l'ordre au sectionneur pour le mettre en ouverture ou en fermeture tout dépend de la tension mesuré entre le rail et la terre grâce à un un détecteur de tension rail-sol (DTRS) installé dans chaque sous station (CEI 60255)(Annexe A.8).

Ce relais ou bien ce détecteur a deux principaux rôles qui sont :

- Surveiller la tension rail – terre.
- Limiter cette tension à une valeur définie par la norme EN 50122-1(Annexe A.9).

Le tableau de protection de traction comprend quatre disjoncteurs ultra rapides, ce type de disjoncteur de courant continu est particulier au système de traction car le temps de coupure est très court de l'ordre de ms. Il est opérable en mode local ou en mode PCC (Poste de Commande Centralisé)et a un pouvoir de communication avec les autres DURs des sous stations adjacentes.

Le tableau de distribution de traction comprend des sectionneurs de ligne (NF C 63 – 130)(Annexe A.1) pour réaliser des essais sur la LAC selon les règles CEI 913 (Annexe A.10), aussi pour but de permettre la fermeture du DUR en toute sécurité.

Avant chaque fermeture du DUR, un essai de ligne est lancé automatiquement. Il consiste à comparer la résistance de la ligne par rapport à une référence (valeur calculée) afin de s'assurer qu'il n'y a pas de défaut électrique sur la LAC, et Indiquer aux disjoncteurs alimentant la même section qu'un défaut est détecté afin d'isoler la section complète.

Une cellule intercepteur du transformateur auxiliaire 200 *KVA* (30 *KV*/400 *V*/220 *V*) (NF C 52-100)(Annexe A.15) pour alimenter les systèmes à basse tension alternative ou continue comme les batteries à partir des redresseurs par l'intermédiaire d'un tableau général de basse tension assisté par un autre tableau basse tension secours en cas de défaillance sur le tableau principal.

Une alimentation sans interruption à partir d'un chargeur de batterie pour alimenter des équipements indispensables comme les boutons d'urgence, la téléphonie et quelque équipement de protection grâce à un system montré sur la Figure (2.19).

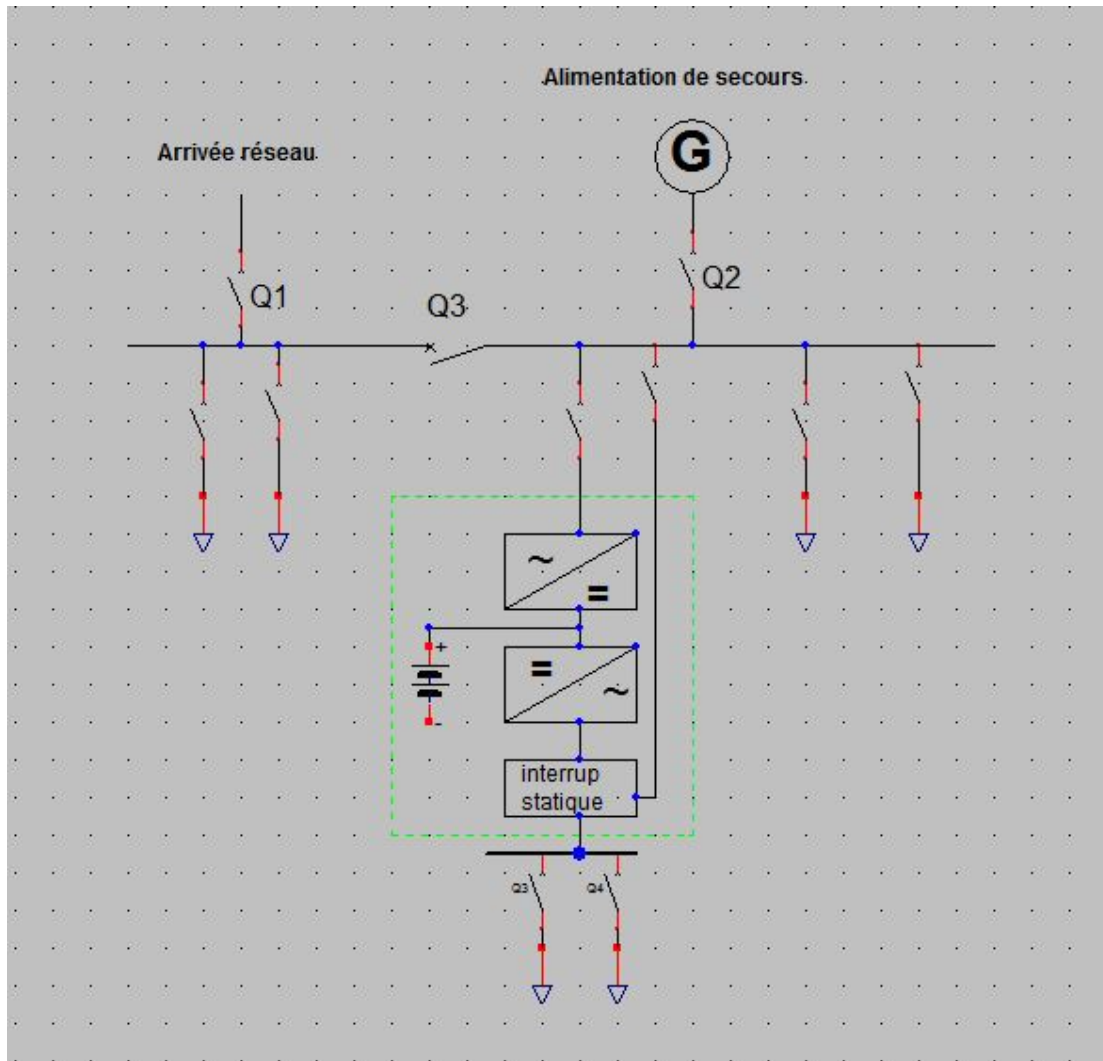
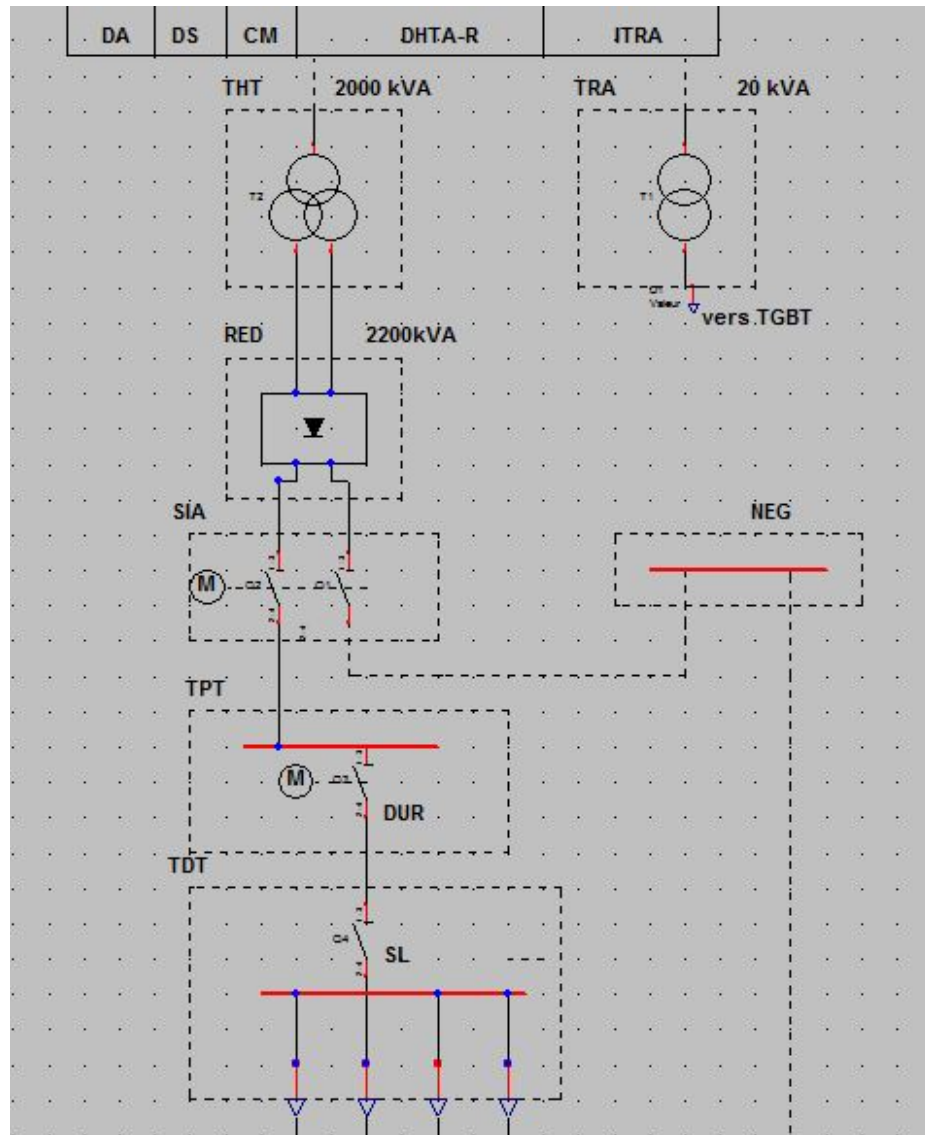


FIGURE 2.19: Système d'alimentation sans interruption passive sur AutoCAD)

**Les types de sous stations :** Dans chaque sous station de traction, il y aura un tableau de protection traction (TPT), ce dernier est constitué des cellules disjoncteurs ultra rapides (DUR) qui alimentent les tronçons des lignes à travers l'armoire de sectionnement automatique où on distingue deux types de sous station [17] :

1. Les sous stations qui n'alimentent qu'une section électrique sont dites en dérivation ou en T. Un unique disjoncteur de voie alimente et protège une section électrique.

