

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
- تلمسان -

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Energie et environnement

Présenté par :

M. OUADI Syphax & M. DOUAG Brahim Fouad

Thème

**Etude technico-économique de
l'installation électrique du tramway de
Tlemcen**

Soutenu publiquement, le 26 / 09 /2021

devant le jury composé de :

M. ABDELLAOUI. A

MCB

ESSA. Tlemcen

Président

M^{me} BOURI. S

MCA

UNIV- Tlemcen

Directeur de mémoire

M^{me} BOUSMAHA. I

MCB

ESSA. Tlemcen

Examineur 1

M. MERAD. L

Pr

ESSA. Tlemcen

Examineur 2

Année universitaire : 2020 /2021

Dédicaces

“

JE dédie ce travail à mes chers parents et à toute ma famille, pour leur soutien, patience et encouragement durant tout mon parcours

*”
scolaire.*

- Douag Brahim Fouad

“

JE dédie ce travail

A mes chers parents, pour leurs soutiens dans tout mon parcours scolaire, mais aussi de leurs support et amour dans ma vie.

A mes sœurs Dounia, qui m'a toujours encouragé et soutenu, Salsabile et Maissa qui sont une source d'amour et d'affection.

A ma nièce Serina, notre espoir et princesse je t'offre ce travail.

A tous mes amis Brahim, mohamed, Djalil, Chawki, youcef et Tadj qui ont été la meilleure compagnie qu'un homme puisse avoir.

A chahinez qui a fait en sorte que j'arrive là.

”

- OUADI Syphax

Remerciements

Les travaux effectués au cours de ce mémoire de fin d'étude n'aurais pu voir le jour sans les échanges et directives de notre encadrante madame BOURI Sihem, donc on tient à la remercier tout d'abord sur l'opportunité qu'elle nous a offert pour travailler sur un sujet aussi pertinent et transversal, et montrer notre gratitude pour son accompagnement tout le long du parcours.

On remercie monsieur BOUZERARA Hocine, responsable gestion de site tramway Alger, qui nous a accompagnés tout le long du stage pratique au sein de SETRAM-Alger, et sa contribution en idées techniques et scientifiques sur notre mémoire.

On tient ainsi à remercier tous les employés de l'entreprise SETRAM-Alger, au-delà du cadre formel de l'expérimentation, ils ont été surtout d'agréables collègues contribuant à la bonne ambiance du lieu de travail.

Nous sommes sensibles à l'honneur que nous a fait monsieur Ghouti ABDELLAOUI maitre de conférences à l'ESSA Tlemcen, pour avoir accepté de présider et nous honorer de sa présence au sein du jury de soutenance du présent mémoire. Qui trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

Enfin nous tenons également à adresser nos vifs remerciements au docteur Iman BOUSMAHA, maitre de conférences à l'ESSAT, et au professeur Lotfi MERAD, nous les remercions chaleureusement pour avoir accepté d'examiner le présent mémoire.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin nous ont aidé et donc contribué au succès de ce travail.

Brahim DOUAG Syphax OUADI

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une modernisation du transport urbain, le tramway étant une option retenue pour être pérenne et agréable, ce mode de déplacement urbain consomme le moins d'énergie par distance et par personne, quasi non polluant il est de loin la vedette du transport urbain, certes exigeant comme d'autres moyens de transports se privilégiant les sites propres, mais il est là où la fréquentation potentielle est trop importante. En termes d'actualité l'agglomération de Tlemcen présente une croissance démographique qui ne peut échapper aux attentions, l'industrie se lance en développement et les zones résidentielles ne cessent de s'étaler.

Notre projet consiste en l'étude de la partie électrique de l'installation d'un réseau de Tramway. Pour aborder la thématique d'installation d'un réseau Tramway, on va se lancer d'abord dans l'aspect démographique et géographique de la ville, où nous proposerons les itinéraires adéquats qui permettent une couverture optimale de l'agglomération de point de vue transport, pour ensuite aborder la problématique technique de cette installation, dont l'approvisionnement en énergie de ce moyen de transport est crucial en matière de disponibilité de l'énergie de la part du fournisseur pour alimenter les 10 sous station de traction en permanence, tout en respectant les normes internationales, régissant les installations de traction électrique pour assurer un fonctionnement efficace, durable et sûr. Nous terminerons par la mise en place d'un modèle qui répond aux objectifs tracés.

Mots clés : tramway ; sous station de traction ; puissance ; réseau électrique

Abstract

This study is part of the will to address the issue of installing a tramway network in the city of Tlemcen, this approach will take a technical dimension but also social and economic. The tramway comes as a savior of contemporary urban problems and this because of its striking fluidity in a city, and its ecological and environmental advantages.

In order to approach the installation of a tramway network, we will start with the demographic and geographical aspect of the city, where two lines have been proposed with 15 trains on the first line and 08 trains on the second line to reach an optimal coverage of the

urban need, and then approach the technical problematic of such an installation, whose energy supply of this means of transport is crucial in terms of availability of energy from the supplier to supply the 10 sub-stations of traction permanently, while respecting the international standards governing the facilities of electric traction to ensure an efficient, sustainable and safe, to finally put in place a model that meets the objectives set Key words: tramway; traction substation; power; electrical network

ملخص

تأتي هذه الدراسة في إطار الرغبة في معالجة موضوع تركيب شبكة ترامواي في مدينة تلمسان، وسيأخذ هذا النهج بعداً تقنياً ولكن أيضاً بعداً اجتماعياً واقتصادياً. يأتي الترامواي كمنقذ للمشاكل الحضرية المعاصرة، وذلك بسبب سيولته الرائعة في المدينة، ومزاياه البيئية

لمعالجة موضوع تركيب شبكة ترامواي، سننظر أولاً إلى الجانب الديموغرافي والجغرافي للمدينة، حيث تم اقتراح خطين مع 15 قطاراً في الخط الأول و08 قطارات في الخط الثاني لتحقيق التغطية المثلى للمدينة. الطلب على الحاجة الحضرية، ومن ثم معالجة المشكلة التقنية لمثل هذا التثبيت، حيث يعتبر إمداد الطاقة لوسائل النقل هذه أمراً حاسماً من حيث توفر الطاقة من جانب المورد لتزويد محطات الجر العشر الفرعية بشكل دائم، مع احترام المعايير الدولية التي تحكم تركيبات الجر الكهربائي لضمان التشغيل الفعال والمستدام والأمن، لوضع نموذج نهائي يلبي الأهداف المذكورة الكلمات الرئيسية: ترامواي؛ تحت محطة الجر قوة؛ شبكة الكهرباء

Table des matières

Dédicaces	I
Remerciements	III
Résumé	IV
Abstract	IV
ملخص	V
Introduction générale	1
I. Réseau d'alimentation d'un tramway	2
I.1. Introduction	4
I.2. système d'électrification ferroviaire	4
I.3. Sous stations de traction	4
I.4. Architecture d'une sous station de traction	6
I.5. Types d'Alimentation	7
I.5.1. LAC (ligne arienne de contact)	7
I.5.2. Composition de la caténaire	8
I.5.3. Sectionnements	9
I.5.4. Alimentation par le sol (APS)	10
I.5.5. Feeder	11
I.5.6. Le pantographe	12
I.6. La ligne d'exploitation	13
I.7. Le matériel roulant	14
I.7.1. Composition du matériel roulant (Citadis-302)	14
I.7. 2. Retour des courants de traction, courants vagabonds)	15
I.8. conclusion	17
II. Etude technique de l'installation tramway	18
II.1. Introduction	19

II.2. Choix de l'itinéraire	19
II.2.1. Premier itinéraire	19
II.2.2. Deuxième itinéraire	20
II.2.3. répartition des stations des voyageurs	21
II.3. Étude de faisabilité urbaine	22
II.4. dimensionnement du réseau électrique	28
II.4.1. Choix du matériel roulant	29
II.4.2. Exigence sur le matériel roulant	29
II.4.3. Caractéristiques des rames citadis-302	30
II.4.4. conditions d'exploitation	31
II.4.5. Impédance du circuit de traction	32
II.4.6. Caractéristiques de chute de tension	32
II.4.7. calcul de distance maximale entre les SST	32
II.4.8. Répartition des SST sur la ligne d'exploitation	33
II.5. Puissance moyenne consommée par une rame	33
II.5.1. données temporelles	33
II.5.2. données sur la géographie	33
II.5.3. Effort de traction	34
II.5.4. Puissance d'accélération	34
II.5.5. Calcul de puissance	36
II.6. Vitesse d'exploitation.....	36
II.7. Calcul de nombres de rames pour chaque ligne	37
II.7.1. nombre de rames su la Ligne01	37
II.7.2. nombre de rames su la Ligne02	37
II.8. Puissance totale consommée par les rames	38
II.9. Conclusion	39
III. Sous station de traction et performance de l'installation	40
III.1. Introduction	41

A.2 schéma électrique du dépôt	68
A.3 Transformateur de traction	69
A.4 Transformateur des auxiliaires	70
A.5 plaque signalétique du redresseur	71
Normes	
.....	72
NFC 34-110-2	
71	
EN 50122-1	72
NF EN 50163	72
NF C 52112-1	72
Bibliographie	73

Table des figures

Figure I.1	Schéma synoptique de réseau de distribution électrique d'un tramway	5
Figure I.2	Schéma synoptique de la chaîne de production et distribution de la ligne	7
Figure I.3	deux LAC suspendues	8
Figure I.4	point d'injection sur la LAC (nourrice)	9
Figure I.5	section d'une LAC	10
Figure I.6	illustration d'un tramway roulant à travers une alimentation par sol	11
Figure I.7	boîtier d'un Feeder	13
Figure I.8	schéma représentatif d'un pantographe	13
Figure I.9	composant d'une rame citadis-302	15
Figure I.10	diagramme vu de côté du bogie Arpege	16
Figure I.11	schéma de conduite du courant dans une installation de tramway	17
Figure I.12	schéma de comportement du courant vagabond	17
Figure II.1	itinéraire01	21
Figure II.2	itinéraire02	21
Figure II.3	girouette frontale et écran de quai	23
Figure II.4	répartition des stations des voyageurs	23
Figure II.5	distance et dénivelée entre station 13' et 14'	24
Figure II.6	distance et dénivelée entre station 10 et 11	24
Figure II.7	pente de démarrage station 5	26
Figure II.8	pente de démarrage station 6'	27
Figure II.9	la représentation des 2 itinéraires	29
Figure II.10	graphe de l'effort en fonction de la vitesse d'une rame citadis-302	31
Figure II.11	graphe du courant en fonction de la vitesse d'une rame citadis-302	31
Figure II.12	répartition des SST sur les deux lignes	36

Figure III.1 schéma unifilaire de la cellule HT	51
Figure III.2 schéma du transformateur Ddy11	52
Figure III.3 schéma unifilaire du bloc TRT+ redresseur	56
Figure III.4 schéma électrique d'une sous station de traction	59
Figure III.5 connexion en T	61
Figure III.6 connexion en Π	62
Figure III.7 simulation de deux rames alimentées par une sous station	64
Figure III.8 simulation de trois rames alimentées par une sous station	66
Figure A.1 schéma unifilaire d'une SST en Π	71
Figure A.2 schéma unifilaire du dépôt	72
Figure A.3 Plaque signalétique du transformateur de traction	73
Figure A.4 Plaque signalétique du transformateur des auxiliaires	74
Figure A.5 Plaque signalétique du redresseur	75

Liste des tableaux

Tableau II.1 pentes de démarrage des stations de voyageurs	25
Tableau II.2 pentes entre les stations de voyageurs	28
Tableau II.3 caractéristiques d'une rame citadis-302	30
Tableau II.4 table de variation de tension en exploitation ferroviaire	32
Tableau II.5 table de variation de tension en régime de 750Vcc	32
Tableau II.6 répartition des SST sur les lignes d'exploitation	36
Tableau II.7 les puissances et temps du comportement des rames	39
Tableau III.1 caractéristiques du transformateur de traction	52
Tableau III.2 caractéristiques du transformateur auxiliaire	53
Tableau III.3 caractéristiques du redresseur	55
Tableau III.4 équipement de la SST	60
Tableau III.5 caractéristiques nominale du moteur 4 HGA 1433	63
Tableau III.6 résultats de l'essai en charge du moteur 4 HGA 1433	64

Liste d'abréviations

LAC	Ligne Aérienne de Contact
SST	Sous-Station de Traction
HT	Haute Tension
BT	Basse Tension
TGBT	Tableau Générale Basse Tension
ACC	Armoire de Contrôle Commande
AAU	Armoire d'Arrêt d'Urgence
APS	Alimentation Par le Sol
FC	File de Contact
NP	Nacelle Porteuse
M1	Caisse Motrice d'Extrémité 01
C1	Caisse Suspendue d'Extrémité 01
HPC	Haut Pouvoir de Coupure
DHTA	Disjoncteur Haute Tension Alternative
PCC	Poste de Conduite Centralisé
ASI	Alimentation Sans Interruption
CM	Cellule de Mesure
CSS	Cellule de Basculement de Sources
TRT	Transformateur de Traction
TRA	Transformateur des Auxiliaires

Introduction générale

Face aux enjeux énergétiques, écologiques et urbains, l'introduction des moyens de transport plus efficaces et moins polluants comme le tramway est devenue un impératif pour toute ville en cours de modernisation. Son fonctionnement à l'électricité le rend très adéquat pour l'atteinte des objectifs de politiques énergétiques tracées.

Le développement accéléré de l'industrie qu'a connu l'agglomération de Tlemcen et la poussée démographique concomitante (de l'ordre de 1.05%/an) ont eu pour conséquences l'urbanisation rapide, marqué par une extension anarchique, où la problématique de mobilité se pose en premier lieu.

Dans le cadre du programme d'investissement conçu pour moderniser le transport, à l'instar de plusieurs villes du pays, l'étude de faisabilité pour l'insertion urbaine d'un tramway dans l'agglomération de Tlemcen était confiée au groupement de bureau d'études Algéroportugais BETURE FERCONSULT. Cette étude avait pour objectif d'identifier les itinéraires envisageables pour ce qui deviendra la ligne de tramway et cela pour répondre à l'augmentation des besoins de mobilités des habitants de Tlemcen et favoriser le développement urbain de la ville.

Le tramway comme moyen de transport ferroviaire se distingue par le fait qu'il est installé à l'intérieur même de la ville contrairement aux trains qui sont isolés de toute présence humaine, d'où la nécessité d'être ferme sur la question de sécurité et la sûreté des citoyens proches et en interférence quotidienne avec ce moyen de transport, donc elle doit obéir aux normes et habilitations, afin d'assurer un fonctionnement durable et sûr.

Dans ce mémoire nous allons procéder à une étude technique d'installation d'un réseau tramway à la ville de Tlemcen, le travail est réparti en trois chapitres :

- Le premier chapitre concerne les généralités d'un réseau tramway, les principaux organes responsables de sa mise en marche, et la composition des rames circulant sur ces lignes.

Introduction générale

- Dans le deuxième chapitre nous allons entamer l'étude technique et les contraintes pour pouvoir implanter des lignes de tramway, en tenant compte des contraintes démographiques, géographiques et temporelles, pour enfin aboutir à des tracés des lignes, tout en restant dans les normes urbaines. Pour ensuite faire un calcul de la puissance nécessaire lors de l'injection des rames sur ces lignes et avoir un aperçu sur le besoin énergétique du modèle proposé.
- Dans le troisième chapitre, compte tenu de la consommation d'énergie définie de ce modèle, nous allons proposer les sous-stations de traction et définir les composants de celles-ci qui alimenteront les engins en circulation, ainsi de prévoir leurs comportements lors d'un fonctionnement dans les conditions normales, en heure de pointe ou en mode dégradé.
 - Nous terminerons par une conclusion où nous allons regrouper tous les résultats de l'étude

Réseau d'alimentation d'un tramway

I.1. Introduction

Circulant sur une **voie ferrée**, le tramway est alimenté par une **ligne aérienne de contact (LAC)**, qui capte l'énergie électrique délivrée par les **sous stations de traction (SST)**, le long du **réseau du tramway**, par le biais d'un **pantographe** qui achemine une **tension utile (750V continue)** pour aboutir à la mise en marche du **matériel roulant**.

Dans la suite de ce chapitre nous allons illustrer l'architecture et les équipements présents sur le réseau électrique d'un tramway.

I.2. système d'électrification ferroviaire

Un système d'électrification ferroviaire est l'ensemble des moyens mis en œuvre pour alimenter en énergie électrique les trains (locomotive électrique ou rame automotrice électrique). Les trains sont alimentés en courant alternatif ou en courant continu. L'alimentation passe par un troisième rail ou une caténaire et le retour de courant se fait par les rails de la voie ou un quatrième rail dédié [1].

I.3. Sous stations de traction

Une SST est située sur une ligne de tramway. Elle permet l'alimentation en énergie électrique d'une section de cette ligne.

Réparties sur le long de la ligne du tramway, la fonction principale des **SST** est d'abaisser la tension, captée du réseau électrique alternatif à haute tension, à une valeur utilisable pour les engins moteurs tout en la convertissant en tension continue (750V).

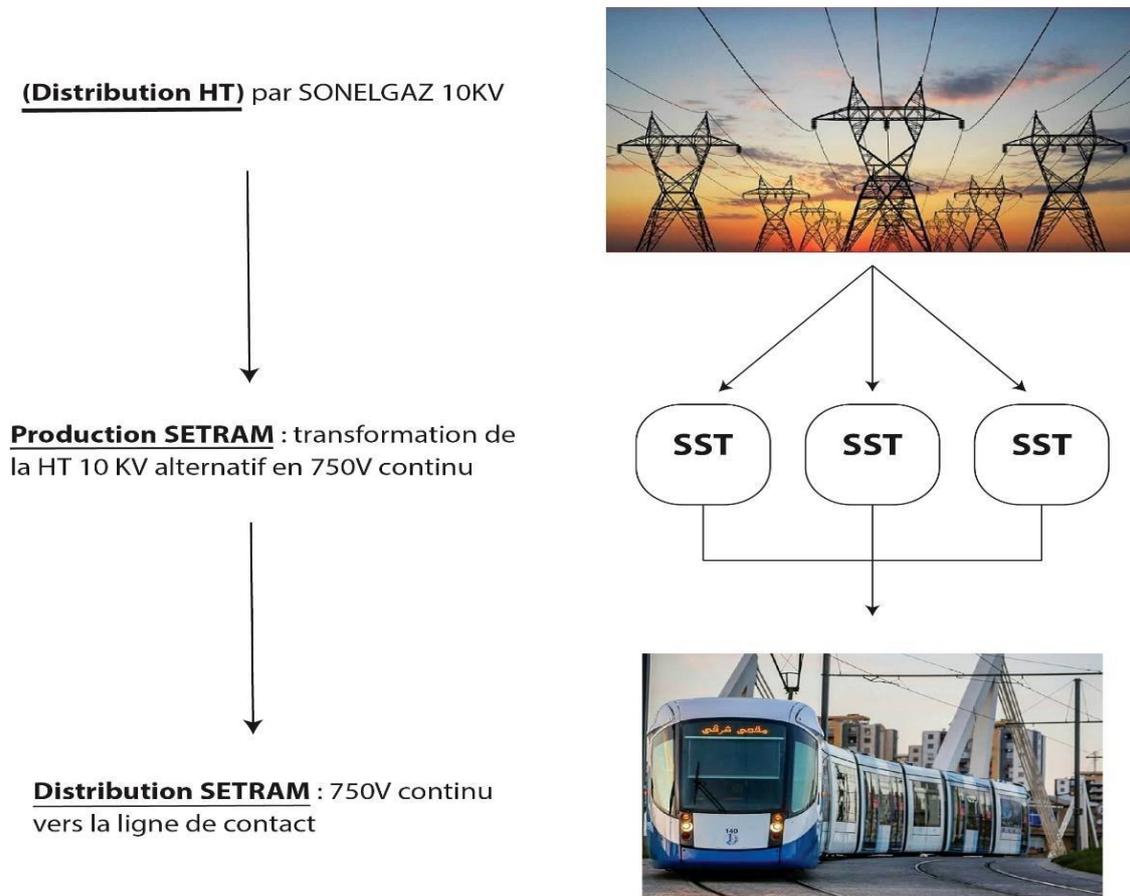


Figure I.1 : Réseau de distribution électrique du tramway d'Alger

La SST fournit deux types de tension :

- **Tension continue pour la traction**

Le transformateur de traction alimente en basse tension le redresseur qui à son tour fournit une tension continu de 750V ; passant à travers d'un sectionneur d'isolement automatique (SIA), d'un disjoncteur ultra rapide (DUR) et d'un sectionneur de ligne (SL).

