

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا



Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° d'ordre : M...../GE/2023

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES  
DE MASTER En GENIE ELECTRIQUE

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Intitulé du sujet

Réglage et dimensionnement de la LAC de tramway  
Mostaganem

Présenté par :

- Douara Ahmed

Soutenu le 25 / 06 / 2023 devant jury composé de :

Président :	Mr . OMARI HAMZA	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur :	Mr. CHOUACH ABDLLAI	MCB	Université de Mostaganem
Encadreur :	Mme GHOMRI LEILA	MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2022/2023

## **Remerciements**

*Je remercie « Mme Ghomri Leila », Professeur Au département de génie électrique, avoir accepté la direction de ce travail. Je lui exprime toute ma gratitude pour son expérience, sa compétence multidisciplinaire, son soutien inconditionnel et ses qualités humaines.*

*Je tiens à remercier également « Mme BOURIYHYA AMINA » cadre de la société COSIDER de Mostaganem pour leurs aides et leurs entière disponibilités pour finaliser et valoriser ce travail et pendant la durée de mon stage.*

*Nous remercions également les membres de jury qui ont bien voulu acceptant examiner notre travail.*

*Enfin, un grand merci à tous les enseignants du département Génie électrique de l'UMAB qui ont participé à notre formation durant tout notre cycle universitaire ainsi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance : mes très chers parents qui ont été toujours là pour moi, et qui ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.*

*A mes très chers frères*

*A mes très chères sœurs*

.

*A mes chers amis et chères amies pour tous les moments de joie et de peine qu'on a passée ensemble.*

***DOUARA AHMED***

# Liste des abréviations

<b>LAC</b>	Ligne aérienne de contact
<b>APS</b>	Alimentation par le sol
<b>SSR</b>	Sous-station de redressement
<b>TRT</b>	Transformateur de traction
<b>IST</b>	Interrupteur de secours télécommandé
<b>CMP</b>	Coffrets de mise en parallèle
<b>PEF</b>	Poste équipements force
<b>PHT</b>	Poste haute tension
<b>DTC</b>	Commande directe du couple
<b>ASI</b>	Alimentations sans interruption
<b>PCC</b>	Poste de commandes centralisées
<b>MSA</b>	Machine asynchrone
<b>HTB</b>	Haute tension de niveau B
<b>HTA</b>	Haute tension de niveau A
<b>BT</b>	Basse Tension
<b>SIA</b>	Sectionneur d'isolement automatique
<b>DUR</b>	Disjoncteur DC ultrarapide
<b>GRF</b>	Groupe de refroidissement
<b>MLI</b>	Modulation de largeur d'impulsions
<b>CEM</b>	Compatibilité électromagnétique
<b>Vt</b>	Vitesse de translation du tramway
<b>Ff</b>	Frottements dus au mouvement du tramway
<b>Fc</b>	Force due aux courbures
<b>Fd</b>	Force due aux déclivités
<b>Fres</b>	Effort de résistance à l'avancement
<b>GRTE</b>	Gestionnaire du réseau de transport de l'électricité
<b>TGBT</b>	Tableau général basse tension
<b>IGBT</b>	Insulated gate bipolar transis

## **Résumé :**

Le tramway est un moyen de transport moderne, fiable et écologique. L'Algérie s'est dotée ces dernières années de plusieurs projets dans certaines villes dont Mostaganem.

Le but de ce mémoire est la modélisation et la simulation de fonctionnement de ce système basé sur l'électrotechnique et l'électronique de puissance et de commande.

Un modèle a été conçu puis testé pour simuler toutes les parties composant le système, en vue d'apporter des solutions à certains problèmes de fonctionnement futur et de maintenance prédictive.

Mot-clé : tramway- LAC- variateur de vitesse

## **Abstract**

The tramway is a modern, reliable and environmentally-friendly means of transport. In recent years, Algeria has launched several projects in cities such as Mostaganem.

The aim of this thesis is to model and simulate the operation of this system based on electrical engineering and power and control electronics.

A model was designed and then tested to simulate all the parts making up the system, with a view to providing solutions to certain future operating and predictive maintenance problems.

Key words: tramway- LAC- variable speed drive

يعتبر الترام وسيلة نقل حديثة وموثوقة وصديقة للبيئة. أطلقت الجزائر في السنوات الأخيرة عدة مشاريع في مدن مثل مستغانم. الهدف من هذه الأطروحة هو نمذجة ومحاكاة تشغيل هذا النظام على أساس الهندسة الكهربائية وإلكترونيات الطاقة والتحكم. تم تصميم نموذج ثم اختباره لمحاكاة جميع الأجزاء المكونة للنظام ، بهدف توفير حلول لبعض مشكلات التشغيل والصيانة التنبؤية المستقبلية. الكلمات المفتاحية: ترامواي- LAC- قيادة متغيرة السرعة

**Mots-clés:** Protection, Parafoudre, Eclateur, Fusible, Sectionneur, Surtension, Surintensité, Court-circuit, Transformateur, Ligne, Poste de transformation

# Sommaire

# Sommaire

## Table des matières

<i>Dédicaces</i> .....	3
<i>Résumé</i> :.....	5
Sommaire .....	7
Introduction Générale : .....	1
Chapitre I.....	2
I.1 Introduction.....	2
I.2 Architecture des Réseaux Électriques.....	2
I.2.1 Réseaux de transport et d'interconnexion .....	3
I.2.2 Réseau de répartition .....	4
I.2.3 Réseau de distribution .....	4
I.3 Structure topologiques de réseau de transport .....	5
I.3.1 Réseau maillé.....	5
I.3.1.1 L'avantage .....	5
I.3.1.2 Inconvénient .....	6
I.3.2 Réseau bouclé .....	6
I.3.2.1 Les avantages.....	6
I.3.2.2 Inconvénient .....	6
I.3.3 Réseau arborescente .....	6
I.4 Réseau moyenne tension MT .....	7
I.4.1 Réseau moyenne tension aériennes (MTA) .....	7
I.4.2 Réseau moyenne tension souterraines (MTS) .....	9
I.4.2.1 Les caractéristiques du câble conducteur .....	9
I.4.2.2 Les composants d'une ligne aérienne.....	11
I.4.3 Les postes de transformation .....	12

<b>I.4.3.1 Postes d'interconnexion</b> .....	13
<b>I.4.3.2 Postes de mixte</b> .....	13
<b>I.4.3.3 Postes de transformation</b> .....	13
<b>I.4.4 Les différents emplacements d'un poste électrique</b> .....	13
<b>I.4.4.1 Poste de transformation sur poteaux</b> .....	13
<b>I.4.4.2 Poste de transformation en plein air</b> .....	15
<b>I.4.5 Choix d'un poste de transformation</b> .....	16
<b>I.4.6 Les éléments constitutifs d'un poste de transformation</b> .....	16
<b>I.4.6.1 Jeux de barres JB</b> .....	16
<b>I.4.6.2 Les cellules de Couplage des Barres</b> .....	16
<b>I.4.6.3 Travée</b> .....	17
<b>I.4.6.4 Jeux de barre</b> .....	20
<b>I.4.6.5 Travée transformateur 220kv/60kv</b> .....	21
<b>Conclusion</b> .....	23
<b>ChapitreII</b> .....	2
<b>Les réseaux électriques des tramways</b> .....	12
<b>II.1 Introduction</b> .....	12
<b>II.2 Historique</b> .....	12
<b>II.3 Le structure du réseau d'alimentation de tramway</b> .....	12
<b>II.3.1 Ligne aérienne de contact</b> .....	13
<b>II.3.2 Alimentation par le sol</b> .....	14
<b>II.4 La sous-station de redressement</b> .....	16
<b>II.4.1 Tableau haute tension</b> .....	17
<b>II.4.2 Les transformateurs</b> .....	17
<b>II.4.2.1 Transformateur de traction</b> .....	18
<b>II.4.2.2 Transformateur de services auxiliaires</b> .....	18
<b>II.4.3 L'ensemble redresseur SIA</b> .....	18
<b>II.4.4 Le disjoncteur DC ultrarapide</b> .....	18

<b>II.4.5 Le tableau général basse tension</b> .....	18
<b>II.4.6 L'alimentation sans interruption (ASI)</b> .....	19
<b>II.4.7 Les pertes en ligne</b> .....	19
<b>II.5 Le matériel roulant</b> .....	<b>20</b>
<b>II.5.1 La motorisation des tramways</b> .....	20
<b>II.5.2 Les bougies</b> .....	20
<b>II.5.2.1 Les bougie moteurs</b> .....	21
<b>II.5.2.2 Les bougie porteurs</b> .....	22
<b>II.5.3 Les type de freinage</b> .....	22
<b>II.5.3.1 Les freins électrodynamiques</b> .....	22
<b>II.5.3.2 Les freins mécaniques (freins à friction)</b> .....	23
<b>II.5.3.3 Les freins électromagnétiques</b> .....	23
<b>II.5.4 Les courants vagabonds</b> .....	24
<b>II.6 La Chaîne de traction</b> .....	<b>25</b>
<b>II.6.1 L'appareil de protection</b> .....	25
<b>II.6.2 Le filtre d'entrée</b> .....	25
<b>II.6.3 Les convertisseurs de traction</b> .....	25
<b>II.6.4 Les moteurs</b> .....	26
<b>II.6.5 Les convertisseurs auxiliaires</b> .....	26
<b>II.6.6 Le maintien du plan de tension</b> .....	26
<b>II.6.6.1 Durant les phases de traction</b> .....	26
<b>II.6.6.2 Durant les phases de freinage</b> .....	26
<b>II.6.7 Échanges entre les tramways</b> .....	26
<b>II.7 Limitations et améliorations possibles d'un réseau classique</b> .....	<b>27</b>
<b>De tramway</b> .....	<b>27</b>
<b>II.7.1 Architecture électrique classique d'un réseau de tramways</b> .....	27
<b>II.7.2 Nouvelles architectures d'alimentation (Transformateur centralisé)</b> .....	28
<b>II.7.3 La réversibilité des sous-stations</b> .....	28

<b>conclusion.....</b>	<b>28</b>
<b>chapitreIII.....</b>	
<b>vision général sur le tramway Mostaganem.....</b>	<b>12</b>
<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>29</b>
<b>III.2 Le tramway de Mostaganem.....</b>	<b>12</b>
<b>III.2.1 Représentation de projet.....</b>	<b>13</b>
<b>III.2.2 Système d'électrification de tramway.....</b>	<b>14</b>
<b>III.3 Présentation du sous-système LAC.....</b>	<b>17</b>
<b>III.3.1 La conception du système LAC.....</b>	<b>17</b>
<b>III.3.2 Fils de contact.....</b>	<b>17</b>
<b>III.3.3 Supports LAC.....</b>	<b>18</b>
<b>III.3.3.1 Types d'insertion.....</b>	<b>19</b>
<b>III.3.3.1.1 Supports équipés de consoles.....</b>	<b>20</b>
<b>III.3.3.1.2 Support équipés de transversaux ou de portiques souples.....</b>	<b>21</b>
<b>III.3.3.1.3 Supports équipés des rappels souples.....</b>	<b>22</b>
<b>III.3.3.1.4 Bras de rappels compensé sous ouvrage d'art.....</b>	<b>23</b>
<b>III.3.4 Armement.....</b>	<b>23</b>
<b>III.3.5 Hauteur du fil de contact.....</b>	<b>23</b>
<b>III.4 Désaxement.....</b>	<b>24</b>
<b>III.5 Comportement de la LAC aux variations de température.....</b>	<b>25</b>
<b>III.6 La régularisation (compensation de la tension mécanique).....</b>	<b>25</b>
<b>III.6.1 LAC régularisée.....</b>	<b>25</b>
<b>III.6.2 Principe.....</b>	<b>25</b>
<b>III.6.3 Equipements de régularisations.....</b>	<b>26</b>
<b>III.6.3.1 Appareil tendeur à moufle.....</b>	<b>26</b>
<b>III.6.3.2 L'appareil tondeur à ressort.....</b>	<b>27</b>
<b>III.6.4 LAC non régularisée.....</b>	<b>28</b>
<b>III.7 L'alimentation.....</b>	<b>29</b>

<b>III.8 Découpage de la Ligne .....</b>	<b>31</b>
<b>III.8.1 Sectionnement Mécanique .....</b>	<b>31</b>
<b>III.8.2 Sectionnement Electrique .....</b>	<b>31</b>
<b>III.8.2.1 Isolateur de section .....</b>	<b>32</b>
<b>III.9 Les communications .....</b>	<b>32</b>
<b>III.9.1 Equipement Tangentielle .....</b>	<b>32</b>
<b>III.9.2 Equipement Croisé .....</b>	<b>33</b>
<b>III.10 Anti-cheminement.....</b>	<b>34</b>
<b>III.10.1 Protection des installations contre les mises en charge traction.....</b>	<b>34</b>
<b>III.10.1.1 Parafoudre.....</b>	<b>34</b>
<b>III.10.1.2 Mis à la terre .....</b>	<b>35</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>35</b>
<b>ChapitreIV .....</b>	<b>13</b>
<b>IV.1 Introduction.....</b>	<b>23</b>
<b>IV.2 Simulation des composants de la sous-station .....</b>	<b>23</b>
<b>IV.2.1 Présentation de système globale de tramway .....</b>	<b>23</b>
<b>IV.2.2 Simulation du transformateur .....</b>	<b>24</b>
<b>IV.2.3 Simulation du redresseur PD3 non commandé.....</b>	<b>25</b>
<b>IV.2.4 Simulation de le hacheur Buck .....</b>	<b>29</b>
<b>IV.2.5 Simulation des composants du tramway.....</b>	<b>31</b>
<b>IV.2.5.1 Simulation de le hacheur rhéostatique.....</b>	<b>31</b>
<b>IV.3 Modélisation et simulation du système global du tramway .....</b>	<b>38</b>
<b>IV.3.1 Mode de traction .....</b>	<b>38</b>
<b>IV.3.2 Mode de freinage.....</b>	<b>40</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>42</b>
<b>Conclusion Générale : .....</b>	<b>49</b>
<b>Références Bibliographiques :.....</b>	<b>50</b>

# ***LISTES DES FIGURES***

Chapitre I.....	.....
Figure I.1 : les poste de transport .....	.....
Figure I.2 : Architecture des Réseaux Électriques .....	.....
Figure I.3 : très haute tension et haute tension.....	.....
Figure I.4 : Structure topologiques de réseau de transport .....	.....
Figure I.5 : Réseau arborescente .....	.....
Figure I.6 : les lignes aériennes .....	.....
Figure I.7 : Schéma unifilaire d'un réseau MT .....	.....
Figure I.8 : la structure d'un câble électrique .....	.....
Figure I.9 : Structure générale des réseaux souterrains MT .....	.....
Figure I.10 : Pylônes .....	.....
Figure I.11: schéma d'un poste de transformateur sur poteaux .....	.....
Figure I.12 : Poste de transformation en plein air .....	.....
Figure I.13 : Poste de transformation blindé .....	.....
Figure I.14 : Les cellules de Couplage des Barres .....	.....
Figure I.15 : Transformateur de potentiel (tension) (TP) .....	.....
Figure I.16 : Sectionneur de mise à la terre et Sectionneur Tête de Ligne ... Erreur ! Signet non défini.	.....
Figure I.17 : Transformateur de courant (Tc) .....	.....
Figure I.18 : Le disjoncteur unipolaire (disj) .....	.....
Figure I.19 : À air comprimé et À huile et À SF6 .....	.....
Figure I.20 : Les sectionneurs d'aiguillage .....	.....
Figure I.21 : Disjoncteur tripolaire .....	.....
Figure I.22 : Parafoudres .....	.....
Figure I.23 : Transformateur de puissance .....	.....

<b>ChapitreII .....</b>	
<b>FigureII.1 – Illustration d’un réseau de tramway .....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure II.3 – Pantographe .....</b>	
<b>Figure II.4 : Support latéral d’une ligne .....</b>	
<b>Figure II.5 – Principe d’alimentation par sol l’APS .....</b>	
<b>Figure II.6 – Le rôle de la sous-station de redressement .....</b>	
<b>Figure II.7 – Schéma des différents éléments de sous-station de traction ....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure II.8 – Schéma d’une alimentation sans interruption .....</b>	
<b>Figure II.9 – Bogie moteur Arpège équipant les tramways Citadis™ ..</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure II.10 – Bogie moteur Ixège pour les tramways Citadis™.....</b>	
<b>Figure II.11 – Bogie porteur .....</b>	
<b>Figure II.12 – Les Outils de freinages .....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure II.13 – Principe de circulation des courants vagabonds .....</b>	
<b>Figure II.14 – Schéma de principe d’une chaîne de traction de tramway .....</b>	
<b>Figure II.15 – Alimentation classique d’un réseau de tramways. ....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure II.16 : Nouvelles architectures d’alimentations. ....</b>	
<b>Figure II.17 – Une sous-station réversible .....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>chapitreIII.....</b>	
<b>Figure III.1 :l’organigramme du projet .....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure III .2 : la trace du tramway de Mostaganem .....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure III.3 : la distribution 30Kv de Mostaganem .....</b>	
<b>Figure III.4: principe de circulation de courant .....</b>	
<b>Figure III.5 : un poteau LAC .....</b>	
<b>Figure III. 6 insertions parapluie .....</b>	
<b>Figure III.7: insertion unilatérale .....</b>	Erreur ! Signet non défini.

<b>Figure III. 8 : portique souple</b> .....	
<b>Figure III.9 : transversal</b> .....	
<b>Figure III.10 : insertion en tirant lâché</b> .....	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure III.11 hauteur du fil de contact</b> .....	
<b>Figure III.12 le principe du d'désaxement</b> .....	
<b>Figure III.13 : appareil tendeur à treuil</b> .....	
<b>Figure III.14 : appareil tendeur à ressort</b> .....	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure III.15 : Montage ancrage fixe</b> .....	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure III.16 : principe d'alimentation</b> .....	
<b>Figure III.17 : principe du sectionnement mécanique</b> .....	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure III. 18 : isolateur de section</b> .....	
<b>Figure III. 19 : principe de l'équipement tangentiel avec IS</b> .....	
<b>Figure III.20: principe d'équipement croisé avec IS</b> .....	
<b>Figure III. 21 : block anti-cheminement</b> .....	
<b>Figure III.22 : Parafoudre</b> .....	Erreur ! Signet non défini.
<b>ChapitreIV</b> .....	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure IV.1 : Schéma de système global de tramway</b> .....	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure IV.2 : Modèle d'un transformateur Dy.....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure IV.3: Tension primaire du transformateur. ....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure IV.4: Tensions du secondaire de transformateur.....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure IV.5: Montage d'un redresseur triphasé parallèle double PD3.....</b>	
<b>Figure IV.6: Tension de sortie redressée sans filtrage. ....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure IV.7: Courant de sortie redressée sans filtrage. ....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure IV.8: Redresseur triphasé non commandé avec filtrage capacitif.....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure IV.9: Tension de sortie redressée avec filtrage.....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Figure IV.10: Courant de sortie redressé avec filtrage.....</b>	Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.11: Montage d'un hacheur série.....** Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.12: Signal de commande de l'interrupteur. ....** Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.13: Tension d'entrée de sortie du hacheur série. ....** Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.14: Montage du hacheur rhéostatique en mode traction .....** Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.15: Signal de commande de l'interrupteur .....** Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.16 : Tension d'entrée et de sortie de le hacheur en traction .....**

**Figure IV.17: Montage du hacheur rhéostatique en mode freinage.....** Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.18 : Signal de commande de l'interrupteur .....** Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.19 : Tension et courant de sortie du hacheur en mode freinage ..** Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.20: simulation de système global du tramway .....** Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.21 : le courant de traction .....** Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.22: le couple de traction .....** Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.23: la vitesse de traction .....** Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.24: le courant de freinage.....** Erreur ! Signet non défini.

**Figure IV.25: le couple de freinage.....** Erreur ! Signet non défini.

**FigureIV.26:lavitessedefreinage.....** Erreur ! Signet non défini.

### **Introduction Générale :**

Les transports en commun sont une solution pour limiter la consommation énergétique et les dépenses liées au transport. C'est tout particulièrement le cas du tramway qui est devenu un moyen de transport que plusieurs villes adoptent de nos jours. C'est un moyen de transport écologique qui offre une alternative intéressante notamment pour désengorger les centres villes. Le tramway est alimenté par un système représentant l'ensemble des moyens mis en œuvre pour alimenter en énergie électrique les trams (rame automotrice électrique). Les tramways sont alimentés en courant continu. L'énergie de traction passe par un troisième rail ou une ligne aérienne de contact (LAC). Mon objective d'après ce travail est de présenter le système d'alimentation par la ligne aérienne de contact utilisé dans la première ligne de tramway de la wilaya de Mostaganem et réaliser un manuel de la maintenance de la ligne.

Notre travail est composé de 4 chapitres :

Dans le 1<sup>er</sup> chapitre ; on va voir les généralités sur les réseaux électriques en indiquant l'architecture des réseaux ; les types des réseaux et les composants de la ligne de transport.

Dans le 2<sup>ème</sup> chapitre ; nous avons répertorié les caractéristiques et les composants du sous-système LAC.

Et dans le dernier chapitre nous allons présenter une simulation de sous stations et une simulation des composants de tramway.

Et on va conclure notre travail par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

**Généralités sur les réseaux électriques**



## I.1 Introduction

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble. [1]

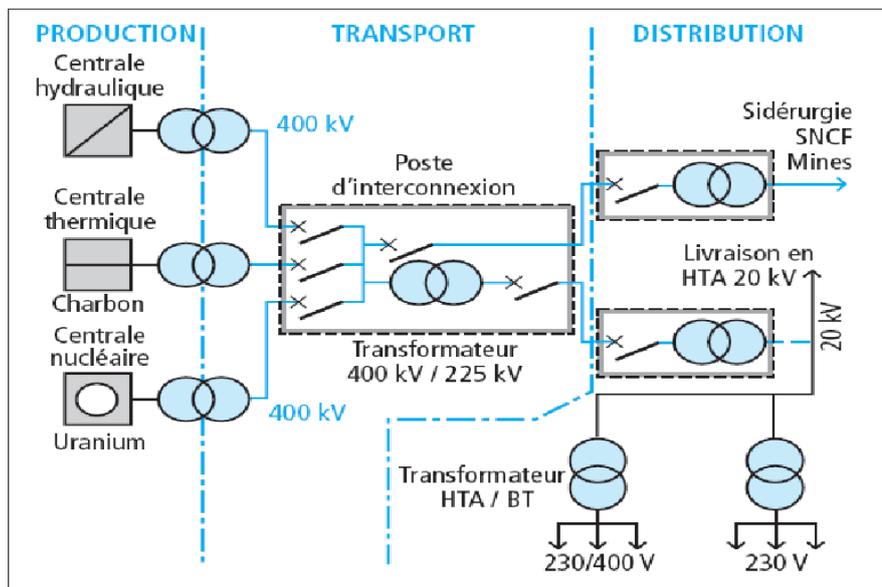


Figure I.1 : les poste de transport [3]

## I.2 Architecture des Réseaux Électriques

les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées. [2]

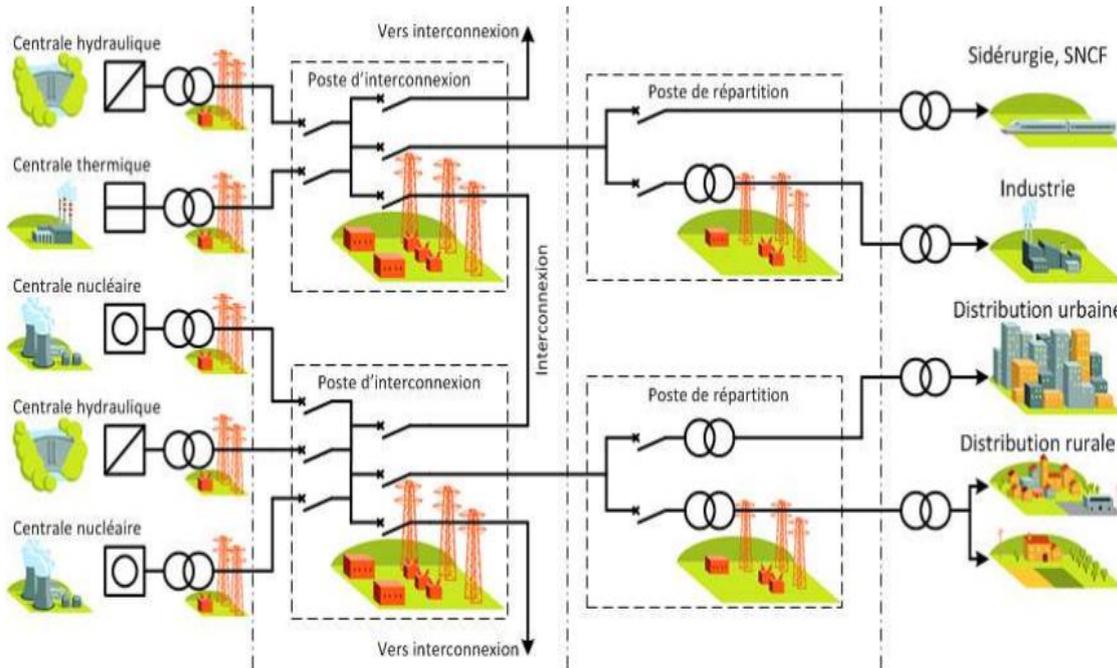


Figure I.2 : Architecture des Réseaux Électriques [3]

### I.2.1 Réseaux de transport et d'interconnexion

- Les réseaux de transport à très haute tension (THT 150 kV, 220 kV) transportant l'énergie électrique produite dans les centrales de production couvrant ainsi de grands territoires et se rapprochant des gros consommateurs. Ces réseaux sont interconnectés, donc maillés, réalisant la mise en commun de l'ensemble des moyens de production à disposition de tous les consommateurs.
- Les lignes THT permettent de transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances avec des pertes minimales. est constitué de deux types de lignes :  
Les lignes très haute tension (**HTB2**) et les lignes haute tension (**HTB**).