Le schéma unifilaire d'une sous station de type T est [Annexe B.1] :



**FIGURE 2.20:** Schéma unifilaire de la SST en T

2. Les sous stations qui alimentent deux sections électriques adjacentes sont dites en sectionnement ou (II). Deux disjoncteurs ultra rapides alimentent et protègent deux sections électriques indépendantes et séparées par un coupon (isolateur de section). Ce type de distribution consiste en deux distributions en T en parallèle avec un couplage possible entre les deux sections. Ce couplage est réalisé par un disjoncteur de secours télécommandé. La figure (2.21) représente le schéma unifilaire d'une SST de type II [AnnexeB.1] :

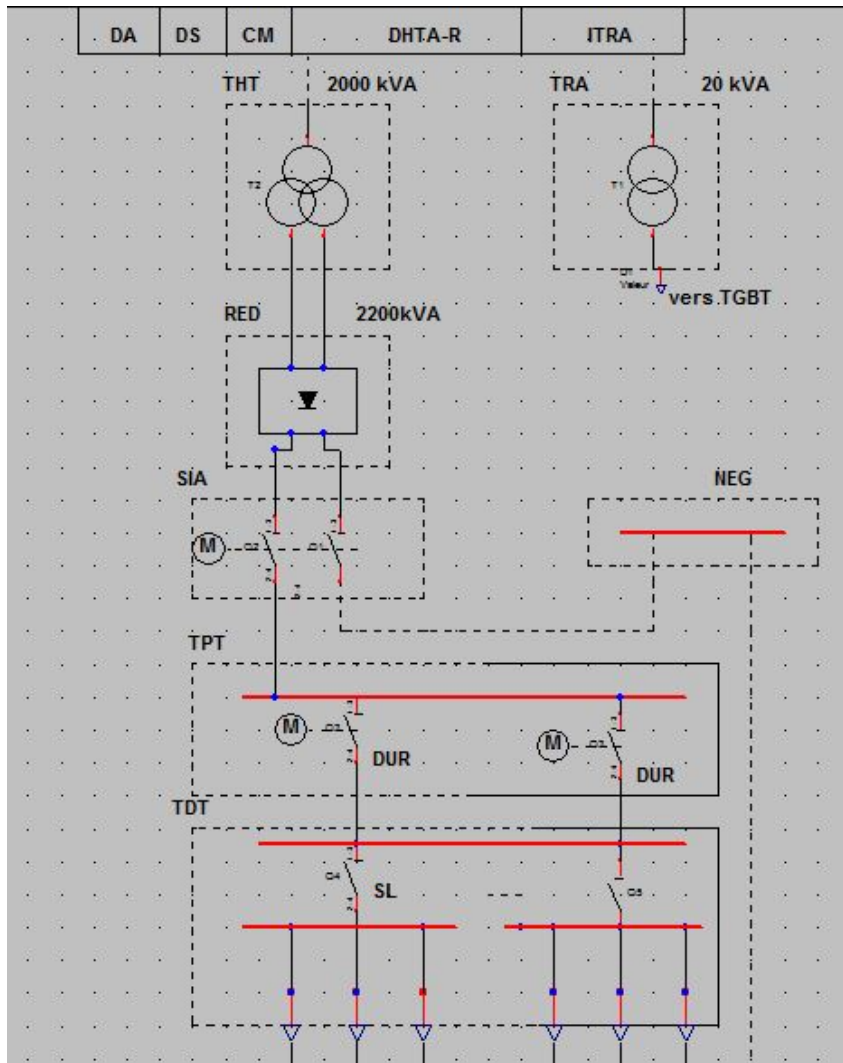


FIGURE 2.21: Schéma unifilaire de la SST en II

## Conclusion

Les itinéraires proposés par l'entreprise FERCONSULT présentent un compromis entre la faisabilité et la difficulté de réalisation, sur laquelle on abordera une approche améliorée dans le chapitre suivant.

L'utilisation des équipements de transformation, de mesure, de protection et de distribution est nécessaire pour alimenter tous les sous-systèmes continus ou alternatif, de haute tension ou de basse tension en tenant en considération la position des infrastructures statiques le long de toutes les lignes de traction.

# Dimensionnement des itinéraires proposés du tramway

## Introduction

Les chemins des systèmes ferroviaires doivent respecter d'une part certaines contraintes et certaines normes pour assurer le bon fonctionnement des systèmes, et d'autre part l'énergie adéquate et suffisante par l'intermédiaire du bilan de puissance de ce système.

Le réseau d'alimentation de traction nécessite la détermination du nombre des sous-stations de traction et la structuration du poste haute tension afin de couvrir les besoins énergétiques d'une manière permanente et durable en tenant compte de toutes les pertes susceptibles durant les périodes normales et critiques (durant les heures de pointe, durant les chutes de tension sur la LAC).

Nous abordons par la suite ces points d'une manière où nous déterminant les relations de cause à effets de ce système dans le détail.

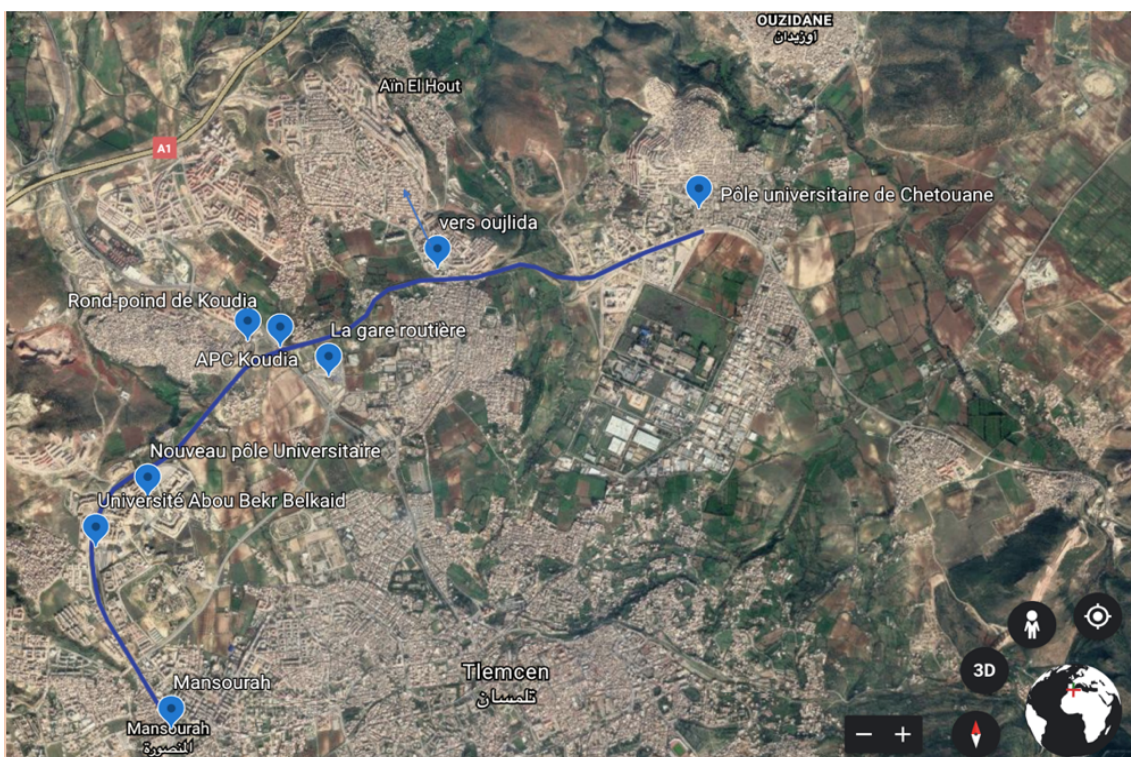
### 3.1 Choix d'itinéraire

À l'aide de l'étude qui a été faite par la société portugaise FERCONSULT en ce qui concerne les corridors et les scénarios proposé basant sur les prévisions socio-économiques citée dans le chapitre précédent, deux itinéraires corrigés sont proposés dans cette thèse on se basant sur les critères suivants :

- Ces deux itinéraires corrigés sont les plus communs entre tous les scénarios cités par FERCONSULT.

- Ces deux itinéraires corrigés présentent le minimum d'obstacles possibles (patrimoine, hydrologique, géologique, géotechnique ...).
- Ces itinéraires corrigés présentent un cout d'investissement relativement faible.

Le premier itinéraire corrigé est d'une longueur près de 8 000 m, il lie principalement les deux grands pôles universitaires (le pôle scientifique à Chetouane et l'université de Belkaid à côté de la rocade) passant par la gare routière et aussi par l'assemblées populaires communales d'El Koudia sachant qu'il y'a approximativement 50 000 étudiants. De plus, cette ligne a un portail de mobilité vers Oujlida où existe une évolution et une grande croissance d'habitants et des élèves. La figure 3.1 présente le premier itinéraire proposé sur Google Earth.

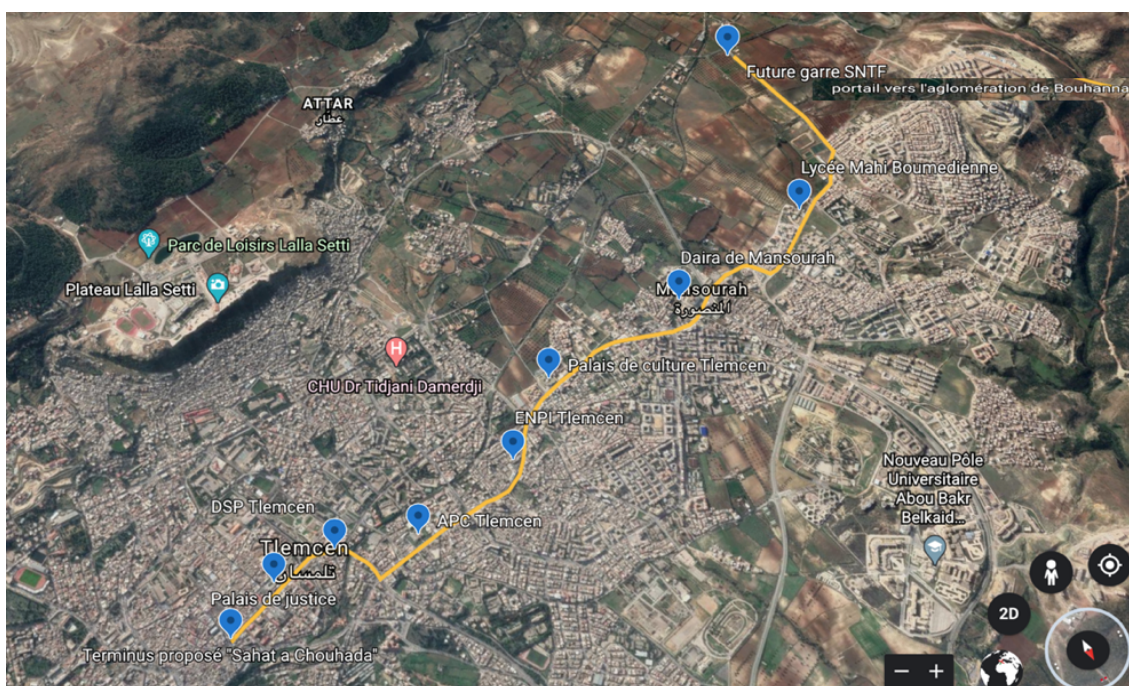


**FIGURE 3.1:** Le premier itinéraire proposé

Le deuxième itinéraire corrigé est d'une longueur de 6 830 m, il lie principalement la future gare SNTF et le centre ville de la wilaya de Tlemcen plus précisément à Sahat El Chouhada passant par différentes institutions comme la Daïra de Mansourah, le palais de culture, l'Entreprise National de Promotion Immobilière et l'Assemblées populaires communales de la wilaya de Tlemcen. Parmi les raisons principales de choisir cet itinéraire est leur position géographique car il traverse le centre ville qui génère un potentiel très élevé de mobilité pendant toute les période d'exploitation et d'une manière plus chargé dans les heures de pointes. De plus, la future gare SNTF sera un grand générateur de voyageurs du fait qu'il concentre une forte demande, aussi le terminus évite la déviation vers la Médina ou l'obligation de passer par El



Machwar où il y'a beaucoup de patrimoine. La figure 3.2 présente le deuxième itinéraire proposé sur Google Earth.