- **Tension alternative pour l'alimentation des auxiliaires**

Le transformateur auxiliaire alimente le tableau général basse tension (TGBT) qui distribue la basse tension (BT) et assure la protection des équipements auxiliaires, de l'Armoire de Contrôle Commande ACC, l'Armoire d'Arrêt d'Urgence AAU, et l'éclairage des quais de stations voyageurs et les plaques de signalisation les plus proches.

La répartition des **SST** le long de la ligne permet :

- Une stabilité de la tension, dans une marge acceptable évitant ainsi les problèmes dus aux chutes de tension qui vont crescendo avec la distance de la ligne. Donc une répartition adéquate permet de réduire ces chutes.
- D'assurer une continuité de service, en cas de pannes survenant sur une SST ou pendant une de celle-ci.

I.4. Architecture d'une sous station de traction

C'est la disposition par blocs des différents équipements assurant la conversion de l'énergie fournie en **HT**, en énergie exploitable.

- Cellule haute tension : c'est l'arrivée à partir d'une ligne **HT SONELGAZ** Bloc
- transformateur, qui comporte deux transformateurs :
 - Un transformateur triphasé destiné à l'alimentation de la traction
 - Un transformateur auxiliaire monophasé destiné à l'alimentation du tableau TGBT
- Bloc redresseur : qui a pour rôle de redresser la tension alternative, captée du secondaire du transformateur, en une énergie continue exploitable par le matériel roulant.

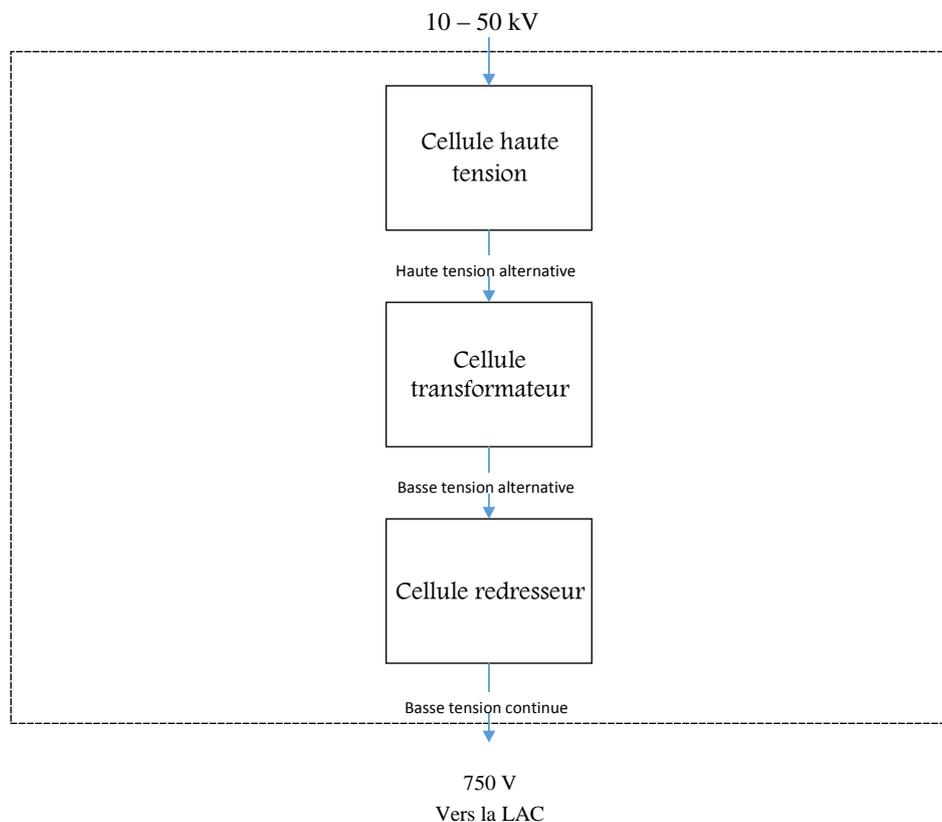


Figure I.2 : Schéma synoptique de la chaîne de distribution de la ligne

I.5. Types d'Alimentation

En électrification par courant continu, le "positif" est transmis aux engins de traction depuis les sous-stations par l'intermédiaire d'une caténaire. Le retour du courant à la sousstation se fait par les rails considérés comme étant négatifs. En effet, dans ce mode d'électrification, le conducteur retour de courant (le rail) est isolé de la terre afin d'éviter les courants vagabonds dans le sol, susceptibles d'engendrer de fortes corrosions sur des masses métalliques à proximité (ex : canalisations de gaz, etc...). Dans son mode de fonctionnement normal, le potentiel des rails par rapport à la terre est compatible avec la protection des personnes.

Pour l'alimentation du tramway on en distingue deux façons :

I.5.1. Ligne aérienne de contact (LAC)

Un fil conducteur est placé dans l'axe de la voie (Figure I.3), permettant à l'appareil de prise de courant articulé « pantographe » de capter l'énergie pour alimenter ses équipements de puissance. Le nombre de conducteurs électriques distribués dépend de la tension utilisée, de la vitesse de la ligne, du dimensionnement électrique nécessaire en fonction du nombre de circulations présentes simultanément sur un même secteur.

En modifiant sans cesse le point de contact, et ceci en formant un zigzag à la caténaire sur le plan horizontal entre les poteaux, on limite ainsi l'usure de l'archet tout en garantissant une qualité de contact optimale. Mais encore faut-il envisager que ce contact peut être altéré selon les saisons, L'été par forte chaleur, **la dilatation des caténaires peut provoquer des distensions et perturber l'accroche du pantographe.**



Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

Figure I.3: Deux LAC suspendues

Note : Une ligne aérienne de traction électrique est appelée ligne de contact lorsqu'elle ne comporte qu'un ou deux fils de contact (FC). La caténaire est constituée d'un ou de deux fils de contact suspendus par des pendules à un ou deux câbles porteurs.

1.5.2. Composition de la caténaire

D'après la norme NFC 34-110-2 Conducteur en alliage de cuivre qui a le rôle de porter le fil de contact le long de la ligne ferroviaire a les dimensions suivantes :

- Un porteur de bronze 65.4 mm²
- Un fil contact cuivre 107 mm²
- Deux conducteurs de protection aérienne alu-acier (retour de courant) de 240/40 mm² si nécessaire
- Feeder d'alimentation 240/40 mm² si nécessaire
- Le poids total de la caténaire est de 1.60 kg/m [2]

L'introduction du courant dans la **LAC** se fait via des nourrices (Figure I.4), qui empruntent le support de la **LAC** et se subdivisent en deux pour permettre d'acheminer le courant, et ce à cause de la présence des isolateurs entre le support et la **LAC**.



Figure I.4 : Point d'injection sur la **LAC** (**nourrice**)

La disposition des supports à nourrices est à proximité de chaque sous-station ou près de chaque boîtier feeder. L'injection ne nécessite pas une synchronisation car on est en courant continu.

1.5.3. Sectionnements

En cas d'incident ou d'un mauvais fonctionnement sur une partie de la LAC on doit isoler celle-ci pour effectuer des réparations tout en laissant le reste de l'installation en fonction, et cela par un sectionnement adéquat de la partie affectée.

On distingue plusieurs types de sectionnements ayant des rôles différents :

- Le sectionnement à lame d'air dont le rôle est de permettre d'isoler électriquement une section de caténaire, des sections encadrantes. En effet, pour des raisons d'entretien, il peut être nécessaire de ne plus alimenter une portion de caténaire. Ce dispositif est plus ou moins analogue à un équipement tendeur (il assure donc, en plus de la séparation électrique, la fonction de tension mécanique) avec les adaptations nécessaires à l'isolement.



Figure I.5 : Section d'une LAC

L'isolateur de section qui a rigoureusement la même fonction que le sectionnement à lame d'air mais a un encombrement bien moindre (et n'assure pas la fonction de tension mécanique). Il est utilisé soit sur les voies parcourues à faible vitesse.

1.5.4. Alimentation par le sol (APS)

L'**APS** est un type d'alimentation, développé par INNORAIL la filiale d'ALSTOM, il consiste à implémenter un troisième rail au milieu des 2 autres, Figure I.6, ainsi l'utilisation de frotteurs sous le tramway est primordiale pour le captage de courant, le troisième rail est fixé au sol via des supports isolants en céramique ou en matériaux composites et alimenté par une sous-station électrique. Ce type d'alimentation peut subvenir à certaines contraintes techniques,

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

car cette méthode se concrétise en substituant, dans certaines zones de centre-ville ou de rues étroites, à la ligne aérienne de contact.

Elle est surtout destinée aux transports électriques sur espaces partagés avec d'autres modes ainsi pour éviter tout risque d'électrocution pour les usagers (piétons ou autres), des mesures de sécurité doivent être prises en considérations notamment la segmentation du 3^{ème} rail en tronçons qui seront alimentés seulement lorsqu'ils sont totalement couverts par le tramway [3].

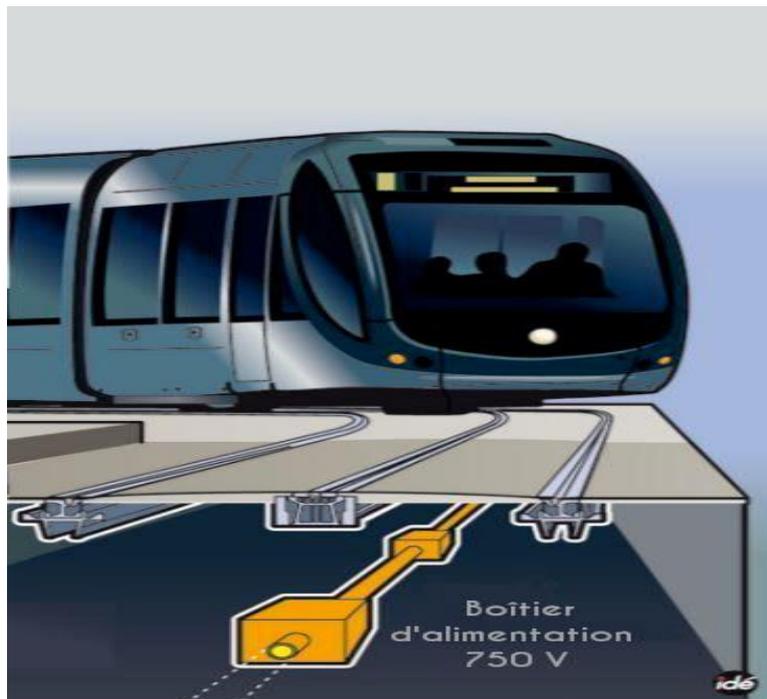


Figure I.6 : Illustration d'un tramway roulant à travers une alimentation par sol

Dans le cas échéant, la continuité d'alimentation s'effectue par la présence d'un minimum de 2 frotteurs pour assurer la circulation du courant lors de l'extinction d'un tronçon, ce problème basique ressemble en tout point à celui lié au pantographe et la **LAC**, ce qui a pour recommandation la présence de 2 bandes d'usure.

L'optimisation de l'exploitation énergétique, ce résout par la récupération de l'énergie de freinage, ce qui ne l'est guère dans les systèmes à caténaire. En dernier lieu on peut citer la dimension esthétique qui se traduit par l'absence de câbles aériens qui pourrait nuire au charme de la ville.

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

Cependant avec ce changement de système, la présence d'autres contraintes plus ou moins inattendues, on cite par exemple :

- Le changement de matériau utilisé pour les frotteurs afin de rallonger leur durée de vie.
- Mise en place d'aimants supplémentaires pour expulser tout arc électrique pouvant se produire à l'ouverture des contacteurs.

I.5.5. Feeder

Venant du lexique anglais (feed signifiant nourrir), le Feeder est un moyen de maintenir une continuité du courant. Il peut être utilisé pour maintenir la puissance mais aussi pour assurer une liaison d'équilibrage entre plusieurs circuits. Le Feeder de puissance permet de distribuer à certains points clés du réseau une puissance constante. Il permet en quelque sorte de compléter en permanence la puissance de sortie, il prend la forme d'une ligne de distribution de courant électrique. Son implémentation est considérée comme un système d'appoint qui remédiera aux problèmes de chutes de tensions.

Il appartient au mode de transport électrique souterrain sachant qu'il est alimenté ainsi depuis la sous station la plus proche, on le trouve souvent dans des blocs exhibés près de la ligne comme le montre la figure ci-dessous.



Figure I.7 : Boîtier d'un Feeder

L'injection du courant électrique dans la ligne est facilement faisable en absence des contraintes de couplages au réseau, ceci car le courant d'exploitation est au courant continu (déphasage nul et amplitude constante), ce qui signifie pratiquement qu'aucun risque de court-circuit lié à la différence de tension n'est envisagée.

1.5.6. Le pantographe

Est un dispositif qui permet la transmission électrique de la caténaire vers le matériel roulant en question (la rame), ce qui est aussi appelé captage de courant, il fait circuler le courant par contact de frottement avec la LAC (ligne aérienne de contact). Sa forme ressemblant à un bras articulé en Z, du type mono bras, (Figure I.8), fixé sur le toit de la rame du tramway au moyen d'isolateurs, se déployant verticalement pour atteindre la LAC.

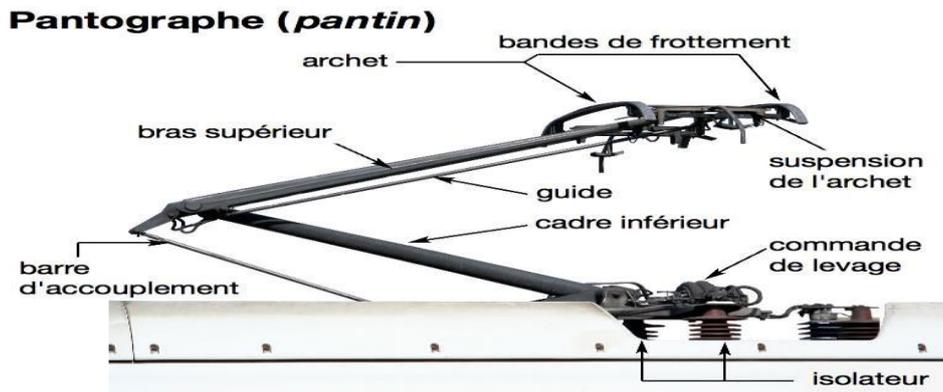


Figure I.8 : Schéma représentatif d'un pantographe

Le dispositif se constitue d'une **tête de captage**, des **bras**, d'une **commande de levage** et d'un **cadre**, il peut être mû pneumatiquement ou électriquement.

Le courant est capté par les bandes de contact montées sur la tête du pantographe. Leur nombre et leur type dépendent de la nature et d'intensité du courant à transmettre, mais aussi de l'état de la caténaire. Il est donc considéré comme un organe critique ce qui soulève divers contraintes, citons l'exemple d'usure ; phénomène s'appliquant aux bandes de contact sachant que le point où s'effectue la continuité électrique est fixe tout au long de la ligne d'exploitation, ceci causera sous l'effet de petits arcs électriques une usure qui par conséquent engendrera une rupture de la pièce.

L'intensité capté avant le décollage est maximale, dans un premier temps la rame ne bouge pas, les points de contact (fil-pantographe) sont fixes, soit une intensité très élevée et la vitesse nulle, la température augmente aux points de passage du courant. En cas de sollicitation très importante et prolongée, il pourrait y avoir fusion du fil de contact par une élévation très importante de la température.

Pour remédier à ce problème il suffit de créer un effet de zigzag pour le point de contact, la ligne aérienne sera donc tendue en biais, entre les supports de la LAC, cela changera en permanence la position du point de contact sur un axe horizontal.

On constate bien que le pantographe du tramway possède un archet unipalette (à 2 bandes d'usure), le choix de 2 bandes a sûrement une dimension plus approfondie dans le domaine des matériaux, et aussi pour assurer la continuité électrique, lors du passage du pantographe par un isolateur.

1.6. La ligne d'exploitation

L'exploitation s'effectue par 2 lignes aller-retour (pour un seul itinéraire), pour chaque ligne on procède à une série de sectionnement pour optimiser les procédures de consignations routinière ou bien celle en cas de panne. La division en secteur s'effectue par la mise en place d'isolateurs sur la LAC. Ainsi l'alimentation totale de la ligne, est assurée par les **SST** montées en **II**.

Les sections sont elles aussi dans quelques cas divisées en **sous-sections** pour d'éventuels autres cas d'optimisations, mais dans ce cas le by-pass est assuré par des interrupteurs placés à proximité du point de sectionnement, ces derniers sont aussi utilisés pour les procédures de consignation.

1.7. Le matériel roulant

Le matériel roulant est, avec l'infrastructure et les procédures d'exploitation, une composante du système de transport ferroviaire, qu'il soit urbain (tramway, métro) ou interurbain (train). Le matériel roulant ferroviaire est composé de l'ensemble des véhicules, moteurs ou remorqués, conçus pour se déplacer sur une voie ferrée [4].

1.7.1. Composition du matériel roulant (Citadis-302)

Les rames sont composées de 5 modules articulés reposant sur 03 bogies dont 02 moteurs. Les bogies moteurs sont situés sous les caisses d'extrémité, dites motrices 1 et 2 (**M1** et **M2**). Le bogie porteur est implanté sous les caisses centrales dites nacelles porteuses (**NP**). Enfin, entre chaque motrice et la nacelle porteuse s'intercalent les caisses suspendues. **C1** du côté **M1** et **C2** du côté **M2** [5].

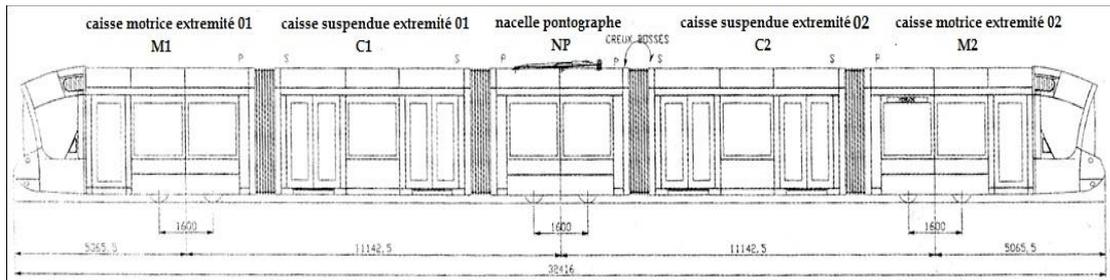


Figure I.9 : Composants d'une rame citadis-302

Un bogie, ou boggie, est un chariot situé sous un véhicule ferroviaire, sur lequel sont fixés les essieux. Il est mobile par rapport au châssis du véhicule et destiné à s'orienter convenablement dans les courbes.