Les lignes **HTB** 2 Ces lignes, dont la tension est supérieure à 100 kilovolts (kV), constituent le réseau de grand transport ou d'interconnexion. Elles permettent de relier les régions et les pays entre eux ainsi que d'alimenter directement les grandes zones urbaines. La majorité des lignes **HTB2** ont des tension de 400 kV et 225kV

Les lignes **HTB** constituent le réseau de répartition ou d'alimentation régionale et e permettent le transport à l'échelle régionale ou locale. Elles acheminent l'électricité aux industries lourdes, aux grands consommateurs électriques comme les transports ferroviaires et font le lien avec le second réseau. Leur tension est de 63 ou 90 kV. [3][4][5]

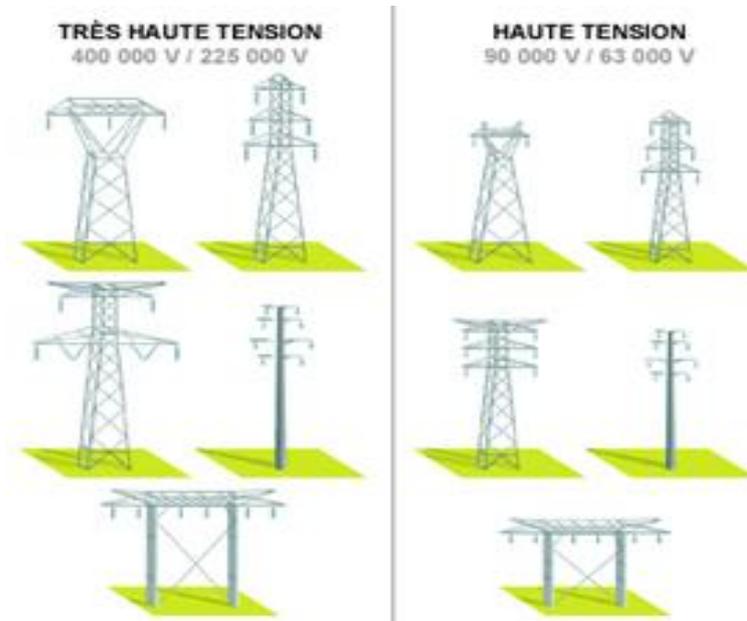


Figure I.3 : très haute tension et haute tension [3]

## I.2.2 Réseau de répartition

Les réseaux de répartition ( $30 \text{ kV} < U < 150 \text{ kV}$ ) ont pour fonction de faire la liaison entre le réseau de transport et les réseaux de distribution. Ils doivent de ce fait assurer l'alimentation du territoire qu'ils desservent qui sont en général des zones de consommation. Comme par exemple des grandes agglomérations ou des concentrations d'installations industrielles qui du fait de leur importance économique doivent être alimentées en permanence. [3][5]

## I.2.3 Réseau de distribution

Les réseaux de distribution (entre 3 et 50 kV) sont les réseaux d'alimentation des consommateurs, mise à part les importantes installations industriels qui sont très souvent alimentés directement par les réseaux THT et HT. Ce sont des lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, les cuisinières, etc.

Les lignes sont habituellement des câbles ou des barres fonctionnant à des tensions inférieures à 600V. [6][7]

### I.3 Structure topologiques de réseau de transport

Les topologies diffèrent d'un type de réseau à un autre. Cette topologie est dictée par :

- le niveau fiabilité recherché,
- la flexibilité et la maintenance,
- les coûts d'investissement et d'exploitation [8]

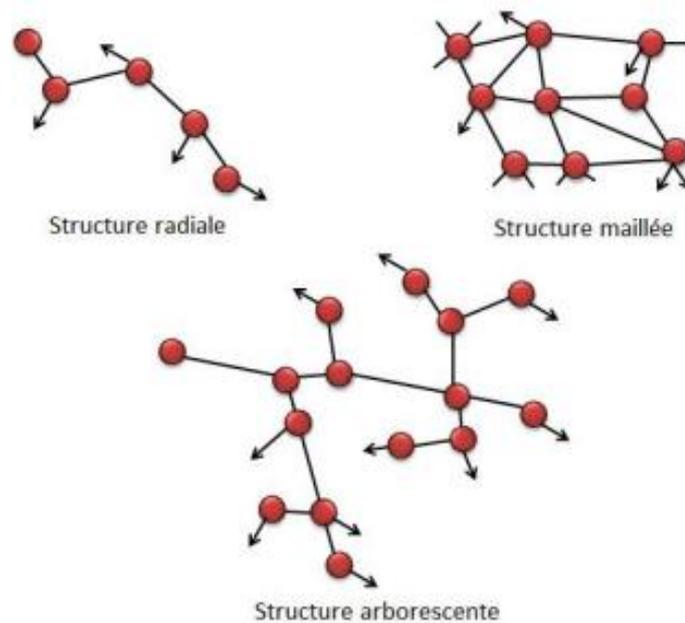


Figure I.4 : Structure topologiques de réseau de transport [8]

#### I.3.1 Réseau maillé

Cette topologie est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. [8]

##### I.3.1.1 L'avantage

- une meilleure fiabilité
- améliorer la répartition de la charge [8]

### I.3.1.2 Inconvénient

- l'apparition de courants de courts circuits élevés au point du réseau faible impédance
- nécessite une surveillance à l'échelle nationale voire continentale. [8]

### I.3.2 Réseau bouclé

- Ce réseau est surtout utilisé dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles. [8]

#### I.3.2.1 Les avantages

- Facilité de construction et d'exploitation.
- d'augmenter la disponibilité
- Les dépenses pour la réalisation et la protection d'un tel réseau sont minimales. [8]

#### I.3.2.2 Inconvénient

- le déclenchement du disjoncteur principal qui entraîne une interruption du service pour tous les usagers en aval, en cas d'avarie sur une ligne. [8]

### I.3.3 Réseau arborescente

Les postes rouges représentent les apports d'énergie : la sécurité d'alimentation est faible puisqu'un défaut sur la ligne ou sur le poste rouge coupe l'ensemble des clients en aval. [8]

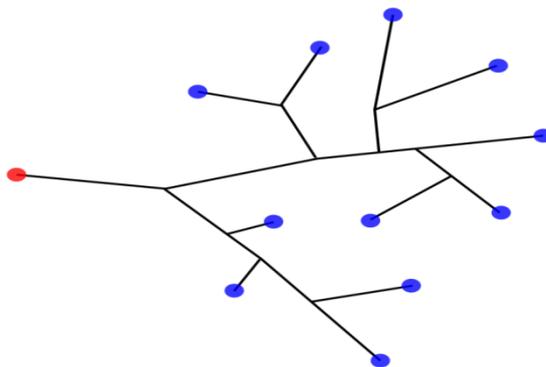


Figure I.5 : Réseau arborescente [8]

## I.4 Réseau moyenne tension MT

Les réseaux de moyenne tension sont généralement utilisés dans des zones plutôt rurales pour distribuer l'électricité jusqu'à 100 km. Mais ils sont également utilisés dans les villes pour alimenter certains quartiers. La tension utilisée se situe entre 10 et 30 kilovolts (kV). Il y'a deux types de réseaux électriques moyenne tension

- Réseau moyenne tension souterraine.
- Réseau moyenne tension aérien.

Les réseaux moyens tension sont exploités en antenne

- En structure radial pour les réseaux souterraine.
- En structure arborescente pour les réseaux aériens [9]

### I.4.1 Réseau moyenne tension aériennes (MTA)

Les plus récentes sont réalisées avec des fils isolés torsadés supportés par des poteaux métalliques, en béton ou en bois. Constitue conducteur, isolateur. [9]



Figure I.6 : les lignes aériennes [13]

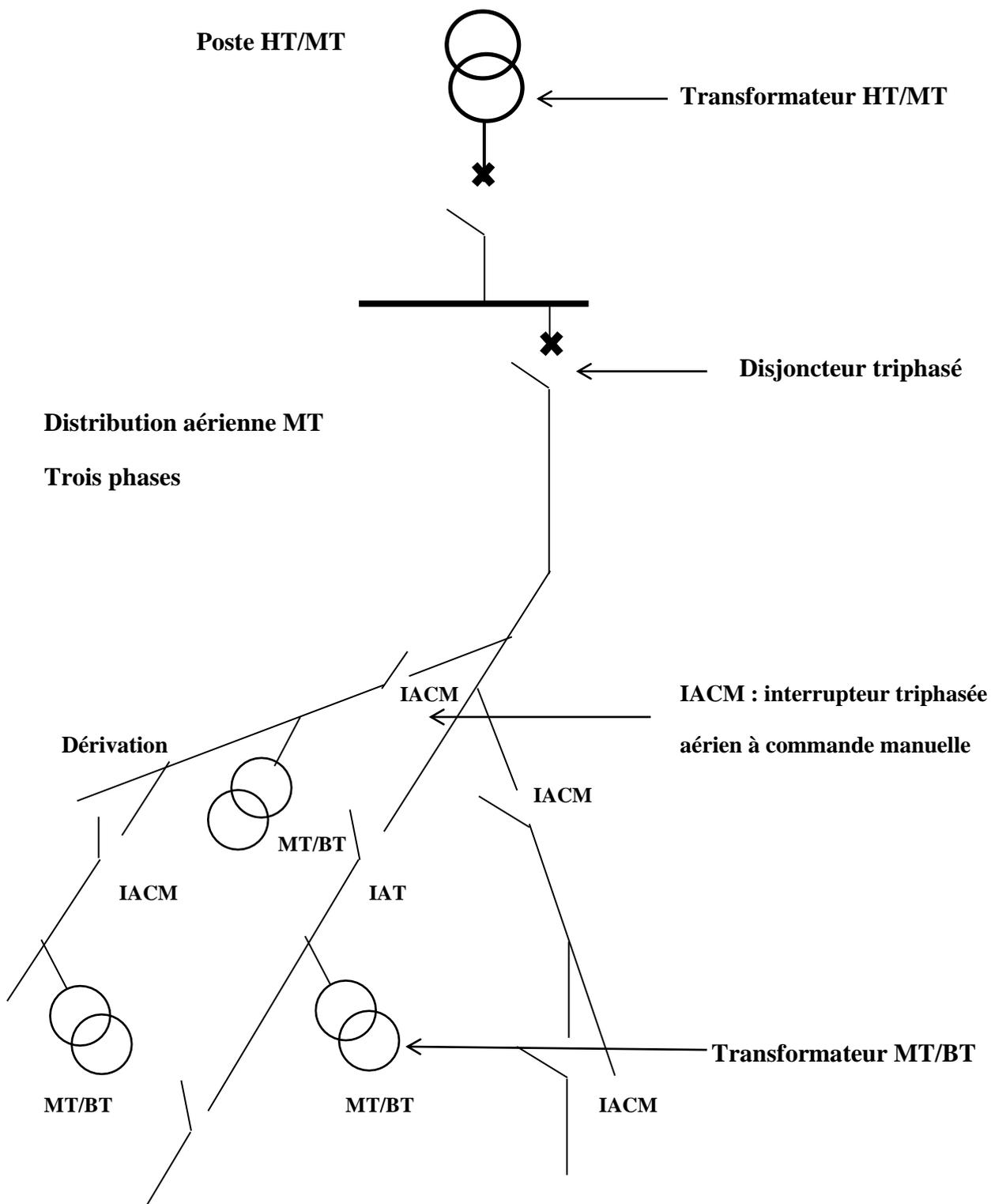


Figure I.7 : Schéma unifilaire d'un réseau MT

## I.4.2 Réseau moyenne tension souterraines (MTS)

Un câble est constitué d'un (ou plusieurs) conducteur central, isolation Rigidité diélectrique élevée avec la constante diélectrique et la perte diélectrique les plus faibles possibles et revêtement conducteur généralement mis à la terre. [9]

### I.4.2.1 Les caractéristiques du câble conducteur

Le câble souterrain en lui-même est composé des éléments suivants :

- ❖ une âme en cuivre ou aluminium, conductrice, nécessaire au transport de l'électricité .
- ❖ une isolation de haute qualité en polyéthylène capable de résister aux contraintes électriques liées à la haute tension .
- ❖ un écran servant à éliminer le champ électrique et les courants en cas de court-circuit .
- ❖ une gaine extérieure. [9]

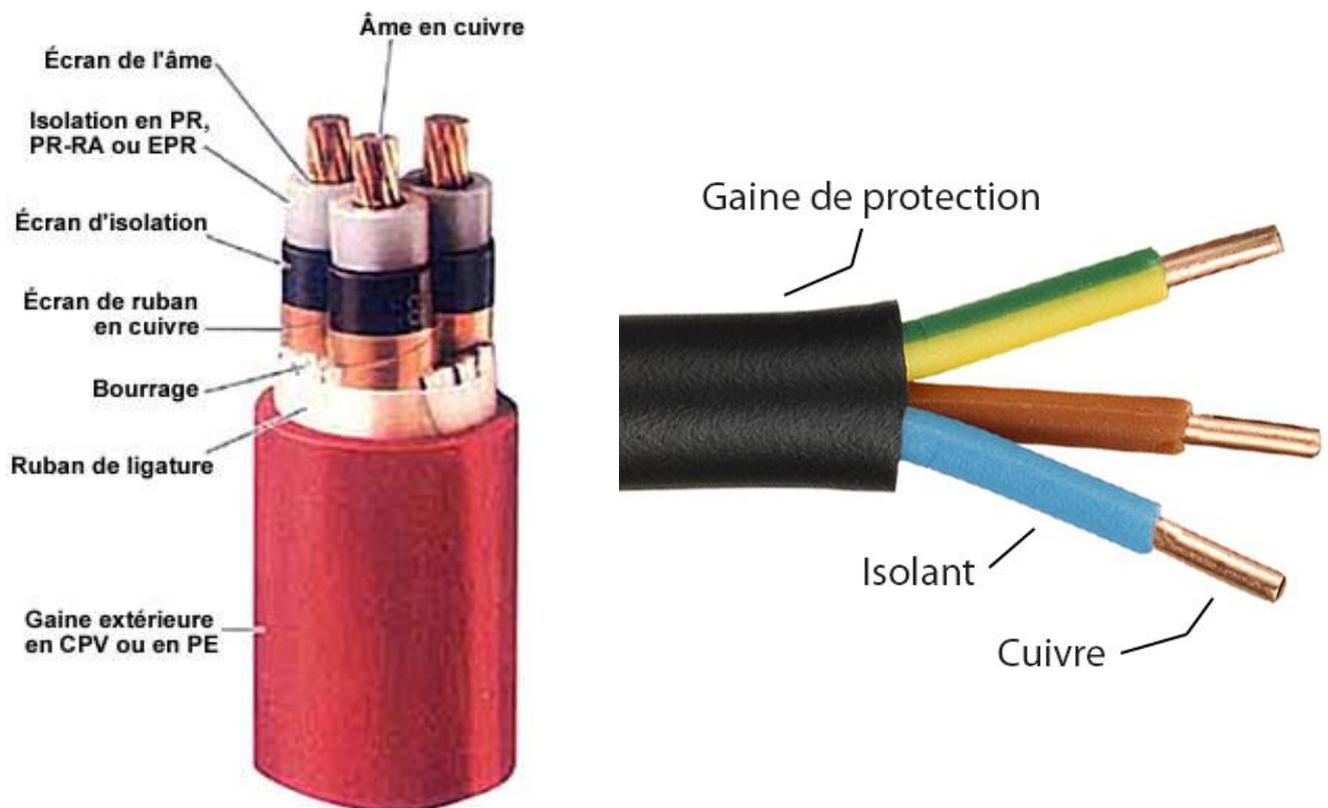


Figure I.8 : la structure d'un câble électrique [11]

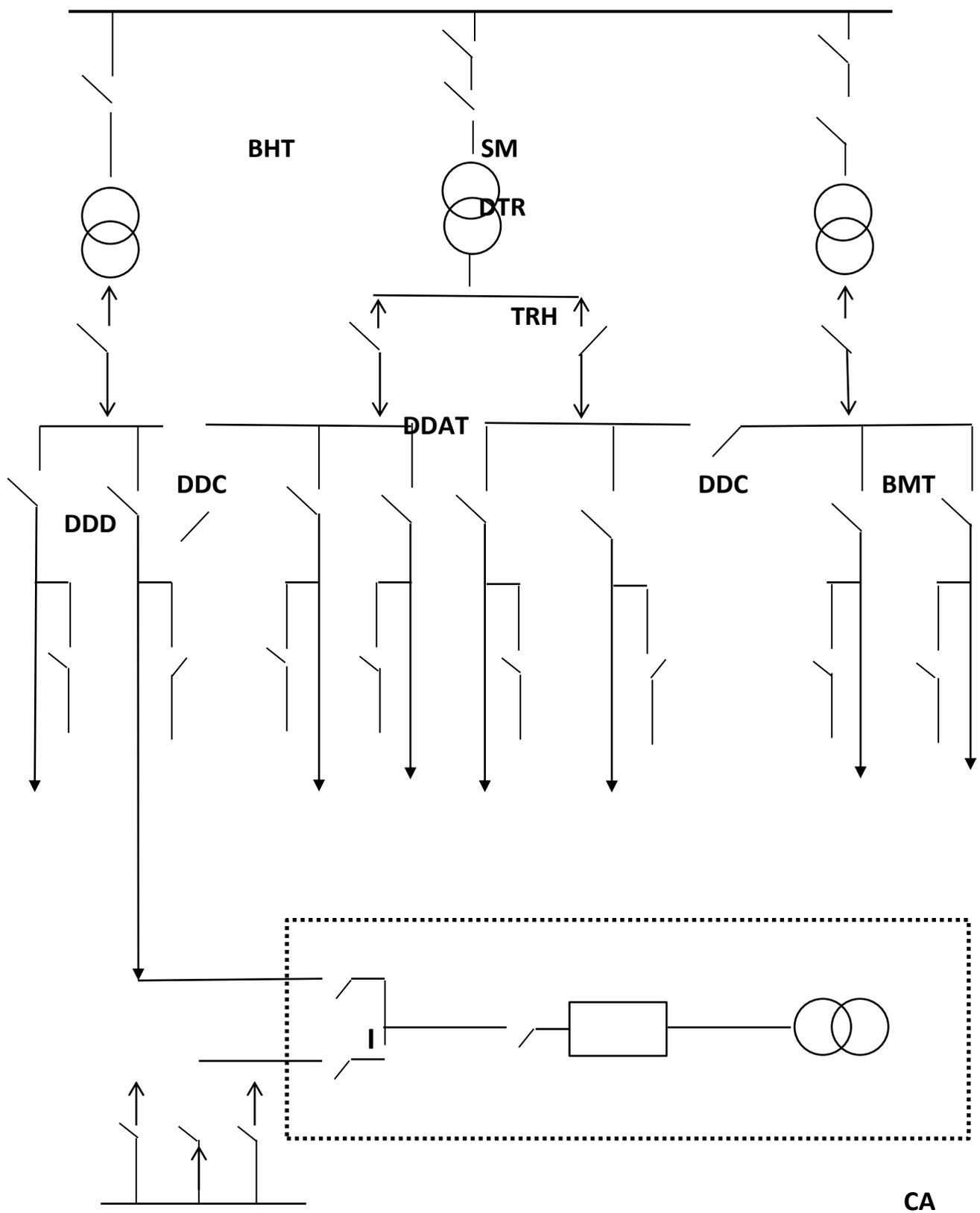


Figure I.9 : Structure générale des réseaux souterrains MT

## I.4.2.2 Les composants d'une ligne aérienne

Une ligne de transport se compose de conducteur, d'isolateur et câble de garde :

### I.4.2.2.1 Conducteurs

Le courant électrique est transporté dans des conducteurs, le plus souvent sous forme triphasée, avec au moins trois conducteurs par ligne. Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés. On utilise généralement des conducteurs en alliage d'aluminium. Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques : température, vent, pluie, verglas etc. Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne. [12]

### I.4.2.2.2 Isolateurs

L'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs. Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. On les associe entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important. [12]

### I.4.2.2.3 Câbles de garde

Les câbles de garde ne transportent pas le courant. Ils sont localisés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitant le foudroiement des conducteurs. Au centre du câble de garde on place quelquefois un câble en fibre optique qui permet de la communication de l'exploitant. [12]

### I.4.2.2.4 Pylônes

Maintenir les conducteurs à une certaine distance du sol et des obstacles rencontrés pour assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage de la ligne, les pylônes sont tenus par des massifs de fondation armement : Quinconce ou triangle, double terne, nappe et chat [12]

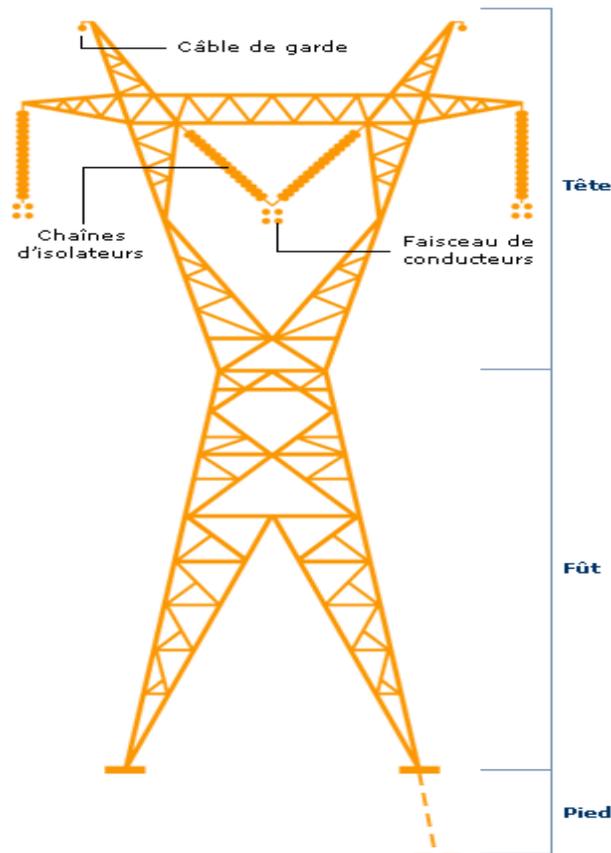


Figure I.10 : Pylônes [12]

### I.4.3 Les postes de transformation

Un poste de transformation est un élément du réseau électrique qui transmet et distribue l'électricité. Il permet d'élever la tension électrique pour sa transmission puis de la baisser en vue de sa consommation par les utilisateurs.

Il existe plusieurs types de postes électriques :

- Postes de sortie de centrale
- Poste d'interconnexion : transformateur
- Poste éleveurs
- Poste de distribution. [10]

### **I.4.3.1 Postes d'interconnexion**

Qui comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs, etc.) de même tension peuvent être aiguillés. [10]

### **I.4.3.2 Postes de mixte**

Les postes mixtes, les plus fréquents, qui assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation. [10]

### **I.4.3.3 Postes de transformation**

Les postes de transformation permettent de passer d'un niveau de tension d'entrée donné à un niveau de tension de sortie qui peut être supérieur (on parle alors de transformateurs éleveurs) ou inférieur (abaisseur). Il existe plusieurs types de postes de transformation :

- Le poste HT/MT : HT (> 100kV) à la MT (>10kV).
- Le poste MT/MT : Assurer la démultiplication des départs MT.
- Le poste MT/BT : MT (>10kV) à la BT (>100kV). [10]

## **I.4.4 Les différents emplacements d'un poste électrique**

Les postes sont situés dans des emplacements publics, comme les parkings, les quartiers résidentiels, etc. ou dans des locaux privés, auquel cas le distributeur doit avoir un accès direct permanent.