**FIGURE 3.2:** Le deuxième itinéraire proposé

Les itinéraires corrigés proposes totalisent une distance de 14 830 *m*, ils présentent aussi une flexibilité à long terme en cas d'ajout d'autre corridors ou d'autres itinéraires.

### 3.1.1 La normalisation d'itinéraire

Le système de transport concerné est un tramway sur fer d'une longueur comprise entre 40 et 45 *m* et d'une largeur de 2,65 *m* (Citadis 402). Il nécessite une pose de voie avec un type adapté à l'environnement et n'affecte pas son fonctionnement. Il y'a deux normes à respecter :

- La pente maximale entre chaque deux stations des voyageurs (pente maximal normal en ligne) dans chaque tançons du chemin est 6% [16].
- La pente maximale au démarrage du tramway (pente maximal en station) est de 2% [17].

La vérification de ces normes était faite via une application web sur internet [38].

#### A) Norme 1

Pour la première norme, on prend l'exemple entre le point A (qui se trouve à une distance de 5540.05 *m* du point départ) et le point B (qui se trouve à une distance de 398 *m* du point A), comme il est montré dans la figure suivante par Google Earth :

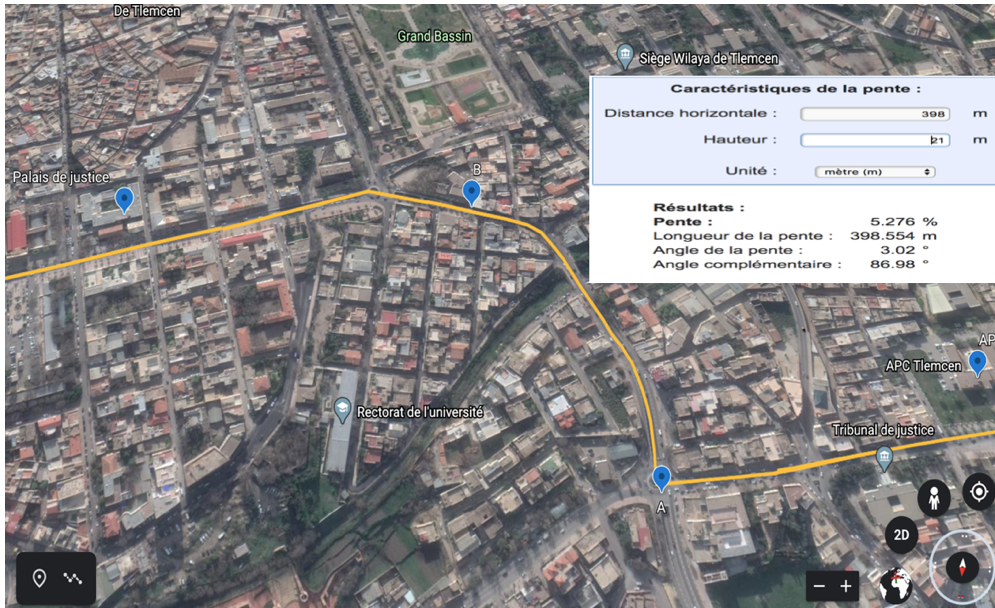


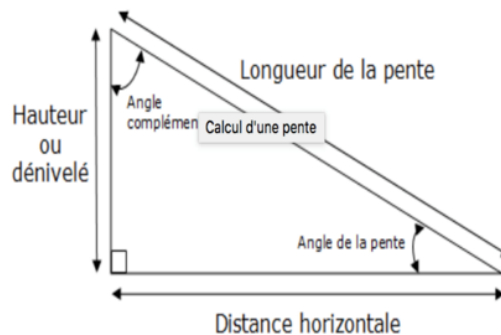
FIGURE 3.3: Calcul de la pente entre A et B.

**Résultat 3.1.1** La pente dans ce traçons égale à 5.276% donc elle est inférieure à la norme citée précédemment d'où la faisabilité du système.

#### B) Norme 2

Pour la norme de démarrage du tramway, elle est calculée de la manière suivante :

La vitesse moyenne au démarrage du moteur est  $12.5 \text{ km/h}$  c'est dire approximativement  $3.472 \text{ m/s}$ , cette vitesse moyenne est parcourue dans un temps de  $5 \text{ s}$ , sachant que la distance est la vitesse multiplier par le temps et égale à  $17.36 \text{ m}$ , cette distance calculée est la longueur de la pente mais pour calculée la pente il faut calculée la distance horizontale qui est expliqué par le schéma suivant via le théorème de Pythagore :



Si on pose :

- La longueur de la pente est  $a = 17.36 \text{ m}$  ;
- La hauteur est  $b$  ;

— La distance horizontale est  $c$ .

D'après le théorème de Pythagore :  $c^2 = a^2 + b^2$  où on trouve que la distance horizontale dépend de la hauteur entre la position du tramway en arrêt et après une distance de démarrage (longueur de pente) égale à  $17.36 \text{ m}$ , il y'a deux possibilité :

1. **Selon le tronçon** entre le point C (qui se trouve à une distance de  $4479.02 \text{ m}$  du point départ du deuxième itinéraire proposé) et le point D (qui se trouve à une distance de  $17.36 \text{ m}$  du point A), la hauteur dans ce tronçon est de  $0.35 \text{ m}$  d'où la distance horizontale sera égale à  $16.307 \text{ m}$ , par conséquent la pente sera  $1.966\%$  ce qui est inférieure à  $2\%$ .



FIGURE 3.4: Calcul de la pente entre C et D.

2. **Selon le tronçon** entre le point E (qui se trouve à une distance de  $4563.34 \text{ m}$  du point départ du deuxième itinéraire proposé) et le point F (qui se trouve à une distance de  $17.36 \text{ m}$  du point E), la hauteur dans ce tronçon est de  $0.8 \text{ m}$  d'où la distance horizontale sera égale à  $16.72 \text{ m}$ , par conséquent la pente sera  $4.785\%$  ce qui n'est pas faisable parce que cette pente est supérieure à  $2\%$ .



FIGURE 3.5: Calcul de la pente entre E et F.

**Résultat 3.1.2** *On remarque que la pente calculée entre C et D satisfait la norme 2. Tandis que la pente entre E et F ne la vérifie pas. Par conséquent, l'exploitant doit choisir les positions adéquates des stations voyageurs (selon les exigences géographiques) tout en vérifiant cette norme.*

## 3.2 Dimensionnement des sous stations de traction

### 3.2.1 Données d'entrée du premier tronçon :

1. Ligne aérienne de contact :
  - Tension nominale de la LAC : 750 V CC.
  - Limite de tension de la LAC : selon la norme EN 50163 (Annexe A.11).
    - Tension maximale de la LAC : 900 V CC.
    - Tension minimale de la LAC : 525 V CC.
2. Données d'exploitation :
  - Longueur de ligne (premier tronçon) :  $L = 6830 \text{ m}$ .
  - Nombre de stations :  $N = 13$  stations.
  - Temps d'arrêt en station : 20 s.
  - Temps d'arrêt en station terminus : 240 s.
  - Vitesse commerciale : 20 km/h.
  - Distance moyenne entre stations : 530 m

### 3. Matériel roulant : Citadis 402 [24] [25]

- La masse à vide : 55 tonnes.
- La masse avec 5 passagers ( 1 assis + 4 debout) / $m^2$  (charge nominale) : 76 tonnes.
- La masse avec 7 passagers ( 1 assis + 6 debout) / $m^2$  (charge nominale) : 84 tonnes.
- Vitesse maximale (théorique) : 70 Km/h.
- Accélération maximale : 1.25  $m/s^2$ .
- Courant maximum du pantographe : 1450 A.

### 3.2.2 Demande du courant de traction

Selon les données des fournisseurs des équipements, ces derniers peuvent supporter le courant suivant :

- Courant demandé par les transformateurs auxiliaires : 100 A ( $P_{aux} = 74 kW$ ).
- Courant maximale de traction : 1350 A ( $P_{traction} = 1013 kW$ ).
- Courant maximum du pantographe : 1450 A ( $P_{max} = 1087 kW$ ).
- Rendement du matériel roulant :  $\eta = 83\%$ .

### 3.2.3 La puissance nécessaire pour dépasser la résistance de démarrage

Cette puissance est donnée par la formule suivante :

$$P = \frac{((R \times 1000 \times V)/3600)}{\eta} + x = 86 kW \quad (3.1)$$

Tel que :

- $x = 15\%$  représente d'autres pertes.
- $\eta = 0.83$  rendement du matériel roulant [17].
- $V = 50 Km/h$  est La vitesse de véhicule à vide.
- R : présente la résistance de démarrage, elle est calculer par la formule de Devis :

$$R(N) = M \times 9.81 * (P + 2.5 + \frac{V^2}{850}) = 4.483 KN \quad (3.2)$$

Sachant que :

- M : Masse de véhicule 84 tonnes.
- P : La pente dans cette phase elle n'est pas prise en compte.
- V : La vitesse de véhicule Km/h.

En ajoutant la puissance des équipements auxiliaire  $P_{aux}$  [24], la puissance totale demandée à une vitesse maximale de 50 km/h sera :

$$P_T = P_{aux} + P = 86 + 74 = 160 kW. \quad (3.3)$$

Cette valeur maximale sera utilisée pour toutes les vitesses pour satisfaire le côté sécuritaire des besoins d'énergies [17].

### 3.2.4 La puissance moyenne demandée par une rame

La puissance moyenne demandée par une rame lors du trajet d'aller est donnée de la manière suivante :

$$P_{rame} = \frac{E_T}{t_t}$$

Où  $E_T$  est l'énergie total demandée durant tout le trajet d'aller et  $t_t$  représente le temps parcouru. La détermination de ces paramètres est basée sur les conditions suivantes :

- Chaque rame en accélération moyen a besoin d'une puissance de  $P_{acc} = 716 \text{ KW}$ .
- La demande d'énergie à la décélération et l'arrêt est  $P_{arrt} = 74 \text{ kW}$ .
- Temps d'accélération et de décélération est  $t_1 = 13.89 \text{ s}$ .
- Temps entre deux stations est  $t_2 = 12.29 \text{ s}$ .
- Temps d'arrêt en station est  $t_3 = 20 \text{ s}$ .
- Temps d'arrêt en terminus est  $t_4 = 240 \text{ s}$ .
- Nombre de stations est  $N = 13 \text{ stations}$ .