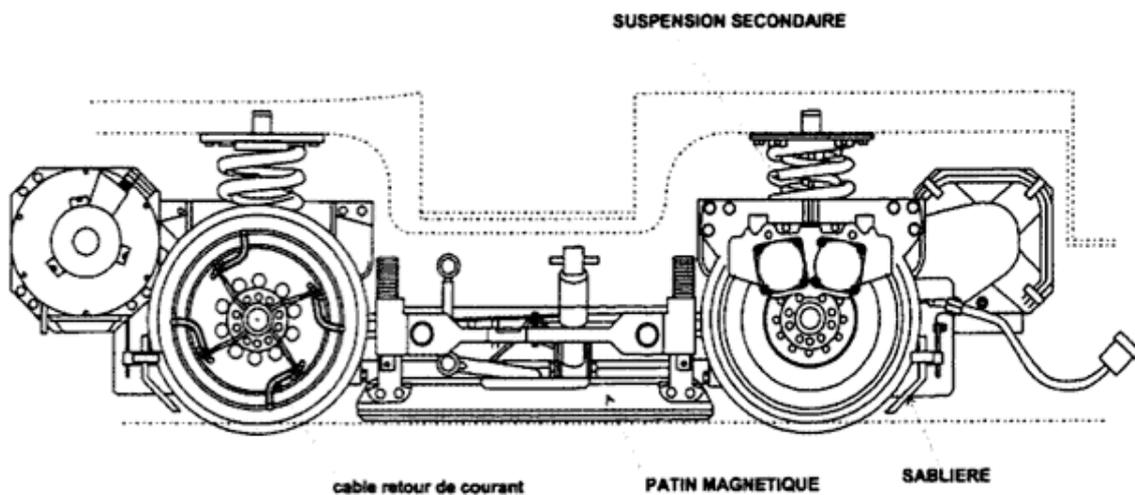


Figure I.10 : Diagramme vu de côté du bogie Arpege

Les deux bogies moteurs sont équipés chacun de 2 moteurs asynchrones triphasés à refroidissement par eau d'une masse de 335 kg et d'une puissance de 120kW. Leur vitesse de rotation maximale est de 4550 tours par minute. La transmission de l'effort de traction est assurée par des engrenages et un pont moteur formant un essieu coudé virtuel. La lutte contre les phénomènes de patinage est assurée par des sablières qui disposent de tuyaux éjecteurs face à chaque roue du côté de l'extrémité du bogie. Seuls les éjecteurs à l'avant dans le sens de la marche sont actifs.

1.7.2. Retour des courants de traction, courants vagabonds

Dans le cadre d'un roulement fer, les rails de roulement jouent un double rôle. Le premier sert de guidage mécanique lors de l'évolution du matériel roulant. Le second assure le retour de courant aux sous-stations de traction. Pour les tramways roulant sur pneus, le retour de courant peut se faire via un contact frotteur sur un troisième rail.

Le sol représente aussi involontairement un chemin de retour. Les rails de roulement ou l'éventuel troisième rail ne sont qu'imparfaitement isolés du sol, et permettent de ce fait une circulation partielle du courant de traction dans le sol.

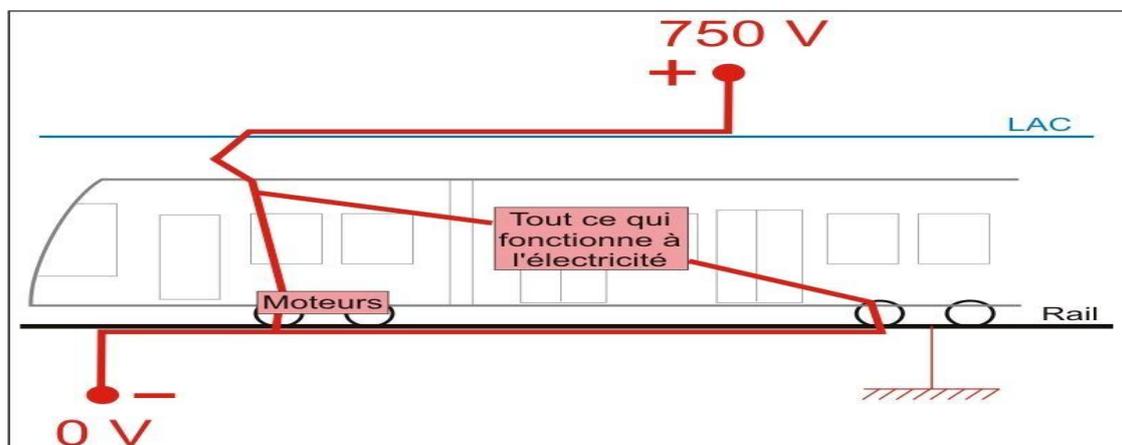


Figure I.11 : Schéma de conduite du courant dans une installation de tramway

Une meilleure isolation des rails du sol réduit les courants vagabonds, mais peut conduire à l'apparition de 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) [6].

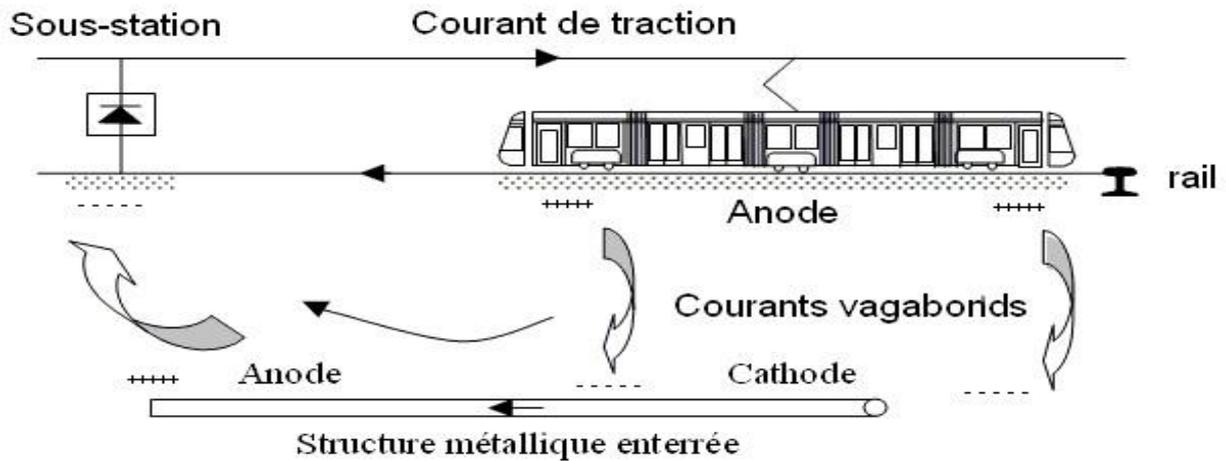


Figure I.12 : Schéma de comportement du courant vagabond

La tension rail-sol sera ainsi surveillée et des contacteurs de mise à la terre automatisés seront placés au droit des sous-stations, à proximité des stations de passagers ou à tout autre endroit identifié par les simulations électriques (détection de potentiel rail-sol élevé en fonction du point kilométrique) [6].

I.8. conclusion

Le principe de fonctionnement ainsi que tous les équipements phares du tramway sont explicités, ainsi que leurs disposition, en commençant par l'arrivée de l'énergie, la production, transformation enfin le transport de celle-ci dernière jusqu'à la mise en marche des rames.

Nous connaissons maintenant ce qui doit être exigé pour l'installation électrique du tramway notamment la valeur tension d'alimentation recommandée 750V, en courant continu. Cependant pour effectuer l'étude technico-économique nous devons définir les équipements nécessaires à l'installation, pour se faire nous aurons besoin de tout détail concernant la consommation d'énergie ainsi que le coût des différents équipements.

Chapitre II

Etude technique de l'installation tramway

II.1. Introduction

La première étape de dimensionnement sera d'abord de définir l'itinéraire donc nous devons déterminer la distance totale, cela nous permettra de juger où placer les sous-stations selon les conditions techniques et aussi urbaines liées à la ville de Tlemcen. Ceci s'appliquera aussi pour les stations de passagers, où nous prendrons en plus en considération la pente du chemin pour satisfaire les normes de sécurité. Le choix du type de rames, ses caractéristiques et sa consommation seront mentionnés dans le présent chapitre.

II.2. Choix de l'itinéraire

L'entreprise portugaise FERCONSULT a proposé divers scénarios comportant chacun un minimum de 3 lignes de tramway, en examinant les lignes choisies, nous constatons qu'elles couvrent bien la quasi-totalité des axes de la ville et atteignent même quelques communes avoisinantes qui possèdent un important réservoir démographique. Cependant, l'étroitesse des différentes rues de la ville pose un énorme problème, qui affectera l'activité des lignes de bus pour le transport urbain, et les activités commerciales. C'est pour cela que nous avons opté de supprimer quelques lignes pour minimiser les effets négatifs qui pourront être engendrés.

En conclusion notre choix est porté sur deux itinéraires au lieu de trois, avec un total de 15 km au lieu de 21.5 km, et de 23 stations au lieu de 33 stations

II.2.1. Premier itinéraire

L'itinéraire indiqué dans la figure ci-dessous, couvre une partie considérable de la ville, en partant de l'endroit où est envisagé d'établir la future Gare Ferroviaire dans la périphérie jusqu'à arriver au centre-ville, en passant par Bouhennak tout près de l'Université d'Economie et du Complexe Administratif, ensuite près du siège de la daïra de Mansourah là où se situe divers services publics notamment le Commissariat, la Mairie, le nouveau Palais de Justice et la direction de la Protection Civile. Après, vient le Palais de Culture, Centre d'Etudes Andalou et la Piscine Municipale, puis la Mairie le Tribunal, les Banques jusqu'à atteindre le terminus où se trouve la Grande Poste et l'ancien Palais de Justice ainsi plusieurs services publics sont desservis.

Malgré les modifications apportées par nous aux itinéraires proposés par FERCONSULT, nous n'échapperons pas aux problèmes d'exiguïté qui vont de pair avec la ville de Tlemcen. Cet itinéraire s'étendra sur une distance de **6171m**, il possèdera une bifurcation au niveau du rond-point du commissariat pour entamer le 2^{ème} itinéraire.

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

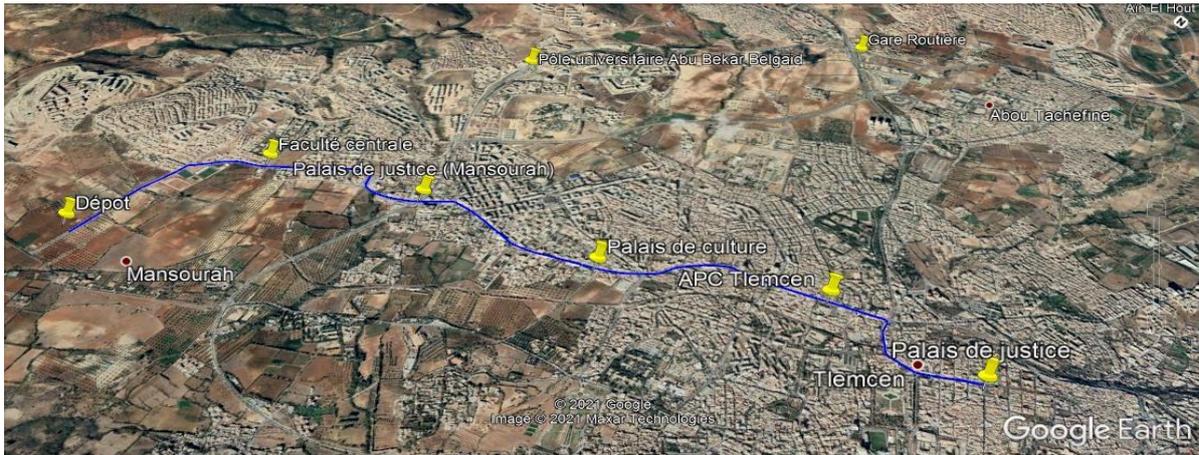


Figure II.1 : Itinéraire 1

II.2.2. Deuxième itinéraire

Celui-ci passant auprès de la Rocade il aura comme objectif de relier les différents points de la périphérie de Tlemcen, commençant du même endroit avec le premier itinéraire il partagera un tronçon commun de **(2560m)** entre la future gare SNTF et la bifurcation envisagée. Il reliera donc l'Université d'Economie et le Complexe Administratif avec les quartiers ouest d'Imama, les cités universitaires le nouveau Pôle Universitaire, la Gare Routière, Oujlida jusqu'à arriver à l'Université de Technologie de Chetouane et le Centre Anti-Cancer. La distance sera de **11341m** (en comptant le tronçon commun).

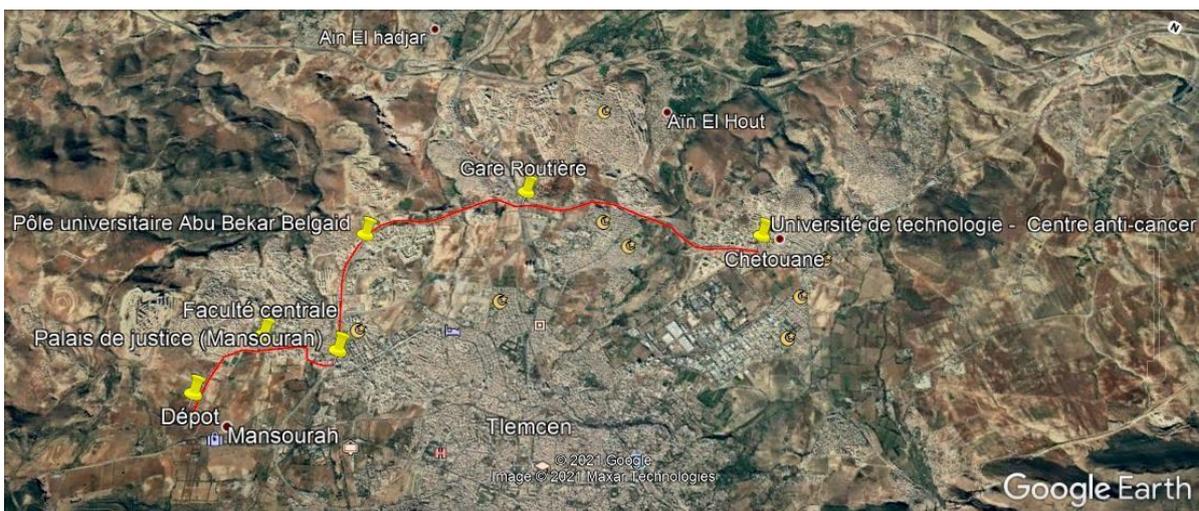


Figure II.2 : Itinéraire 2

Contrairement à la partie sud de la ville de Tlemcen, géographiquement limité par le plateau de Lalla Setti, la partie nord observe une croissance urbaine hors norme notamment

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

pour Oujlida, Boujlida, El Koudia, et Chetouane, ce qui représente un réservoir démographique que le tramway répondra sûrement à ses exigences.

Note : Notant qu'il y a bien un tronçon commun pour les deux lignes, nous tenons à préciser qu'une rame de tramway, comme d'ailleurs tout autre type de transport en commun, possède une girouette frontale qui affiche les informations sur la destination et le numéro de la ligne, c'est en fait un afficheur électronique qui peut être conçu par des diodes électroluminescentes LED, ou bien par cristaux liquides LCD.

De même pour le quai de transport, il est équipé d'un écran affichant la destination de la rame prochaine et le temps restant pour son arrivée ainsi que l'heure actuelle. Dans l'image ci-dessous prise pour le tramway d'Oran, on voit bien les deux écrans.



Figure II.3: Girouette frontale et écran de quai

Sur-ce l'orientation ne se représentera en aucun cas comme un problème pour les passagers.

II.2.3. répartition des stations des voyageurs

Nous représentons sur la carte ci-dessous une vue globale de toutes les stations de passagers sur les deux lignes, nous totaliserons donc en tout 23 stations, 11 sur la ligne entre le Dépôt et le Palais de Justice du centre-ville et 12 sur le deuxième itinéraire en partant de la bifurcation au niveau du commissariat de Mansourah.

Pour la distinction nous avons numéroté les stations de 1 à 11, ensuite pour éviter l'amalgame nous avons différencié ces numéros par prime, et ce pour les stations se trouvant après bifurcation (de 5 à 16), nous tenons à noter que les stations de 1 à 4 sont en commun pour les deux itinéraires.



Figure II.4 : Répartition des stations des voyageurs

II.3. étude de faisabilité urbaine

Maintenant nous entamerons la vérification de la faisabilité de la ligne en matière de pente, sachant que la formule utilisée est :

$$\text{Pente} = \frac{\text{Hauteur}}{\text{Distance}}$$

Nous avons effectué sur chaque station de passagers cette vérification mais pour les illustrations nous donnerons exemples de quelques-unes notamment celle où se présente près d'une pente remarquable. Sachant que la limite d'une pente maximale est de 8% et celle d'une pente avoisinant un arrêt est de 3% [7].

On commence par quelques exemples sur les pentes entre deux stations de passagers.

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

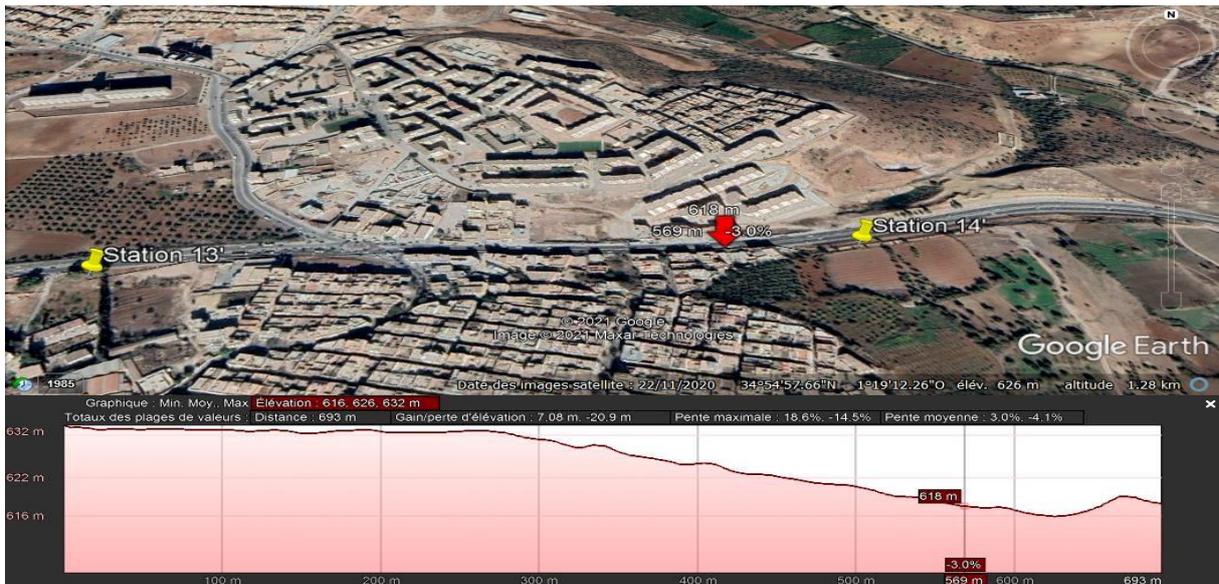


Figure II.5 : Distance et dénivelée entre station 13' et 14'

Pour une distance de 693 m qui sépare les stations 13' et 14', on constate une dénivelée de 20.9 m, ceci nous donne une pente de 3.02%.