Ceci amène souvent à placer les postes dans des locaux dont un des murs se situe en bordure de voie publique, avec une porte d'accès depuis cette dernière. [10]

### **I.4.4.1 Poste de transformation sur poteaux**

Les transformateurs montés sur poteau sont un type de transformateurs de distribution de boîte à pain montés sur un poteau de service électrique en bois ou en béton. Ils se tiennent généralement au niveau des fils supérieurs. Il est constitué :

- D'un interrupteur aérien : son installation n'est pas toujours obligatoire, selon le réseau existant.
- D'un support (poteau).

- D'un point de livraison, il est au point de raccordement des conducteurs MT sur le support du transformateur.
- D'un transformateur accroché sur le support. [10]

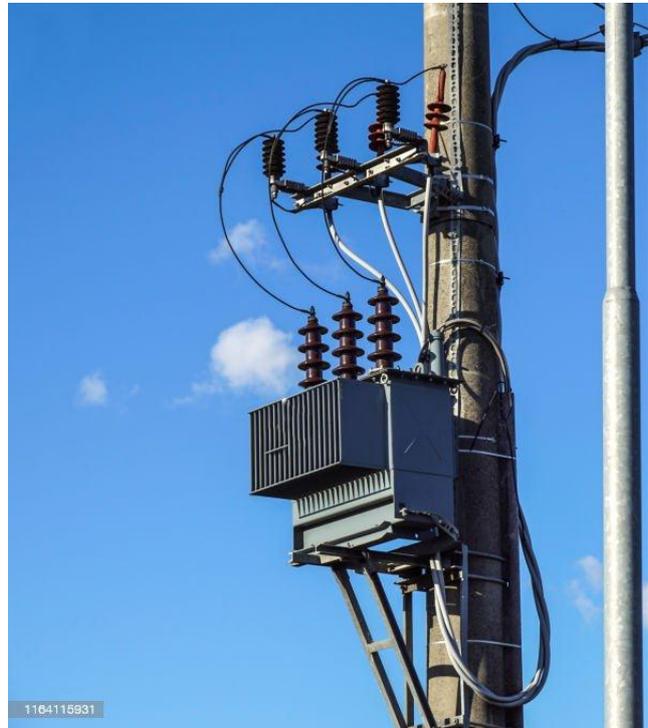
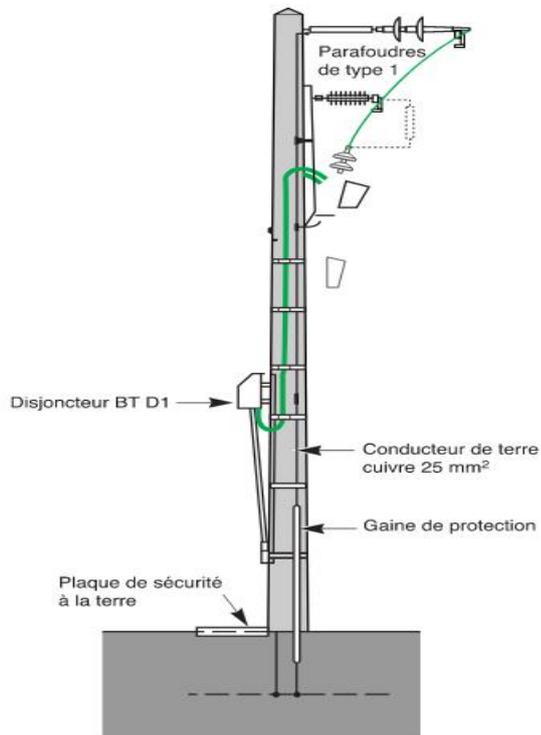


Figure I.11: schéma d'un poste de transformateur sur poteaux [10]

### I.4.4.2 Poste de transformation en plein air

L'isolement diélectrique est assuré par l'air à la pression atmosphérique. Dans ces conditions, on définit des distances d'isolement et de sécurité à partir desquelles ont été obtenues les dimensions géométriques des installations. [10]



Figure I.12 : Poste de transformation en plein air [4]

#### I.4.4.2.1 Poste blindé

Poste blindé Poste blindé, est un poste électrique dont l'isolation est réalisée par un gaz isolant, typiquement de SF<sub>6</sub>), et dont l'enveloppe métallique externe est mise à la terre. Ils s'opposent aux postes électriques isolés dans l'air. Leurs principaux intérêts sont d'être très compacts et de pouvoir être installés à l'intérieur de bâtiments. [10]



Figure I.13 : Poste de transformation blindé [3]

### I.4.5 Choix d'un poste de transformation

En choisissant le type de transformateur à installer n'importe où, il est nécessaire de prendre en compte la norme suivant :

- lieu de travail
- la valeur de la puissance qualifiée du transformateur a utiliser
- les dimensions du poste [10]

### I.4.6 Les éléments constitutifs d'un poste de transformation

#### I.4.6.1 Jeux de barres JB

Un jeu de barres est un ouvrage électrique triphasé régnant sur la longueur du poste. Il permet de relier entre eux les départs de même tension qui y aboutit. Un poste électrique peut être doté d'un jeu de barre (Poste simplifié), deux, trois jeux de barres pour une tension donnée. [10]

#### I.4.6.2 Les cellules de Couplage des Barres

Ils permettent de coupler entre deux des jeux de barres du poste. Leur équipement comprend un disjoncteur tripolaire, plus les sectionneurs d'aiguillage sur les différents jeux de barres. [10]



Figure I.14 : Les cellules de Couplage des Barres [3]

### I.4.6.3 Travée

Une travée est l'ensemble des équipements électrique HT-BT constituant une alvéole d'un départ (travée ligne) ou d'une travée transformateur (THT-HT, HT-MT) Elle est raccordée à un jeu de barre. [9]

#### I.4.6.3.1 Travée ligne

##### I.4.6.3.1.1 Transformateur de potentiel (tension) (TP)

Un transformateur de tension peut être défini comme un transformateur d'instrument pour la transformation de tension d'une valeur supérieure à une valeur inférieure. On utilise ce transformateur pour les mesures et la protection. [10]

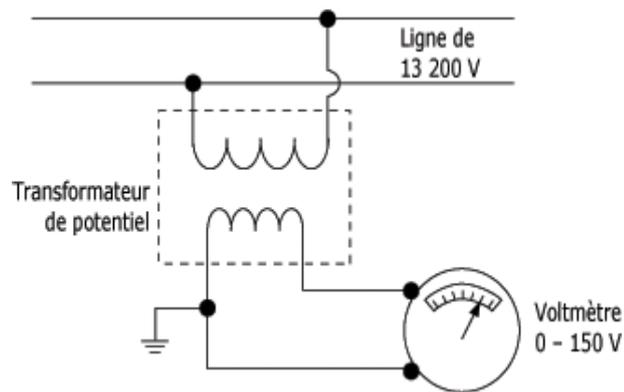


Figure I.15 : Transformateur de potentiel (tension) (TP) [3]

##### I.4.6.3.1.2 Les sectionneurs de mise à la terre(ST)

sont des interrupteurs de sécurité qui isolent un circuit et qui grâce à leur mise à la terre empêchent l'apparition de toute tension sur une ligne pendant les réparations. C'est également un organe de sécurité qui complète le sectionneur en dérivant vers la terre de façon sûre, tout courant qui pourrait naître dans le conducteur qu'il protège. [10]

### I.4.6.3.1.3 Sectionneur tête de ligne (STL)

sont des appareils destinés à ouvrir ou fermer un circuit électrique à vide, ne possèdent aucun pouvoir de coupure, ils ne permettent d'ouvrir un circuit qu'en l'absence de tout tension, la commande du Sectionneur peut être à distance ou local. Le sectionneur assure une coupure visible du circuit électrique. [10]



Figure I.16 : Sectionneur de mise à la terre et Sectionneur Tête de Ligne [4]

### I.4.6.3.1.4 Transformateur de courant (Tc)

Un transformateur de courant est un dispositif permettant de transformer le courant d'une valeur supérieure à une valeur inférieure. On utilise cette valeur pour la protection et pour les mesures [10]

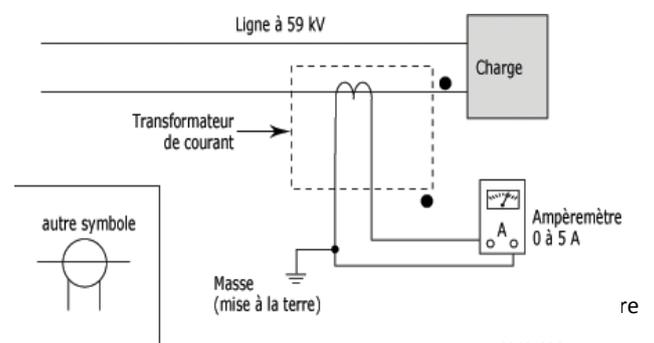


Figure I.17 : Transformateur de courant (Tc) [4]

### I.4.6.3.1.5 Le disjoncteur unipolaire (disj)

Situé à l'intérieur d'un poste électrique, le disjoncteur est un appareil destiné à protéger les circuits et les installations contre une éventuelle surcharge de courant due à un court-circuit (provoqué par la foudre ou par un contact entre le conducteur et la terre). Il permet aussi l'exploitation du réseau en interrompant ou en rétablissant le passage du courant dans une portion du circuit.

Il est constitué de deux contacts mobiles et fixes. Chaque fois que le défaut survient dans le système, le relais envoie la commande de déclenchement au disjoncteur et

Leurs contacts sont donc séparés. Ainsi, le problème survient dans le système devient clair.

[10]

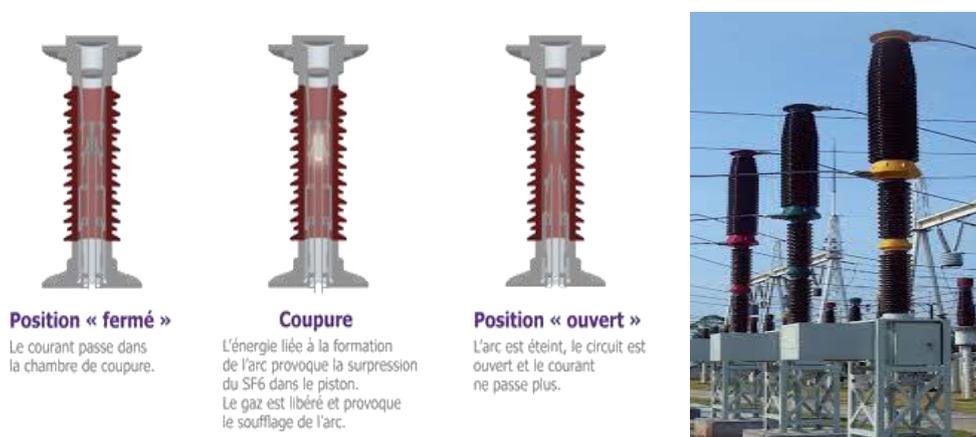


Figure I.18 : Le disjoncteur unipolaire (disj) [4]

#### I.4.6.3.1.5.1 Types de disjoncteurs

La coupure d'un courant électrique par un disjoncteur à haute tension est obtenue en séparant des contacts dans un gaz (air, SF<sub>6</sub>..) ou dans un milieu isolant (par exemple l'huile ou le vide). Après séparation des contacts, le courant continue de circuler dans le circuit à travers un arc électrique qui s'est établi entre les contacts du disjoncteur. Donc en a trois types de disjoncteurs : à huile à air comprimé, au SF<sub>6</sub>. [10]

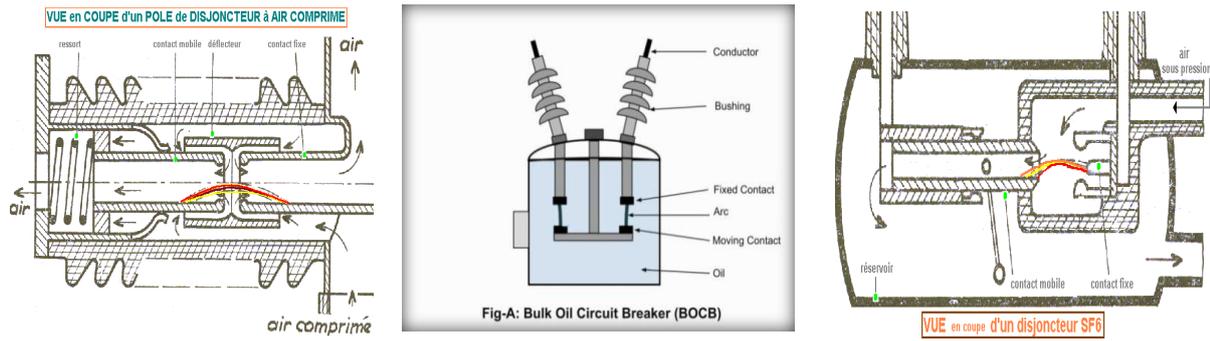


Figure I.19 : À air comprimé et À huile et À SF6 [4]

### I.4.6.3.1.6 Les sectionneurs d'aiguillage

on utilise pour aiguiller travée dans les différents jeux de barre 1 ou 2 coté 220kv (sectionneur de barre 1 SB1, sectionneur de barre 2 SB2) [10]



Figure I.20 : Les sectionneurs d'aiguillage [4]

### I.4.6.4 Jeux de barre

#### I.4.6.4.1 Transformateur de potentiel (tension) (TP)

ce trouve dans la fin de jeux de barres dans la phase médiane on utilise pour mesurer la valeur de tension dans les jeux de barre pour la synchronisation entre tension ligne et jeu de barre.

[10]

### I.4.6.5 Travée transformateur 220kv/60kv

#### I.4.6.5.1 Les sectionneurs d'aiguillage

on utilise pour mettre le transformateur en jeux barre 1 ou 2. [10]

#### I.4.6.5.2 Disjoncteur tripolaire

on utilise ce type de disjoncteur pour alimenter le transformateur par 3 phases en évitant le déséquilibre. [10]

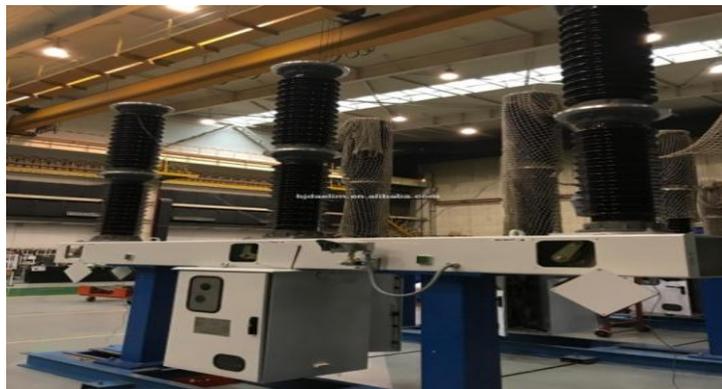


Figure I.21 : Disjoncteur tripolaire [4]

#### I.4.6.5.3 Transformateurs de courant Tc

on utilise pour mesures et les protections. [10]

#### I.4.6.5.4 Parafoudres

Ils assurent la protection des équipements aux surtensions de foudre et de manœuvres ; Pour leur bon fonctionnement les parafoudres doivent être associés à un filet de garde sur le poste et un câble de garde sur au moins une partie de la ligne et à un circuit de terre de qualité. [10]



Figure I.22 : Parafoudres [9]

#### **I.4.6.5.5 Transformateur de puissance**

Transformateur de puissance : C'est une machine d'induction qui transforme la THT (circuit primaire 225KV couplage étoile) en HT (circuit secondaire 60KV couplage étoile neutre à terre) en MT (circuit tertiaire 10.5 kV couplage triangle), et se compose des éléments suivants : \* Un circuit magnétique comprenant des colonnes, une culasse supérieur et autre inférieure. Un circuit électrique comprenant deux bobines par noyaux, l'une formant. L'enroulement primaire et l'autre secondaire. Des organes mécaniques assurant les fonctions telle que : support, protection, manutention, refroidissement. [10]



Figure I.23 : Transformateur de puissance [4]

#### **I.4.6.5.6 Transformateur TSA**

C'est un transformateur de service auxiliaire 10KV/BT qui assure une tension alternative de 220V/380V pour alimenter l'éclairage, chauffage les pc, les redresseurs...) [10]

#### **I.4.6.5.7 Transformateurs de potentiel (tension) (TP)**

on utilise pour la mesure de tension sortie de transformateur. [10]

#### **I.4.6.5.8 Sectionneurs de mise à la terre**

#### **I.4.6.5.9 Sectionneurs d'isolement de transformateur SITR**

on utilise pour l'isolement de transformateur. [10]

#### **I.4.6.5.10 Transformateurs de courant (Tc)**

on utilise pour la mesure de courant sortie de transformateur. [10]

**I.4.6.5.11 Disjoncteur tripolaire**

on utilise ce type de disjoncteur pour protéger le transformateur de puissance de tous risques.  
[10]

**I.4.6.5.12 Les sectionneurs d'aiguillage**

on utilise pour partager l'arrivée dans les différents jeux de barre 1 et 2 de côté 60kv  
(sectionneur de barre 1 SB1, sectionneur de barre 2 SB2). [10]

**I.5 Conclusion**

Puisque ce premier chapitre a fourni une vue d'ensemble du réseau électrique, en rappelant les différentes structures topologiques, nous avons répertorié les différents composants du réseau électrique de la production à la distribution pour faciliter la compréhension du flux de travail.

# **Chapitre II**

Etude et modélisation de la ligne  
d'alimentation du tramway  
Mostaganem(LAC)

## **Les réseaux électriques des tramways**

### **II.1 Introduction**

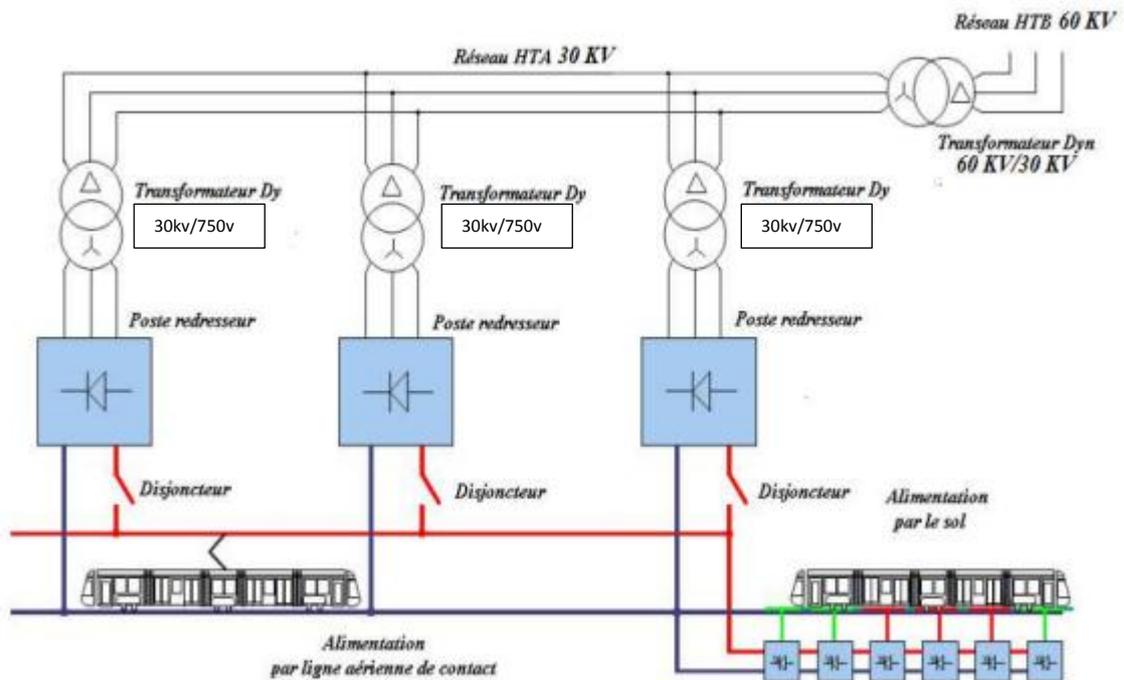
L'étude et la modélisation des réseaux d'alimentation électrique de tramway demandent d'adopter une démarche globale de type système. En effet, la présence de nombreuses structures d'électronique de puissance au sein de ces réseaux modifie fortement leur topologie et leur fonctionnement. Les méthodes de modélisation retenues sont ainsi en rupture par rapport aux approches traditionnelles, puisqu'une analyse complète d'un réseau ne peut être dissociée de l'étude de ses éléments constitutifs. Afin de répondre aux enjeux du monde des tramways. Ce chapitre présente d'abord les composants et les équipements, suivi d'une description de la structure du bâtiment. Composants clés de la source d'énergie du tramway. [1]

### **II.2 Historique**

Les premiers tramways se sont montrés aux USA durant le début du 19<sup>ème</sup> siècle, ils sont alors tractés par des animaux, globalement des canassons. Vu que le prix d'utilisation était inabordable en raison de la traction animale, la traction mécanique a été conçue dans les plus brefs délais : à vapeur dès 1873, à air comprimé (système Mékarski) et à eau surchauffée (système France) dès 1878, ensuite les tramways électriques depuis 1881. En Algérie, le premier tramway d'Alger a été mis en service en 2011, le tramway de Constantine en 2013 , le tramway d'Oran en 2013, le Tramway de Sidi Bel Abbés en 2017, le Tramway d'Ouargla, mise en service en mars 2018 et le tramway de Sétif le 8 Mai 2018. Il y a plusieurs projets en cour de construction comme le tramway de Batna et Annaba dont les travaux ont été lancés en 2015 et le tramway de Mostaganem qui est prévu pour 2021. [1]

### **II.3 Le structure du réseau d'alimentation de tramway**

Cette section présente différentes méthodes d'alimentation électrique pour les systèmes de transport électrique des tramways. Les nouveaux développements de la science et de la technologie ont rendu bon nombre de ces idées viables. Certaines alimentations proviennent du sol, telles que les lignes aériennes de contact (LAC) alimentées par .EN 50163. Ceux-ci sont utilisés pour le système LAC, qui est présenté dans la section suivante. Les tramways à plus haute tension fonctionnent à l'électricité qui vient d'Asie, d'Afrique, d'Europe ou des États-Unis. Ces systèmes de tramway fonctionnent sur 600, 750 ou même 1500 volts d'électricité. Il existe des systèmes de tramway alimentés par 600 ou même 1500 volts d'électricité en Suisse, en Allemagne et en Russie.