L'énergie totale  $E_T$  est donnée par :

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 = 499\,152 \text{ kJ}$$

Où :

#### 1. L'énergie d'accélération :

$$E_1 = P_{acc} \times t_1 \times (N - 1) = 119\,342,88 \text{ kJ}$$

#### 2. L'énergie dissipé par le tramway entre deux stations :

$$E_2 = P_T \times t_2 \times (N - 1) = 23\,596.8 \text{ kJ}$$

#### 3. L'énergie d'arrêt en sation :

$$E_3 = P_{arrt} \times t_3 \times (N - 1) = 12\,334.32 \text{ kJ}$$

#### 4. L'énergie de décélération :

$$E_4 = P_{arrt} \times t_1 \times (N - 1) = 17\,760 \text{ kJ}$$

### 5. L'énergie d'arrêt en terminus :

$$E_5 = P_{arrt} \times t_4 = 17\,760 \text{ kJ}$$

**Résultat 3.2.1** Pour une durée d'un trajet d'aller égale à 960,84 s la puissance moyenne demandée par une rame d'un tramway est 197.09 kW .

### 3.2.5 Nombre total des rames sur la ligne aux heures de pointes

Le nombre total des rames circulant sur le premier itinéraire aux heures de pointes est donné par la formule suivante :

$$\text{nombre de rame} = \frac{(2 \times \frac{L}{V_m}) \times 60}{Fr} \quad (3.4)$$

- $L$  : Longueur du tronçon en  $Km$ .
- $V_m$  : Vitesse d'exploitation moyenne en  $Km/h$ .
- $Fr$  : Fréquence (Intervalle entre deux rames) en Minute.

Pour calculer la vitesse d'exploitation moyenne de ce système on doit calculer la vitesse théorique (arrêts compris) :

$$V = \frac{L}{t} = \frac{6.83}{t/3600} = 25.5 \text{ km/h} \quad (3.5)$$

Sachant que les pertes à cause des courbes serrés, les franchissements routiers, d'autres limitations de vitesse et le retard imprévu sont estimés à 15%, alors la vitesse commerciale d'exploitation (arrêts et pertes inclus) est de 21  $km/h$ .

En se basant sur cette vitesse d'exploitation de 21  $km/h$  sur le premier tronçon de 6.83  $km$  avec une fréquence de 240 s, on trouve que le nombre total de rame sur la ligne aux heures de pointes est [19] [17] :

$$\text{nombre de rame} = \frac{(2 \times \frac{6.83}{21}) \times 60}{4} = 9.7 \text{ (soit 10) rames}$$

### 3.2.6 Puissance totale de traction aux heures de pointes

La puissance totale de traction aux heures de pointes est :

$$P_T = P_{echange} + P_M = 2\,119 \text{ kW} \quad (3.6)$$

où

- $P_{echange}$  est la puissance demandée de deux rames en moment d'échange au bout de la ligne est de  $2 \times 74 \text{ kW}$ .

- $P_M$  est La demande moyenne d'énergie de traction en heures de pointes (service) donnée par :

$$P_M = n \times P_{rame} = 1\,970.9 \text{ kW} \quad (3.7)$$

où  $n$  est le nombre de rame.

La puissance moyenne de traction consommée par kilomètre pourra s'écrire comme suit :

$$P_{moy} = \frac{P_T}{L} = \frac{2\,119}{6.83} = 310.25 \text{ kW/Km} \quad (3.8)$$

Sachant que  $L$  est la longueur de la ligne.

### 3.2.7 Sous station de traction

Le dimensionnement des équipements des sous stations de traction est réalisé sur une conception standard, et répondra aux plusieurs fournisseurs d'équipements sur le marché international.

1. Classe de service des équipements sélectionné :
  - Transformateur de traction : 2 000 KVA (EN 50329 classe de service V) (annexe A.12).
  - Redresseur de traction : 2 200 KVA (EN/IEC 60146-1-1 classe de service V)(annexe A.13).
2. La tenue de charge des équipements classe V est la suivante :
  - 100% : En régime normal : 2 900 A
  - 150% : Durant 2 h : 4 350 A
  - 200% : Durant 620 s : 5 800 A

#### Le nombre de sous stations sur la première ligne

Comme il est mentionné dans le premier chapitre, la distance entre les SST est entre 500 m et 2.5 km alors dans ce travail à l'aide d'une argumentation par récurrence on a pu estimer le nombre total de sous station de traction de la première ligne par 5 SST avec une distance moyenne entre les sous stations de 1.377 Km.

- Chaque rame en accélération maximal a besoin d'une puissance de :

$$P_{max} = 1\,087 \text{ KW}$$

- Chaque rame en accélération moyen a besoin d'une puissance de :

$$P_{acc} = 716 \text{ KW}$$



— Le nombre de rame alimenté par une seule sous station est :

$$n = \frac{\text{nombre de rame}}{\text{nombre de SST}} = 2 \text{ rames}$$

Sachant que  $P_{perte1}$  et  $P_{perte2}$  sont des pertes de traction estimées à un taux de  $r = 8,6\%$  [24], le courant maximal de chaque sous station est :

1. **Si deux rames sont en accélération moyenne :**

$$P_{perte1} = P_{acc} \times r = 716 \times 0.086 = 61.576 \text{ W} \quad (3.9)$$

$$I_1 = \frac{P}{V} = \frac{(P_{acc} + P_{perte1}) \times 2}{750} = 2\,073.536 \text{ A} < 2\,900 \text{ A}. \quad (3.10)$$

2. **Si deux rames sont en accélération maximale :**

$$P_{perte2} = P_{max} \times r = 1\,087 \times 0.086 = 93.482 \text{ W} \quad (3.11)$$

$$I_2 = \frac{P}{V} = \frac{(P_{max} + P_{perte2}) \times 2}{750} = 3\,147 \text{ A} < 4\,350 \text{ A} \quad (3.12)$$

3. **Si trois rames en demande maximale sur une zone alimentée par une seule sous-station (en cas de panne d'une SST) :**

$$I_3 = \frac{P}{V} = \frac{(P_T + P_{perte2}) \times 3}{750} = 4\,721.928 \text{ A} < 5\,800 \text{ A} \quad (3.13)$$

Calculant la puissance moyenne débitée par une SST en heures de pointe :

$$P_m = \frac{P_T}{\text{nombre de SST}} + P_{perte1} = 460.25 \text{ kW} \quad (3.14)$$

**Résultat 3.2.2** *Globalement 5 sous stations de traction avec 5 transformateurs à une classe de service V vont satisfaire les besoins en énergie sur toute la première ligne, sans oublier le côté sécuritaire de la ligne aérienne de contact (capacité de transport de courant et le calcul de la chute de tension) qui va être détaillé dans la section suivante.*

Cette étude nous a permis de calculer la demande en puissance de la première ligne du tramway et ainsi le nombre deS sous stations de traction et identifier les contraintes possibles. Ces calculs ont permis d'écrire un programme sur MATLAB [annexe C.1] pour estimer les besoins énergétiques des autres lignes et aussi les paramètres suivantes : la distance moyenne entre les sous stations, les vitesses de fonctionnement théorique et opérationnelles, la puissance en heures de pointes et aussi la puissance moyenne consommées par kilomètre. Il suffit d'entrer la longueur de la ligne pour obtenir les paramètres cités précédemment de chaque ligne.

```

donner la longueur de la ligne L :
6.83
la longuer de la ligne est: 6.83kM
le nombre des stations est: 13stations
la puissance moyenne demandée par un tramway est: 198.57 kW
la vitesse de fonctionnement theorique est: 25.5901 km/h
la vitesse d exploitation est: 21.7516km/h
le nombre des rames sur la ligne est: 10 rames
la puissance totale de traction en heure de pointe est: 1985.7 kW
la puissance moyenne consommée par kilomètre est: 290.7321 kW
le nombre de sous station de traction est4.9601 sous-station
fx >> |

```

**FIGURE 3.6:** Résultats du programme pour la première ligne.

Pour vérifier la faisabilité du programme pour la première ligne, on a comparé les résultats obtenus précédemment avec les résultats obtenus par l'intermédiaire du programme dans la figure 3.6.

Les résultats obtenus par le programme sont presque similaires aux résultats obtenues précédemment (section 3.3), cela nous permet d'estimer les besoins énergétiques de l'autre ligne et même pour des lignes prévus à long terme, alors les résultats du programme pour la deuxième ligne sont montrés dans la figure 3.7.

```

donner la longueur de la ligne L :
8
la longuer de la ligne est: 8kM
le nombre des stations est: 15stations
la puissance moyenne demandée par un tramway est: 203.1795 kW
la vitesse de fonctionnement theorique est: 26.6425 km/h
la vitesse d exploitation est: 22.6461km/h
le nombre des rames sur la ligne est: 12 rames
la puissance totale de traction en heure de pointe est: 2438.1543 kW
la puissance moyenne consommée par kilomètre est: 304.7693 kW
le nombre de sous station de traction est5.8097 sous-station
fx >> |

```

**FIGURE 3.7:** Résultats du programme pour le deuxième tronçon

### 3.2.8 Évaluation de la capacité du courant de la ligne aérienne de contact

La capacité de transport (courant continu) d'un fil de contact de  $150 \text{ mm}^2$  de section en Cu (cuivre) est  $583 \text{ A}$  et celle d'un feeder d'alimentation de  $120 \text{ mm}^2$  en Cu est  $377 \text{ A}$ , alors la capacité de transport de la ligne aérienne de contact sera :

$$I_{LAC} = 583 + 377 = 960 \text{ A}$$

( en conformité avec la norme EN 50 119 [Annexe A.16]).

1. **Le courant circulant aux heures de pointes** (la première ligne) :

$$I_m = \frac{P}{V} = \frac{\left(\frac{P_T + P_{perte}}{5}\right)}{750} = 613.66 \text{ A} < I_{LAC} \quad (3.15)$$

où :

$P_T$  : La puissance totale de traction en heure de pointe.

$P_{perte}$  : Les pertes estimés à 8.6% .

2. **Évaluation de la chute de tension sur la ligne aérienne de contact** : La chute de tension critique au milieu de deux sous stations adjacentes en présence de deux rames, qui consomment au maximum un courant de 1450 A est [17] [annexe C.2] :

$$\Delta U = 156.75 \text{ V}$$

Sachant que la tension de redresseur à vide (courant continu) est supérieure à la tension nominale de 10% (soit  $U_0 = 825 \text{ V CC}$ ), la tension de la ligne de contact dans ces conditions est :

$$U = U_0 - \Delta U = 825 - 156.75 = 668 \text{ V}$$

Cette valeur est acceptable (plus de  $0,8 U_n$ ) et le tramway pourra être utilisé en plein charge.