Nous enchaînons avec un autre exemple, entre les stations 10 et 11 (terminus de la 1^{ère} ligne), on note une distance de 975 m, nous tenons à préciser que par manque d'espace nous avons étendu la distance entre les stations, il ressort que c'est le choix optimal pour l'emplacement de la dernière station.

Pour une distance de 975 m nous constatons qu'il y a une dénivelée de 10.4 m ce qui nous donnera une pente de 1.07% qui est pratiquement conforme aux normes.



Figure II.6 : Distance et dénivelée entre station 10 et 11

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

Après l'illustration des deux exemples nous donnons le calcul des pentes pour chaque cas de distance entre stations de passagers, et nous classons les données prises dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.1 : pentes de démarrage des stations de voyageurs

Station Passagers	Distance (m)	Hauteur (m)	Pente (%)	Etat
1 et 2	742	36	4.85	Conforme
2 et 3	696	16	2.3	Conforme
3 et 4	701	5.04	0.72	Conforme
4 et 5	584	6.45	1.1	Conforme
5 et 6	601	1.95	0.32	Conforme
6 et 7	504	6	1.19	Conforme
7 et 8	487	13.5	2.77	Conforme
8 et 9	450	8.78	1.95	Conforme
9 et 10	431	6.4	1.48	Conforme
10 et 11	975	10.4	1.07	Conforme
4 et 5'	865	23.6	2.73	Conforme
5' et 6'	664	14	2.11	Conforme
6' et 7'	746	33	4.42	Conforme
7' et 8'	548	17.9	3.27	Conforme
8' et 9'	980	49.2	5.02	Conforme
9' et 10'	432	5.93	1.37	Conforme
10' et 11'	597	20.3	3.4	Conforme
11' et 12'	588	12.2	2.07	Conforme
12' et 13'	758	27.7	3.65	Conforme
13' et 14'	475	33.5	7.05	Conforme
14' et 15'	693	20.9	3.02	Conforme

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

15' et 16'	1060	53.4	5.04	Conforme
16' et 17'	796	17.2	2.16	Conforme

Dans le cas échéant toutes les pentes respectent la limite fixée de 8%.

Maintenant que nous avons conclu le cas de distances entre les stations de passagers nous entamerons le cas de la pente maximale qui est représentée par le calcul de la pente à environ 20 m de l'arrêt, ceci pour répondre à la contrainte d'une pente qui ne dépasse pas les 3%. Nous citons tout d'abord deux exemple parmi l'itinéraire.

Station 5 pour une distance de 21.3 m et une dénivelée de 0.3 m nous obtiendrons une pente 1.41% ce qui est jugé conforme.

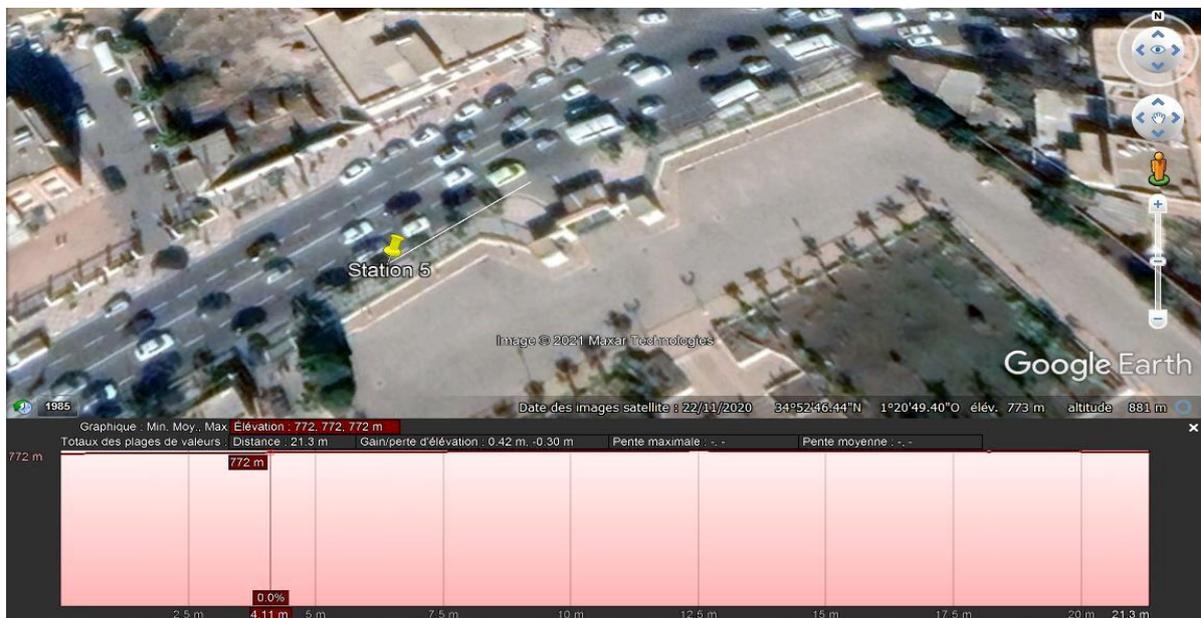
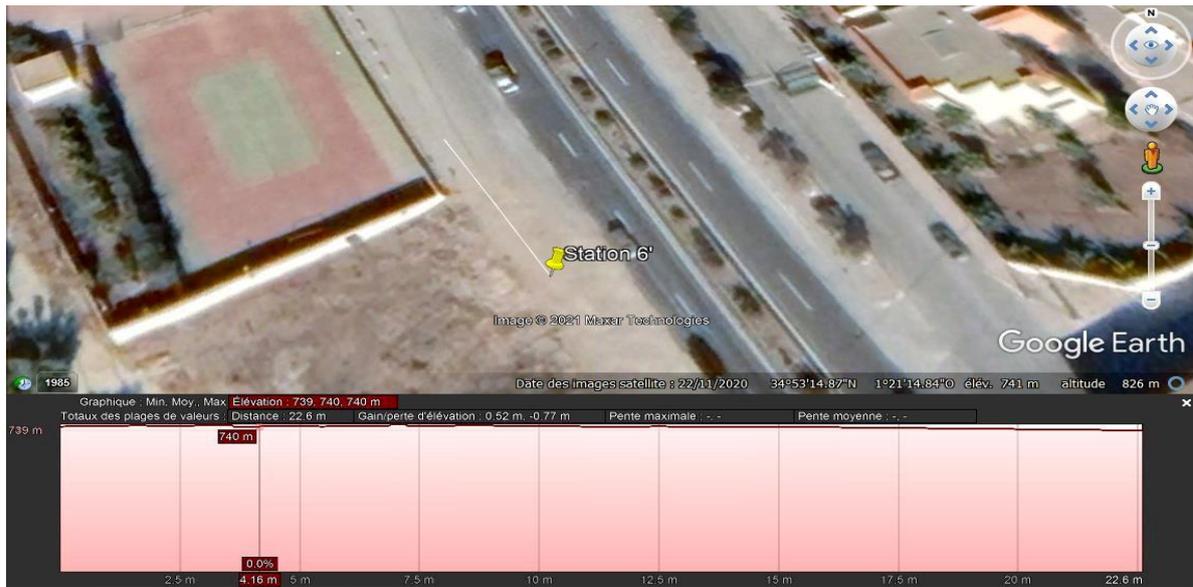


Figure II.7 : Pente de démarrage station 5

Nous enchainons avec le deuxième exemple, la station 15', pour ce cas-là nous avons une distance de 24 m et une dénivelée de 1.23 m ce qui nous donne une pente de 5.13% qui dépasse la limite, ceci est dû à la nature du terrain qui n'est pas bien aménagé, ceci nécessite donc un terrassement adéquat par les services concernés, afin de ramener la pente aux normes préconisées.

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway



Pour le reste des cas on note sur le tableau ci-dessous les données de pente de démarrage pour chaque station, nous avons comme non-conformité les stations suivantes : 1, 2, 9, 11, 6', 8', 10', 12', 13', 14', 15'. Vu que la distance à établir est courte cela favoriserait la solution d'un terrassement, notamment car les pentes ne dépassent pas 5.13%.

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

Tableau II.2 : pentes entre les stations de voyageurs

Station Passagers	Distance (m)	Hauteur (m)	Pente (%)	Etat
1	27.6	1.13	4.09	Non conforme
2	20.9	0.69	3.3	Non conforme
3	24.2	0.4	1.65	Conforme
4	31.3	0.25	0.8	Conforme
5	21.3	0.3	1.41	Conforme
6	20.8	0.07	0.34	Conforme
7	25.2	0.67	2.66	Conforme
8	28.2	0.17	0.6	Conforme
9	23.3	0.86	3.69	Non conforme
10	22.3	0.06	0.27	Conforme
11	21.4	0.74	3.46	Non conforme
5'	22.7	0.58	2.56	Conforme
6'	22.6	0.77	3.41	Non conforme
7'	23.4	0.15	0.64	Conforme
8'	21.4	0.86	4.02	Non conforme
9'	28.4	0.68	2.39	Conforme
10'	26.3	1.34	5.1	Non conforme
11'	30	0	0	Conforme
12'	27.2	1.34	4.93	Non conforme
13'	28.3	1.05	3.71	Non conforme
14'	30	0.95	3.17	Non conforme

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

15'	24	1.23	5.13	Non conforme
16'	20.9	0.47	2.25	Conforme

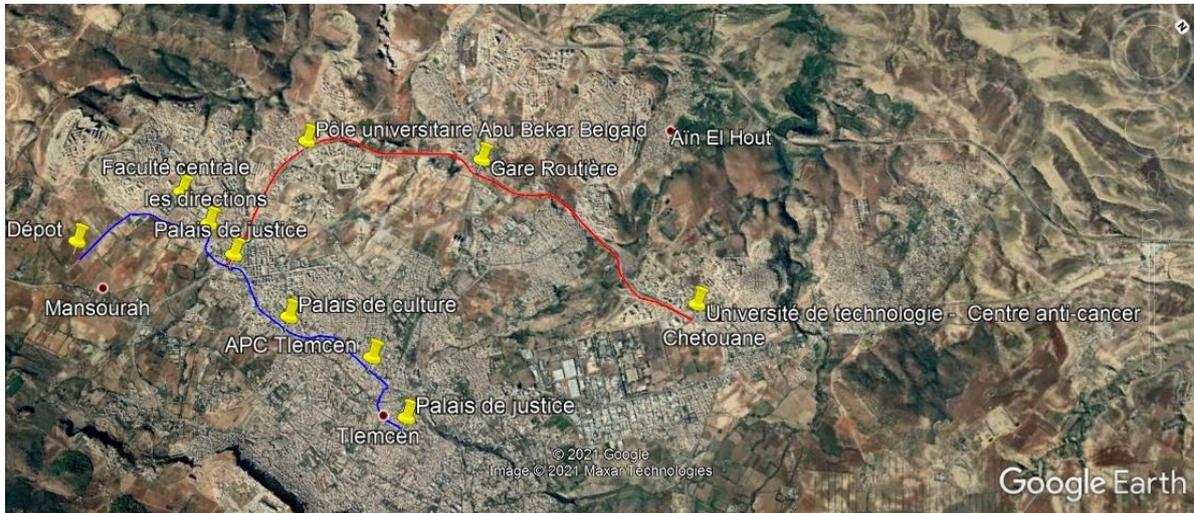


Figure II.9 : La représentation des 2 itinéraires Donc

l'exploitation se fera sur deux lignes :

- **Ligne 01** : en bleu reliant le dépôt jusqu'au centre-ville sur une longueur de 6171m avec 11 stations de voyageurs.
- **Ligne 02** : en rouge reliant le dépôt jusqu'à Chetouane sur une longueur de 11341m avec 16 stations de voyageurs

Les deux lignes partagent un tronçon en commun depuis le dépôt jusqu'à la bifurcation de Mansourah sur une longueur de 2560m et avec 04 stations de voyageurs.

II.4. Dimensionnement du réseau électrique

Pour pouvoir faire un dimensionnement nous avons fixé les contraintes temporelles tout en satisfaisant les contraintes électriques du matériel roulant.

Ces contraintes, sont issues de l'étude faite par FERCONSULT ces dernières ont permis d'identifier, aussi d'autres paramètres relatifs à la réalisation de ces lignes de Tramways dans l'agglomération de Tlemcen, notamment en ce qui concerne les caractéristiques du matériel roulant, des prévisions de transport et d'exploitation, dans le but de garantir une exploitation optimale [8].

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

Dans la suite de cette section nous allons aborder le choix du matériel roulant adéquat pour notre étude, les caractéristiques de ce dernier, les normes d'exploitation pour enfin élaborer un plan d'implantation des SST sur les deux lignes d'exploitation.

II.4.1. Choix du matériel roulant

La ville de Tlemcen est connue pour ses routes étroites et sa densité importante qui est de 3494 hab/km² [9], nous avons opté pour des rames de taille moyenne de type CITADIS-302 de l'entreprise Alstom.

II.4.2. Exigence sur le matériel roulant

Les rames de CITADIS-302 ont les dimensions suivantes, qui répondent aux caractéristiques de la ville de Tlemcen.

- **Longueur** : de 30m
- **Largeur** : 2.65m
- **Capacité** : 230 passagers
- **Vitesse maximale** : de 70km/h à 80km/h

La fiche technique des rames est sur le tableau suivant :

Tableau II.3 : caractéristiques d'une rame citadis-302 [11]

Désignation	Valeurs
Longueur hors-tout	32 416 mm
Largeur de caisse	2 400 mm
Hauteur maxi au-dessus du rail	3 270 mm
Distance entre pivots des bogies	11 142 mm
Masse à vide en ordre de marche	38,41 t
Masse en charge normale	52,48 t
Nombre de bogies moteurs	2
Nombre de bogies porteurs	1
Nombre de places assises	56

Charge normale	201 passagers
Charge maximale	272 passagers
Vitesse maximale	70 km/h
Puissance maximale à la jante (traction)	688 kW
Tension d'alimentation	750 V Courant Continu
Accélération moyenne en charge normale en palier	1,10 m.s ⁻² de 0 à 40 km/h

II.4.3. Caractéristiques des rames citadis-302

Durant la phase de démarrage du tramway, l'effort de traction exercé est maximal et constant jusqu'à 30 km/h environ, (Figure II.10). Le tramway se dégage ainsi rapidement du trafic. Le courant débité pendant cette durée est proportionnel à la vitesse et augmente graduellement jusqu'à 1200 A, qui est un courant nominal (Figure II.11). Une phase de fonctionnement à puissance constante succède ensuite à celle de démarrage : le courant reste égal à 1200 A. A partir de 40 km/h, la puissance du tramway est réduite. La tension au pantographe restant égale, ou ne variant peu avec la position du tramway, le courant appelé par le tramway suit la même tendance que la puissance [6].

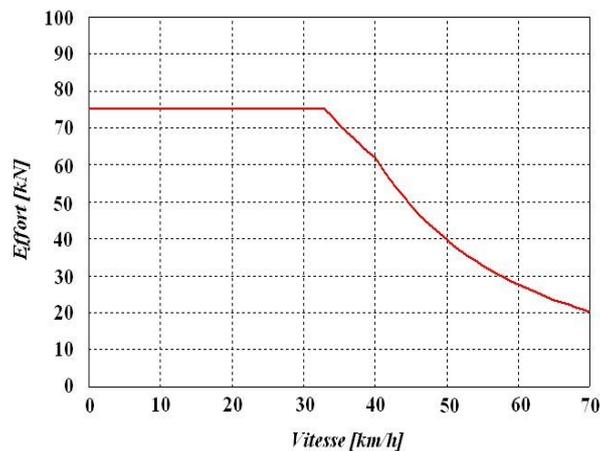


Figure II.10 : Graphe de l'effort en fonction de la vitesse d'une rame citadis-302

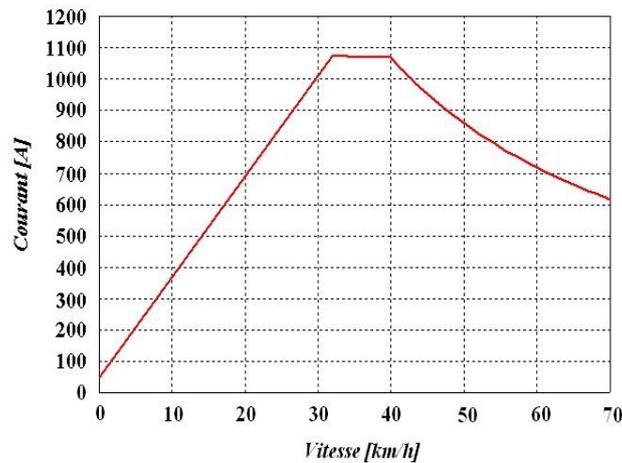


Figure II.11 : Graphe du courant en onction de la vitesse d'une rame citadis-302

II.4.4. conditions d'exploitation

L'exploitation des tramways répond à des conditions précises sur les limites de tension présentes au niveau de la **LAC**.

D'après la norme **NF EN 50163** définissant les tensions nominales et leurs limites admissibles en valeurs et en durée indiquées sur le tableau suivant :

Tableau II.4 : Table de variation de tension en exploitation ferroviaire

Système d'électrification	Tension non permanente la plus basse U_{min2} (V)	Tension permanente la plus basse U_{min1} (V)	Tension nominale U_n (V)	Tension permanente la plus élevée U_{max1} (V)	Tension non permanente la plus élevée U_{max2} (V)
Courant continu (valeurs moyennes)	400	400	600	720	800
	500	500	750	900	1000
	1000	1000	1500	1800	1950
	2000	2000	3000	3600	3900

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

Vu notre choix porte sur les rames de citadis-302 fonctionnant sous une tension 750V AC les contraintes sur la tension seront regroupées dans le tableau suivant.

Tableau II.5 : Table de variation de tension en régime de 750Vcc

Système d'électrification	Tension non permanente la plus basse U_{min2} (V)	Tension permanente la plus basse U_{min1} (V)	Tension nominale U_n (V)	Tension permanente la plus élevée U_{max1} (V)	Tension non permanente la plus élevée U_{max2} (V)
Courant continu (valeurs moyennes)	500	600	750	900	1000

II.4.5. Impédance du circuit de traction

La longueur du circuit de traction se mesurant en kilomètres, les calculs de chute de tension font appel à l'impédance kilométrique de ce circuit. Celle-ci est complexe à déterminer car elle porte sur la ligne de contact, les rails et l'environnement conducteur.

Sous tension continue, en régime stabilisé, cette impédance se limite à la résistance ohmique, on fait alors appel à la **résistance kilométrique** du circuit. Pour les applications courantes on peut retenir la valeur de 0,05 Ω /km [12].

II.4.6. Caractéristiques de chute de tension

La chute de tension calculée en fonction du déplacement de l'engin de traction dépend de la configuration de la ligne et de son alimentation.

- Ligne à voie unique, une seule sous-station (alimentation en antenne) : depuis la sousstation la chute de tension croît linéairement jusqu'à un maximum ΔU_d à la distance d.
- Ligne à double voie, une seule sous-station, mise en parallèle des lignes de contact à l'extrémité opposée à la sous-station : la chute de tension croît selon une parabole jusqu'à un maximum $\Delta U_d/2$ à la distance d.
- Ligne à voie unique, deux sous-stations (alimentation bilatérale) : la chute de tension suit une parabole centrée sur l'intervalle entre les sous-stations, avec un maximum $\Delta U_d/4$ à la distance d/2.
- Ligne à double voie, deux sous-stations, mise en parallèle des lignes de contact au droit de chaque sous-station et au milieu de l'intervalle : la chute de tension suit deux arcs de parabole avec deux maximum $\Delta U_d/6$ aux distances d/3 et 2d/3 [13].