FigureII.1 – Illustration d'un réseau de tramway [1]

### II.3.1 Ligne aérienne de contact

L'alimentation par ligne aérienne de contact est le mode universel à cause de sa simplicité, sa fiabilité, sa facilité et son coût de mise en œuvre réduit. La ligne aérienne simple, à ne pas confondre avec la caténaire, est constituée d'un fil en cuivre électrolytique. Sa section, de 102 à 150 mm<sup>2</sup> suivant la valeur des courants prévus dans les conditions les plus défavorables, a une section ronde ou ovale et comporte, dans sa partie supérieure, un talon, formé à la tréfilerie, permettant au fil d'être pris dans une pince de suspension. Celle-ci est fixée à un câble transversal, en acier galvanisé, en para fil ou en kevlar (matériaux synthétiques légers et résistants), perpendiculaire à la ligne aérienne et ancré, de part et d'autre de la voie, à des crochets apposés sur les façades des immeubles ou sur des poteaux pouvant servir à l'éclairage. [2]

## Chapitre II : Etude et modélisation de la ligne d'alimentation du tramway Mostaganem (LAC)

Grâce à un appareil de prise de courant (pantographe, perche), les engins de traction captent la tension entre, d'un côté, un ou deux fils de contact suspendus et, de l'autre côté, les rails. [3]

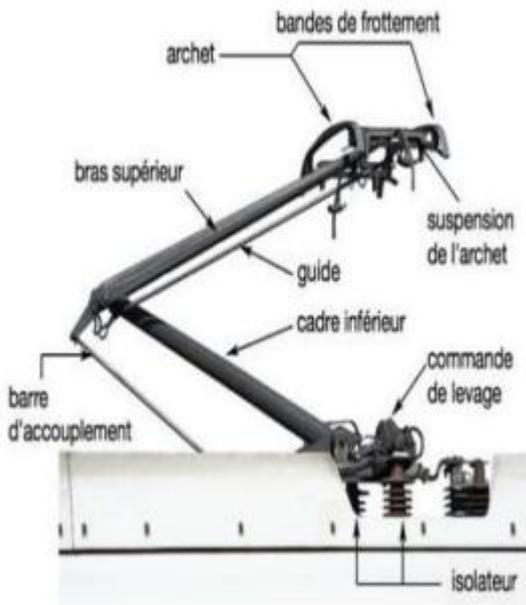


Figure II.3 – Pantographe [3]

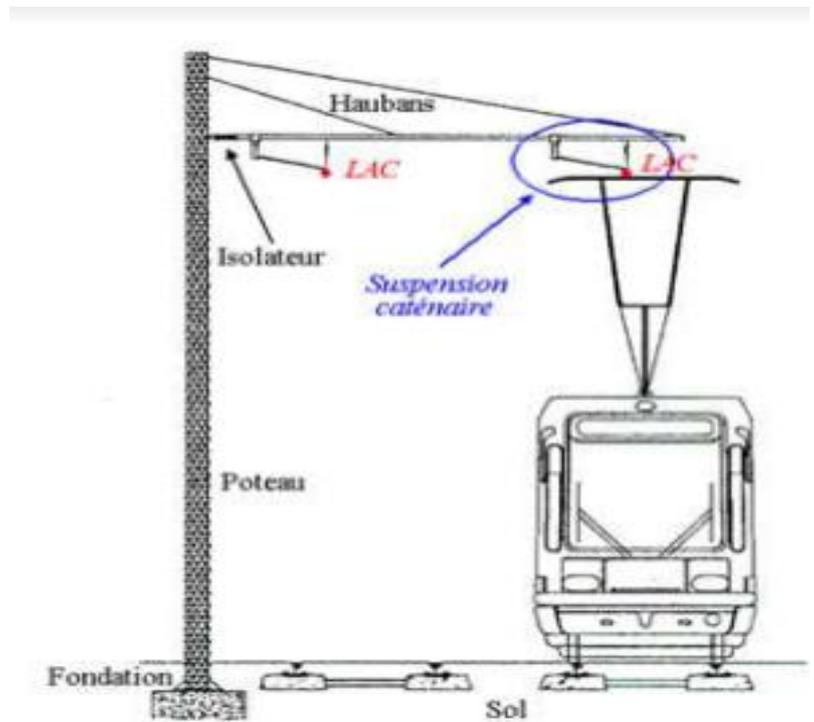


Figure II.4 : Support latéral d'une ligne [1]

### II.3.2 Alimentation par le sol

Le principe de l'alimentation par le sol (APS) consiste à poser dans l'axe de la voie une suite de sections de profilés, de longueur limitée à 11 m, isolés électriquement entre eux et par rapport au sol. Chaque section comprend, sur sa partie supérieure, un profilé conducteur de 8 m alternant avec un profilé de 3 m de long en matériau isolant. Chaque profilé conducteur est relié, en dérivation, à un feeder 750 V et à un coffret de commande, encastré dans la chaussée, comprenant une électronique de contrôle et de commande ainsi que des contacteurs permettant de mettre sous tension le profilé se trouvant sous le tram et hors tension, avec mise à la terre, les profilés extérieurs au tram. Chaque coffret, disposé à 22 m du précédent et du suivant, contrôle et commande la mise sous tension ou hors tension de 2 coffrets. Des boîtiers d'isolement font la jonction mécanique et électrique

## Chapitre II : Etude et modélisation de la ligne d'alimentation du tramway Mostaganem (LAC)

entre chaque profilé. Chaque rame est équipée de 2 frotteurs de prise de courant, munis de semelles en carbone et montés sur un bogie central, qui captent le courant depuis le profilé de surface lorsque celui-ci est sous tension. Lorsqu'aucune rame n'est en circulation dans le secteur, la suite de profilés centraux est entièrement hors tension et mise à la terre. La transition d'un secteur de ligne équipé de ligne aérienne à un secteur pourvu de l'APS se situe généralement au niveau d'une station. Lorsque la rame est en mouvement, une antenne, disposée à proximité des frotteurs, envoie au prochain coffret un signal radio qui commande la fermeture des contacteurs de telle manière que, lorsque les frotteurs arrivent sur le profilé suivant ils trouvent ce dernier sous tension tandis que le fait, pour le frotteur arrière, de quitter un secteur sous tension met ce dernier, automatiquement hors tension et à la terre.

L'alimentation par le sol est, dans sa configuration actuelle, une technologie compliquée et très coûteuse en investissement et en maintenance [4]

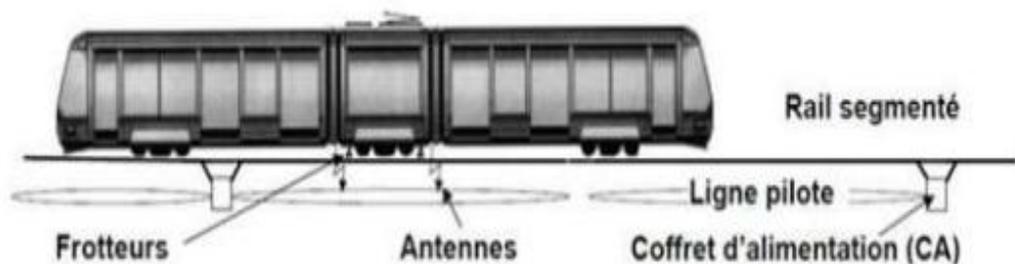
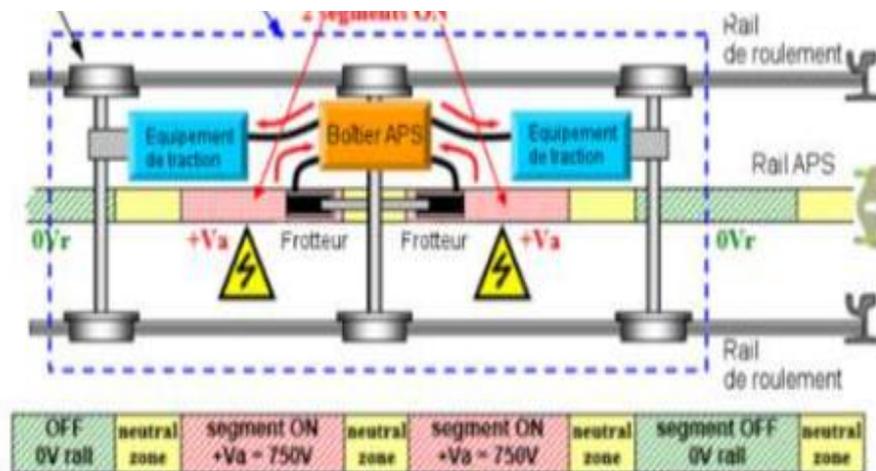


Figure II.5 – Principe d'alimentation par sol l'APS [1]



## II.4 La sous-station de redressement

Une sous-station de redressement ou de traction est la liaison entre le réseau HTA Local (30 kV) et le réseau continu à 750 V DC. Elle est usuellement raccordée à un réseau Électrique alternatif à haute tension. Son rôle est de diminuer cette tension pour qu'elle puisse être utilisée par les moteurs et parfois de varier la fréquence de la tension ou de la convertir en tension continue. [3]

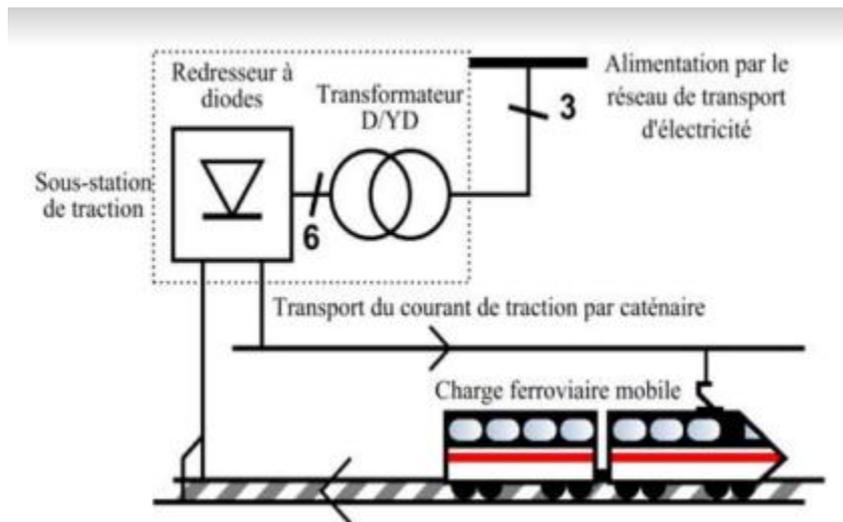


Figure II.6 – Le rôle de la sous-station de redressement [3]

Les sous-stations sont réparties le long des lignes en fonction des exigences de l'exploitant. Ces exigences sont dictées par les performances souhaitées pour la gestion de son exploitation (adéquation entre les grilles horaires et les puissances à installer), mais aussi par les contraintes d'implantation dans la ville. En effet, les emplacements susceptibles d'accueillir les sous-stations dans une ville sont assez restreints. La distance entre les sous-stations se révèle être un facteur à mettre en adéquation avec la structure utilisée pour le transport et la distribution du courant continu. Les tensions de lignes minimales acceptables en fonctionnement normal et dégradé (disjonction d'une sous-station par exemple) sont primordiales. En exploitation normale, par exemple, la tension minimale généralement acceptable sur une ligne de tramway est de 500 V DC. La puissance d'un groupe redresseur est généralement de 900 kW, débitant ainsi 1200 A sous 750 V. Le calcul des chutes de tension en ligne en fonction des caractéristiques de la ligne et du trafic assuré permet de déterminer les intervalles entre sous-stations pour respecter les minima de tension acceptés par le moteur électrique. Il existe une redondance entre les sources d'alimentation, ce

## Chapitre II : Etude et modélisation de la ligne d'alimentation du tramway Mostaganem (LAC)

qui permet, pour des opérations de maintenance, d'isoler une sous-station sans que le programme d'exploitation n'en souffre, La gestion des sous-stations est assurée par un automate programmable qui transmet les données à un poste de commandes centralisées (PCC). [1] Une sous-station de traction est constituée principalement des éléments suivants :

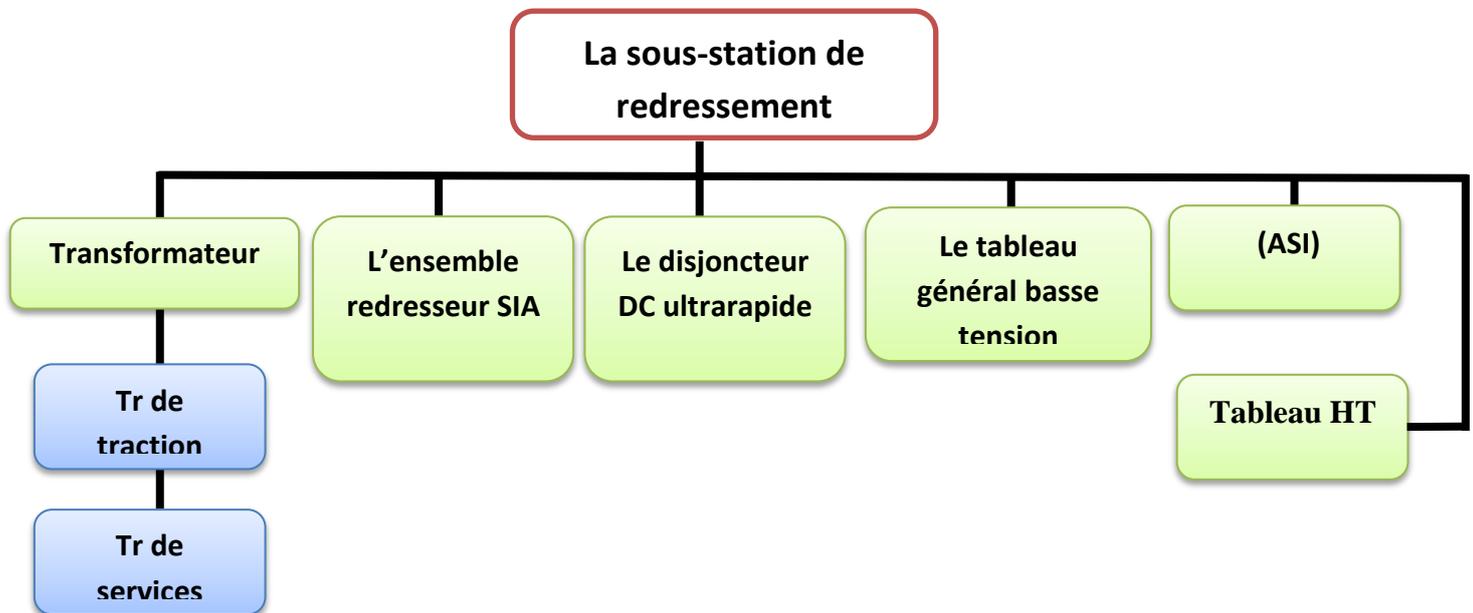


Figure II.7 – Schéma des différents éléments de sous-station de traction

### II.4.1 Tableau haute tension

Il est constitué de [4] :

- Une cellule arrivée HT.0
- Une cellule de comptage.
- Une cellule de protection du transformateur de puissance
- Une cellule de protection interrupteur fusible d'alimentation du transformateur

HTA/BT auxiliaire (ITRA)

### II.4.2 Les transformateurs

Une sous-station de traction peut être équipée des transformateurs suivants :

### **II.4.2.1 Transformateur de traction**

C'est un transformateur triphasés traditionnel soit à deux enroulements Dyn, ou transformateur équipés de deux secondaires triphasés Dyn

- Les tensions d'entrées sont généralement de 10 ou 30 kV.
- La tension de sortie est 750 V [4]

### **II.4.2.2 Transformateur de services auxiliaires**

Pour alimenter le service auxiliaire il s'agit un transformateur à l'huile d'un enroulement primaire couplé en triangle et d'un enroulement secondaire couplé en étoile avec le neutre à la terre.

- Les tensions d'entrées sont : 10 ou 30 kV
- La tension de sortie est : 420 V+N [1]

### **II.4.3 L'ensemble redresseur SIA**

La majorité des sous-stations utilisent à l'heure actuelle un simple redresseur à diodes pour assurer la conversion en courant continu. Ces redresseurs sont source d'une pollution harmonique assez élevée et basse fréquence. Une solution pour réduire cette pollution, et l'ondulation résiduelle sur le réseau DC, est d'utiliser un redresseur dodécaphasé. Un transformateur à deux enroulements de sortie étoile/triangle va ainsi créer deux systèmes de tensions triphasés décalés de  $\pi/3$ . Un redresseur est alors placé à la sortie de chaque enroulement [3]. Généralement d'une puissance de 900KW. Il sert à alimenter les tramways avec une tension continue généralement de 750 V[3].Le sectionneur d'isolement automatique (SIA) a pour fonction d'isoler le groupe transformateur /redresseur de la distribution du courant de traction[5]

### **II.4.4 Le disjoncteur DC ultrarapide**

Un disjoncteur DC ultrarapide (durée d'ouverture inférieure à 20 ms) se positionne en Sortie du groupe redresseur. [4]

### **II.4.5 Le tableau général basse tension**

Équipements de la sous-station sont généralement alimenté par les transformateurs auxiliaires il s'agit donc les TGBT équipements système, des locaux en ligne (signalisation ferroviaire et d'exploitation). [3]

### **II.4.6 L'alimentation sans interruption (ASI)**

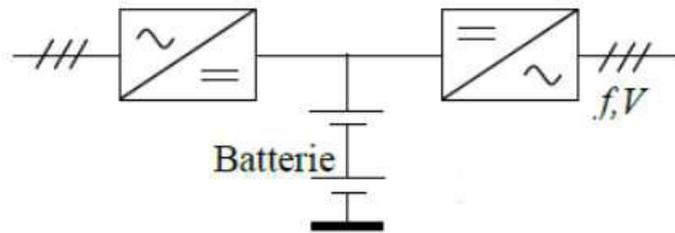


Figure II.8 – Schéma d'une alimentation sans interruption [1]

En cas de panne dans le réseau d'alimentation. Il faut assurer l'alimentation des capteurs et les services auxiliaires (l'éclairage. . .) et le système de commande des Appareils motorisé (disjoncteurs SIA .....). En temps normal, les batteries est maintenue en charge, mais l'énergie est produite par le réseau via le redresseur et l'onduleur, dans le cas de panne l'énergie est produit par les batteries via l'onduleur. [4]

### **II.4.7 Les pertes en ligne**

Nous avons vu qu'un réseau à courant continu présente des pertes en ligne plus importantes. La cause principale provient du transport en basse tension. Ce problème existe sur les grandes lignes, mais il est encore plus marqué sur les réseaux de tramways où la tension nominale est de 750V. Fort heureusement, les réseaux de tramways sont moins étendus, ce qui limite les pertes. Pour réduire ces pertes, plusieurs solutions peuvent être envisagées en gardant la structure classique. Augmenter la tension d'alimentation permet ainsi de réduire efficacement les pertes. Cependant cette tension doit rester dans une plage de tension bien définie et normalisée pour des raisons de sécurité. De plus cette solution n'est efficace que durant les phases de traction. Une deuxième piste d'amélioration consiste à diminuer la résistance de la LAC. Deux solutions sont possibles pour y parvenir : diminuer la résistance linéique de la LAC ou réduire l'espacement entre les sous-stations. Pour diminuer la résistance linéique, il suffit d'augmenter la section de la LAC. Cela peut se faire directement en ajoutant une deuxième ligne en parallèle. Une autre solution consiste à connecter à intervalles réguliers les LAC des deux voies d'une ligne de tramway. [3]

## **II.5 Le matériel roulant**

Le matériel roulant ferroviaire est l'ensemble des véhicules moteurs ou remorqués, élaborés pour se déplacer sur une voie ferrée et qui évolue toujours avec le temps. Afin de répondre aux attentes des usagers et des exploitants des réseaux de tramway [1]

### **II.5.1 La motorisation des tramways**

Comme son grand frère le train, le tramway a connu une évolution semblable de la motorisation. Jusqu'au début des années 1990, le moteur de traction a été la machine à courant continu tétra polaire avec excitation série. Encore une fois, la machine à courant continu souffrait de son collecteur fragile et de sa densité de puissance faible. C'est ce moteur qui équipa les premiers tramways dits TSF (Tramway Français Standard). Depuis l'avènement de l'onduleur à IGBT, la motorisation à machine à courant alternatif s'est massivement imposée sur le tramway [5]

### **II.5.2 Les bogies**

L'élément principal de l'ensemble du matériel roulant est le bogie qui est un chariot situé sous un véhicule ferroviaire sur lequel sont fixés les essieux (les roues). Il est mobile par rapport au châssis du véhicule (locomotive par exemple) et destiné à s'orienter convenablement dans les courbes. Outre son rôle de liaison entre les essieux et la caisse, le bogie assure les rôles de freinage, d'interface entre la signalisation sur voie et la caisse, de suspension de l'ensemble du tramway. On distingue donc deux grandes familles de bogies [1].

### **II.5.2.1 Les bogies moteurs**

Il est utilisé dans le cas d'une traction directe ou indirecte et aussi pour le freinage. Les tramways Citadis™ actuels sont équipés de bogie moteur Arpège avec un moteur asynchrone refroidi par eau, cela permet de disposer d'un moteur plus compact à puissance équivalente qu'un moteur refroidi par air. En revanche, une boucle à eau spécifique doit être mise en œuvre, elle se nomme « GRF » (groupe de refroidissement) et se situe en toiture. En toiture, nous retrouvons aussi les modules de puissance qui sont quant à eux refroidis par une circulation d'air forcée [8]

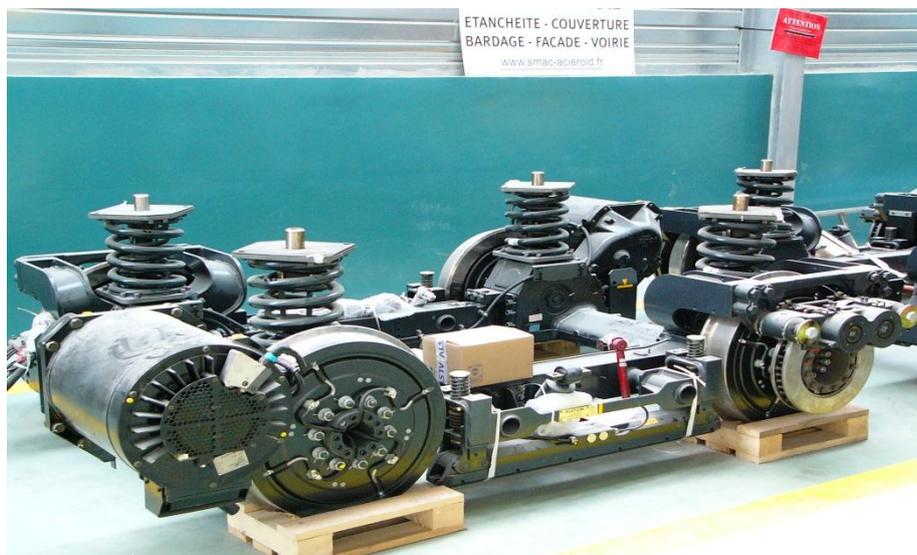


Figure II.9 – Bogie moteur Arpège équipant les tramways Citadis™ [6]

Plus récemment, un nouveau bogie a été conçu (2008), il s'agit du bogie moteur Ixège équipé de moteurs synchrones à aimants permanents refroidi par air, en circuit fermé. Ce moteur présente l'avantage de garder un volume similaire à celui refroidi par eau à puissance équivalente et évite l'ajout d'un GRF [6].

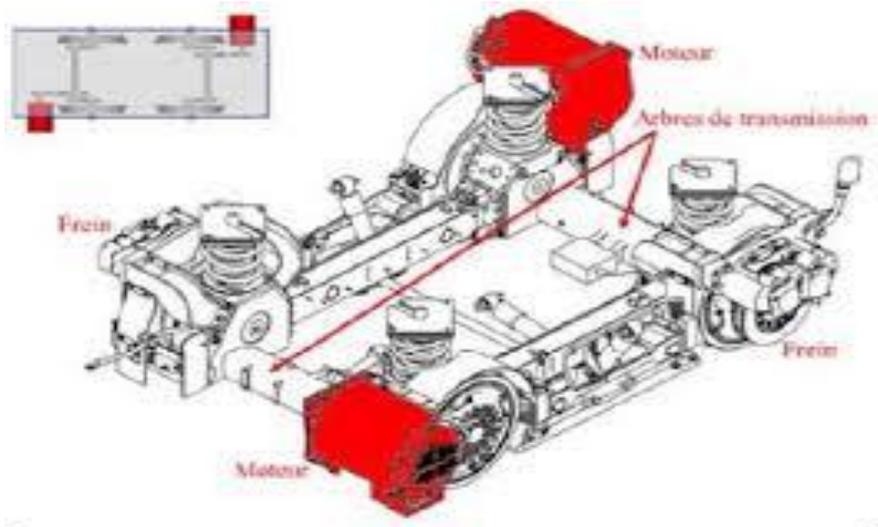


Figure II.10 – Bogie moteur Ixège pour les tramways Citadis™ [6]

### **II.5.2.2 Les bogies porteurs**

Les chariots porteurs sont généralement utilisés pour le freinage et pour la répartition et le guidage de la charge.



Figure II.11 – Bogie porteur [6]

### **II.5.3 Les type de freinage**

Les trains de tramway sont équipés de différents systèmes de freinage :

#### **II.5.3.1 Les freins électrodynamiques**

Le freinage de tramway est essentiellement assuré par les freins électrodynamiques qui agissent sur les essieux moteurs (chaque essieu contient deux roues). Il est également du type

## Chapitre II : Etude et modélisation de la ligne d'alimentation du tramway Mostaganem (LAC)

à récupération d'énergie en fonction de la capacité récupératrice de la ligne d'alimentation HT. Cependant lorsque la ligne HT n'est pas récupératrice il y a mise en application de freins rhéostatiques. ONIX gère automatiquement la répartition entre les deux [7].

### II.5.3.2 Les freins mécaniques (freins à friction)

Les freins mécaniques sont aussi appelés freins à friction. Ils équipent tous les essieux des bogies moteurs et les roues des bogies porteurs. Ces freins sont mis en œuvre à l'aide d'un dispositif hydraulique agissant sur un ensemble étriers du disque de freins [7].