### 3.2.9 Évaluation de la LAC dans les conditions critiques (cas d'une sous station hors tension)

1. **Contrôle du courant admissible par la ligne aérienne de contact** :

Le courant moyen en heure de pointe dans les conditions critiques (une sous station hors ligne) est :

$$I_M = \frac{P}{V} = I_m \times 150\% = \frac{\left(\frac{P_M + P_{perte}}{5}\right)}{750} \times 1.5 = 920.49 \text{ A}$$

Or la capacité de transport du courant continu par la ligne aérienne de contact (Fil de Contact + Feeder) est  $I_{LAC} = 960 \text{ A}$ . Donc, cette capacité de transport en courant continu peut supporter le courant moyen en heure de pointe (dans les conditions critiques).

2. **Chute de tension sur la ligne aérienne de contact** :

La chute de tension sur une portée (distance) maximale dans le cas d'une SST hors tension sera 50% de plus que dans les conditions normales

$$\Delta U_{critique} = \Delta U \times 150\% = 156.75 \times 1.5 = 235 \text{ V}$$

La tension du fil de contact au point critique est :

$$U_{critique} = U_0 - \Delta U_{critique} = 825 - 235 = 590 \text{ V} \approx 0,8 U_n$$

- .
- 3. Conclusion pour la conception des SST et LAC :** Au total 5 sous stations (sur le premier tronçon) avec un transformateur et un redresseur de 2000 *KVA*, 2200 *KVA* respectivement d'une classe de service V, suffira les besoins énergétiques en heures de pointe avec 10 rames en service et assurera le bon fonctionnement du système de transport de charge (LAC). Cette conception répond aux conditions anormales et n'affecte pas le fonctionnement et la fiabilité du système d'alimentation en énergie électrique.

### 3.3 Choix de l'alimentation d'arrivée

Le choix de la tension d'arrivée adéquat pour l'alimentation du tramway (EN 50163)(annexe A.11) se fait à partir de certains paramètres. Deux contraintes mis en points :

1. Le décrit du moment électrique en Algérie.
2. La capacité d'énergie disponible dans les postes sources utilisés pour l'alimentation.

### 3.3.1 Bilan de puissance

**TABLE 3.1:** La puissance installée

Les équipements	Les puissances (KVA)
Transformateurs de Traction (ligne 1)	$5 \times 2000$
Transformateur Auxiliaire (400 V) (ligne 1)	$5 \times 200$
Transformateurs de Traction (ligne 2)	$6 \times 2000$
Transformateur Auxiliaire (400 V)	$6 \times 200$
Transformateur Auxiliaire (400 V) (atelier et dépôt)	$1 \times 1000$
La puissance totale installée est	25 200

Pour la haute disponibilité et fiabilité de la source d'alimentation en énergie auxiliaire, deux transformateurs de (1000 KVA) seront installés dans la sous station du dépôt/atelier. Chacun d'entre eux pourra répondre au besoin énergétique (en termes de service auxiliaire) des équipements du dépôt/atelier.

**TABLE 3.2:** La puissance totale en heure de pointe

Equipements et pertes	Les puissances (KW)
Puissance de traction/Courant continu de la ligne 1	$460.25 \times 5 = 2\ 301.25$
Les pertes de ligne (ligne 1)	197.9
Les pertes de Transfo-Redresseur (ligne 1)	115.1
Puissance de traction/Courant continu de la ligne 2	$460.25 \times 6 = 2\ 761.5$
Les pertes de ligne (ligne 2)	237.5
Les pertes de Transfo-Redresseur (ligne 2)	138
Transformateur auxiliaire (400V)	1 056
Transformateur auxiliaire dépôt/atelier	560

Sachant que :

$$P = S \times \cos\varphi$$

où  $\cos\varphi = 0.8$

La puissance totale en heure de pointe ( partie haute tension) avec 3% de perte en ligne est : 7.611 MW.

### 3.3.2 Capacité d'énergie disponible dans les postes sources

Selon des informations de la filiale de distribution d'électricité de Tlemcen situé à El KIFEN, les postes source de Sidi Yaakoub et d'Abou Techfin ont quatre trans-

formateurs de 40 *MVA* en total, c'est à dire  $2 \times 40$  *MVA* pour chaque poste avec un poste supplémentaire à Abou Techfin, leur rôle est de fournir l'énergie à la ville de Tlemcen [22].

D'après les estimations effectuées dans la section précédente. la consommation énergétique en fonction des besoins de ce système ferroviaire en mettre en évidence la consommation de dépôt ( centre de maintenance) est approximativement 7.611 *MW* pour les deux tronçons, sachant que les itinéraires proposés totalisent une distance de 14830 *m*.

Le facteur de puissance d'un tel type de système avec un niveau de tension haute est égale à  $\cos\varphi = 0.80$ , alors d'après la relation qui lie la puissance apparente et la puissance active on trouve que la puissance apparente est 9.5138 *MVA*, cette puissance apparente présenté est relativement faible par rapport aux puissances installées dans les postes sources d'Abou Techfin et de Sidi Yacoub parce que elle ne présente même pas 9% de la puissance installée dans chaque poste source.

### 3.3.3 Le moment électrique

Le moment électrique est la capacité de puissance transformée dans une distance, il est défini par :

$$M = P \times L \quad (3.16)$$

Où *P* est La puissance demandée et *L* est la longueur entre le premier point de livraison et le PHT.

Le seuil du moment électrique diffère en fonction de deux paramètres, pour cela les exigences du raccordement au reseau sont donnée dans le tableau illustratif 3.3 [21].

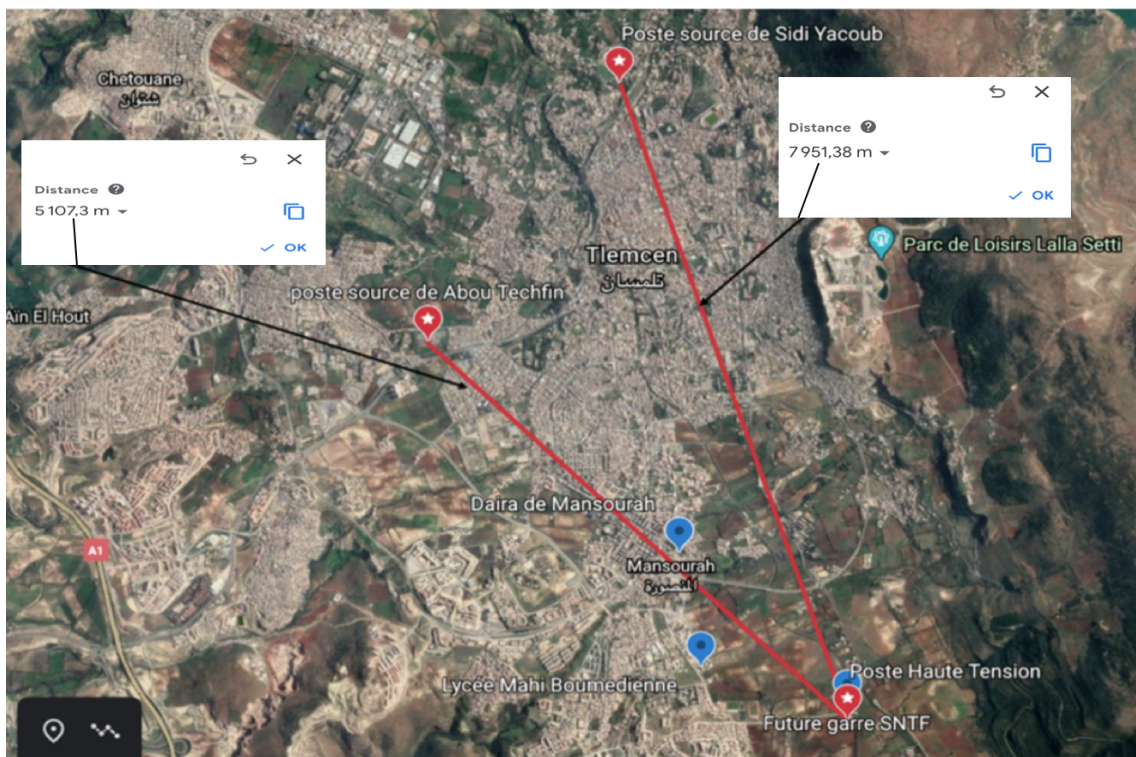
**TABLE 3.3:** Les exigence du raccordement au réseau.

<i>U</i> en (KV)	Classe	<i>P</i> en (KW)	<i>M</i> en (KW * Km) (arien)	<i>M</i> en (KW * Km)(souterrains)
5.5	HTA	2 500	2 000	4 000
10	HTA	5 000	7 000	14 000
30	HTA	15 000	60 000	12 0000
60	HTB	30 000	300 000	600 000
220	HTB	50 000	1000 000	2000 000
400	HTB	100 000	2500 000	5000 000

La propagation des sites résidentiels en Algérie est de manière aléatoire. De plus, la mauvaise infrastructure des données énergétiques souterraines rend le transport d'énergie souterrain difficile à réaliser. D'après ces contraintes on assure que l'acheminement aérien est le choix le plus utile et le plus simple à réaliser donc

à partir de ces normes et de la puissance estimées pour le cas du tramway de Tlemcen qui est  $7.611 \text{ MW}$  on constate que :

- Les puissances associées aux niveaux de tensions de  $5.5 \text{ KV}$  et celle du  $10 \text{ KV}$  ne suffisent pas.
- La puissance associée au niveau de tension de  $30 \text{ KV}$  couvre la puissance désirée mais lorsque les distances entre le poste haute tension de se système (le premier point de contact qui appartient au système ferroviaire) et les postes sources sont :
  - $L = 5\,107,3 \text{ m}$  à partir du poste d'Abou Techfin, cela ne présente aucun problème car :  $M = 38\,871.66 < 60\,000 \text{ KW.Km}$ .
  - $L = 7\,951.38 \text{ m}$  à partir du poste de Sidi Yacoub, cette distance présente un dépassement de la valeur du seuil du moment électrique car  $M = 60\,517.95 \text{ KW.Km}$ , or que le seuil mentionné dans le tableau référentiel précédent est de  $60\,000 \text{ KW.Km}$  (figure 3.8).



**FIGURE 3.8:** La distance entre les deux postes sources et le poste haute tension de tramway.

La puissance associée au niveau de tension de  $60 \text{ KV}$  couvre les charges de consommation et aussi vérifie largement la contrainte du moment électrique parce que ce dernier sera inférieur au seuil qui est de  $300\,000 \text{ KW.km}$ . De plus, le choix de ce niveaux de tension permet d'ajouter d'autre lignes à long terme sans aucun crains de dépasser les exigences du moment électrique.