II.4.7. calcul de distance maximale entre les SST

Après avoir défini les variables responsables de la variation de tension qui sont :

- La résistance kilométrique du circuit. Pour les applications courantes on peut retenir la valeur de $R=0,05 \Omega/\text{km}$.
- un courant nominal de $I=1200 \text{ A}$ généré par le redresseur de la SST.
- Ligne à double voie, une seule sous-station, mise en parallèle des lignes de contact à l'extrémité opposée à la sous-station : la chute de tension croît selon une parabole jusqu'à un maximum $\Delta U_d/2$ à la distance d.
- La tension minimale qui ne doit pas dépasser $U_{min1} > 500$.

$$\frac{\Delta U_d}{2} < -U_{min1}$$

$$2 \times R \times I \times d_{max} < 250$$

$$d < \frac{125}{1200 \times 0.05}$$

$$d_{max} < 2080m$$

Où :

ΔU_d : La chute de tension en volt entre deux SST adjacentes.

R : la résistance kilométrique en Ω/km .

I : le courant maximal livré par la SST.

d: Distance maximale admissible en mètres entre deux SST.

II.4.8. Répartition des SST sur la ligne d'exploitation

D'après le calcul précédent, La distance maximale séparant deux SST ne doit pas dépasser $d_{max} = 2080$ m.

Pour optimiser les distances entre les SST on va commencer par la distribution sur la ligne la plus longue qui est la deuxième ensuite on passera au tronçon restant après la bifurcation de la première ligne.

Le circuit proposé dans le titre précédant comprend deux lignes d'exploitation pour répondre à la contrainte démographique et géographique de la ville.

Calcul de nombre de SST des lignes d'exploitation :

- **Ligne 2** : reliant le dépôt à Chetouane sur une longueur de $d_{Ligne02} = 11341$

$$N_{SST2} = \frac{d_{Ligne02}}{d_{max}}$$

$$N_{SST2} = \frac{11341}{2080}$$

$$N_{SST2} = 5.45$$

Où :

$L_{ligne02}$: longueur de la ligne 2

N_{SST2} : nombre de sous station de tractions sur la ligne 2

d: Distance maximale admissible entre deux SST

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

Alors on doit opter pour un nombre de SST= $[5.45]= 6$ D'où
le nombre de SST sur la ligne 2 est : 6.

Pour un nombre de 06 SST sur la ligne 2 Nous allons calculer la distance entre ces dernières.

$$d_2 = \frac{L_{\text{ligne02}}}{N_{\text{SST2}}}$$
$$d_2 = \frac{11341}{6}$$
$$d_2 = 1890 \text{ m}$$

Où :

d_2 : La distance entre deux SST sur la ligne 2.

Ligne 1 : reliant le dépôt avec le palais de justice

Il faut bien noter que dans ce cas nous allons aborder le tronçon qui commence de la bifurcation jusqu'au palais de justice, car les deux SST sont communes aux deux lignes.

$$d_{L1} = 4560 \text{ m}$$

$$N_{\text{SST1}} = \frac{d_{L1}}{d_{\text{max}}}$$
$$N_{\text{SST1}} = \frac{4560}{2080}$$
$$N_{\text{SST1}} = 2.19$$

Alors on doit opter pour un nombre de SST= $[2.19]= 3$.

Où :

N_{SST1} : Nombre de sous station de tractions sur la ligne01 sans le tronçon commun

d_{L1} : Longueur de la ligne un sans le tronçon commun .

$$d_1 = \frac{d_{L1}}{N_{SST1}}$$
$$d_1 = \frac{4560}{63}$$
$$d_1 = 1520 \text{ m}$$

Où :

d_1 : La distance entre deux SST sur la ligne 01.

Nous récapitulons les résultats obtenus sur le tableau suivant :

Tableau II.6 : répartition des SST sur les lignes d'exploitation

	Nombre de SST	Distance entre les SST
Ligne 02	6	1890 m
Ligne 01(à partir de la SST2)	3	1520 m

NB : les SST dépôt et N_{SST2} sont communes entre les lignes 01 et ligne 02

La disposition des SST sur la carte de la ville de Tlemcen à l'aide de Google earth est illustrée sur la Figure II.12.

La ligne en blanc indique le tronçon commun entre les deux lignes où ces dernières partagent deux sous-stations (dont celle du dépôt).

La ligne 1 qui comporte les sous stations 3,4 et 5.

La ligne 2 qui comporte les sous stations 6, 7, 8,9 et 10.

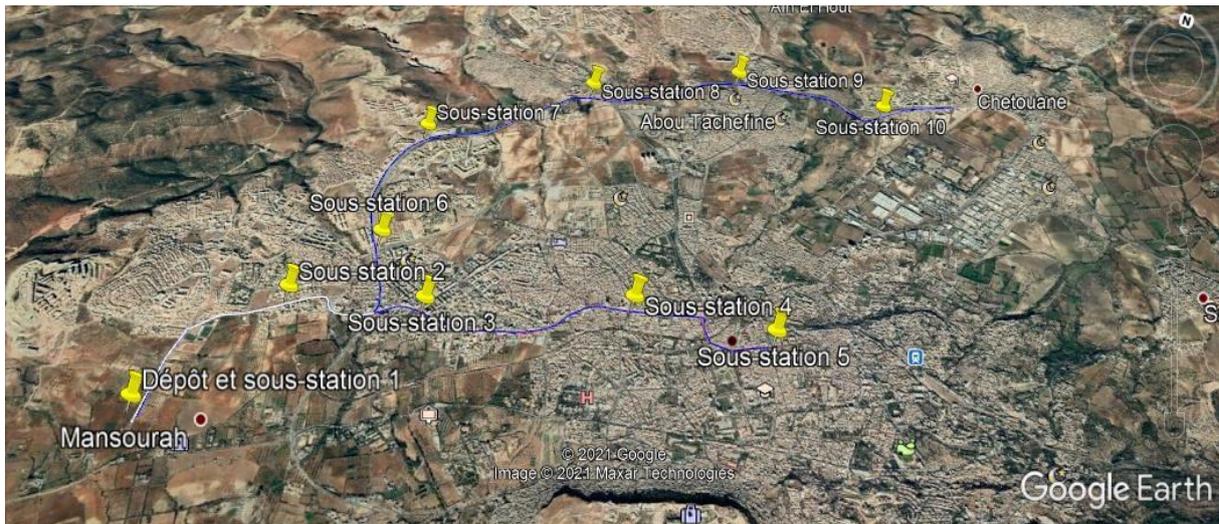


Figure II.12 : Répartition des SST sur les deux lignes

II.5. Puissance moyenne consommée par une rame

Une rame de tramway passe par des phases lors de son mouvement, naturellement une rame initialement démarre depuis le dépôt, passant par les stations de voyageurs où elle transporte les voyageurs pour enfin aboutir au terminus, et ensuite faire le chemin retour jusqu'au dépôt.

Pour mener cette étude nous allons d'abord fixer les contraintes temporelles sur l'arrêt en station, l'arrêt en gare aussi l'arrêt en terminus et la fréquence de passages des rames sur la ligne, ainsi que le nombre de stations passages sur les deux lignes.

II.5.1. données temporelles

D'après l'entreprise métro-Alger, en heure de pointe les rames vont obéir aux conditions suivantes :

- **Fréquence** : 4 minutes dans un tronçon chargé.
- **Temps d'arrêt stations** : 20 secondes.
- **Temps d'arrêt en gares** : 30 secondes.
- **Temps dans le terminus** : 120 secondes [14]

II.5.2. données sur la géographie

Comme nous l'avons déjà abordé dans l'étude des itinéraires, nous avons eu à faire aux données suivantes

- ❖ Nombre de station de voyageur : 23
- ❖ Distance moyenne entre stations voyageurs : 670 m

Après avoir déterminé les contraintes temporelles sur l'exploitation, nous allons calculer la puissance nécessaire pour une rame dans le cas où elle empreinte la ligne01, ensuite quand elle empreinte la ligne02 respectivement lors d'un fonctionnement en heure de pointe.

Les puissances calculées par la suite sont précisées pour les heures de pointes où la demande sur le réseau est importante.

II.5.3. Effort de traction

Pour mettre une rame en mouvement la force nécessaire est exprimée par la deuxième loi de Newton.

Où :

F : la force en K Newton

M : la masse de la rame en charge normale en Kg a

: l'accélération de la rame en m/s²

$$F = M \times a$$

$$F = 1000 \times 60 \times 1.20$$

$$F = 72KN$$

Ce résultat est du même rang que l'essai théorique illustré sur la Figure II.10 où la résistance mécanique lors du démarrage d'une rame est maximale d'où la force nécessaire pour la mise en marche de ce dernier est importante.

II.5.4. Puissance d'accélération

Après avoir déterminé la force nécessaire pour mettre la rame en mouvement, la puissance nécessaire lors d'une accélération est [15] :

$$P_{acc} = \frac{F \times v}{\eta} = \frac{72 \times 40 \times 10^6}{0.9 \times 3600} = 888.889kW$$

Où :

P: La puissance d'accélération en kW

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

v : La vitesse en accélération en m/s

η : Le rendement du matériel roulant

Dans ce qui suit nous allons calculer la puissance nécessaire pour un aller (du dépôt au terminus) de deux (02) rames qui vont respectivement emprunter les lignes 01 et 02. Cela nous permettra d'avoir un aperçu sur le besoin énergétique nécessaire pour toute une installation.

Pour procéder à ce calcul on doit d'abord considérer qu'une rame passera par cinq états, qui sont :

- Une accélération lors du départ de chaque station de passagers
- Une décélération lors de l'arrivée à chaque station de passagers
- Un arrêt en chaque station de passagers
- Un arrêt en terminus
- Un arrêt en gare

Dans le tableau suivant nous allons illustrer la puissance consommée par la rame selon son état, ainsi le temps écoulé dans ses derniers.

Tableau II.7 : les puissances et temps du comportement des rames [16]

Etat	Accélération	décélération	Arrêt station	Arrêt terminus	Arrêt gare	Entre deux stations
Puissance (KW)	$P_{acc} = 888,9$	$P_{dec} = 74$	$P_{arr} = 74$	$P_{arr} = 74$	$P_{arr} = 74$	$P_{aux} = 110$
Temps (S)	$t_1 = 13.89$	$t_1 = 13.89$	$t_2 = 20$	$t_3 = 120$	$t_4 = 30$	$t_5 = 15$

P_{acc} : Puissance d'accélération c :

Puissance de décélération

P_{arr} : Puissance de l'arrêt x :
Puissance des auxiliaires

II.5.5. Calcul de puissance

Dans ce qui suit nous allons calculer la puissance nécessaire pour mener deux rames du dépôt au deux terminus, et cela en calculant l'énergie totale consommée sur les lignes, ensuite on déduit la puissance correspondante par rapport au temps.

D'où le nombre des stations parcourues par deux rames sur deux lignes est

$$N = N_{ligne01} + N_{ligne02} = 23.$$

1^{er} cas : on calcule la puissance sur la ligne 1

$$N_{ligne01} = 11 \text{ stations}$$

Energie d'accélération E_1 :

$$E_1 = P_{acc} \times t_1 \times (N_{ligne01} - 1) = 888.9 \times 13.89 \times 10 = 123468.21 \text{ KJ}$$

Energie de décélération E_4 :

$$E_4 = P_{dec} \times t_1 \times (N_{ligne01} - 1) = 74 \times 13.89 \times 10 = 10278.6 \text{ KJ}$$

Energie dissipée entre deux stations E_2 :

$$E_2 = P_{aux} \times t_5 \times (N_{ligne01} - 1) = 110 \times 15 \times 10 = 16500$$

Energie d'arrêt en station E_3 :

$$E_3 = P_{arr} \times t_2 \times (N_{ligne01} - 1) = 74 \times 20 \times 10 = 14800 \text{ KJ}$$

Energie d'arrêt en terminus E_5 :

$$E_5 = P_{arr} \times t_3 \times 1 = 74 \times 120 \times 1 = 8880 \text{ KJ}$$

Energie d'arrêt en gare E_6 :

$$E_6 = P_{arr} \times t_4 \times 1 = 74 \times 30 \times 1 = 2220 \text{ KJ}$$

L'énergie totale E_{T1} d'un aller d'une rame depuis le dépôt sur la ligne01 est alors : $E_1 =$

$$E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 = 176146.81 \text{ KJ}$$

Le temps nécessaire pour une rame sur la ligne01 pour atteindre le terminus est donc

$$t_{L1} = 758 \text{ s}$$

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

La puissance nécessaire P_1 pour mener une rame du dépôt jusqu'au terminus sur la ligne 01 est donnée par la relation suivante :

$$P_1 = \frac{E_{T1}}{t_{L1}}$$
$$P_1 = \frac{176146.81}{758} = 232.38 \text{ kW}$$

2^{ème} cas : on calcule la puissance sur la ligne 2

$$N_{\text{ligne01}} = 16 \text{ stations}$$

Energie d'accélération E'1 :

$$E'_{1} = P_{acc} \times t_1 \times (N_{\text{ligne02}} - 1) = 888.9 \times 13.89 \times 15 = 185202.32 \text{ KJ}$$

Energie de décélération E'4 :

$$E'_{4} = P_{dec} \times t_1 \times (N_{\text{ligne02}} - 1) = 74 \times 13.89 \times 15 = 15417.9 \text{ KJ}$$

Energie dissipée entre deux stations E'2 :

$$E'_{2} = P_{aux} \times t_5 \times (N_{\text{ligne02}} - 1) = 110 \times 15 \times 15 = 24750 \text{ KJ}$$

Energie d'arrêt en station E'3 :

$$E'_{3} = P_{arr} \times t_2 \times (N_{\text{ligne02}} - 1) = 74 \times 20 \times 15 = 22200 \text{ KJ}$$

Energie d'arrêt en terminus E'5 :

$$E'_{5} = P_{arr} \times t_3 \times 1 = 74 \times 120 \times 1 = 8880 \text{ KJ}$$

Energie d'arrêt en gare E'6 :

$$E'_{6} = P_{arr} \times t_4 \times 1 = 74 \times 30 \times 1 = 2220 \text{ KJ}$$

L'énergie totale E_{T2} d'un aller de deux rames depuis le dépôt sur la ligne est alors

$$E_{T2} = E'1 + E'2 + E'3 + E'4 + E'5 + E'6 = 258670.22 \text{ KJ}$$

Le temps nécessaire pour les deux rames pour atteindre le terminus est donc

$$t_{L2} = 1072 \text{ s}$$

La puissance nécessaire pour mener une rame du dépôt jusqu'au terminus sur la ligne 01 est : E_{T2}

$$P_2 = \frac{E_{T2}}{t_{L2}}$$

$$P_2 = \frac{258670.22}{1072} = 241.3 \text{ kW}$$

II.6. Vitesse d'exploitation

Pour chaque ligne on va déterminer la vitesse moyenne d'exploitation et cela en fonction de la distance et le temps nécessaire pour un voyage de bout en bout.

Ligne 1 :

$$LLigne01 = 6171m$$

$$t_{L1} = 758 \text{ s}$$

$$v_{L1} = \frac{LLigne01}{t_{L1}}$$

$$v_{L1} = \frac{6171}{758} = 8.14 \text{ m/s}$$
$$v_{L1} = 29.31 \text{ km/h}$$

La vitesse moyenne sur la ligne 1 est 29.31km/h.

Ligne 2 :

$$LLigne02 = 11341m$$

$$t_{L2} = 1072 \text{ s}$$

$$v_{L2} = \frac{LLigne02}{t_{L2}}$$

$$v_{L2} = \frac{11341}{1072} = 10.58 \text{ m/s}$$
$$v_{L2} = 38.09 \text{ km/h}$$

La vitesse moyenne sur la ligne02 V_{L2} est 38.09 km/h.

La différence des vitesses moyennes aussi dite commerciale de la ligne 1 et 2 est due à la non-équidistance des stations de voyageurs car il s'agit d'une vitesse moyenne

En prenant en compte les pertes dues aux courbes serrées et les arrêts qui sont estimées de 15%, la vitesse est estimée à $v_{moy} = 28.64 \text{ km/h}$.

II.7. Calcul de nombres de rames pour chaque ligne

Après avoir déterminé la vitesse moyenne de déplacement des rames nous allons déterminer le nombre de rames nécessaire pour assurer la fréquence de passage d'une rame toute les 4 minutes.

Le nombre de rames est donné par la formule suivante :

$$\text{Nombre de rames} = 2 \times [(L_{\text{Ligne}} / (y \times 1000 / 60)) \times f_r]$$

Où :

f_r : la fréquence de passage des rames sur les stations de passagers

II.7.1. nombre de rames su la Ligne01

$$N_{R1} = 2 \times \frac{L_{\text{Ligne}}}{y \times 1000 \times f_r}$$

$$N_{R1} = 2 \times \frac{6171}{\frac{24 \times 1000}{3600}} \times \frac{1}{240}$$

$$N_{R1} = 7.71$$

$$N_{R1} = 8 \text{ rames}$$

Où :

N_{R1} : le nombre de rames sur la ligne01.

Pour la fréquence de passage des rames de 4 minutes on aura besoin de 8 rames circulant d'une vitesse moyenne de 24km/h pour satisfaire la demande sur la ligne01

II.7.2. nombre de rames su la Ligne02

$$N_{R2} = 2 \times \frac{L_{\text{Ligne}}}{y \times 1000 \times f_r}$$

$$N_{R2} = 2 \times \frac{11341}{\frac{24 \times 1000}{3600}} \times \frac{1}{240}$$

$$N_{R2} = 14.2$$

$$N_{R2} = 15 \text{ rames}$$

Chapitre II : étude technique de l'installation tramway

Pour la fréquence de passage des rames de 4 minutes on aura besoin de 15 rames circulant d'une vitesse moyenne de 28.64km/h pour satisfaire la demande sur la ligne02.

Donc en total nous avons $N_R = 23$ rames sur les lignes d'exploitation circulant avec une vitesse moyenne (commerciale) de 28.64km/h et une fréquence de passage de 04 minutes.

II.8.Puissance totale consommée par les rames

Une rame une circulation consomme une puissance $P=230KW$ pour faire un aller du Dépôt au Terminus.

Donc la puissance totale consommée lors de l'exploitation sous les contraintes précédentes est :

$$P_T = N_R \times P$$

$$P_T = 23 \times 230$$

$$P_T = 5.3 \text{ MW}$$

Où P_T : la puissance totale consommée par 23 rames sur le réseau.

Donc en heure de pointe avec les exigences précédente on aura besoin en moyenne 5.3MW d'énergie pour faire rouler toutes les rames sur le réseau.

Il faut bien noter que cette consommation est théorique, elle répond à un cahier de charge bien déterminé en nombre de voyageurs et en nombre de rames, aussi il faut savoir que lors de l'exploitation d'un tramway la consommation n'est pas uniforme, en effet la journée à une demande d'énergie plus importante que la nuit.

II.9. Conclusion

Nous avons traité dans ce chapitre, le parcours des deux itinéraires que nous avons choisi. Nous avons déterminé le nombre optimal de stations voyageurs, nous avons aussi déterminé nombre de sous-stations qui couvriront les deux itinéraires.

Vu la nature du terrain de l'agglomération nous avons soulevé le problème des pentes entre les stations et celle de démarrages qui nécessite un terrassement adéquat pour se conformer aux normes exigées. Puis nous avons procédé aux calculs des puissances consommées par les rames, afin de déterminer le nombre nécessaire de rames à mettre en circulation respectant les conditions imposées par l'Entreprise SETRAM.