### II.5.3.3 Les freins électromagnétiques

Ce type de freins est réalisé par l'intermédiaire de six patins magnétiques par élément de rame. Une paire de patin magnétique est montée sur chaque bogie ils se plaquent sur les rails lorsqu'ils sont alimentés afin de faire ralentir ou arrêter le véhicule suivant les cas d'utilisation. Chaque patin magnétique est suspendu au longeron de châssis-pont du bogie. [7]

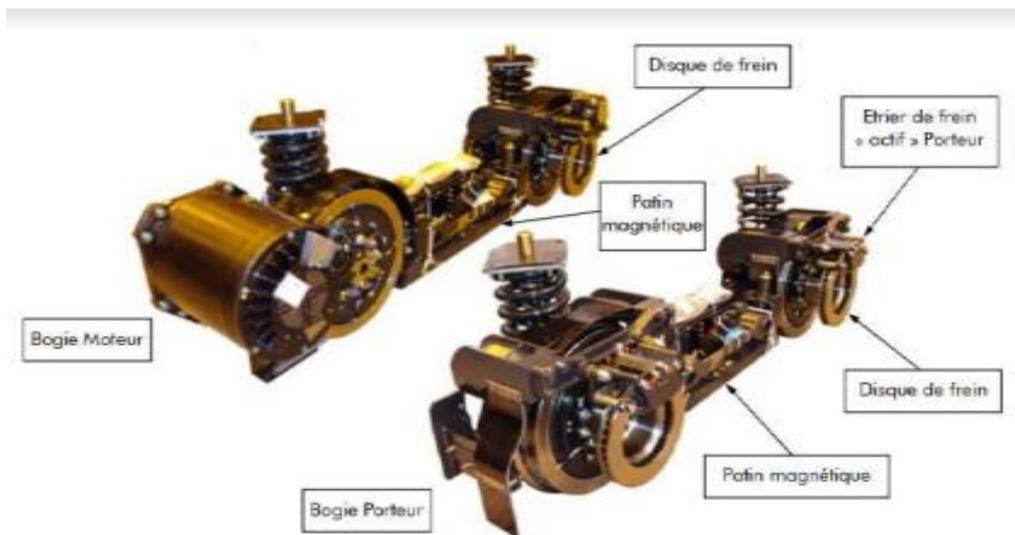


Figure II.12 – Les Outils de freinages [6]

IL y a d'autres types de freinages :

- Freinage de service.
- Freinage d'urgence.
- Freinage de secours ou de sécurité.
- Freinage d'immobilisation.
- Freinage de parking (ou de stationnement). [7]

### **II.5.4 Les 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. Ces courants circulant à travers le sol sont appelés 'courants vagabonds'. Ils sont particulièrement néfastes au bon vieillissement des installations, car ils participent grandement à la corrosion des structures métalliques enterrées à proximité des voies et des sous-stations de traction. Une meilleure isolation des rails du sol réduit les courants vagabonds, mais peut conduire à l'apparition de potentiels électriques de contact dangereux pour les personnes. [1].

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). 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) [3].

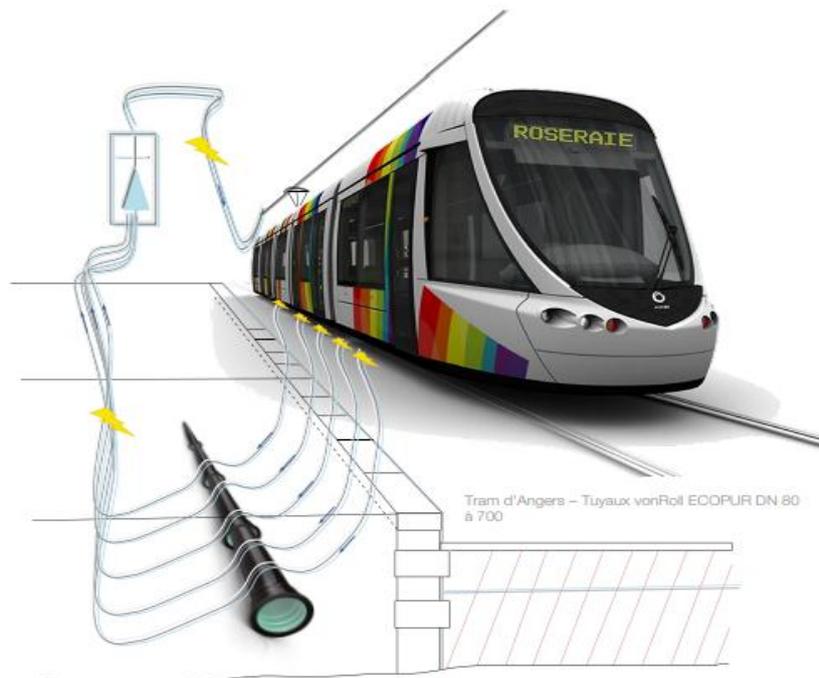


Figure II.13 – Principe de circulation des courants vagabonds [8]

## II.6 La Chaîne de traction

Une chaîne de traction de tramway est constituée des éléments suivants :

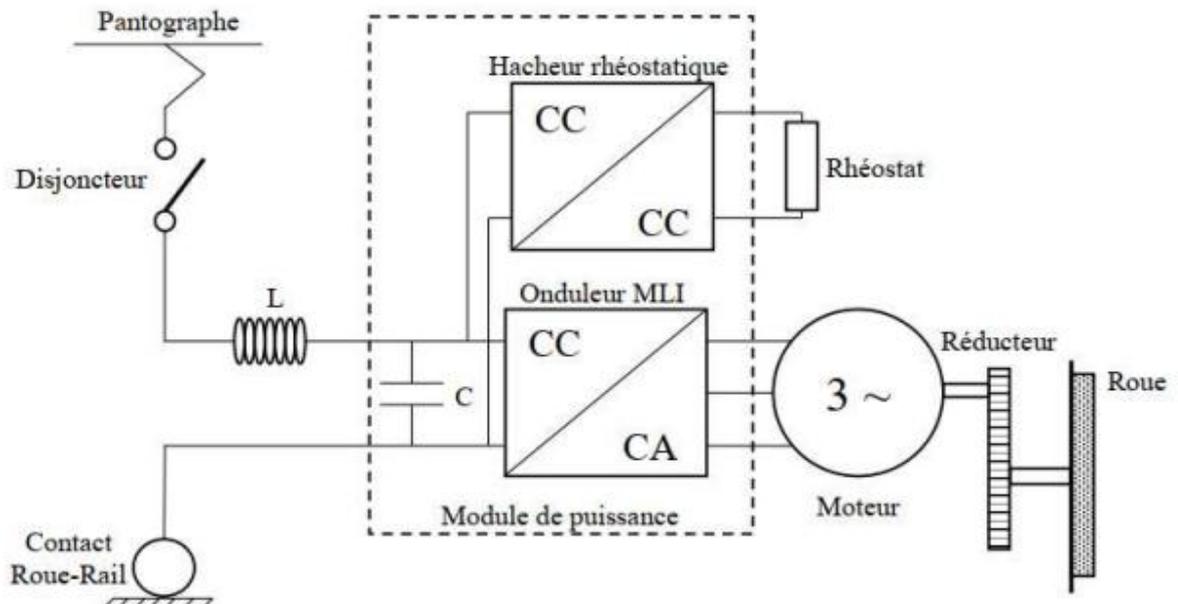


Figure II.14 – Schéma de principe d'une chaîne de traction de tramway [9]

### II.6.1 L'appareil de protection

Le disjoncteur, qui protège l'équipement en cas de surintensité ou de court-circuit [8].

La fermeture du disjoncteur est commandée, lorsque celui-ci détecte la présence de tension et peut être ouvert en cas de défaut des coffres de traction ou par la perte de la présence tension [9].

### II.6.2 Le filtre d'entrée

Constitué d'une inductance de ligne et d'un condensateur de filtrage, qui permet d'assurer la stabilité du bus continu pour le bon fonctionnement de l'onduleur, de garantir une impédance minimale de l'engin vis-à-vis du réseau, de limiter le courant absorbé à la caténaire dans la bande de fréquence autorisée et ainsi de respecter les gabarits harmoniques de courants notamment pour ne pas perturber les circuits de voie [3].

### II.6.3 Les convertisseurs de traction

Un ou de plusieurs convertisseurs d'énergie électrique. Dans notre cas, avec une alimentation continue, il s'agit d'un module de puissance onduleur, qui transforme la tension continue à

## **Chapitre II : Etude et modélisation de la ligne d'alimentation du tramway Mostaganem (LAC)**

---

son entrée en une tension alternative triphasée d'amplitude et de fréquence variables destinée à alimenter le moteur de traction [6].

### **II.6.4 Les moteurs**

Un ou plusieurs moteurs de traction qui convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique appliquée aux roues. Le moteur absorbe de l'énergie en mode traction et devient générateur en mode freinage [6].

### **II.6.5 Les convertisseurs auxiliaires**

Tous les convertisseurs de puissance auxiliaires sont des éléments électriques qui ne sont pas utilisés directement pour entraîner la machine. Ces excipients peuvent être divisés en deux catégories : Aides au confort et aides à la traction, les aides au confort concernent principalement la ventilation, la climatisation et l'éclairage. Assistante de La traction est liée au moteur du ventilateur (pour refroidir le convertisseur) [6].

### **II.6.6 Le maintien du plan de tension**

Le respect des niveaux de tension est le critère dimensionnel le plus important. Par conséquent, cette tension LAC doit être comprise entre 500V et 900V. [6]

#### **II.6.6.1 Durant les phases de traction**

Lors des phases de traction, le tramway consomme du courant. Ce courant est fourni par les sous-stations ou d'autres tramways en phase de freinage. Il arrive au tramway via la LAC. Cette circulation de courant va entraîner une chute de tension et les sous-stations doivent être disposées de manière à garantir le respect de la tension minimale dans le pire cas. En cas d'impossibilité, il faudra doubler la LAC [10]

#### **II.6.6.2 Durant les phases de freinage**

Lorsqu'un tramway freine, il utilise majoritairement le freinage par récupération. Les moteurs vont alors fonctionner en alternateur et renvoyer de l'énergie sur le réseau. La résistance de la LAC va alors entraîner une élévation de sa tension ; La tension maximale en régime permanent est fixée à 900 V. Pour ne pas dépasser cette tension, les tramways sont équipés en toiture d'un rhéostat de freinage. Ce rhéostat est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un hacheur. Si la tension du bus dépasse 900 V, le rhéostat de freinage se déclenche et dévie une partie du courant de freinage. La tension du bus se régule alors autour de 900 V. Lors du déclenchement du rhéostat de freinage, l'énergie est perdue [10].

### **II.6.7 Échanges entre les tramways**

Lorsqu'un tramway freine, l'énergie est renvoyée sur le réseau. Cette énergie peut alors être consommée par d'autres véhicules situés à proximité et en phase de traction. Grâce à cet

## Chapitre II : Etude et modélisation de la ligne d'alimentation du tramway Mostaganem (LAC)

échange, l'efficacité du réseau de tramways augmente significativement. Il faut cependant que les tramways soient suffisamment proches. En effet, dans le cas contraire, la tension du bus de tramway en phase de freinage peut dépasser la tension de déclenchement du rhéostat de freinage et l'énergie est dissipée par effet Joule. Pour favoriser les échanges entre véhicules sans dépendre du carrousel de véhicules, il faut donc diminuer la résistance et la tension de la LAC. Une diminution de la tension est favorable durant le freinage, mais se révèle préjudiciable lors des phases d'accélération [10].

### II.7 Limitations et améliorations possibles d'un réseau classique De tramway

#### II.7.1 Architecture électrique classique d'un réseau de tramways

Un schéma simplifié de l'architecture du tramway est présenté sur la figure (II.15)

Ce schéma montre deux sous-stations à diodes alimentées par le secteur AC. Ces sous-stations alimentent le LAC en 750 V.

Par le pouvoir (Tram). Un réseau complet comprend naturellement plus de sous-stations. Le LAC est divisé en sections mutuellement isolées. Les disjoncteurs permettent de connecter ces différents composants lorsque le réseau est sain, et limitent le fonctionnement en cas de défaut. Les filtres et autres dispositifs de protection ne sont pas représentés sur ce schéma unifilaire [10].

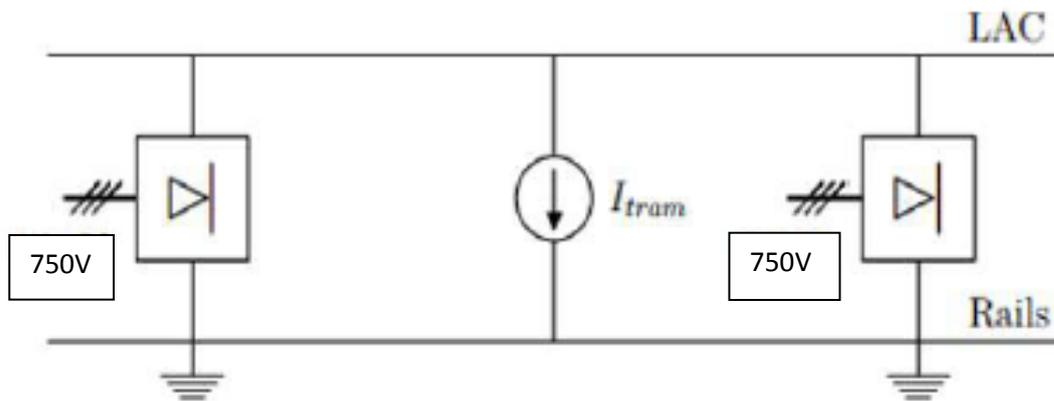


Figure II.15 – Alimentation classique d'un réseau de tramways. [10]

### **II.7.2 Nouvelles architectures d'alimentation (Transformateur centralisé)**

Cette solution, comme la précédente, propose de limiter le nombre de points de connexion. Encore une fois, une ligne d'alimentation longe la ligne et la distribution se fait avec un petit courant alternatif. La figure (II.16) illustre cette stratégie :

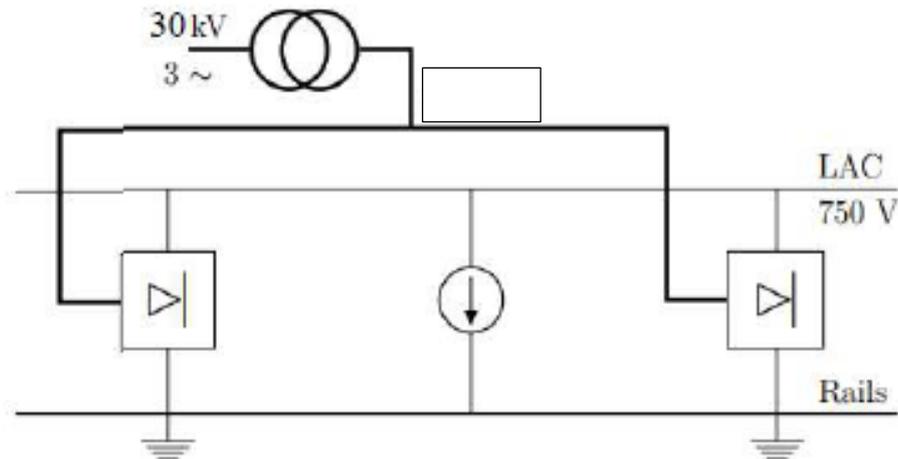


Figure II.16 : Nouvelles architectures d'alimentations. [10]

Cette alimentation 750 Vac élimine le besoin de transformateurs de sous-station encombrants. Ces nouvelles sous-stations légères limitent non seulement le nombre de points de connexion, elles sont également plus faciles à trouver dans le centre-ville. Cette solution présente quelques inconvénients. Tout d'abord, la distribution d'énergie est basse tension, Les pertes du réseau AC sont plus élevées que dans le cas précédent [10].

### **II.7.3 La réversibilité des sous-stations**

L'échange énergétique entre véhicules permet des gains énergétiques importants. Cependant, lorsqu'il y a plus de puissance produite que de puissance consommée, on peut alors s'interroger sur la possibilité de réinjecter la puissance sur le réseau de distribution. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que les sous-stations classiques sont construites sur la base d'un pont de diodes non réversible. Le courant ne peut donc pas être renvoyé sur le réseau entraînant un déclenchement des rhéostats. Lorsque la puissance fournie diminue, les sous-stations se débloquent, et reprennent leur rôle normal. Une sous-station réversible consiste à récupérer l'énergie de freinage de tramway via le pantographe et la renvoyer au réseau HTA. Les caractéristiques de cette énergie doivent être compatibles avec celles du réseau, d'où la nécessité de l'ajout d'un onduleur et d'un transformateur. [11].

## Chapitre II : Etude et modélisation de la ligne d'alimentation du tramway Mostaganem (LAC)

---

Les sous-stations fonctionnent selon deux modes :

- Mode de traction : le redresseur alimente la LAC.
- Mode de récupération : l'onduleur envoie l'énergie récupérée au réseau HTA.

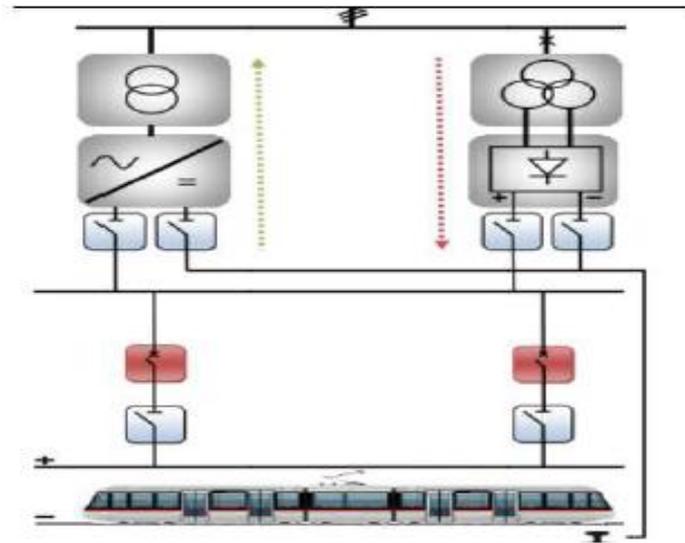


Figure II.17 – Une sous-station réversible [11]

### II.8 Conclusion

Nous avons effectué dans ce chapitre une étude générale sur les éléments principaux qui composent un tramway.

Nous allons dans la suite présenter notre cas d'étude : le tramway de Mostaganem mis en service en 2023



# Chapitre III

## Tramway de Mostaganem

## **Chapitre III :tramway de Mostaganem**

---

### **vision général sur le tramway Mostaganem**

#### **III.1 Introduction**

Le tramway de Mostaganem est un réseau de tramway desservant la ville de Mostaganem en Algérie. La ville, inaugurée le 18 février 2023, est la troisième ville de l'ouest algérien à disposer d'un tramway, après Oran et Sidi Bel Abbas. Deux lignes sont en service. Le premier est de 12,2 km avec 20 stations et le second de 2 km avec 4 stations. [1]

#### **III.2 Le tramway de Mostaganem**

L'Algérie connaît actuellement un important développement du transport ferroviaire. Nous avons de l'expérience dans le développement du transport ferroviaire. Projet Mostaganem.

Mostaganem deviendra la troisième ville de l'ouest algérien à disposer d'un tramway, après Oran et Sidi Bel Abbas. L'appel d'offres pour la société du métro d'Alger, communément appelée EMA, a été attribué par le groupe franco-espagnol ALSTOM et CORASAN ISOLUX, avec un avant-projet détaillé réalisé par le bureau d'études YUKSEL et les travaux ont débuté le 4 août 2013. Sa mise en œuvre a duré environ 40 mois et son coût est estimé à 24,34 milliards de dinars algériens soit plus de 240 millions d'euros. [1]

## Chapitre III :tramway de Mostaganem

Les travaux de construction du tramway ont été suspendus fin 2016 après la faillite de la société CORASAN ISOLUX. En vue de la reprise des travaux, un nouvel appel d'offres a été lancé et le choix de réaliser le projet a été laissé au groupe COSIDER. [12]

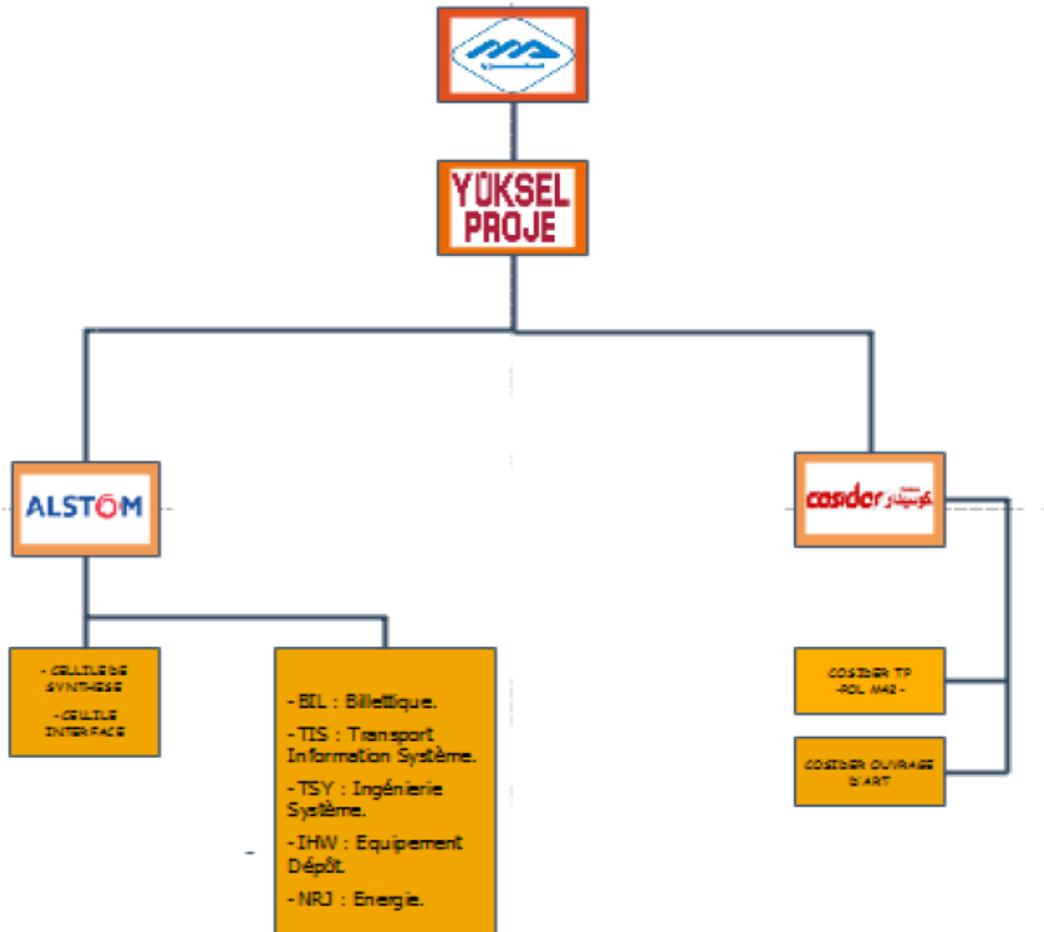


Figure III.1 :l'organigramme du projet [12]

J'ai effectué un stage au bureau d'étude YUKSEL PROJE dans le département système. Cette dernière est une société de design turque fondée en 1978 et est aujourd'hui l'une des plus grandes sociétés d'ingénierie et de conseil en Turquie. YKSEL PROJE a mis en œuvre de nombreux projets majeurs en Turquie et à l'étranger. Possède des succursales dans plusieurs pays dont l'Algérie

### III.2.1 Représentation de projet

L'itinéraire du tramway de Mostaganem est divisé en deux tronçons, la section 1 et la section 2. Le tronçon 1 mesure 12,2 km de long et compte 20 gares de voyageurs. Voyagez de

## Chapitre III :tramway de Mostaganem

Salamandre à Kharouba Collège. Le tronçon 2 mesure 2 km de long et compte 4 gares de passagers. De la gare SNTF au nouvel arrêt de bus. Comme la section est un peu longue, elle a été divisée en deux parties, la section 1A et la section 1B. [1]