**Résultat 3.3.1** *Le choix de la tension d'arrivée de 60 KV est meilleur car ce niveau de tension vérifie largement les paramètres cités précédemment.*

### 3.4 Schéma unifilaire du PHT

Ce schéma était fait sur AutoCAD électrique Figure 3.9, il représente les deux arrivées celle de Abou Techfine et celle de Sidi Yacoub avec un niveau de tension de 60 KV (système de redondance), chaque ligne est protégée par un sectionneur et un disjoncteur (NF C 63-120) pour la protection visuelle en charge et à vide. Des transformateurs de tension et de courant assure la mesure de la quantité d'énergie fournis par Sonelgaz et assure aussi l'isolation entre le niveau haute tension et les instruments de mesure à basse tension (EN 60044)(annexe A.14) .

Les deux jeux de barres assurent la répartition d'énergie entre ce système redondant même en cas de défaillance car il existe un disjoncteur de couplage entre ces deux jeux de barres, cette énergie est transformée par des transformateur de puissance (NF C 52-100) (annexe A.15) à 30 KV d'une part vers les sous stations via la boucle de traction de 30 KV à partir de deux jeux de barres couplés entre eux, et d'autre part vers les transformateurs de mise à la terre pour créer deux points neutre artificiels en cas de besoin. D'une troisième part la sortie des transformateurs de puissance du 60/30 KV est transformer par deux autres transformateurs ( système de redondance) à 400 V et 230 KV pour alimenter les équipements de basse tension disponible dans le PHT comme les systèmes d'alimentation sans interruption, l'éclairage, les systèmes de commande et de control, etc. . .



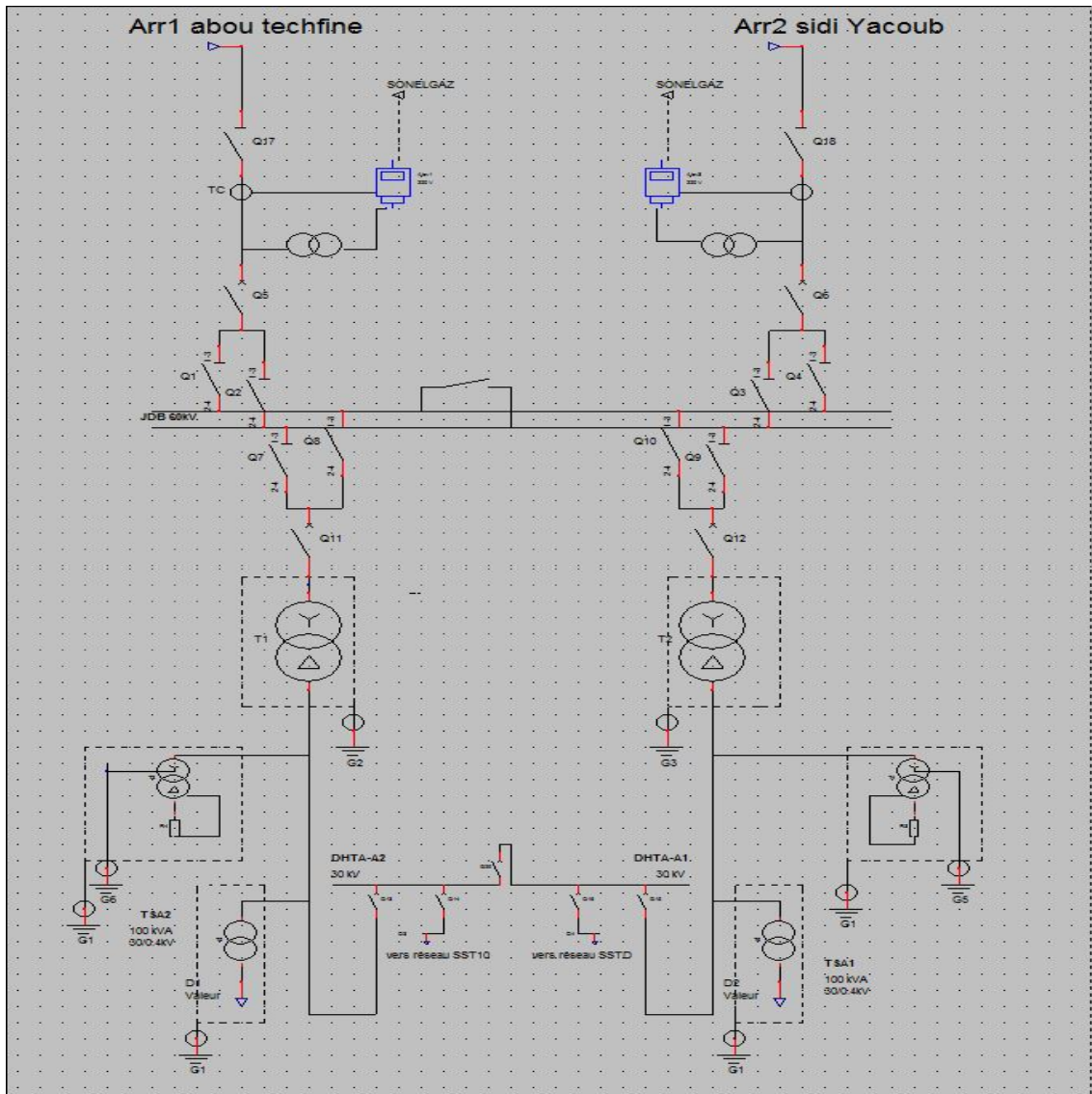


FIGURE 3.9: Schéma unifilaire d'un PHT [annexe B.2]

### 3.5 La topologie de raccordement de la boucle

La topologie utilisée ici consiste à lier les sous stations impaires en cascade et les sous stations pairs en cascade aussi, avec l'existence de deux lignes de secours en cas de défaillance entre deux sous stations de même type soit pair ou impair.

Chaque transformateur de puissance 60/30 KV situé à la sortie de la sous-station haute tension fournira de l'énergie à un type de sous-station qui est pair ou impair comme indiqué sur la figure 3.10.

Cette topologie de raccordement d'une part évite toute possibilité de coupure d'énergie et d'autre part évite la surcharge sur un seul transformateur comme le cas



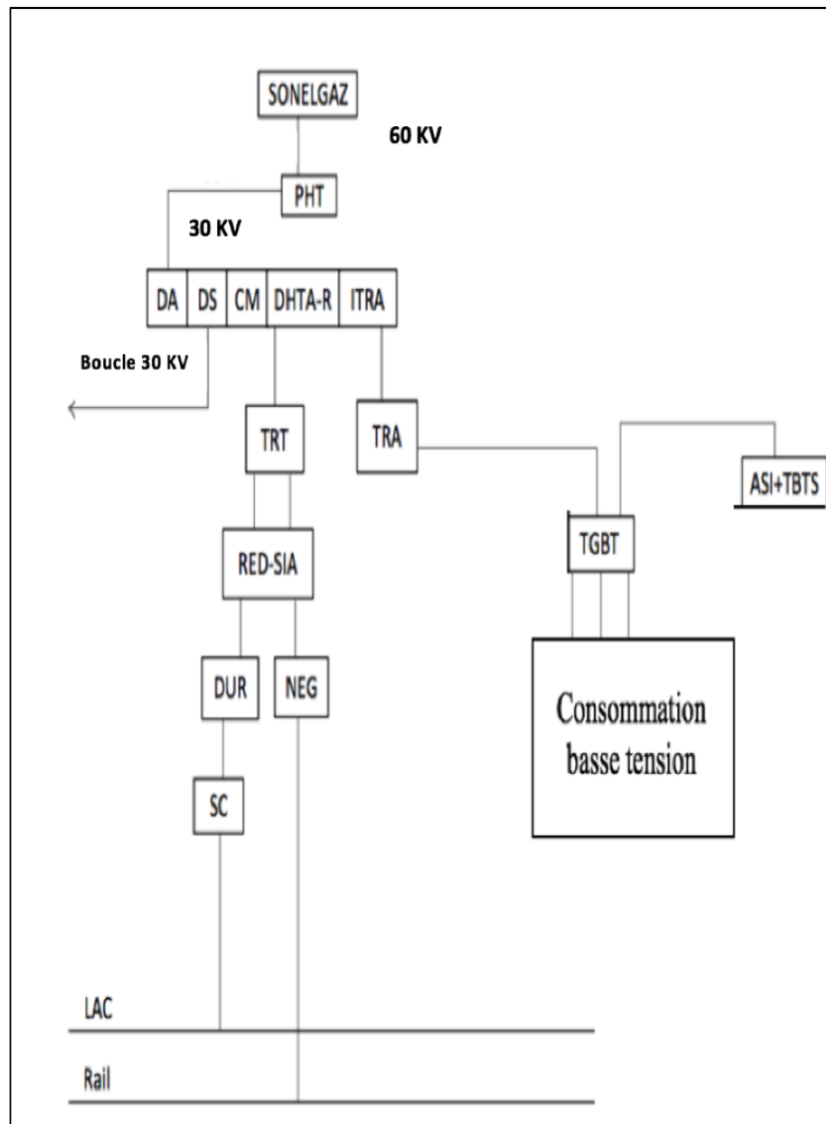


FIGURE 3.11: Schéma général du système d'alimentation de traction.

## Conclusion

Dans ce chapitre, deux itinéraires ont été proposés sur la base de l'étude de FERCONSULT et en respectant les différentes normes nécessaires au choix des itinéraires. Puis un dimensionnement est effectué afin de définir la demande d'électricité. Ce calcul prendra en compte la longueur de la ligne de tramway, la fréquence et le nombre de rames affectés pour la ligne. Ce calcul déterminera ce qui suit :

- Nombre de sous stations de traction ;
- Le besoin énergétique de la ligne ;
- Mode de raccordement des sous stations de traction le long de ligne.

Ensuite, Le tramway est alimenté en énergie à partir du réseau haute tension 30 KV

de SONELGAZ (par l'intermédiaire du poste haute tension 60/30 KV). L'énergie haute tension de 30 KV est distribuée par un réseau spécifique et transformée par la suite dans les sous-stations (SST) de manière à produire l'énergie de traction 750 V DC distribuée dans la LAC.

# Conclusion et perspectives

Ce travail avait pour ambition de modéliser le réseau d'alimentation d'un système ferroviaire (tramway) spécifique à la wilaya de Tlemcen, en se demandant si ce projet est réalisable ou pas, en tenant compte des différentes contraintes électriques et géographiques de la wilaya de Tlemcen.