**Sous station de traction et performance de
l'installation**

III.1. Introduction

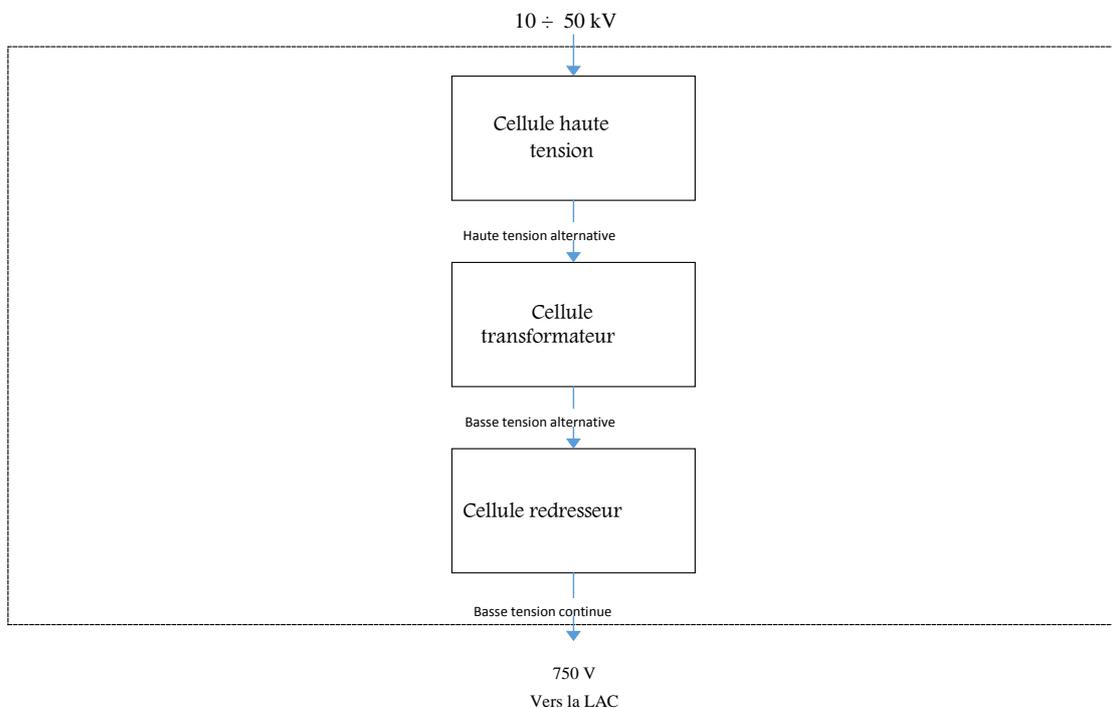
Comme nous l'avons indiqué dans le premier chapitre, les sous stations de traction forment l'infrastructure électrique principale dans un tramway. Une station est destinée à capter l'énergie électrique provenant du fournisseur, celle-ci est traitée et injectée dans le réseau d'exploitation, tout en répondant aux exigences du matériel roulant du point de vue qualitatif et quantitatif pour le bon fonctionnement de toute l'installation.

Dans le chapitre suivant nous allons expliquer le processus mis en œuvre pour fournir une tension exploitable au matériel roulant, et étudier la transformation faite au sein des stations de traction.

Ensuite nous procédons à la simulation de différents cas de charges sur les stations de traction, pour voir le comportement de ces dernières, et de faire le point sur la capacité maximale de l'installation proposée du point de vue énergétique.

III.2. Proposition d'un modèle de SST (sous station de traction)

Pour répondre aux exigences énergétiques du matériel roulant et la ligne d'alimentation La puissance d'une sous-station mono groupe redresseur est généralement de 900 kW dans la suite nous allons passer par expliciter les composants et les blocs aboutissant au fonctionnement d'une sous station de traction pour assurer la mise en marche du matériel roulant en question.



Comme nous l'avons déjà abordé le schéma standard d'une sous station de traction comporte une cellule de haute tension où aboutit l'énergie électrique de le poste HT :

- Une partie de transformation qui abaisse la tension à la valeur requise, puis procéder à son redressement afin de la livrer aux gens.
- Une partie de distribution qui achemine cette énergie utile au matériel roulant à travers la ligne aérienne de contact LAC.

Dans la suite de cette section nous allons détailler toutes les cellules des sous stations, ainsi que les composants de chaque cellule et indiquer leurs fonctions.

III.2.1. Cellules haute tension

III.2.1.1 cellule de fournisseur

Le fournisseur d'électricité assure une tension **HT** (entre 10kV et 50kV) avec une fréquence de 50HZ en tension alternative selon l'exigence de l'exploitant à l'entrée de chaque sous station

Dans un but préventif contre les éventuels coupures, le réseau est alimenté à travers :

- **Une arrivée normale** que nous allons noter IAN
- **Une arrivée secours** que nous allons noter IAS

III.2.1.2. Cellule d'arrivée normale (IAN) et de secours (IAS)

L'alimentation du contrôle commande des cellules d'arrivée (Normale et Secours) est assurée par une source de tension auxiliaire indépendante fournie par SONELGAZ.

Chaque cellule comprend essentiellement :

- un interrupteur-sectionneur de charge motorisée.
- un sectionneur de mise à la terre cadenassable avec verrouillage mécanique
- un jeu de TC pour la surveillance des défauts câbles
- un dispositif de détection présence tension, monté sur diviseur capacitif avec relais et voyants de signalisations.
- un caisson BT équipé d'un bornier d'interface pour le raccordement des câbles de contrôle commande de la SONELGAZ, d'un relais de détection des défauts phase-phase et des défauts phase terre et d'un commutateur de choix de commande local/distance.

III.2.1.3 Cellule de basculement de source (CSS)

L'alimentation du contrôle commande de la cellule de basculement de sources est assurée par une source de tension auxiliaire 230V AC. Cette cellule comprend :

- un interrupteur-sectionneur de charge motorisée.

- un bornier d'interface pour le raccordement des câbles de contrôle commande de la SONELGAZ, d'un relais de détection des défauts et d'un commutateur de choix de commande local/distance.

III.2.1.4. Cellule de comptage (CM)

La cellule de comptage énergie est située après les cellules d'arrivées. Elle comprend essentiellement un jeu de transformateurs de potentiel à double enroulement pour le comptage et un autre pour la mesure de tension.

III.2.1.5. Cellule du disjoncteur de protection générale (DHTA-A)

Cette cellule est alimentée en 230 V AC, à partir de l'alimentation sans interruption (ASI), pour assurer sa pérennité. Elle comprend :

- un sectionneur d'isolement en amont et en aval - un disjoncteur, déconnectable.
- un sectionneur de mise à la terre avec clé de sécurité libre en position fermé.
- un dispositif de signalisation présence tension.
- un jeu de transformateurs de courant.
- un relais de contrôle de température à 2 seuils (alarme et défaut) pour la protection des enroulements du transformateur de traction.

III.2.1.6. Cellule interrupteur / fusible combinés (ITRA)

C'est la cellule d'alimentation pour le transformateur des auxiliaires en ligne, elle comporte :

- un sectionneur manuel avec déclencheur.
- un sectionneur de mise à la terre.
- un jeu de fusibles HPC
- un dispositif de signalisation présence tension.
- un relais de contrôle de température à 2 seuils pour la protection des enroulements du transformateur des auxiliaires.

Les auxiliaires de haute tension installés dans les cellules peuvent être manœuvrés soit manuellement ou automatiquement. Un commutateur local/distance sur chaque cellule équipée d'un actionneur motorisé, permet de sélectionner le lieu de commande.

Après avoir identifié les cellules arrivée HT, le schéma unifilaire de ces dernières et leurs disposition est illustrée sur la figure suivante.

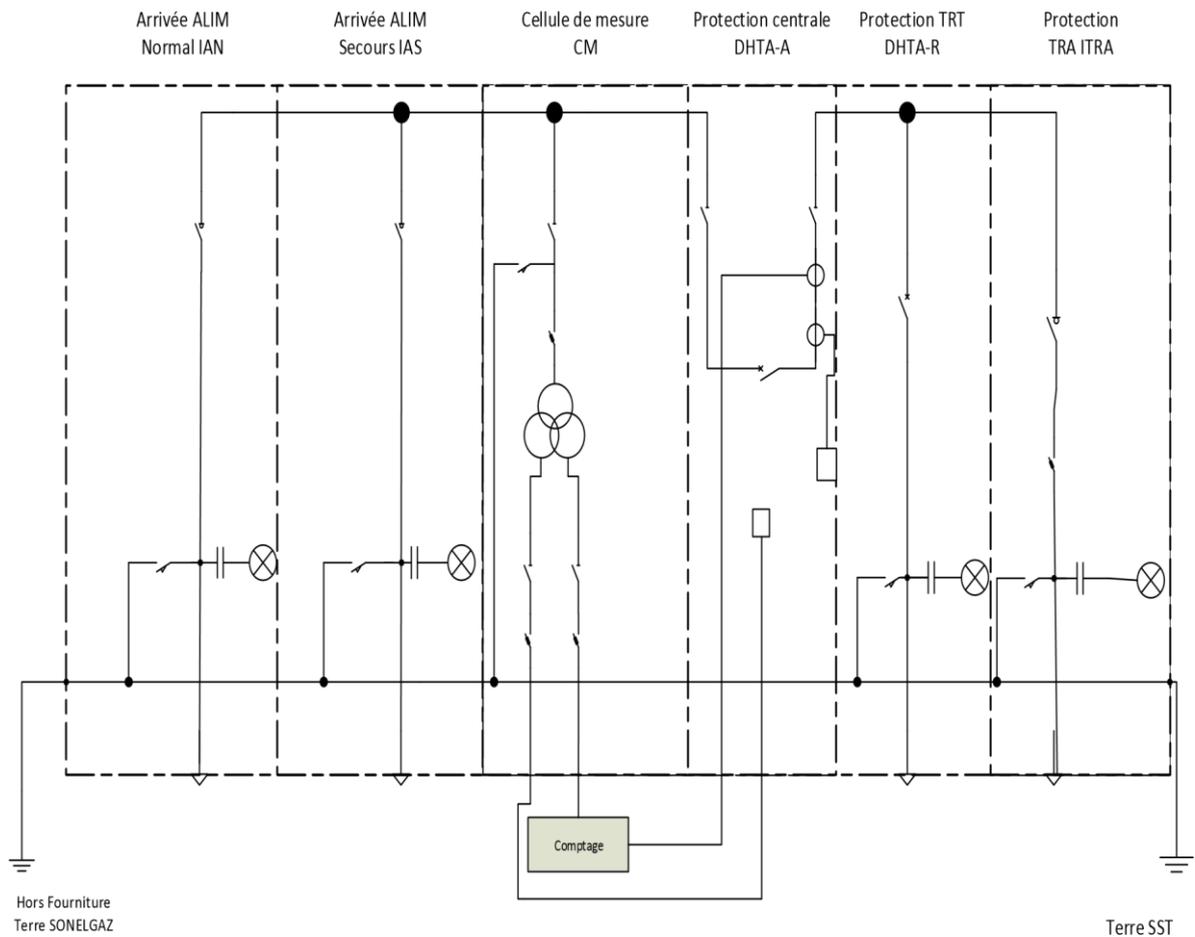


Figure III.1 : Schéma unifilaire de la cellule HT

III.2.2. Bloc de Transformateur

Dans une sous station de traction on distingue deux transformateurs :

- Un transformateur de traction
- Un transformateur des auxiliaires

III.2.2.1 Transformateur de traction TRT

D'après la norme NF C 52112-1 concernant les transformateurs triphasés de distribution de 50 kVA à 2 500 kVA destinés à fonctionner dans des réseaux de distribution triphasés, pour un service continu à l'intérieur comme à l'extérieur, conviennent aux installations de tramway.

Le transformateur de traction permet d'abaisser la tension alternative, HT, à une tension alternative BT qui alimente le groupe redresseur.

Un transformateur est un appareil fiable. Les enroulements primaires et secondaires sont placés autour d'un noyau magnétique.

Tableau III.1 : Caractéristiques du transformateur de traction

Désignation	Caractéristiques
Puissance apparente	1000 KVA
Tension du Primaire/secondaire	30kV/585V
Couplage	Dy11d0
Ventilation	Air naturel
Type	SEC sous enveloppe métallique à 2 enroulements secondaire

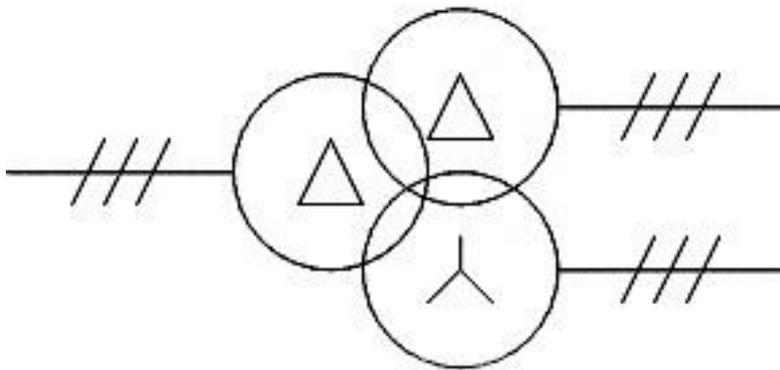


Figure III.2 : Schéma du transformateur Dy11d0

Transformateur Dy11d0

30 kV / 2× 585 V – 50 Hz

S= 1 MVA

Le rôle des protections, est de surveiller les températures des enroulements des transformateurs.

- **Seuil 01** : alarme : lorsque ce seuil est atteint le disjoncteur alternatif DHTA-R amont reste fermé.
- **Seuil 02** : déclenchement : lorsque ce seuil est atteint, le disjoncteur DHTA-R amont s'ouvre et isole ainsi le transformateur.

III.2.2.2. Disjoncteur DHTA-R en amont du transformateur

Le rôle du disjoncteur avec sa cellule est de protéger le transformateur TRT. .

III.2.2.3. Transformateur auxiliaire TRA

Chaque **SST** est équipée d'un transformateur monophasé appelé transformateur des auxiliaires et sont identiques.

Le transformateur des auxiliaires, assurent à travers d'un TGBT la distribution et l'alimentation de :

- Des équipements de sous-station
- Les armoires d'Alimentation Sans Interruption (ASI)
- Les armoires d'Arrêt d'Urgence (AU)
- Des stations de voyageurs et la signalisation ferroviaire
- Ainsi que les ateliers du Dépôt

Tableau III.2 : Caractéristiques du transformateur auxiliaire

Désignation	Caractéristiques
Puissance apparente	160kVA
Fréquence	50 Hz
Tension du primaire	30 kV
Tension du secondaire	400 V
Couplage	Dyn11

III.2.2.3 Cellule Interrupteur Transformateur auxiliaire ITRA

Cette cellule est munie d'un interrupteur et d'un fusible situés au départ transformateur auxiliaire pour assurer la protection de celui-ci.

III.2.2.4 Les Tableaux Généraux Basse Tension TGBT

Les Tableaux Généraux Basse Tension (TGBT) sont installés dans les sous-stations de traction de la ligne. Ils permettent la distribution de l'énergie BT issue des transformateurs des auxiliaires d'une sous-station vers les équipements de celle-ci.

Un module d'entrée-sortie est intégré dans l'armoire du TGBT, afin de remonter les informations de contrôle commande du TGBT vers le PCC (Poste de Conduite Centralisé). De manière à autoriser la possibilité de modification ou d'extension sur les équipements pour la distribution de l'énergie Basse Tension.

Le Tableau Général Basse Tension (**TGBT**) est le point central de la distribution électrique d'un bâtiment. C'est d'interface entre l'arrivée et les différents équipements du Tramway. Le **TGBT** est un système de coffrets et d'armoires de distribution en K. Le **TGBT** est équipé de tableaux de réserves destinés aux futures extensions.

III.2.3. Bloc Redresseur RED

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif/continu, transforme la tension **BT** alternative issue du **TRT**, en énergie continue.

Tableau III.3 : Caractéristiques du redresseur

Désignation	Valeurs
Type	PD12
Tension d'entrée	2 ×585Vca
Fréquence d'entrée	50Hz
Courant d'entrée	980 A
Tension nominale CC	750 V
Courant nominal CC	1200 A
Courant maximum de court-circuit	3400 (10ms) A
Refroidissement	Air naturel

Le redresseur permet de transformer l'énergie alternative BT de sortie du transformateur en énergie continue, le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles, chacun de ces secondaires alimentent un redresseur en pont de Graetz qui réalise un redressement hexaphasé.

Les deux redresseurs sont connectés en parallèles (Figure III.3), dans le cas où les tensions instantanées délivrées par chacun des deux redresseurs n'étant pas égales (vu qu'elles sont décalées de 30°), il est nécessaire de rajouter une inductance à point milieu pour conserver

un débit continu pour chaque redresseur. En absence de cette inductance, la conduction serait assurée à chaque instant par celui du redresseur délivrant la tension la plus élevée.

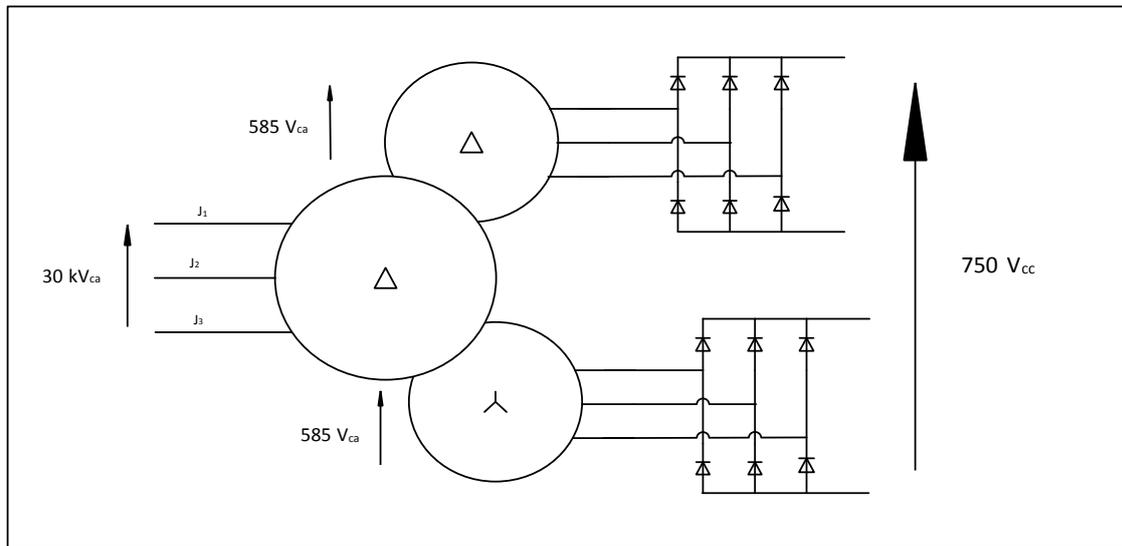


Figure III.3 : Schéma unifilaire du bloc TRT+ redresseur

L'intérêt majeur d'un redresseur hexaphasé est d'atténuer les harmoniques de rang peu élevé mais d'amplitudes importantes pour améliorer la qualité du signal électrique fourni.

III.3. Mesures de sécurité de la partie distribution

Avec l'augmentation de la puissance installée, la distribution électrique doit passer d'une conception BT à une conception MT. En effet, un niveau de courant de court-circuit élevé en BT peut présenter un risque pour l'installation et rendre impossible la sélection des équipements (tableaux et jeux de barres, disjoncteur ...)

III.3.1 sectionneur d'isolement automatique SIA

C'est un composant électromécanique permettant une ouverture d'un circuit électrique, et assure une distance de séparation suffisante. Il peut être utilisé pour plusieurs raisons notamment d'isoler une alimentation sur une certaine partie du circuit tout en assurant la présence du courant dans d'autres parties (cas de consignation), ou aussi d'assurer la sécurité du personnel sur la partie isolée.