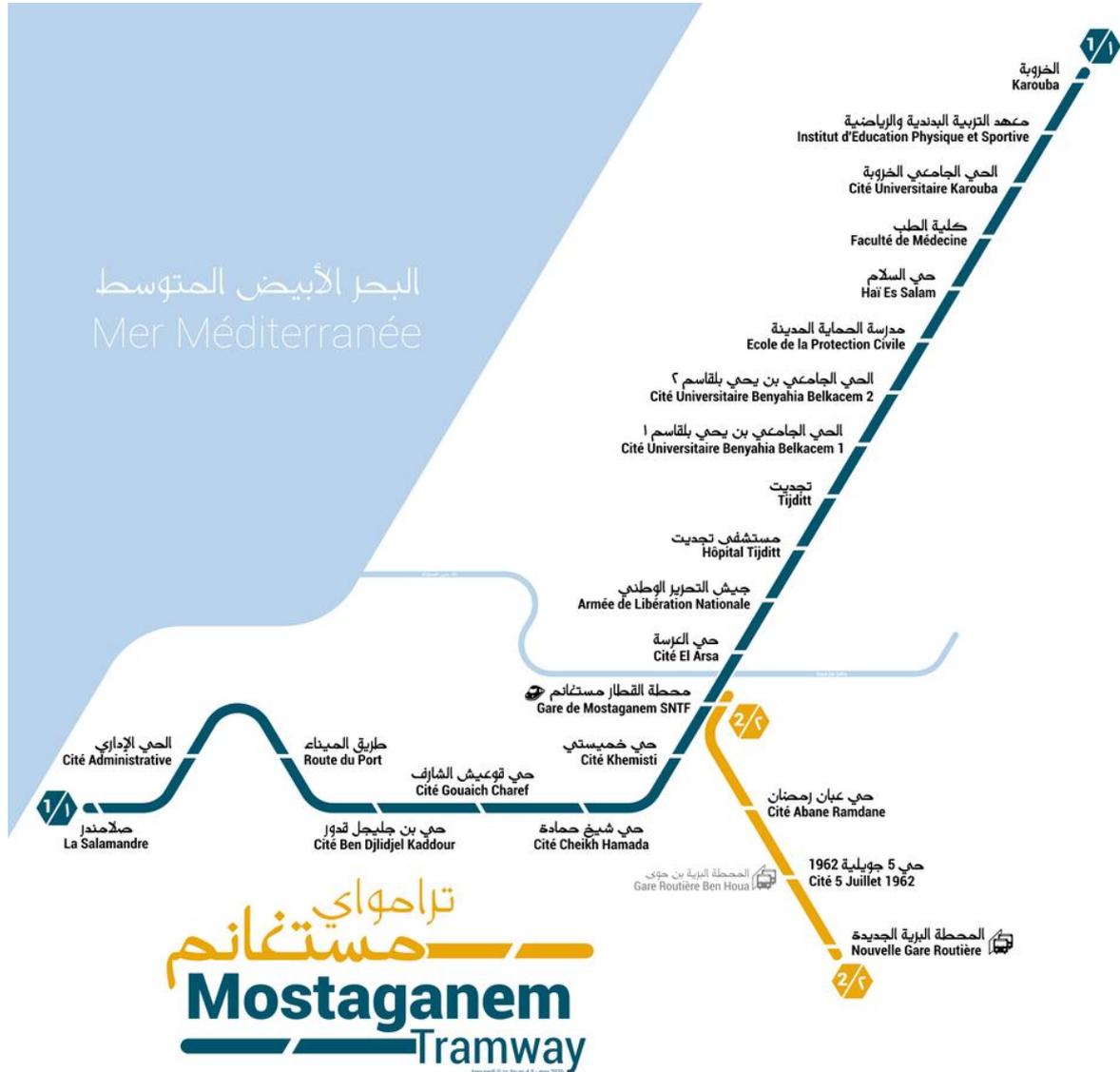


Figure III .2 : la trace du tramway de Mostaganem [12]

### III.2.2 Système d'électrification de tramway

Le tramway de Mostaganem est alimenté grâce à des sous-stations situées le long du parcours, elles-mêmes alimentées par le réseau 30 kV propre au tramway. Ces sous-stations permettent la production de :

- L'énergie de Traction 750 V CC, par l'intermédiaire des Postes Redresseurs

## Chapitre III :tramway de Mostaganem

---

(PR) et de la distribution Traction associée,

- L'énergie Basse Tension 400/230V CA, par l'intermédiaire de transformateurs pour la signalisation et les appareils de voie.
- L'énergie BT auxiliaire pour l'alimentation des appareillages permettant le fonctionnement de la ligne.

Tous les engins HT, BT et de traction sont regroupés sur le site du poste. Le réseau est principalement constitué de boucles alimentées par des pylônes haute tension (PHT) alimentés par deux départs SONELGAZ 60 KV. La production d'énergie de SST est de type mono groupe. Chaque SST, quel qu'il soit (ligne ou dépôt), n'a qu'un seul groupe de génération. Chaque groupe de production d'énergie de traction SST comprend les unités fonctionnelles suivantes :

Tableau de distribution 30 kV (DHTA-R) remplissant des fonctions de protection Le tableau est de type déblocable et est équipé de disjoncteurs, de sectionneurs de mise à la terre et de relais de protection. Les disjoncteurs peuvent être contrôlés localement ou à distance.

Transformateur de traction secondaire double 30 kV / 2 x 585 V pour effectuer une fonction d'abaissement de tension, redresseur pour fournir une fonction de récupération de la tension alternative à 750 V CC et interrupteur de déconnexion automatique (SIA) pour effectuer la fonction d'isolation du groupe de producteurs du côté 750 V CC.

Tous les postes sont identiques en termes de performances et d'équipements. Seuls les sous-stations situées dans le CDM intègrent divers dispositifs pour couvrir les besoins en puissance du CDM. Cette standardisation permet une installation et une maintenance plus flexibles et plus économiques. [13]

Huit sous-stations ont été régulièrement placées le long de la ligne de tramway de Mostaganem comme suit :

- SST D : au dépôt à Salamandre,
- SST 1 : à la cité administrative,
- SST 2 : à la cité Guouaich en face de la rentrée de la caserne,
- SST 3 : à Matamore Théâtre de verdure,
- SST 4 : à l'hôpital Tijditt,
- SST 5 : à l'école protection civile,
- SST 6 : à l'université Kharouba

## Chapitre III : tramway de Mostaganem

- SST 7 : à la cité 5 Juillet 1962.

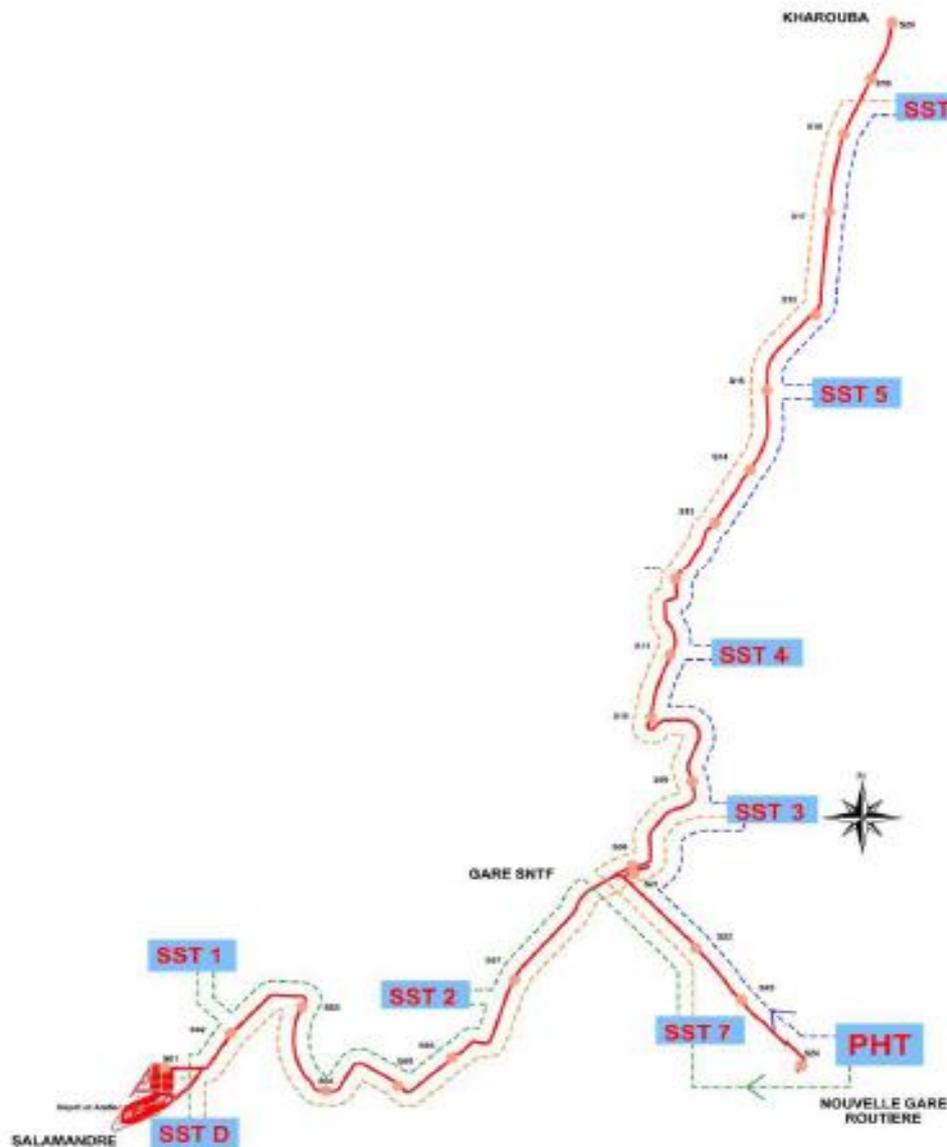


Figure III.3 : la distribution 30Kv de Mostaganem [12]

La gestion des sous-stations est assurée par des automates programmables qui transmettent les données au Central Control Center (PCC). Ce dernier réalise des opérations en temps réel sur différents postes. Le Poste Central de Commande Abrégé PCC est une installation technique destinée non seulement à l'exploitation des tramways et à la régulation du trafic, mais également à l'aide à la conduite et à la régulation de l'énergie de traction du réseau ferroviaire.

## Chapitre III :tramway de Mostaganem

---

Le PCC fournit une vue complète du circuit ou du réseau pour améliorer le temps de réponse en cas de panne [13].

SST convertit de manière fiable l'énergie alternative en énergie directe et distribue l'électricité en cours de route via des lignes aériennes, le moyen le plus traditionnel de transport d'électricité entre les sous-stations et les trains.

La force de traction est fournie à la ligne via un câble d'alimentation positif. Le câble de retour négatif se connecte directement au rail. Dans le cadre des roulements en acier, les rails porteurs ont deux objectifs. Le premier sert de guide mécanique lors du développement du véhicule. Le second est d'assurer le retour de l'alimentation au poste de traction [13].

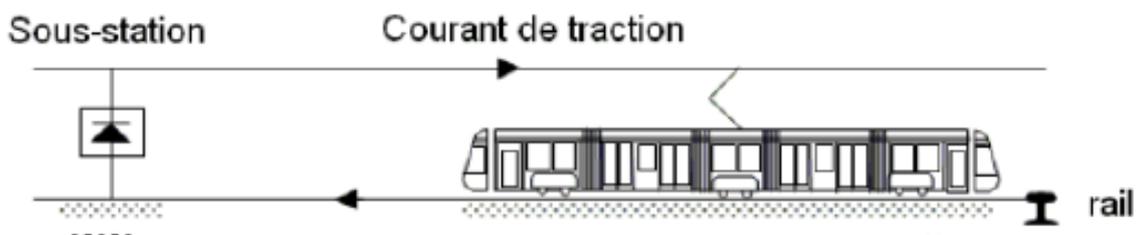


Figure III.4: principe de circulation de courant [13]

### III.3 Présentation du sous-système LAC

#### III.3.1 La conception du système LAC

Le système LAC est constitué de :

- ❖ Fils de Contact.
- ❖ Câbles d'alimentation et connexions électriques.
- ❖ Equipements/Armements (Consoles, Transversal, portique souple, Suspensions, Rappels souple)
- ❖ Supports.
- ❖ Protections (Mise à la terre, Parafoudre) [13]

#### III.3.2 Fils de contact

Un fil aérien est un conducteur électrique sur lequel est placé un pantographe de tram pour capter l'électricité. Le matériau utilisé pour fabriquer le FC est du cuivre dur d'une section de

## Chapitre III :tramway de Mostaganem

---

150 mm<sup>2</sup>. Chaque ligne de tramway de 45 mètres nécessite jusqu'à 1200 A de puissance. FC supporte des tensions mécaniques de 1500 daN (LAC régulé) et 1000 daN (LAC non régulé) et une tension d'alimentation de 750 V DC. Les fils de contact doivent répondre aux exigences de la norme EN 50149 [14].

Les propriétés du fil de contact choisi sont données ci-dessous :

Section	150 mm <sup>2</sup>
Résistance à la traction Min	360 N/mm <sup>2</sup>
Charge de rupture Min	52,4 kN
Poids linéaire	1,34 kg/m
Diamètre	15, mm

### III.3.3 Supports LAC

Les piliers utilisés pour la ligne de tramway de Mostaganem sont cylindro-coniques, avec des semelles en acier galvanisé à chaud, de 8 m ou 10 m de haut selon les endroits, la moitié supérieure ayant le même diamètre que la moitié inférieure. Électrifier

Le centre de maintenance et le stockage secondaire utilisent des pieux circulaires multi faces, et les pieux d'ancrage qui supportent les gabarits sur blocs sont des pieux cylindriques.

Chaque type de colonne LAC fait l'objet d'une feuille de calcul qui permet de déterminer l'effort le plus défavorable introduit dans la colonne par la suspension. Les poteaux LAC ont une résistance dans toutes les directions et sont également limités à 0,5 pouce de hauteur en déviation vers le haut (déviation) à la force maximale. Les appuis sont fixés sur des blocs de fondation intégrés à la plate-forme [14].

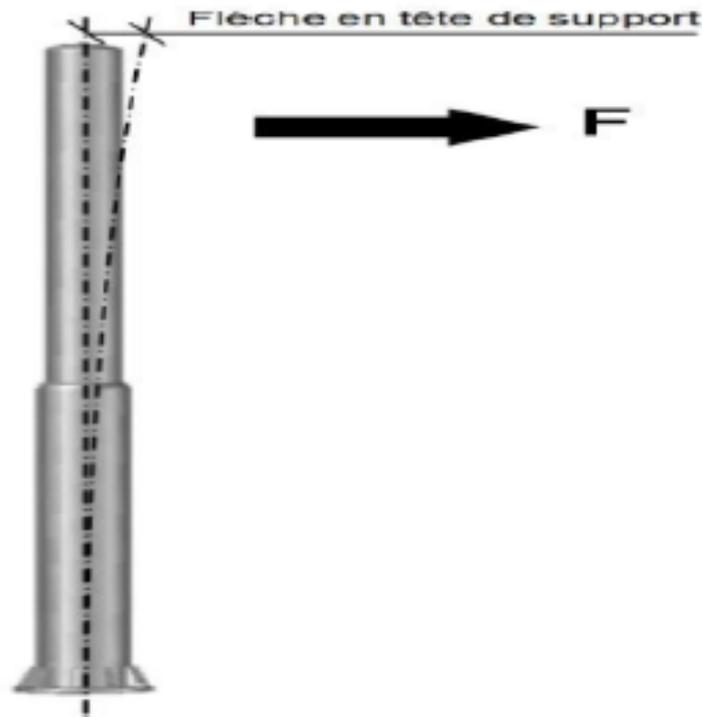


Figure III.5 : un poteau LAC [14]

### III.3.3.1 Types d'insertion

L'insertion consiste à déterminer les différents modes d'appui du contact LAC conduisant à la sélection d'un type d'insertion particulier pour le site considéré. Les différents types d'inserts standards pour Mostaganem Tram LAC sont :

- Supports équipés de consoles
- Supports équipés transversaux ou de portiques souples
- Support équipés de rappels souples
- Bras de rappel compensé sous ouvrages d'art

Les aspects esthétiques et l'intégration de toutes les lignes aériennes sont très importants lors de la création de lignes de tramway. Le choix du type d'insert est essentiel. Cela se fait en concertation entre les ingénieurs de BAC et les architectes de ligne. projet.

La suspension par un support central à deux appuis est répartie sur la majeure partie de la ligne pour minimiser les côtés agressifs des barreaux dans les zones les plus denses de la ville [14].

### III.3.3.1 Supports équipés de consoles

Le support caténaire avec console intégrée comprend :

- ✓ Poteau d'essieu "parapluie" pour appareils bidirectionnels :

Ce système est choisi lorsque la plate-forme est spatialement séparée du trafic routier et que le profil transversal est suffisant pour deux voies et une colonne centrale. Ces types de mâts sont principalement utilisés pour les voies, à l'exception des courbes serrées, des zones d'aiguillage, des entonnoirs et des sections étroites [14].

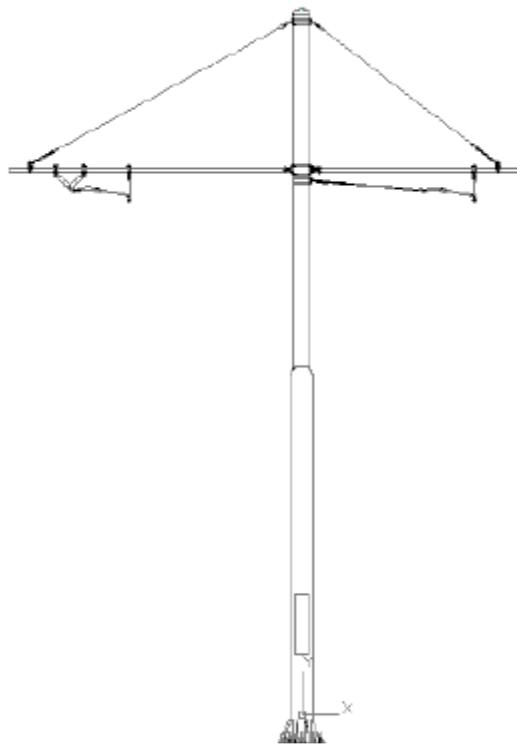


Figure III. 6 insertions parapluie [14]

## Chapitre III :tramway de Mostaganem

---

### ➤ Poteau latéral 1 voie :

Ce système utilise un poteau par piste. B. Zones de retraite, virages serrés, zones d'aiguillage, etc.

### ➤ Poteau latéral 2 voie:

Poteau latéral pour équipements deux voies :

Ce système est utilisé lorsqu'un seul côté du rail est disponible pour le montage sur poteau [14].

### III.3.3.1.2 Support équipés de transversaux ou de portiques souples

Un câble croisé est un câble posé transversalement aux voies pour permettre la suspension et le placement du FC. Les portails latéraux ou flexibles sont utilisés principalement parce qu'une partie de la ligne est utilisée ou ne peut pas être portée en position axiale ou latérale du support. Dans les zones urbaines à densité moyenne, il est compatible avec la présence physique des supports et favorise les aspects esthétiques. Avec ce type d'insertion, les poteaux peuvent être montés loin ou près de la plate-forme, et les poutres transversales peuvent être attachées aux façades des bâtiments existants, à condition qu'elles aient la capacité portante appropriée [15].

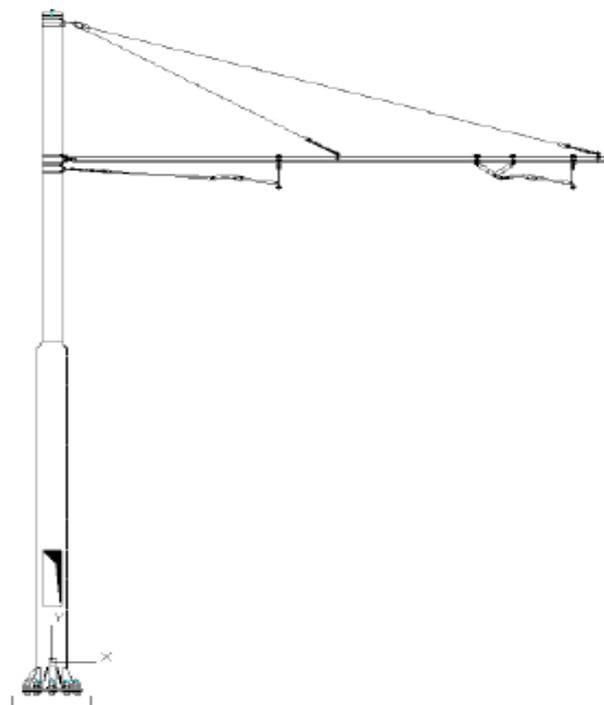


Figure III.7: insertion unilatérale [14]

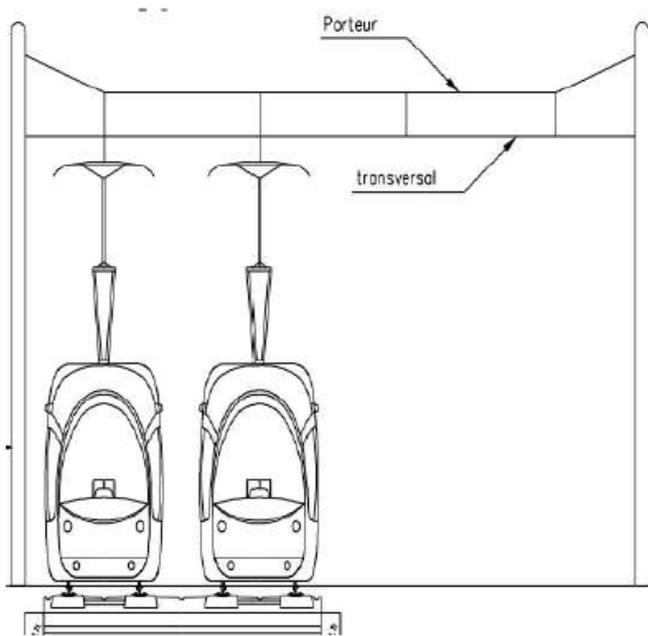


Figure III. 8 : portique souple [14]

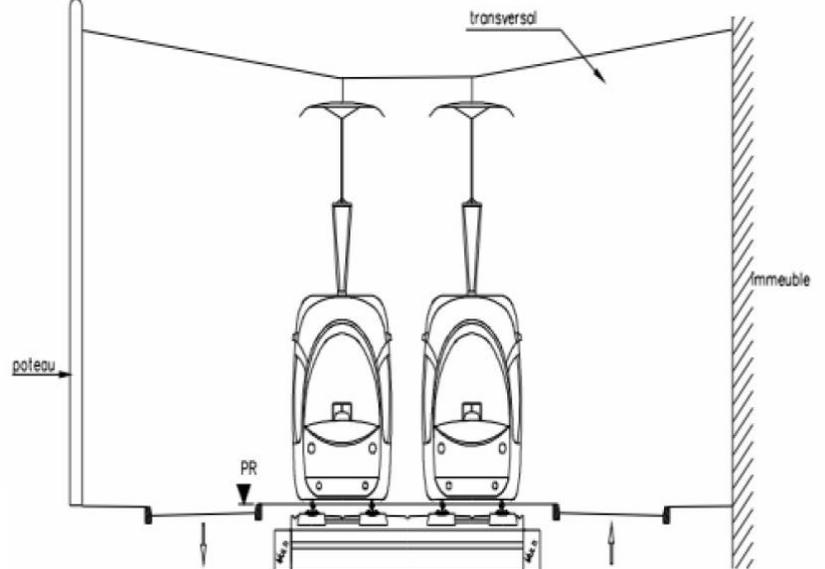


Figure III.9 : transversal [14]

### III.3.3.1.3 Supports équipés des rappels souples

Communément appelés tirants lâches, ils sont fixés à des courbes de petit rayon.

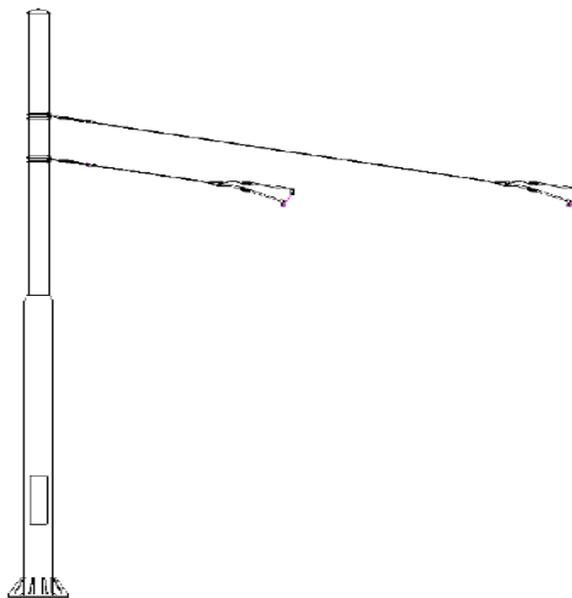


Figure III.10 : insertion en tirant lâché [14]

### III.33.1.4 Bras de rappels compensé sous ouvrage d'art

Dans la passerelle sous l'ouvrage d'art, pour la suspension de fils de contact constitués de bras flexibles compensateurs fixés à l'ouvrage et faisant interface avec le génie civil de l'ouvrage, installés en tenant compte de la distance de sécurité électrique, un équipement spécifique est requis (voir annexe XV). [14]

### III.3.4 Armement

L'armement est le système de suspension auquel sont attachés les câbles du chariot, regroupant consoles, entretoises, points d'appui élastiques, balanciers et griffes.