Il a fallu dans un premier temps définir les itinéraires possibles selon les revendications géographiques et démographiques de la wilaya de Tlemcen à l'aide de l'étude faite par FERCONSULT et ne sélectionne que les itinéraires et les corridors exposés n'ayant le moins d'obstacle possible afin de modifier certains tronçons.

Pour le reste de ce travail on s'est focalisé sur la modélisation de la structure d'alimentation. Les résultats obtenus répondent d'une part aux exigences d'une conception électrique en matière d'infrastructures statique. d'autre part, le réseau créé assure l'énergie d'une manière permanente et redondante pour éviter tout types de coupure soit à cause d'un défaut technique ou à cause d'une maintenance préventive ou corrective.

Par faute de temps on n'a pas pu faire l'étude de :

- La compatibilité électromagnétique du système (l'environnement électromagnétique existant).
- La modélisation de calibrage des équipements de protection et aussi du câblage de tout le système.
- La maintenance préventive de ce système.

# Bibliographie

- [1] E. Morin, Modélisation d'un réseau électrique de tramway : du composant au système, Thèse de doctorat , Université Joseph-Fourier - Grenoble (2005).
- [2] J. Sibue, Conception de systèmes d'alimentation sans contact pour la traction ferroviaire, Thèse de doctorat, Université de Grenoble (2011).
- [3] J. Swanson, Light Rail Without Wires, Article, 9th National Light Rail Transit Conference.
- [4] [http ://clode.chez-alice.fr](http://clode.chez-alice.fr).
- [5] P. Chapas, Alimentation en énergie des trains - Distribution de l'énergie électrique, Article, Technique de l'ingénieur (2012).
- [6] I. Talil et F. Zerhouni, Conception d'une Sous-Station de Tramway, Article, ResearchGate (2018).
- [7] [https ://www.utp.fr](https://www.utp.fr).
- [8] J. Massat, Modélisation du comportement dynamique du couple pantographe-caténaire, Thèse de doctorat, École central de Lyon (2007).
- [9] G. Muller, Alimentation- Conception- Performances et design, Article, Technique de l'ingénieur (2012).
- [10] [http ://www.ocvia.fr](http://www.ocvia.fr).
- [11] [https ://securite-ferroviaire.fr](https://securite-ferroviaire.fr).
- [12] [http ://www.ferro-lyon.net](http://www.ferro-lyon.net).
- [13] O. Lmouden, Les courants vagabonds dans les installations ferroviaires DC, Article, Taqa Efficiency (2016).
- [14] [http ://ccta.fr](http://ccta.fr) .
- [15] [http ://www.hblpower.de/fr](http://www.hblpower.de/fr).
- [16] [https ://reseaustructurant.info](https://reseaustructurant.info).
- [17] Yuksel Proje, Rapport APD- Alimentation en énergie électrique (Sétif en 2013).
- [18] Tensions d'alimentation des réseaux de traction, quatrième édition, International electrotechnical commission.

- [19] Évaluer la commodité d'usage de transports publics, Rapport, Forum international des transports (2014).
- [20] Convertisseurs à semiconducteurs, quatrième édition, International electro-technical commission.
- [21] Les règles économique pour les droits de raccordement au réseaux, Journal officiel de la république algerienne N 19 (mars 2010).
- [22] M. Gadiri, Bilan de la Société de distribution de l'électricité et du gaz de l'ouest, Article, Journal EL MOUDJAHID (mars 2010).
- [23] W. Benhassani, La commande de tramway Cas de tramway de constantine, Mémoire de master, Université de Larbi ben m'hidi (2016).
- [24] <http://www.ferro-lyon.net>.
- [25] <http://transporturbain.canalblog.com>.
- [26] <https://www.courstechpro.com>.
- [27] <http://www.appconsultores.org.pt>.
- [28] <https://www.sonelgaz.dz>.
- [29] <https://www.directindustry.fr>.
- [30] <http://forge.blogspot.com>.
- [31] <http://forge.blogspot.com>.
- [32] <https://pdf.directindustry.fr>.
- [33] <http://eleectrotechnique.fr>.
- [34] <http://eleectrotechnique.fr>.
- [35] <https://www.epsic.ch>.
- [36] <https://www.elo-energie.com>.
- [37] <http://tram.bordeaux.free.fr>.
- [38] <https://www.lememento.fr/calcul-pente>.
- [39] Étude de faisabilité d'une ligne de tramways dans l'agglomération de Tlemcen, Rapport, FERCONSULT (2014).
- [40] L. Jafrane et T. Dahbi, Amélioration des performances du réseau électrique de la région Casablanca -Mohammedia, Mémoire de master, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah(2016) .
- [41] M. Zellagui, Étude des protections des réseaux électrique MT (30 & 10 kV), Université Mentouri Constantine (2010). .
- [42] F. Amrani et R. Belkassa, Étude des protections des départs moyenne tension, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou (2009).

- [43] <https://library.e.abb.com>.
- [44] <https://ritz-international.com>.
- [45] <http://www.surprises.ch/HT/annexes/CT-062.pdf>.
- [46] A. Abdelkebir et N. Saadi, Application de la Logique Floue pour le Diagnostic des Transformateurs de Puissance par Analyse des Gaz dissous, Université M'hamed Bougara-Boumerdes (2017) .
- [47] <https://www.artech.com>.
- [48] A. Mehamli et Y. Yousfi, Systeme d'alimentation du tramway de Constantine, Université Constantine 1 (2014).
- [49] <http://logytel.es>.
- [50] <https://catuelec.com>.



# Annexe A :

## **A.1 NF C 63-130**

la norme NF C 63-130 est applicable à l'appareillage suivant : interrupteurs, sectionneurs, interrupteurs-sectionneurs et combinés-fusibles, destinés à être insérés dans des circuits de distribution et des circuits de moteurs dont la tension assignée est inférieure ou égale à 1000 V en courant alternatif ou à 1500 V en courant continu.

## **A.2 CEI 60044-1**

Transformateurs de mesure : Prescriptions concernant les transformateurs de courant pour protection pour la réponse en régime transitoire

## **A.3 CEI 60044-2**

la norme de CEI 60044-2 s'applique aux nouveaux transformateurs de tension inductifs destinés à être utilisés avec des instruments de mesure électriques et des dispositifs de protection électriques à des fréquences de 15 Hz à 100 Hz.

Bien que cette norme concerne essentiellement les transformateurs à enroulements séparés, elle s'applique également, le cas échéant, aux autotransformateurs. Cette norme ne s'applique pas aux transformateurs destinés à être utilisés en laboratoire.

## **A.4 IEC 60076-1**

La CEI 60076-1 :2011 s'applique aux transformateurs de puissance triphasés et monophasés (y compris les autotransformateurs), à l'exception de certaines catégories de petits transformateurs et de transformateurs spéciaux.

## **A.5 EN 50123-X**

La série des EN 50123 spécifie les exigences relatives aux appareillages et aux appareils de commande à courant continu et est conçue pour être utilisée dans des installations électriques fixes dont la tension nominale ne dépasse pas 3000 V en courant continu, qui alimentent en courant électrique les véhicules destinés au transport public guidé.

## **A.6 NFEN60146**

La présente Norme internationale spécifie les exigences relatives aux caractéristiques de fonctionnement de tous les convertisseurs électroniques de puissance à semiconducteurs, ainsi que des commutateurs électroniques de puissance à semiconducteurs utilisant des valves électroniques, commandables et/ou non commandables.

## **A.7 NF F 41-023**

La présente norme est applicable à l'appareillage de traction, pour l'usage intérieur suivant : sectionneurs dans l'air ; interrupteurs-sectionneurs dans l'air ; destinés à être insérés dans des circuits de distribution à courant continu dont les tensions d'emploi assignées sont : 750 V, 1500 V et 3000 V.

## **A.8 CEI 60255**

La norme CEI 60255 spécifie les exigences et les règles communes applicables aux relais de mesure et aux équipements de protection. Cela inclut toute combinaison de dispositifs pour former des schémas de protection du système d'alimentation tels que les équipements de contrôle, de surveillance et d'interface de processus afin d'obtenir une uniformité des exigences et des essais.

## **A.9 EN 50122-1**

La présente Norme Européenne spécifie les exigences relatives aux mesures de protection concernant la sécurité électrique dans les installations fixes associées à des systèmes de traction en courant alternatif et/ou continu et dans toutes les installations susceptibles d'être affectées par le système d'alimentation de traction. Elle s'applique également à toutes les installations fixes qui sont nécessaires pour

garantir la sécurité électrique lors des travaux de maintenance réalisés sur des systèmes de traction électrique.

## **A.10 NF C15-100**

La norme française NF C15-100 régleme les Installations électriques en basse tension en France. Elle porte plus précisément sur la protection de l'installation électrique et des personnes, ainsi que sur le confort de gestion, d'usage et l'évolutivité de l'installation. Elle traite de la conception, de la réalisation, de la vérification et de l'entretien des installations électriques alimentées sous une tension électrique au plus égale à 1 000 volts (valeur efficace) en courant alternatif et à 1 500 volts en courant continu.

## **A.11 EN 50163**

Le présent document spécifie les caractéristiques principales des tensions d'alimentation des réseaux de traction, tels qu'installation près de traction, incluant les appareils auxiliaires alimentés par la ligne de contact, et matériel roulant, pour l'installation dans les applications suivantes : chemin de fer, système guide de transport tel que tramway, chemin de fer souterrain ou carrières, chemin de fer de montagne et trolley bus, système de transport de matériaux.

## **A.12 EN 50329 classe de service V**

La présente Norme européenne couvre les caractéristiques spécifiques des transformateurs de traction utilisés dans les sous-stations de traction ou le long de la voie pour l'alimentation de puissance des systèmes de traction à courant alternatif et à courant continu ou fournir de la puissance aux services auxiliaires.

## **A.13 EN/IEC 60146-1-1 classe de service V**

La présente Norme internationale spécifie les exigences relatives aux caractéristiques de fonctionnement de tous les convertisseurs électroniques de puissance à semiconducteurs, ainsi que des commutateurs électroniques de puissance à semiconducteurs utilisant des valves électroniques, commandables et/ou non commandables.

## **A.14 EN 60044**

Le présent document est applicable aux transformateurs de courant destinés à être utilisés avec des appareils de mesure électriques et aux transformateurs de courant pour protection, d'usage courant et neufs, la fréquence du courant étant comprise entre 15 Hz et 100 Hz. Il s'applique principalement aux transformateurs à enroulements séparés, mais il est valable aussi, dans la mesure du possible, pour les autotransformateurs.