III.3.2. disjoncteur ultra rapide DUR

Le disjoncteur ultra-rapide est conçu pour assurer, en cas de détection d'un défaut de court-circuit ou d'une éventuelle surcharge, la protection et l'isolation de la Ligne Aérienne de

Contact (LAC). Il est opérable en mode local ou à distance et est sécurisé par verrouillage mécanique.

En cas de détection d'un défaut, le DUR doit indiquer le problème aux disjoncteurs des sous-stations adjacentes, alimentant la même section, afin d'isoler la section complète. Ce type de disjoncteur, qui est à courant continu, est destiné à établir, supporter et interrompre des courants continus sous sa tension assignée, que ce soit en condition normale ou anormale par exemple un court-circuit, selon la définition donnée par la commission électrotechnique internationale. L'interruption d'un courant continu est à la fois différente et plus difficile que celle d'un courant alternatif. Les disjoncteurs à courant continu sont donc très différents de leurs équivalents pour courant alternatif. Des modèles en moyenne tension et haute tension existent actuellement dans le domaine ferroviaire et dans les stations HVDC (High Voltage Direct Current), cependant jusqu'à présent aucune solution acceptable n'a été trouvée pour réaliser un disjoncteur à courant continu très haute tension, soit le système est trop lent, soit dégager trop de pertes.

Pour les disjoncteurs destinés au domaine ferroviaire une chambre de coupure munie de séparateurs est souvent utilisée en combinaison avec une bobine créant un champ magnétique qui fait se déplacer l'arc vers ces derniers.

III.3.3. Sectionneur de ligne SL

Le sectionneur de ligne dans les sous-stations a comme objectif d'isoler l'alimentation injectée à la ligne d'exploitation par ces dernières, il est considéré comme un équipement primaire pour les procédures de consignations (coupure visible).

A la différence d'un disjoncteur ou d'un interrupteur un sectionneur ne possède pas de pouvoir de coupure, il est donc obligatoire de l'isoler électriquement pour éviter une manœuvre en charge, faute de quoi de graves incidents pourraient se produire suite à la formation d'un arc électrique, qui causerait d'importantes brûlures ou une électrocution.

Note : on constate bien que le point commun entre les disjoncteurs et les sectionneurs reste l'action de l'ouverture du circuit électrique, cependant ce qui les différencie c'est le fait que la dite manœuvre peut s'exécuter en charge pour le disjoncteur mais uniquement à vide pour le sectionneur. Du côté sécurité le rôle du sectionneur est de garantir une coupure visible ce qui n'est pas le cas pour un disjoncteur.

Le schéma de la SST est illustré sur la Figure III.3, il faut noter que cette dernière est du type T, sachant qu'il existe un autre type appelé Π (voir [Annexe.2]) et cela en fonction de la position de la SST.

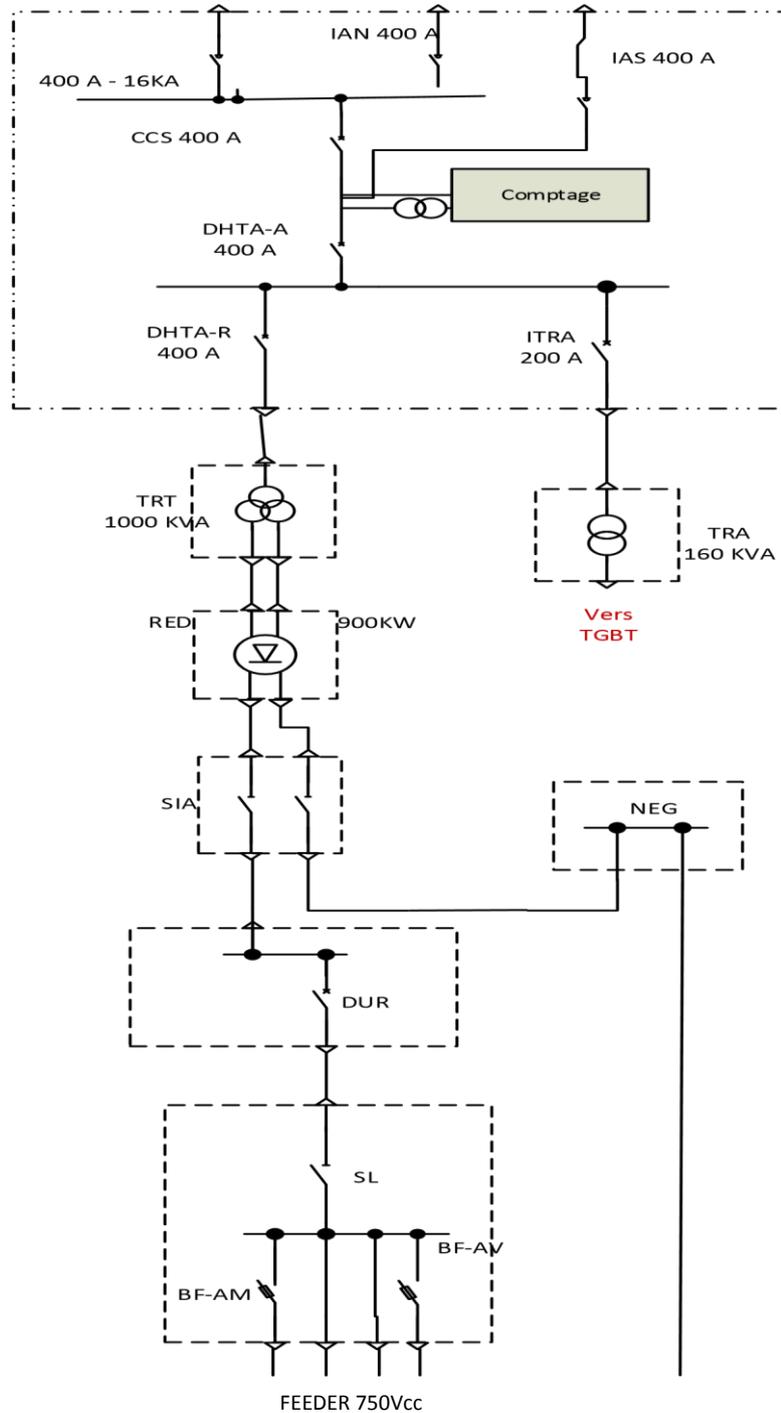


Figure III.4 : Schéma électrique d'une sous station de traction

On dresse un tableau récapitulatif de tous les composants avec leurs abréviations respectives.

Tableau III.4 : Equipement de la SST

Equipements	Abréviations
<p>Cellule HT</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cellule d'arrivée normale • Cellule Arrivée secours • Cellule de basculement de source • Cellule de comptage 	<ul style="list-style-type: none"> • IAN • IAS • CSS • CM
<p>Protection de la cellule HT</p> <ul style="list-style-type: none"> • Disjoncteur de protection • Cellule interrupteur / fusible combinés 	<ul style="list-style-type: none"> • DHTA-A • ITRA
<p>Partie production</p> <ul style="list-style-type: none"> • Transformateur de traction • Transformateur auxiliaire • Bloc Redresseur 	<ul style="list-style-type: none"> • TRT • TRA • RED
<p>Protection de la partie production</p> <ul style="list-style-type: none"> • Disjoncteur d'alimentation du transformateur Redresseur • Interrupteur Transformateur auxiliaire 	<ul style="list-style-type: none"> • DHTA-R • ITRA
<p>Partie distribution</p> <ul style="list-style-type: none"> • Feeder • Tableau général basse tension • l'Armoire de Contrôle Commande 	<ul style="list-style-type: none"> • TGBT • ACC
<p>Protection de la partie distribution</p> <ul style="list-style-type: none"> • sectionneur d'isolement • automatique disjoncteur ultra rapide • Sectionneur de ligne 	<ul style="list-style-type: none"> • SIA • DUR • SL

III.4. Connexion entre les SST

On désigne par la connexion entre les sous stations de traction la disposition des SST sur le chemin du tramway, ainsi que le raccordement de celles-ci pour faciliter la tâche de consignation lors de l'exploitation.

Pour cela nous avons deux types de **SST** :

III.4.1. SST en T

Elle dispose d'un tableau de protection traction avec un seul DUR, d'un tableau distribution traction avec un seul sectionneur et de deux barrettes feeder de mise en parallèle. Cette sous station assure l'alimentation d'une section de la ligne.

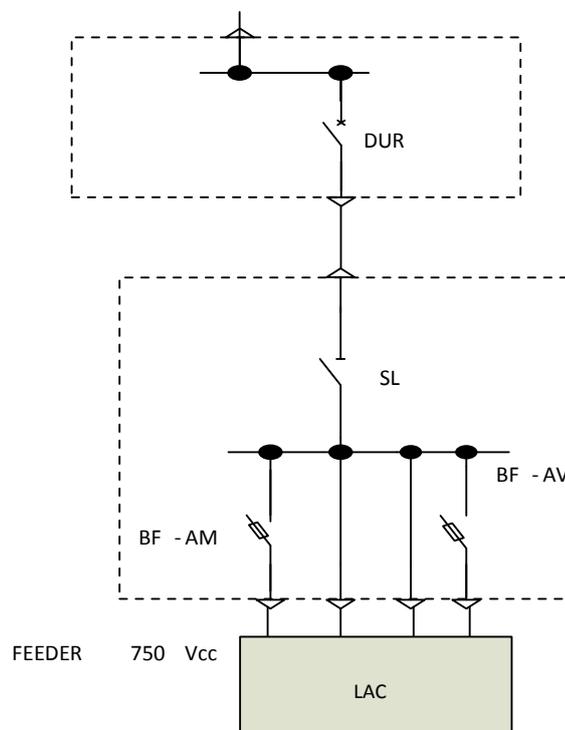
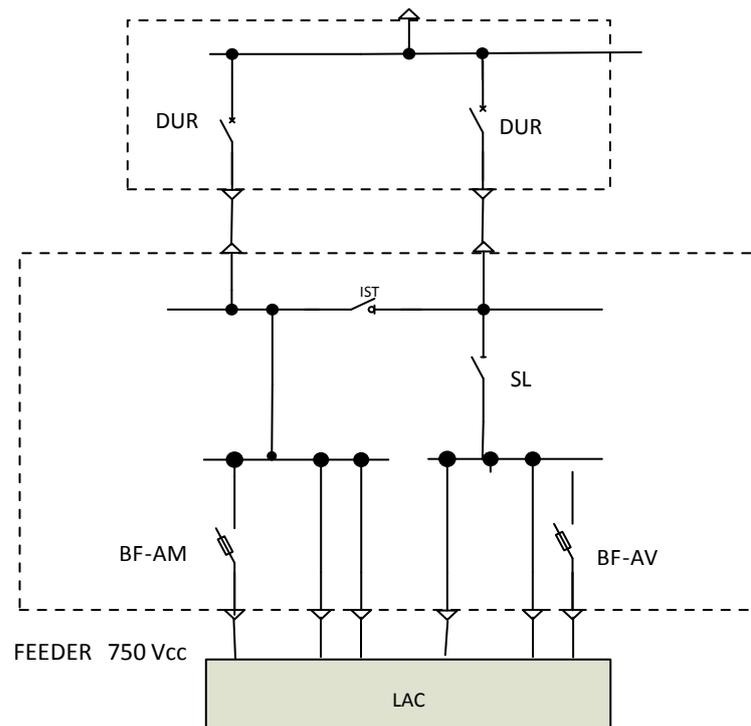


Figure III.5 : Connexion en T

III.4.2. SST en Π

Elle permet de connecter deux sections électriques consécutives, elle est composée d'un tableau de protection traction avec deux DURs débrochables (DUR 1 et DUR 2), d'un tableau de distribution traction à deux sectionneurs ligne (SL1 et SL2). Ce genre de SST se place au niveau des limites de chaque secteur.



- Figure III.6 : Connexion en II

Nota : les **SST en T** servent seulement à injecter l'énergie continue dans la ligne, cependant les **SST en II** possèdent la particularité de servir de by-pass en cas où elle tombe en panne, ce by-pass assure la continuité de l'exploitation, par le biais des SST de part et d'autre.

Particulièrement le dépôt dispose de deux transformateurs de traction TRT, l'un pour motoriser les rames sur la ligne, et l'autre pour le lancement des rames stationnées dedans après le remisage. Son schéma est illustré en **Annexe.2**.

III.5. Performance des SST

Pour tester la performance des SST on simule le cas d'une alimentation des rames en heures de pointes, dont le nombre est défini dans le chapitre précédent. Pour procéder à cette simulation nous utiliserons le logiciel ETAP.

Sur le logiciel ETAP le redresseur ne peut pas être représenté, pour contourner ce problème nous allons travailler directement avec les tensions de sorties des onduleurs installés dans les rames, les dites tensions alimentent les moteurs des bogies.

Les caractéristiques principales du moteur sont :

Tableau III.5 : Caractéristiques nominale du moteur 4 HGA 1433

Désignation	Caractéristiques
Modèle	4 HGA 1433
Type	Asynchrone
Nombre de paires de pôles	2
Rendement	94%
Facteur de puissance	0.872
Puissance absorbé	120kW
Surcouple	1200 N.m
Fréquence en régime moteur	161Hz
Régime moteur	4563 tr/min
Glissement	2.546

Un bogie d'une rame citadis-302 comporte 04 moteurs asynchrones de traction de types 4HGA133 qui a les caractéristiques suivantes lors d'un essai en charge.

Tableau III.6 : Résultats de l'essai en charge du moteur 4 HGA 1433

F	N	g	U	I	cos θ	P _{abs}	Couple		P _u	η
							Théorique	mesuré		
Hz	Tr/mn	%	V	A	-	kW	N.m	N.m	kW	-
34.94	971.1	7.33	236.2	280	0.8788	100.7	760	803	81.7	0.811
73.94	2142.9	3.39	476.4	281.4	0.8648	200.8	760	806	180.9	0.901
89.63	2609.5	2.95	501.1	262.2	0.8667	197.2	626	653	178.4	0.905
110.69	3243.9	2.31	503.5	205.9	0.8725	156.7	403	421	143	0.913

154.5	4559.	1.6	503.	146.	0.872	111.	204	214	102.	0.91
1	6	3	6	1	4	2			2	9

Remarque : La fréquence 154.51 Hz qui est la plus proche de la fréquence au régime moteur présente un bon facteur de puissance et le meilleur rendement avec une puissance absorbée modérée. Le couple théorique est toujours inférieur au couple mesuré.

III.5.1. Performance en heures de pointes

En heures de pointe, le nombre de rames alimentées par une sous station de traction lors des heures de pointe est donné par le rapport entre le nombre des rames N_R sur la longueur de ligne (L_{ligne}), qui est approximativement deux (02) rames par sous station de traction.

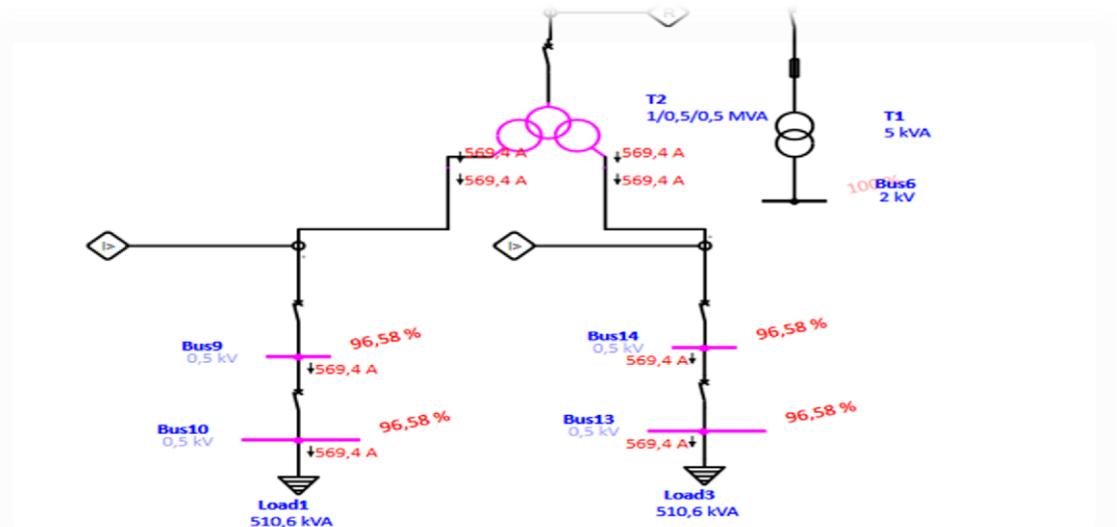


Figure III.7 : Simulation de deux rames alimentées par une sous station

Pour la fréquence d'exploitation indiquée aux contraintes précédentes la sous station de traction assure le fonctionnement normal des rames sur la ligne d'exploitation

Les deux rames consomment un courant total de $I_{\text{consommé}} = 1138.8 \text{ A}$

Alors que le redresseur assure un courant nominal de 1200A Calcul de la chute de tension dans ce cas :

$$\frac{\Delta U_d}{2} = R \times I_{\text{consommé}} \times d$$

$$\Delta U_d = 2 \times R \times I_{\text{consommé}} \times d$$

$$\Delta U_d = 2 \times 0.05 \times 1138.8 \times 1.89$$

$$\Delta U_d = 215.23 \text{ V}$$

Où :

Δ : la chute de tension en volt sur une distance d.

R : la résistance millimétrique en Ω/km .

d : la distance entre deux SST en Km.

Or la chute de tension maximale selon la norme **NF EN 50163** est de 250 V. Donc de ces résultats on pourra déduire que ce modèle de sous station assurera le fonctionnement normale des rames avec la fréquence choisie et répond aux normes exigées.

III.5.2. Performance en mode dégradé : cas d'une sous station en panne (SST hors de fonction)

Le mode dégradé signifie qu'une SST est en panne son circuit est en by-pass à cause des travaux de réparation, mais comme même l'exploitation continue grâce aux autres SST.

Dans ce qui suit nous allons simuler les performances des SST adjacentes à celle qui est en panne.

Dans le cas d'une sous station en panne on passera à 06 rames alimentées par 02 sous station qui veut dire que chaque sous station va motoriser 03 rames en heure de pointe :

Aussi une sous station dans ce cas couvrira une distance plus importante qui est de : 1.5

$$\times d$$

Où :

d : est la distance séparant deux SST.

En simulant ce cas sur le logiciel ETAP on obtient :

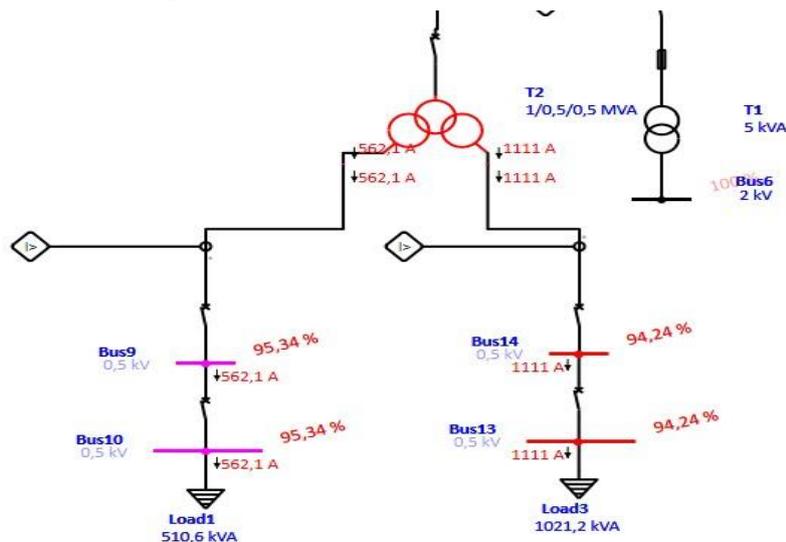


Figure III.8 : Simulation de trois rames alimentées par une sous station

Pour que les trois rames fonctionnent normalement elles vont consommer un courant total de $I_{\text{consommé}} = 1673.1\text{A}$. $I_{\text{consommé}}$ indique le courant nécessaire pour le fonctionnement normal des moteurs de traction. Or le redresseur sur la sous station assure un courant nominal de $I_N = 1200\text{A}$

Nous allons supposer que la distribution du courant dans ce cas est équitable sur les trois rames, où chaque rame consommera un courant de 400A. D'où le courant injecté dans chaque moteur est de 100A.