- Console : Les tubes en plastique renforcé de fibre de verre ne nécessitent pas d'isolateurs de pied de console pour assurer l'isolation électrique du LAC. Le panneau d'alimentation comporte deux tubes avec des entretoises fixées dessus afin que vous puissiez fixer un chemin de câbles.
- Console séjour : est un câble en plastique. Ces entretoises aident à maintenir la console contre le poids de l'ensemble du LAC.
- suspension delta : Il s'agit d'un élément porteur qui assure le maintien vertical du fil de contact. Ils se composent d'un élément de câble synthétique isolé avec des pinces de fixation fixées aux deux extrémités.
- Bras mémoire : Les bras de déviation sont utilisés pour déplacer et fixer les fils de contact. Il doit être léger et résistant aux vibrations de la ligne. il fait 750 mm de long [14]

### III.3.5 Hauteur du fil de contact

La hauteur nominale du niveau d'appui est de 6 m au-dessus de la chaussée, mais peut être inférieure ou supérieure selon le profil longitudinal de la voie et l'intersection de la plateforme avec la chaussée [14].

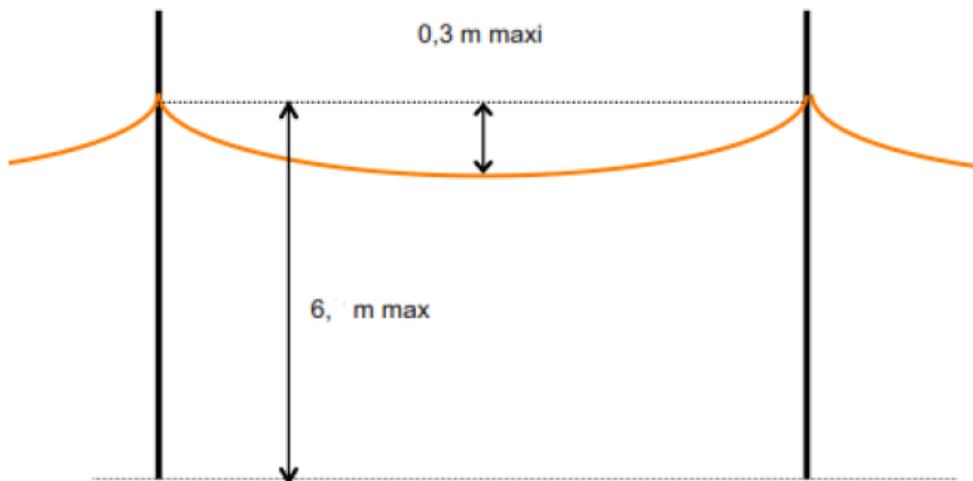


Figure III.11 hauteur du fil de contact [14]

### III.4 Désaxement

Les fils de contact sont décalés des deux côtés de l'axe de la voie pour réduire l'usure du pantographe causée par le frottement des fils de contact contre la ceinture de charbon.

La portée maximale du pantographe limite la valeur de décalage. Si aligné droit, cette valeur serait  $-200\text{mm} / +200\text{mm}$ .

Pour les courbes, la ligne est décalée par la courbe extérieure. La valeur du déport d'essieu dépend du braquage de la voie, mesuré dans le champ considéré sur le rail intérieur de la voie extérieure. Cette flèche à mi- portée est limitée à  $-160\text{ mm}$  . La valeur maximale de désalignement au point de suspension est de  $+240\text{ mm}$  [14].

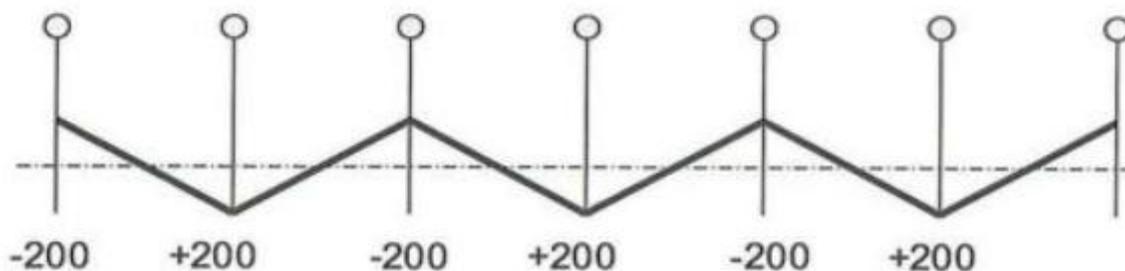


Figure III.12 le principe du d'désaxement [14]

### III.5 Comportement de la LAC aux variations de température

Les plages de température ambiante définies ci-dessus sont -15 °C et +55 °C. Les contraintes mécaniques caractéristiques sont données à une température moyenne de +25°C.

Les calculs de la taille et des compétences du BAC reposent sur deux principes :

- Le LAC est maintenu sous contrainte mécanique constante dans la plage de température ambiante spécifiée.
- LAC où la tension du fil de contact change en fonction de la température [14]

### III.6 La régularisation (compensation de la tension mécanique)

#### III.6.1 LAC régularisée

Le conditionnement du fil de contact aide à compenser la dilatation du cuivre causée par les fluctuations de température, la tension mécanique et la déviation du fil de contact. La déviation du fil de contact ne doit pas dépasser 30 cm. Supposons 52 mètres comme plage linéaire maximale du LAC compensé. Les valeurs de déviation dans ce cas sont:

$$f = \frac{p * A^2}{8 * T} = 0.296m$$

Avec :

P= poids linéaire du fil de contact (1.34 kg/m)

A= portée maximal (52m)

T= tension mécanique du fil de contact (1500daN)

#### III.6.2 Principe

L'alignement des fils de contact est assuré par la mise en place de tendeurs de moufle sur les moitiés de grenaille ou les deux extrémités de grenaille, ou en utilisant des tendeurs à ressort si la longueur est inférieure à 200 mètres. En ce qui concerne les bâtiments de la ligne principale et de la gare, nous maintenons un niveau constant de calme pour les lignes de contact dans la plage de température ci-dessus.

Dans les régions où les fils de contact pour les lignes principales sont réglementés, les fils de contact pour les communications sont également réglementés afin que les différences de comportement dues aux changements de température ne deviennent pas trop importantes. La ligne de contact utilise le même fil de chariot que la ligne principale. [14]

## Chapitre III :tramway de Mostaganem

---

En zone régularisée :

Les câbles de communication de longueur inférieure à 200 m sont équipés d'un tendeur mécanique à chaque extrémité du LAC.

Les câbles de communication d'une longueur inférieure à 600 m doivent être mis à niveau à une extrémité et fixés à un point fixe à l'autre extrémité.

Pour les longueurs de chariot supérieures à 600 m, installer deux compensateurs aux extrémités du bloc et un point fixe ou anti-guidage au milieu du bloc [14].

### III.6.3 Equipements de régularisations

A l'aide d'un dispositif appelé dispositif tendeur placé au niveau du fil d'ancrage, la tension mécanique du fil de contact est maintenue constante et le dispositif tendeur compense la dilatation et la contraction de la vis. Variations de température. Les dispositifs de serrage utilisés sont : [14]

#### III.6.3.1 Appareil tendeur à moufle

Un dispositif de tension de bloc est un système d'équilibrage automatique qui utilise un contrepoids pour maintenir constante la tension mécanique du fil de contact. Ce dispositif permet de réduire les contraintes mécaniques sur le conducteur et de limiter les contraintes sur le contrepoids qui équilibre ces contraintes. Le dispositif de fixation du fil de contact est muni d'un dispositif de tension [14].

- Pour la chaîne actuelle. Le réglage des fils de contact de section 150 mm<sup>2</sup> reste constant sur une plage de température de -15 °C à +55 °C. La dilatation du cuivre est absorbée par le système de serrage du moufle. La valeur de tension mécanique du fil est de 1600 daN.
- Un tendeur de bloc (AT) est un étrier simple avec une poulie comme illustré ci-dessus. La poulie ayant un rapport de réduction de 1/4, la pile de contrepoids reliée au dispositif tendeur est de 400 kg avec une tension mécanique du fil de contact de 1600 daN [15].



Figure III.13 : appareil tendeur à treuil [15]

### III.6.3.2 L'appareil tondeur à ressort

Un compresseur à ressort est utilisé pour la longueur  $L$  avec  $FC = 100$  m. Principalement pour les voies giratoires (aiguillages ou communications). La tension de régulation est de 1000daN à 1500daN

Le nombre d'ATR correspondant à la longueur de tir  $L$  dans le LAC dévié est :

- 1 ATR pour  $L = 100$  m (pour les équipements de voie de communication)
- Si  $100\text{m} < L = 200\text{m}$ , soit 2 ATR [15].



Figure III.14 : appareil tendeur à ressort [15]

### III.6.4 LAC non régularisée

Il est utilisé pour spécifier des lignes où la ligne de contact n'est pas maintenue en tension mécanique constante. La déflexion de la lime entre les deux supports change en raison des changements de contraintes mécaniques en réponse aux changements de température. Cette technique ne nécessite pas de découpe mécanique particulière. La ligne de contact est posée bout à bout des deux côtés à l'aide d'ancrages à point fixe. La tension de montage mécanique recommandée pour les LAC non régulés est de 1000 daN à une température ambiante moyenne de 25 °C. Cette technologie est utilisée dans les zones où les tramways circulent à faible vitesse. B. Centres de maintenance et installations de stockage secondaire [14].

#### ❖ Ancrage Fixe

Des ancrages fixes sont utilisés aux deux extrémités du LAC non régulé (ou aux extrémités du demi-tour régulé). Ce type d'ancrage ne permet pas le déplacement longitudinal du LAC en fonction de la température. Seule la tension change. Cette variation de la tension mécanique du fil de contact y conduit corrélativement. [15]

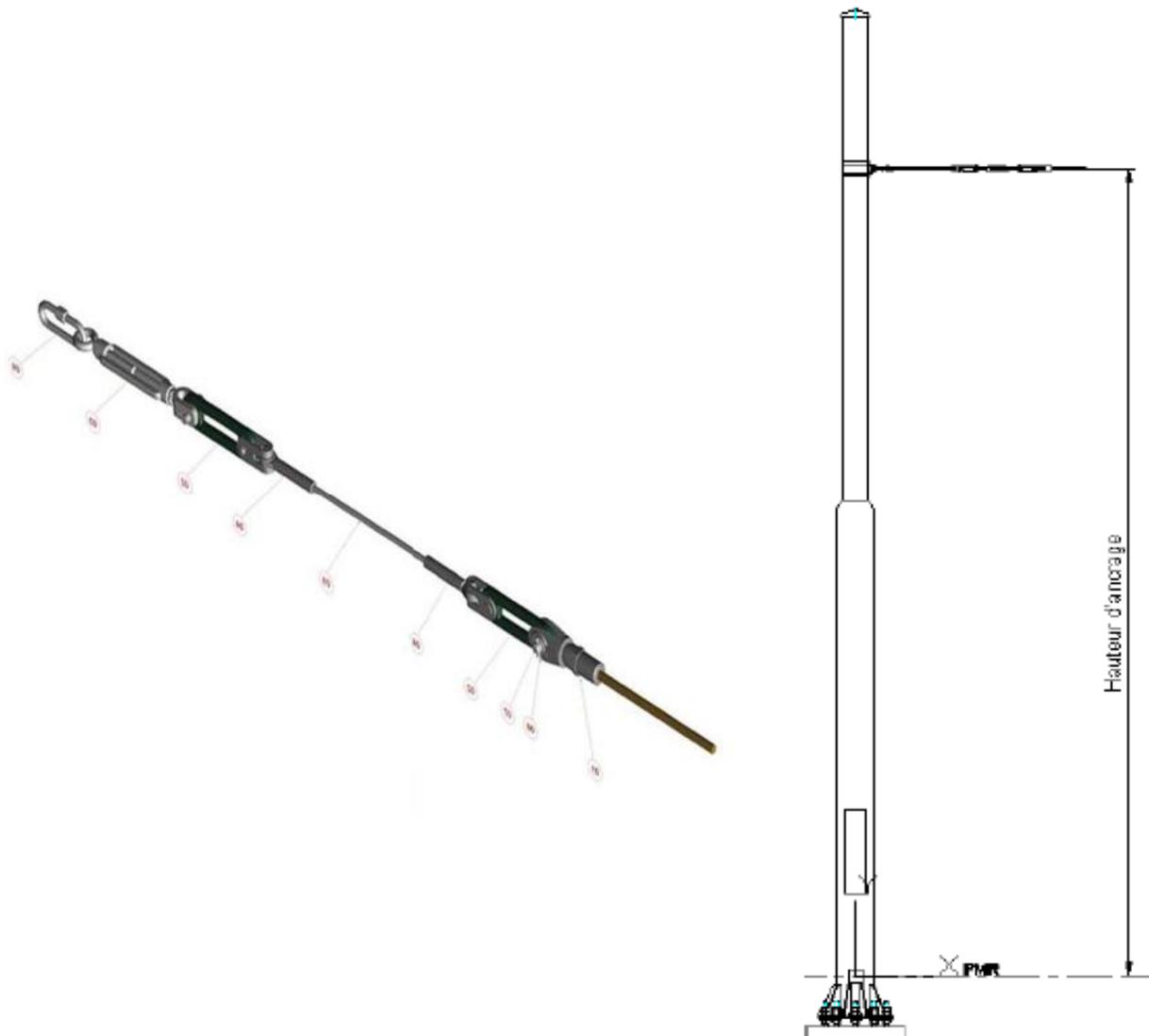


Figure III.15 : Montage ancrage fixe [14]

### III.7 L'alimentation

Les lignes électriques sont alimentées par des poteaux électriques qui maintiennent les lignes d'alimentation. Il s'agit du câble d'alimentation qui relie la sous-station au LAC. Le câble est connecté à la ligne aérienne via un sectionneur manuel. La présence de tension sur les composants électriques est signalée par des voyants de tension. Ces feux permettent de visualiser l'état électrique des caténaires et d'empêcher les conducteurs de tram de pénétrer dans la zone radio.

Les fonctionnalités d'éclairage incluent :

Feu allumé fixe = Présence tension sur la LAC.

## Chapitre III :tramway de Mostaganem

---

Feux allumé clignotant= absence tension sur la LAC.

Feux étaient= état indéterminé (panne d'un équipement) [15]

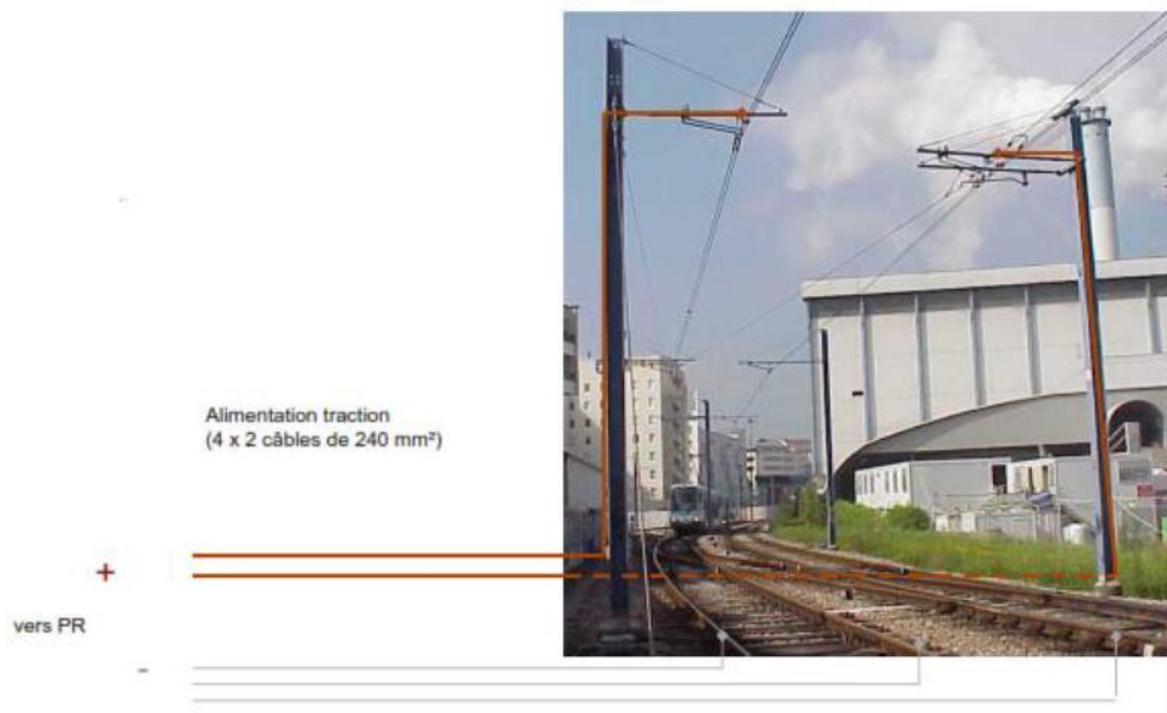


Figure III.16 : principe d'alimentation [14]

### III.8 Découpage de la Ligne

#### III.8.1 Sectionnement Mécanique

Aussi appelé changement de Canton, il sert à mettre le CF sous tension mécanique constante. La distance maximale entre deux ancres consécutives est de 1200 m [14].

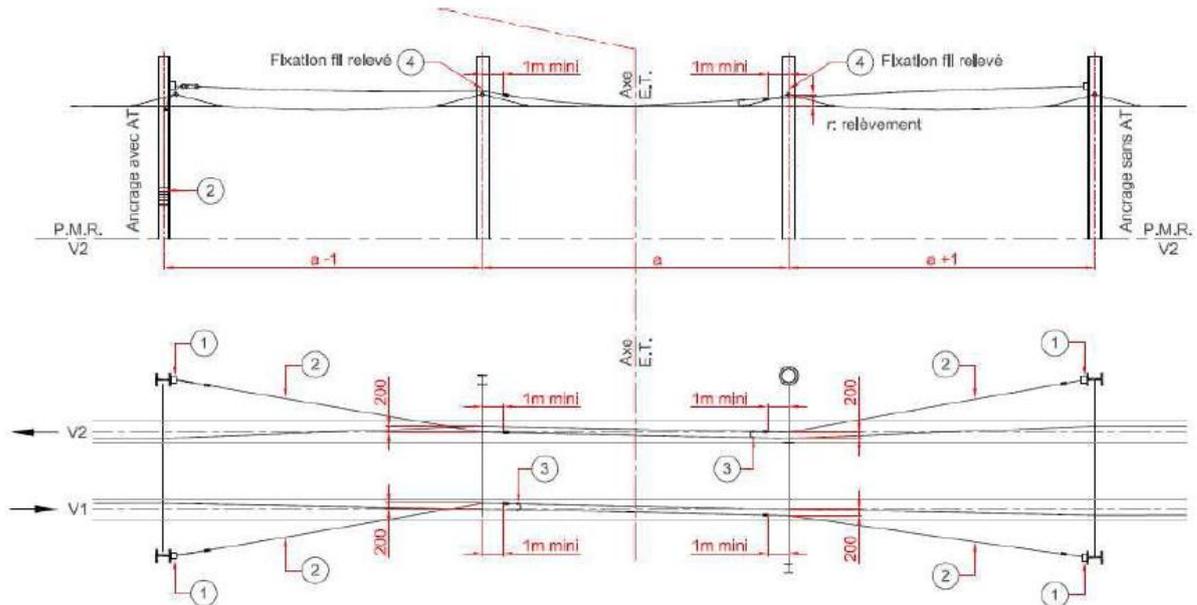


Figure III.17 : principe du sectionnement mécanique [15]

#### III.8.2 Sectionnement Electrique

Les lignes de tramway sont divisées en sections et sous-sections électriques séparées par l'emplacement des sous-stations et l'emplacement des communications utilisées pour les services temporaires, les passages à niveau ou les passages à niveau. En cas d'accident sur une portion de ligne justifiant l'arrêt par un interrupteur télécommandé, ces sous-sections assurent la continuité de service sur la bonne portion. Les types d'isolation galvanique utilisés dans ce projet sont : Subdivision par séparateur de section [14].

### III.8.2.1 Isolateur de section

Dispositif mécanique accolé à un FC pour réaliser l'isolation électrique de la ligne, assurant la continuité des surfaces de contact et le captage électrique lors du passage des pantographes des véhicules ferroviaires, tout en isolant électriquement deux tronçons de la ligne garantie. [14].



Figure III. 18 : isolateur de section [15]

## III.9 Les communications

Lorsque le tramway passe d'une voie à une autre, cela se fait via des aiguillages. Les tramways exigent que le pantographe soit en contact avec le FC tout au long du passage d'une voie à une autre voie pour permettre la traction. Cela nécessite un assemblage spécial. Des LAC de communication sont installés aux points et aux intersections. [14]

Il existe deux types d'équipements :

### III.9.1 Equipement Tangentielle

Ce type de montage nécessite le montage d'un support près du centre de l'appareil. Cette dernière est appelée la zone de l'appareil. Avec ce support, la distance latérale entre les deux lignes de contact est de 0,10 m jusqu'à 0,20 m. Un isolateur de section (IS) a également été installé au milieu de la ligne de communication pour assurer l'isolement entre les FC de la ligne principale.

Principe des équipements tangentiels avec SI :

Il fonctionne sur deux travées de part et d'autre de la communication et se compose de :

## Chapitre III : tramway de Mostaganem

- Axe de communication.
- Intermédiaire de communication assurant le relevage de la LAC déviée.
- Ancrage de la LAC déviée.
- Connexion équipotentielles assurant la continuité électrique.

L'axe de communication doit être coordonné par un dispositif à ressort [14].

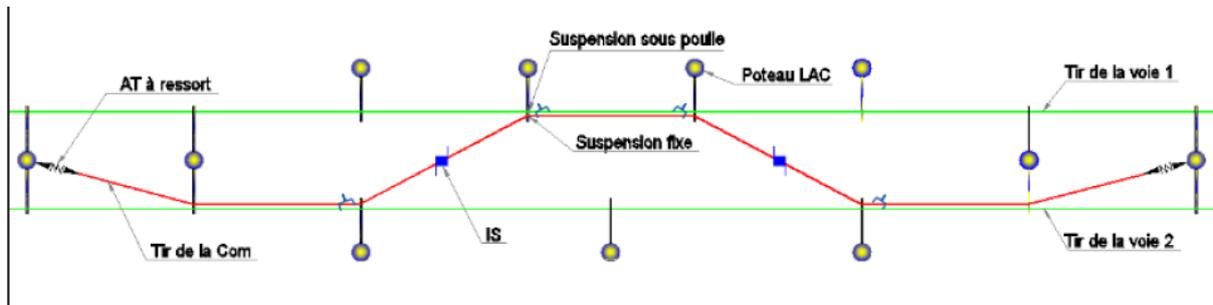


Figure III. 19 : principe de l'équipement tangentiel avec IS [14]

### III.9.2 Equipement Croisé

Dans ce type d'installation, les fils de contact du fil shunt croisent les fils de contact du fil principal près du centre de l'appareil sans les couper. La ligne de contact recalée passe sur la ligne de contact principale. Une équerre fixée sur le câble du chariot à voie directe empêche le soulèvement de la voie de déviation au passage du pantographe [14].

Ils ont les mêmes composants que les équipements tangentiels

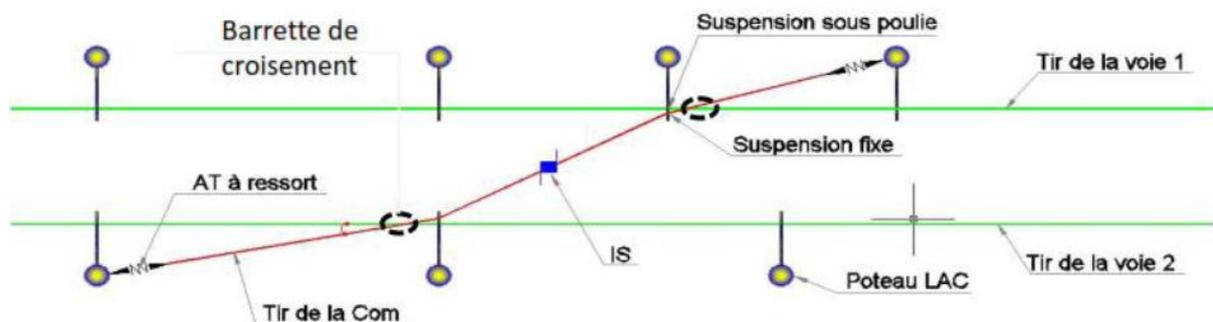


Figure III.20 : principe d'équipement croisé avec IS [14]

### III.10 Anti-cheminement

Ainsi, selon le profil de la voie, on peut observer un déplacement de la caténaire dans le sens du train (chemin positif) ou dans le sens opposé (chemin négatif) sur la longueur des blocs de pose normalisés aux deux extrémités. Le rôle de l'anti-tracking est de fixer les caténaires le long de la suspension, qui est l'axe anti-tracking [15].