## **A.15 NF C 52-100**

La présente norme s'applique aux transformateurs de puissance (y compris les autotransformateurs), à l'exception de certains petits transformateurs et transformateurs spéciaux dont la liste suit : Transformateurs de puissance nominale inférieure à 1 kVA en monophasé ou à 5 kVA en polyphasé ; Transformateurs de mesure (faisant l'objet des Publications 185 1 et 186 3 de la IEC) ; Transformateurs pour convertisseurs statiques (faisant l'objet des Publications 84 3, 1194 et 146 5 de la IEC) ; Transformateurs de démarrage ; Transformateurs d'essais ; Transformateurs de traction montés sur matériel roulant ; Transformateurs de soudure. Lorsqu'il n'existe pas de norme de la C E I pour les transformateurs mentionnés ci-dessus ou pour d'autres transformateurs spéciaux, la présente norme peut être appliquée en tout ou en partie.

## **A.16 EN 50 119**

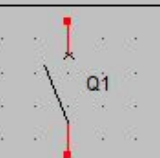
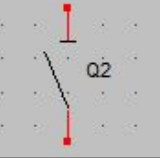
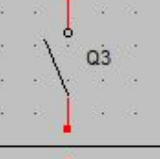

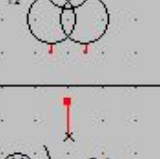

Cette norme s'applique aux systèmes de lignes aériennes de contact dans les chemins de fer lourds, les trains légers, les trolleybus et les chemins de fer industriels des opérateurs publics et privés.

## **A.17 IEC 60502**

La norme internationale IEC 60502 de la Commission Internationale Électrotechnique fixe les spécifications pour les câbles d'alimentation avec isolation extrudée, avec une tension nominale de  $1kV$  à  $30kV$ .

## Annexe B :

### B.1 Légende du schéma unifilaire des SST :

1		<i>DISJONCTEUR</i>
2		
3		<i>SECTIONNEUR</i>
4		
5		<i>INTERREPTEUR</i>
6		<i>TRANSFORMATEUR</i>
7		
8		<i>TRANSFORMATEUR AVEC DEUX ENROULEMENTS EN SECONDAIRE</i>
9		<i>DISJONCTEUR MOTORISE</i>
10		

## B.2 Légende du schéma unifilaire du PHT :

2		TRANSFORMATEUR ETOILE-TRIANGLE
3		TRANSFORMATEUR DE COURANT
4		COMPTEUR
5		DISJONCTEUR
6		INTERREPTEUR
7		INTERREPTEUR
8		SECTIONNEUR
9		SECTIONNEUR
10		TERRE

<i>Transformateur</i>	<i>Valeur</i>
<i>Transformateurs T1 et T2</i>	<i>60/30 kV</i>
<i>Transformateurs TSA1 et TSA2</i>	<i>30/0.4 kV</i>

# Annexe C :

## C.1 Code matlab (Dimensionnement des sous stations de traction )

```
clc;
clear all;
close all;
D=0.530; % distance moyenne entre stations
L=input('donner la longueur de la ligne L : n');
disp(['la longueur de la ligne est : ' num2str(L) 'KM']);
N=L/D;
N = round(N);
disp(['le nombre des stations est : ' num2str(N) 'stations']);
Pa=716; % la puissance d'accélération demandé par chaque rame
Pb=74; %La demande d'énergie à la décélération et l'arrêt
t1=12.29; % temps entre deux stations
t2=20; % temps d'arrêt dans chaque station
t3=240; % temps d'arrêt en terminus
t4=13.89; % temps d'accélération.
P=160; %puissance demandé a une accélération maximale
T=((t4*(N-1))+(t1*(N-1))+(t4*(N-1))+(t2*(N-1))+t3);
Pm=((Pa*t4*(N-1))+(P*t1*(N-1))+(Pb*t4*(N-1))+(Pb*t2*(N-1))+(Pb*t3))/T;
disp(['la puissance moyenne demandée par un tramway est : ' num2str(Pm) ' kW']);
t=T/3600;
V=L/t;
disp(['la vitesse de fonctionnement theorique est : ' num2str(V) ' km/h']);
Vp=V*0.15; % (15% )Perte (à cause des courbes serrés, les franchissements rou-
tiers, d'autres limitations de vitesse et le retard imprévu)
```

$V_m = V - V_p$  ;  
 disp(['la vitesse d exploitation est : ' num2str( $V_m$ ) 'km/h']);  
 $Fr = 4$  ; % fréquence  
 $n = ((2 * L / V_m) * 60) / Fr$  ;  
 $n = \text{round}(n) + 1$  ;  
 disp(['le nombre des rames sur la ligne est : ' num2str( $n$ ) ' rames']);  
 $PM = n * P_m$  ;  
 disp(['la puissance totale de traction en heure de pointe est : ' num2str( $PM$ ) ' kW']);  
 $P_{moykm} = PM / L$  ;  
 disp(['la puissance moyenne consommée par kilomètre est : ' num2str( $P_{moykm}$ ) ' kW']);  
 $N_{sst} = L / 1.377$  ; % 1.377 est la distance moyenne inter sous-station de traction  
 disp(['le nombre de sous station de traction est ' num2str( $N_{sst}$ ) ' sous-station']);

## C.2 Chute de tension sur la ligne aérienne de contact

La chute de tension critique au milieu de deux sous stations adjacente en présence de deux tramways (Rames), qui consomment au maximum un courant de  $I = 1450A$  est :

$$\Delta U = 2 \times I \times \left( \left( \frac{D}{2} \times (R_r + R_{cr}) \right) + (d \times (R_f + R_{ct})) \right)$$

### 1. Resistance des Rails de roulement (retour courant de traction)

$$R_r = 0,00805 m\Omega/m$$

### 2. Rc : Résistivité du fil de contact :

Résistivité du fil de contact =  $17,5 m\Omega mm/m$

Section du fil de contact =  $150 mm$

Facteur d'usure du fil de contact =  $0,85$

$$R_c = 17,5 / (150 \times 0,85) = 0,13 m\Omega/m.$$

### 3. Rb : Resistance du câble feeder :

Résistivité du câble en Cu « courant continu » =  $18,3 m\Omega mm/m$

Section du câble feeder  $S = 120 mm$



Résistivité totale du câble feeder =  $18,3/(120) = 0,15m\Omega/m$

R<sub>cr</sub> : Résistance Fil de contact et feeder d'alimentation

$$R_{cr} = (R_c.R_b)/(R_c + R_b) = (13 \times 15)/(13 + 15) = 0,07m\Omega/m$$

#### 4. Ligne aérienne de contact (Résistance des câbles retour de traction) :

- Longueur approximative du câble retour de traction  $d = 20m$
- Résistance du câble feeder  $R_f = 0,03m\Omega/m$
- Résistivité câble retour de traction  $R_{ct} = 0,0015m\Omega/m$
- Distance moyenne inter sous station de traction  $D = 1,377Km$

Donc

$$\Delta U = 2 \times 1450 \times \left( \left( \frac{1,377}{2} \times (0,00805 + 0,07) \right) + (d \times (0,03 + 0,0015)) \right) = 156,75V$$

## Résumé

La wilaya de Tlemcen a connu récemment une population dense d'une manière répartie dans toute la région, d'autre part l'effectifs scolaires et universitaires deviennent des grands influenceurs sur la mobilité de la wilaya, cette raison mène à insérer un système de transport durable et écologique qui est le tramway. En 2014, l'entreprise portugaise **FERCONSSULT** a défini des corridors à court et long terme qui englobe toute l'agglomération de Tlemcen, malheureusement ce projet était prolongé jusqu'à maintenant à cause de plusieurs occupations et contraintes techniques et économiques.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la faisabilité de ce système. Dans ce contexte, l'évaluation de faisabilité nécessite une connaissance précise du projet dans son intégralité tout en garantissant le bon fonctionnement du système dans les conditions critiques.

Pour répondre à cette problématique, deux itinéraires en conformité avec les normes internationales sont proposés à l'aide de l'étude abordée par l'entreprise. Les caractéristiques de ces deux itinéraires proposés nous ont permis d'estimer le nombre de rames nécessaires et le besoin énergétique en heures de pointe sachant que cette énergie est assurée par le fournisseur d'énergie (**SONELGAZ**) en la transformant en énergie captée par le tramway via des sous-stations de traction tout en respectant les normes nationales et internationales de la conception.

**Mots clés :** Tramway ; Sous-station ; Réseau électrique ; Itinéraires ; Puissance.

---

## Abstract

The city of Tlemcen has recently experienced a dense population distributed throughout the region, on the other hand, the school and university population are becoming great influencers on the mobility of the city, these reasons lead to insert a sustainable and ecological transport system, which is the tramway. In 2014, the Portuguese company **FERCONSSULT** has defined short and long-term corridors which include all the agglomeration of Tlemcen. Unfortunately, this project was extended until now because of several occupations and technical and economic constraints.

The objective of this study is to assess the feasibility of this system. In this context, the feasibility assessment requires a precise knowledge of the project in its entirety while guaranteeing the proper functioning of the system under critical conditions.

To answer this problem, two routes in conformity with international standards are proposed with the help of the study approached by the company. The characteristics of these two proposed routes have allowed us to estimate the number of trains needed and the energy requirement at peak hours knowing that this energy is provided by the energy supplier (**SONELGAZ**) by transforming it into energy captured by the tramway via traction substations while complying with national and international design standards.

**Keywords:** Tram; Substation; Power grid; Itinerary; Power

## ملخص

شهدت ولاية تلمسان مؤخرًا كثافة سكانية منتشرة في جميع أنحاء المنطقة، ومن ناحية أخرى أصبح التعداد البشري في المدارس والجامعات من المؤثرين الرئيسيين على النقل في الولاية، وهاذه الاسباب شجعت إدخال نظام نقل مستدام ويتمشى مع البيئية النظيفة و هو الترام. في عام 2014 ، حددت شركة **FERCONSSULT** البرتغالية ممرات على المدى القصير والبعيد تشمل التكتل السكاني لولاية تلمسان بأكملها ، وللأسف تم تمديد هذا المشروع حتى الآن بسبب العديد من القيود التقنية والاقتصادية.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم إمكانية إدخال هذا النظام. في هذا السياق ، يتطلب تقييم الجدوى معرفة دقيقة بالمشروع بأكمله مع ضمان السير الصحيح للنظام في ظل الظروف الحرجة. لمعالجة هذه المشكلة ، تم اقتراح مسارين وفقاً للمعايير الدولية باستخدام الدراسة التي أجرتها الشركة. سمحت لنا خصائص هذين المسارين المقترحين بتقدير عدد القطارات اللازمة واحتياجات الطاقة في ساعات الذروة. مع العلم أن هذه الطاقة يتم توفيرها من قبل مورد الطاقة (**SONELGAZ**) من خلال تحويلها إلى طاقة يتم التقاطها بواسطة الترام عبر محطات الجر الفرعية مع احترام معايير التصميم الوطنية والدولية.

**الكلمات المفتاحية :** ترام ; محطة فرعية ; شبكة كهربائية ; مسارات ; استطاعة