Dans ce qui suit le comportement des moteurs avec un courant de ligne de 100A qui affectera le fonctionnement normal de ces derniers avec risque plus élevé d'emballement
Calcul de chute de tension dans ce cas :

$$\frac{\Delta U_d}{2} = R \times I_N \times 1.5 \times d$$

$$\Delta U_d = 2 \times R \times I_N \times 1.5 \times d$$

$$\Delta U_d = 2 \times 0.05 \times 1200 \times 1.5 \times 1.89$$

$$\Delta U_d = 340.2 \text{ V}$$

ΔU_d : la chute de tension en volt sur la distance

d R : la résistance kilométrique en Ω/km . d : la distance entre deux SST en Km.

Or, la chute de tension maximale selon la norme **NF EN 50163** est de 250 V. Donc cela affectera le fonctionnement normal des rames vu que la chute de tension est très importante.

Pour y remédier, nous devons élargir la fréquence de passage des rames pour éviter des chutes de tensions plus importantes et protéger l'équipement des sous station de traction.

A titre d'exemple, un cas de surcharge sur une sous-station est arrivé à Sidi Bel-Abbes en 2019, il s'est illustré par la fusion d'une LAC et ce, à cause du passage de quatre (04) rames sur une même section ce qui a engendré un appel de courant important pendant une longue durée.

III.6.puissance de l'installation

Comme mentionné dans le chapitre précédant nous avons opté pour 10 SST et un dépôt donc l'équipement nécessaire pour cette installation est :

- 11 transformateurs de traction TRT
- 10 transformateurs auxiliaires
- 11 redresseurs

III.6.1 Puissance apparente de l'installation

$$S = N_{TRT} \times S_{TRT} + N_{TRA} \times S_{TRA}$$

$$S = 11 \times 1000 + 10 \times 160$$

$$S = 12600 \text{ kVA}$$

S : la puissance apparente de l'ensemble des SST en kVA.

III.6.2. Puissance active

$$P_{ins} = 11 \times 750 \times 1200$$

$$P_{ins} = 9.9 \text{ MW}$$

P: la puissance active de l'ensemble des SST en MW.

III.7. approvisionnement en énergie

Citons le cas particulier d'approvisionnement en énergie électrique pour le cas du tramway d'Alger. Où par difficulté de réaliser un poste HT conçu spécialement pour SETRAM et ce à cause de l'encombrement. Pour parer à ce manque il a été procédé à l'alimentation des SST à partir des postes XD 10kV (distribution publique) implantés à travers le circuit du Tramway. Néanmoins cette solution présente des anomalies car chaque sous-station à sa propre tension qui est liée aux postes de distribution en question et est sujette aux perturbations liées aux réseaux domestiques (surcharges, sous-tensions, surtensions ...).

Cependant cette anomalie a été rectifiée sur les projets réalisés par la suite, à savoir : Oran, Sétif, Sidi Bel-Abbes et Ouargla, Dont l'approvisionnement s'effectue par le biais d'un poste HT 60/30kV propre à l'entreprise SETRAM. Ce poste aura la fonction de prendre en charge l'alimentation des différentes sous-stations du projet. Ainsi l'alimentation des sousstations sera indépendante du réseau domestique.

L'étude approfondie de la partie HT et la manière d'alimenter le réseau tramway sera traitée dans le master.

III.8. conclusion

Dans ce chapitre nous avons traité l'unité la plus cruciale des systèmes de tramway qui est la sous station de traction SST où nous avons mis en évidence l'équipement en guise.

Le traitement de l'énergie au niveau de ces SST se fait sur trois niveaux qui sont :

- L'arrivée de l'énergie à travers une cellule HT à partir du fournisseur.
- L'abaissement de la tension HT puis son redressement.
- La distribution de cette énergie à travers les LAC.

En seconde partie on s'est lancé dans l'étude de performances des SST en régime de pointe et en régime perturbé.

Conclusion générale

Ce mémoire de fin d'étude a pour objectif de répondre à la possibilité d'insertion d'un réseau tramway à l'agglomération de Tlemcen.

Nous avons désigné l'infrastructure nécessaire à une telle installation à dire les sous stations de traction en premier lieu, ensuite l'équipement intervenant dans les systèmes ferroviaire en expliquant le rôle de chacun de ces derniers, pour enfin conclure avec le matériel roulant du tramway et ses caractéristiques.

Puis nous avons déterminé les itinéraires adéquats à un tel projet de sorte qu'il couvre l'agglomération d'une manière optimale en reliant les points essentiels de la ville tout en tenant compte de la répartition démographique de la population, donc nous avons opté pour deux lignes pour satisfaire les contraintes citées précédemment.

Pour ses deux lignes et nous avons défini par la suite la puissance nécessaire pour la mise en marche de cette installation dans des conditions spécifique de passage des rames et déterminer le nombre des rames circulants.

Enfin nous avons procédé à proposer un modèle de sous station de traction pour la mise en marche de l'installation et à la simulation des cas extrêmes de marche du projet de Tramway.

Annexes

Annexe.1 schéma électrique d'une sous station de traction en II

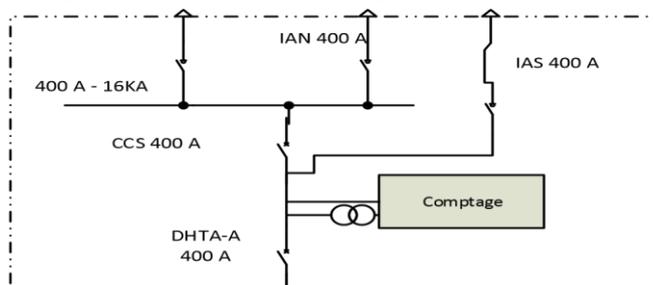


Figure A.1 : Schéma unifilaire d'une SST en II

Annexe.2 schéma électrique du dépôt :

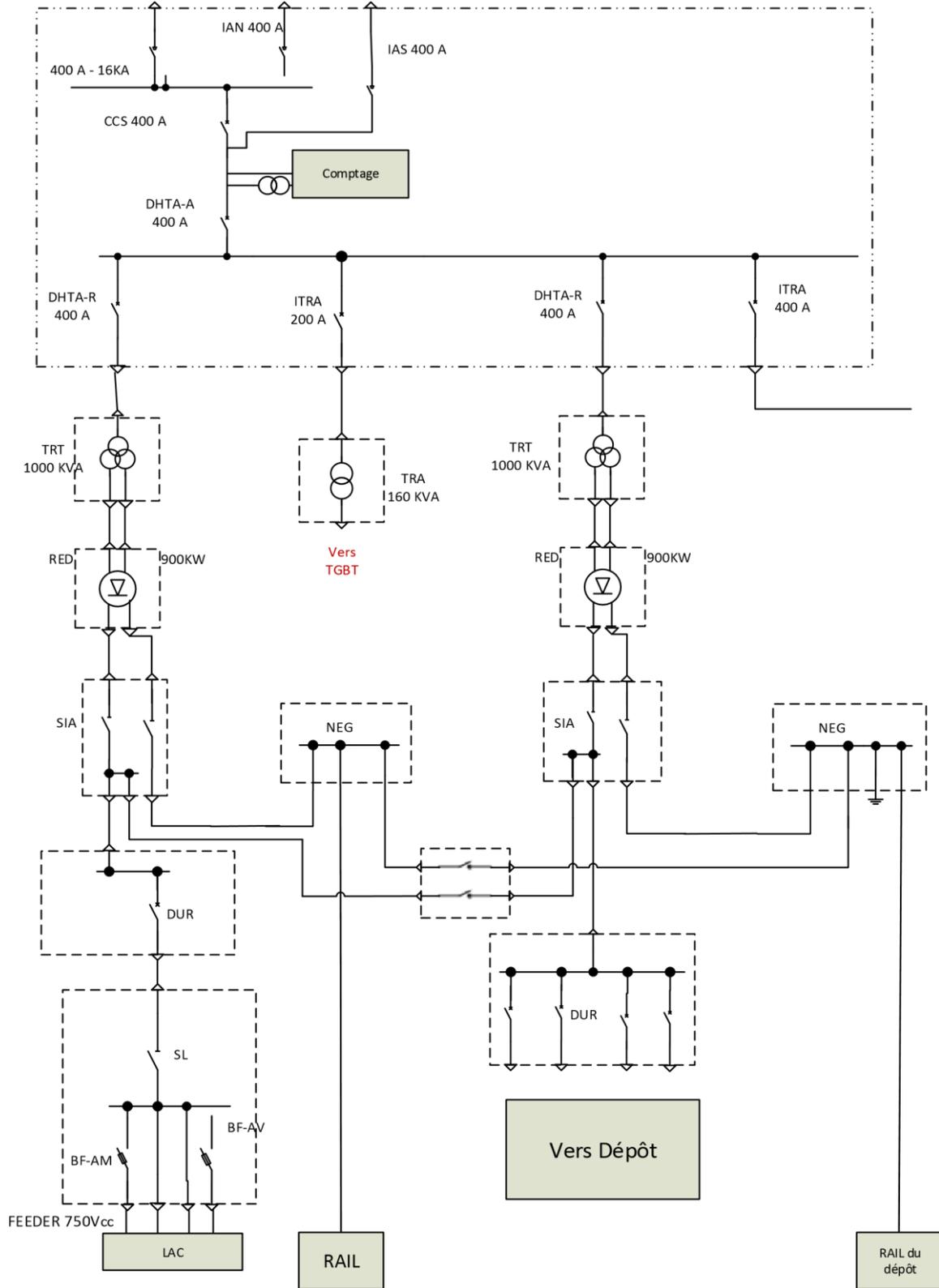


Figure A.2 : Schéma unifilaire du dépôt

Annexe.3 Transformateur de traction

Couplage Dy11d0, le transformateur est équipé de deux enroulements au secondaire :

D : indique le type de couplage HT qui est en triangle **d** : indique le type de couplage

BT qui est en triangle **y** : indique le type de couplage BT qui est en étoile

11 : indice horaire de 11h soit $11 \times 30^\circ$ entre les tensions HT et BT

0 : indice horaire de 12h qui signifie qu'il n'y a pas de déphasage entre les tensions HT et BT

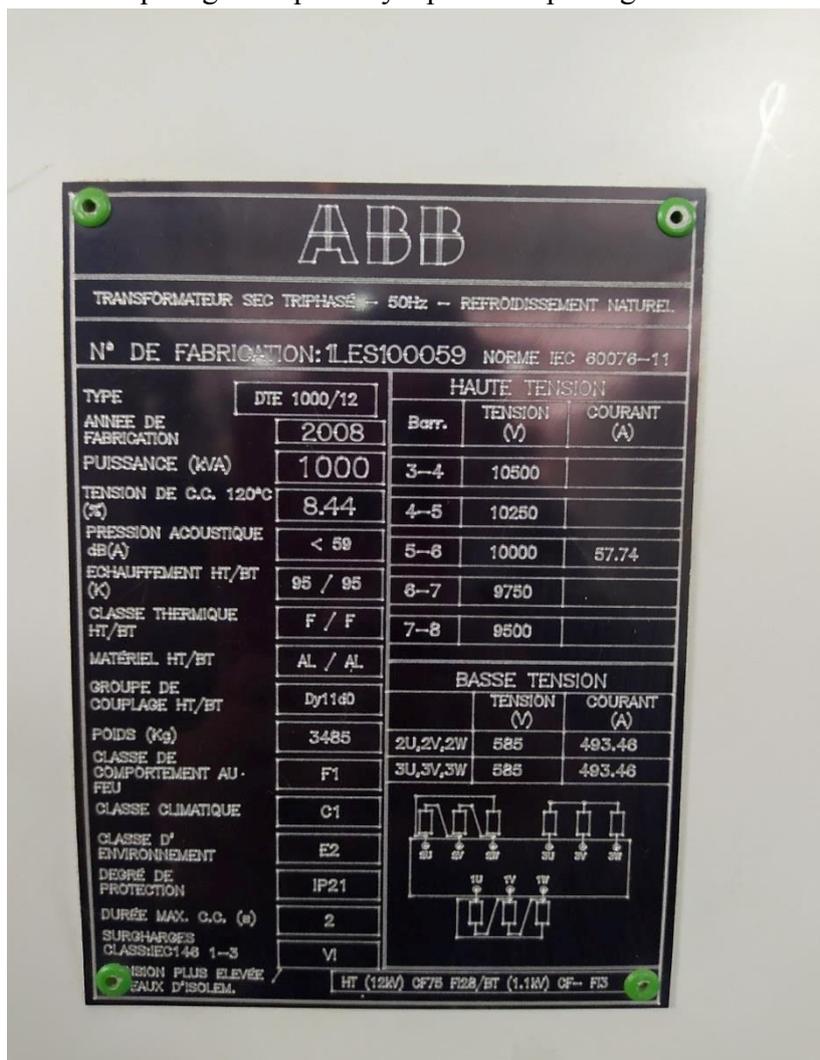


Figure A.3 : Plaque signalétique du transformateur de traction

Annexe.4 Transformateur des auxiliaires

Couplage Dyn11, le transformateur est équipé d'un seul enroulement au secondaire :

D : indique le type de couplage HT qui est en triangle **y** : indique le type de

couplage BT qui est en étoile **n** : indique le neutre sorti au secondaire

11 : indice horaire de 11h soit $11 \times 30^\circ$ entre les tensions HT et BT



Figure A.4 : Plaque signalétique du transformateur des auxiliaires

Annexe.5 Plaque signalétique du redresseur

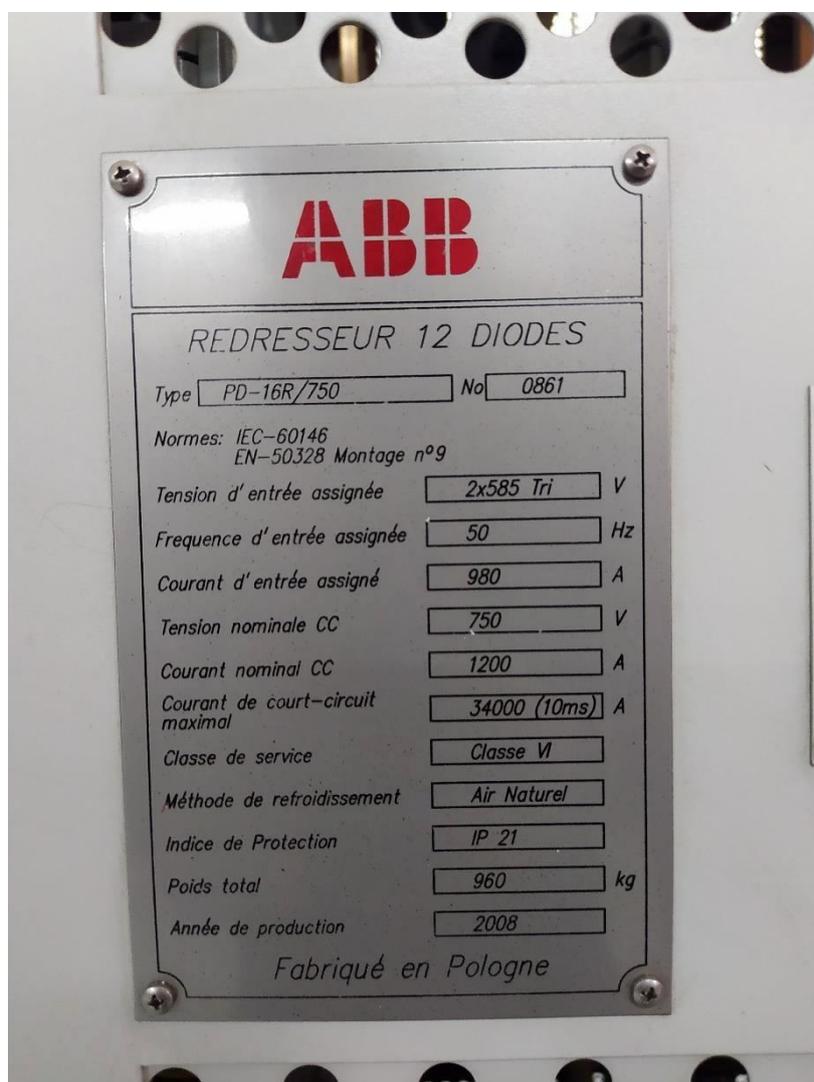


Figure A.5 : Plaque signalétique du redresseur

Normes

NFC 34-110-2

Fils conducteurs en cuivre pur destinés à l'alimentation des locomotives électriques et des tramways par captage du courant par l'utilisation d'un pantographe.

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

NF EN 50163

La présente Norme Européenne 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. Cette norme ne s'applique pas aux : - système de traction des mines dans les mines souterraines; - grues, plates-formes mobiles en équipement similaire de transport en rails, structures temporaires (par exemple : structures d'expositions) pour autant qu'elles ne sont pas alimentées directement à travers des transformateurs connectés au système de ligne de contact et ne sont pas mises en danger par le système d'alimentation de la traction ; - véhicules suspendus à des câbles ; - chemins de fer funiculaires. Cette norme traite des surtensions de longue

NF C 52112-1

Transformateurs triphasés de distribution immergés dans l'huile, 50 Hz, de 50 à 2500 kVA, de tension la plus élevée pour le matériel ne dépassant pas 36 kV - Partie 1 : prescriptions générales et prescriptions pour les transformateurs avec une tension la plus élevée pour le matériel ne dépassant pas 24 kV

Bibliographie

- [1] <https://www.techno-science.net/definition/14911.html>
- [2] <https://www.enicab.dz/cables/Catenaire.pdf>
- [3] https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/G%20Transport/G%20Transport/TE/Le%20mat%C3%A9riel%20roulant%20_M1TE.pdf
- [4] <http://www.ferro-lyon.net/nouveau-tram/88-040les-rames-citadis-tga-302>
- [5] Modélisation d'un réseau électrique de tramway : du composant au système -Eric Morin
- [6] http://www.electrosup.com/poste_electrique.php
- [7] www.demarches.interieur.gouv.fr/professionnels/transports
- [8] <http://www.metroalger-dz.com/fr/activites.php?idAC=34&EMA=TRW>
- [9] GeoHive –Algeria population statistics
- [10] <http://www.ferro-lyon.net/nouveau-tram/88-040les-rames-citadis-tga-302>
- [11] Traction électrique (Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne 2008)
- [12] Etude de l'impact de retour de courant de traction électrique sur la consommation énergétique des sous stations et la mise au point des solutions amélioratives- Sanae Zriouel
- [13] https://fr.wikipedia.org/wiki/Sous-station_de_traction#:~:text=Ligne%20C3%A0%20double%20voie%2C%20deux,%2F3%20et%202d%2F3
- [14] traction mécanique des tramways : Raymond godfernaux
- [15] support et programme de formation énergie SETRAM Alger
- [16] présentation des postes de livraison HT/BT des sous station. Documentation interne de SETRAM- Alger.