Figure III. 21 : block anti-cheminement [14]

### III.10.1 Protection des installations contre les mises en charge traction

#### III.10.1.1 Parafoudre

Equipement pour une protection fiable des installations électriques associées aux lignes aériennes contre les surtensions. Des parafoudres sont installés sur les poteaux d'alimentation (poteaux électriques). Le parafoudre à utiliser est un parafoudre à vanne automatique. Chaque fois que le LAC est alimenté ou survolté, il est protégé par un paratonnerre, qui est relié par le système Patte d'Oie [14].



Figure III.22 : Parafoudre [15]

### III.10.1.2 Mis à la terre

La liaison au sol en fond de fouille est assurée par une grille de terre située dans le lit de fouille et recouverte de 50 mm de terre végétale compactée. Un câble en cuivre de section 35 mm<sup>2</sup> débouche dans l'axe du bloc de fondation et dépasse d'au moins 1,50 m au-dessus du niveau supérieur du bloc. Les prix des terrains ont été déterminés avant que cette zone ne soit réaménagée. [15].

### III.11 Conclusion

Dans ce chapitre 2, nous avons répertorié les caractéristiques et les composants du sous-système LAC, qui est la connexion entre la sous-station et le véhicule. Pour que tous les appareils du LAC fonctionnent correctement, le personnel de maintenance doit effectuer des interventions de maintenance régulières et remplacer les appareils défectueux dès que possible. Dans le chapitre 3, nous créerons un manuel de maintenance pour la caténaire de Mostaganem.

# **Chapitre****IV**

**Modélisation et simulation du système du  
tramway**

## IV.1 Introduction

La simulation est la technique consistant à convertir une conception de circuit en un modèle logiciel et à la tester avec des stimuli d'entrée et une surveillance de sortie. Dans ce chapitre, nous présentons les schémas électroniques des convertisseurs étudiés, les simulons avec les logiciels SIMULINK et Design Suite, puis présentons les différentes courbes obtenues.

## IV.2 Simulation des composants de la sous-station

Une sous-station se compose d'un groupe de transformateurs et de redresseurs (une cascade de convertisseurs DC-DC redresseurs non régulés)

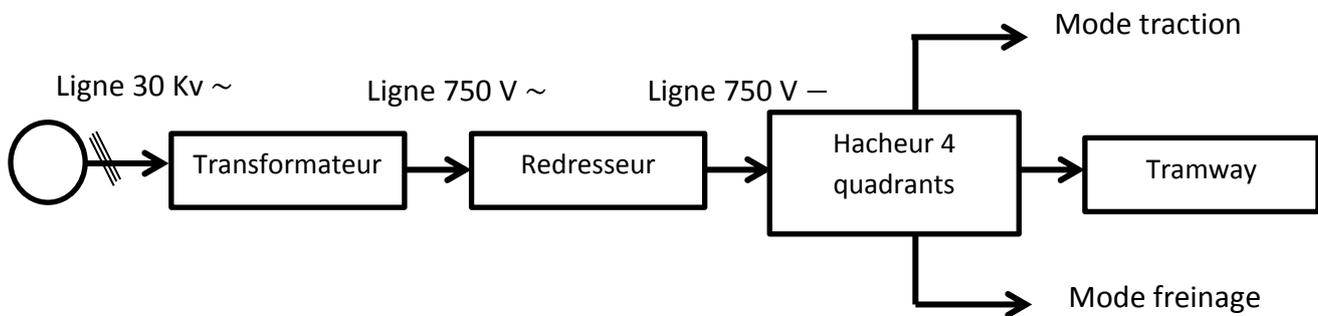


Figure IV.1 : Schéma de système global de tramway

### IV.2.1 Présentation de système globale de tramway

A partir de ligne MT triphasé, une tension de 30 KV est transformé au 750 V puis en redresse cette tension pour avoir une tension continu pour l'alimentation de la machine à courant continu (tramway), pour commander cette tension on ajoute un hacheur 4 quadrants dans les 2 sens une fois en mode traction pour varier la vitesse de tramway et en mode freinage pour l'arrêt.

## IV.2.2 Simulation du transformateur

Dans cette étude, nous simulons une transformatrice dyn avec une tension d'entrée de 30 kV et l'abaissions à 750 V.

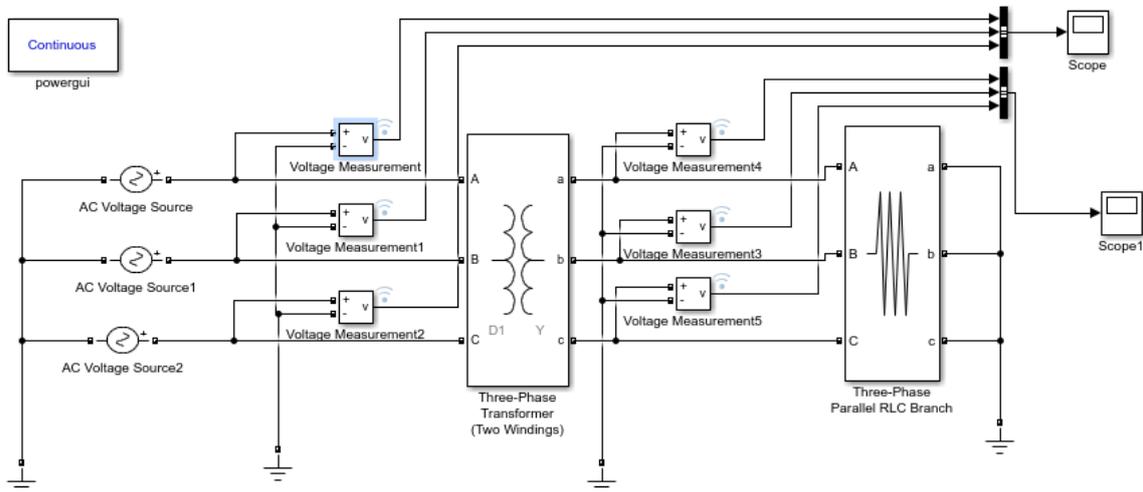


Figure IV.2 : Modèle d'un transformateur Dy.

L'exécution de la simulation donne les résultats suivants :

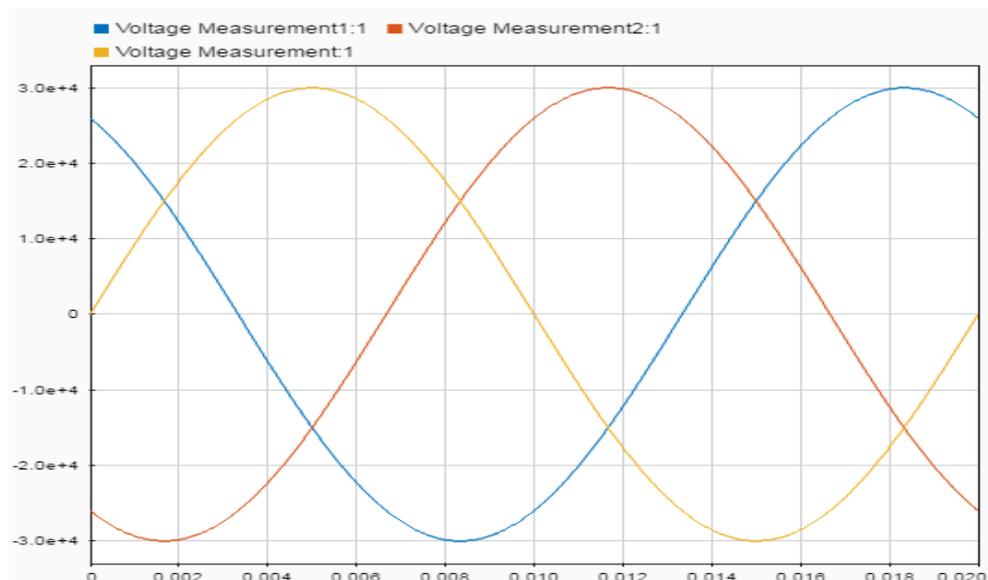


Figure IV.3: Tension primaire du transformateur.

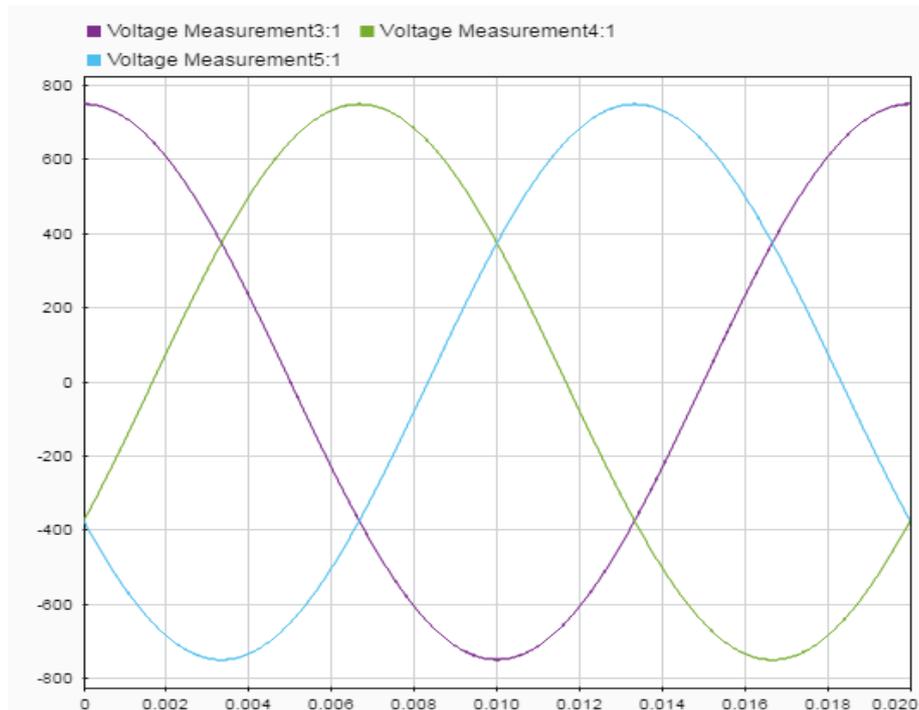


Figure IV.4: Tensions du secondaire de transformateur.

La Fig. IV.4 montre la tension de sortie du transformateur. Nous pouvons donc voir que la tension est tombée à environ 750V (comme vous pouvez le voir, c'est presque 800V).

### IV.2.3 Simulation du redresseur PD3 non commandé

Le redresseur a pour fonction de convertir la tension alternative triphasée du réseau en tension continue. En pratique, il est difficile d'obtenir une tension de sortie parfaitement continue et on obtient généralement une tension continue avec ondulation résiduelle. Cela dépend du type de technologie utilisée. Les pièces utilisées sont des diodes. Des trois configurations existantes (parallèle, double parallèle et série), seule la disposition double parallèle est

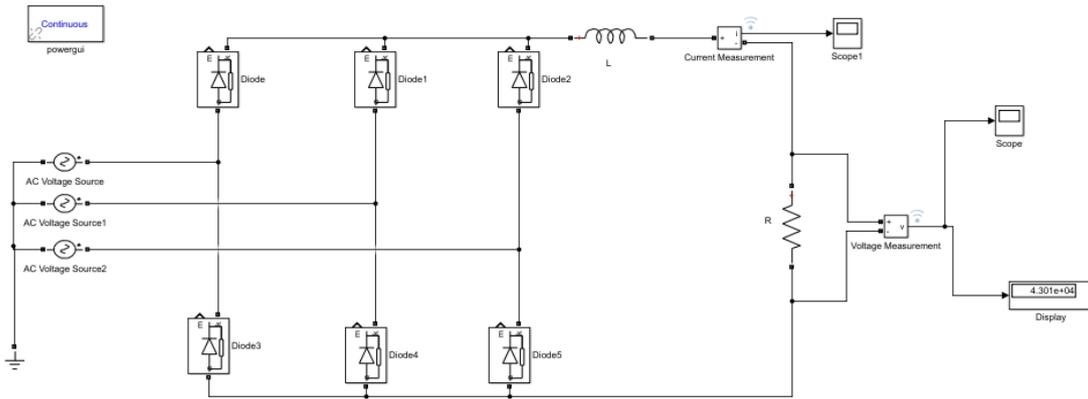


Figure IV.5: Montage d'un redresseur triphasé parallèle double PD3.

Développée dans ce chapitre. Schéma fonctionnel du redresseur PD3 :

Le schéma ci-dessus représente un pont redresseur PD3 et décrit une alimentation triphasée à l'aide des équations suivantes :

$$V_1 = V\sqrt{2} \sin (wt) \quad (2.1)$$

$$V_2 = V\sqrt{2} \sin \left( wt - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.2)$$

$$V_3 = V\sqrt{2} \sin \left( wt + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.3)$$

Avec :  $\omega = 2\pi f$

Nos redresseurs sont des redresseurs non contrôlés, de sorte que la tension de sortie moyenne ne peut pas être définie pour une tension d'entrée donnée. La tension de sortie est constituée de composantes sinusoïdales de valeur efficace  $V\sqrt{3}$ . La tension de sortie est périodique de période  $\frac{T}{6}$ . Par exemple, en calculant la moyenne lorsque les diodes (Diode) et (Diode5) sont conductrices, la tension de sortie  $V_s$  est égale à la tension  $U_{13}$  aux bornes des diodes.

Niveaux 1 et 3.

$$V_{smoy} = \frac{6}{T} \int_{-\frac{T}{12}}^{\frac{T}{12}} U_{13}(t) dt = \frac{6}{T} \int_{-\frac{T}{12}}^{\frac{T}{12}} V \sqrt{3} \sqrt{2} \cos(wt) dt \quad (2.4)$$

$$= \frac{3V_w\sqrt{3\sqrt{2}}}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{12}}^{\frac{\pi}{12}} \cos(\omega t) dt = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi} V_2 \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad (2.5)$$

Finalement on obtient :

$$V_{smoy} = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi} V = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi} 750 = 1754v \quad (2.6)$$

Donc le résultat de ce redresseur est :

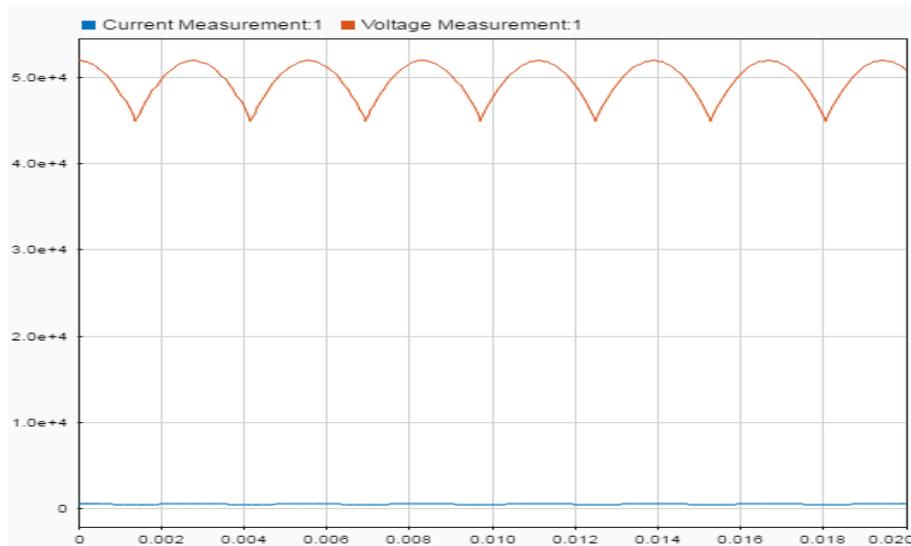


Figure IV.6: Tension de sortie redressée sans filtrage.

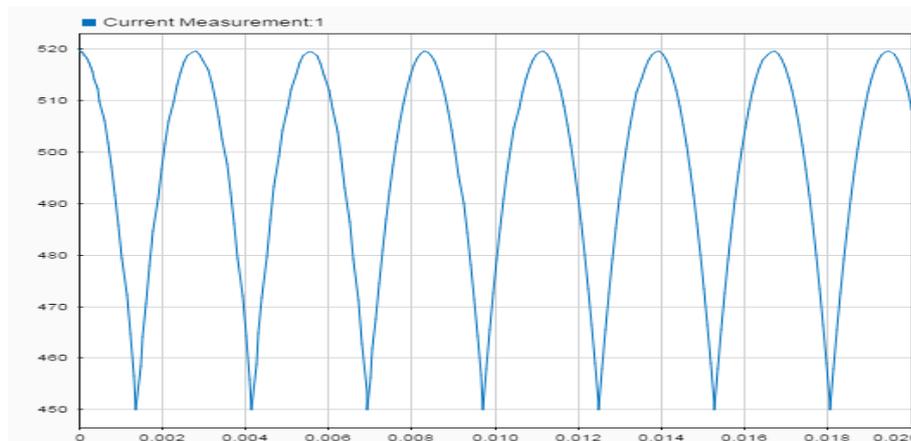


Figure IV.7: Courant de sortie redressée sans filtrage.

Comme vous pouvez le voir sur la figure ci-dessus, le signal de sortie n'est pas purement continu même s'il est redressé, il contient toujours une ondulation. Phases 1 et 3.

Pour supprimer ces ondulations du signal résultant, nous avons ajouté un condensateur pour effectuer un filtrage capacitif de la tension et une inductance pour lisser le courant (voir Figure IV.8).

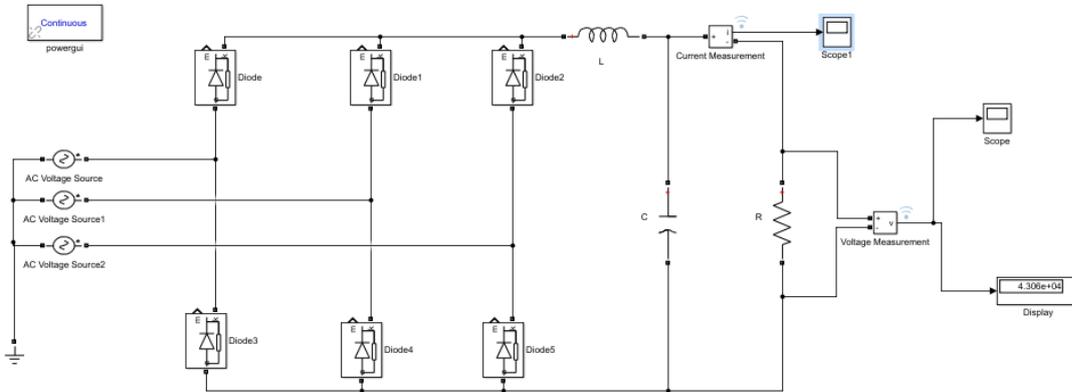


Figure IV.8: Redresseur triphasé non commandé avec filtrage capacitif.

Une capacité de  $C= 10^{-6}F$  a été ajoutée pour obtenir une tension continue filtrée. J'ai ajouté une bobine 1H pour obtenir un courant continu lisse. On obtient les tensions et courants suivants :

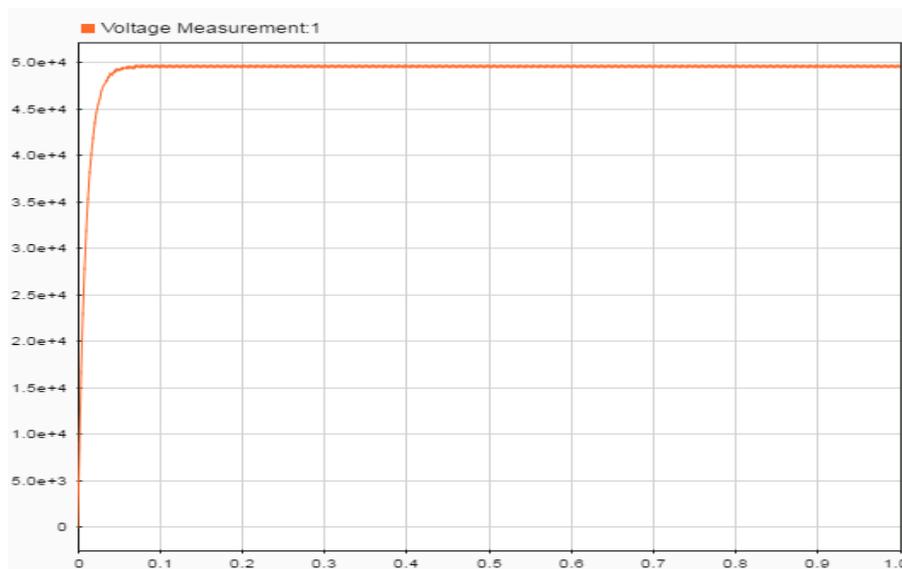


Figure v.9: Tension de sortie redressée avec filtrage.

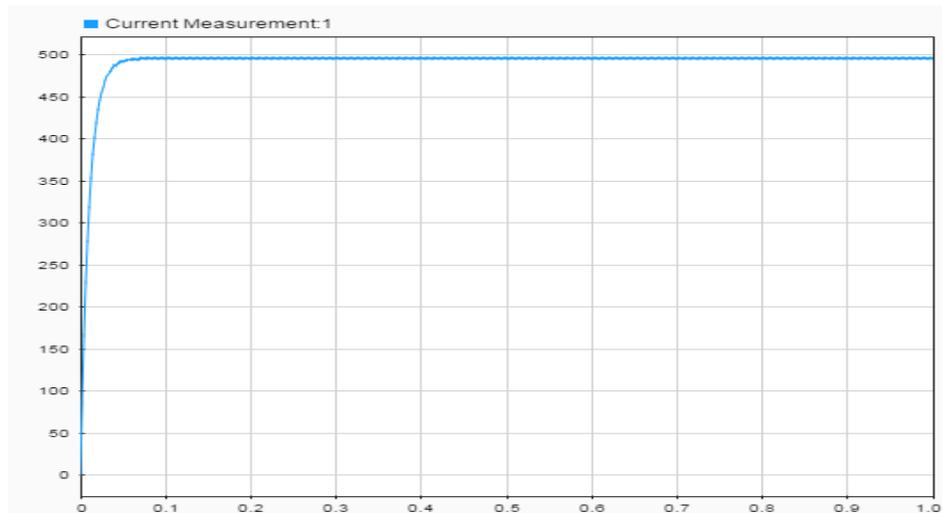


Figure IV.10: Courant de sortie redressé avec filtrage.

On constate donc que la tension redressée avec filtrage est beaucoup plus lisse par rapport à la tension redressée sans filtrage capacitif. L'ajout d'une bobine a rendu le courant plus fluide

Nous pouvons voir que la tension sortant du redresseur est de 1368V (indiquée sur l'affichage). Pour ramener cela à 750V, ajoutez un hacheur abaisseur (en série).

#### IV.2.4 Simulation de le hacheur Buck

Un convertisseur abaisseur ou hacheur série est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure. Un convertisseur abaisseur bien conçu a un rendement élevé et la capacité de réguler la tension de sortie.

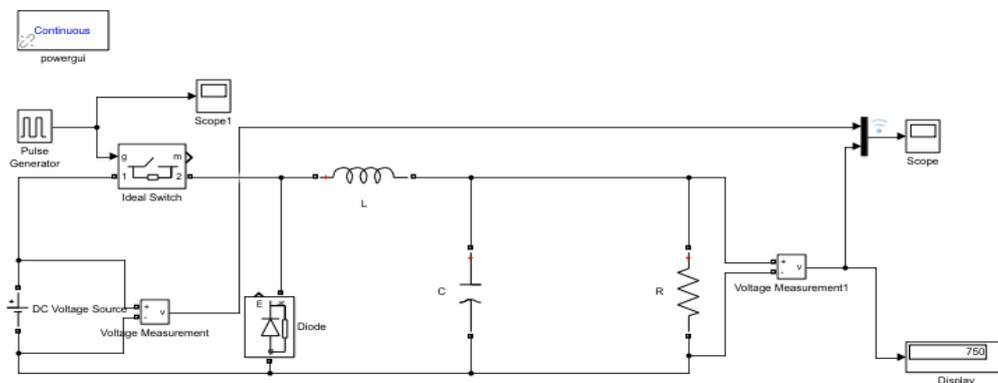


Figure IV.11: Montage d'un hacheur série.

Nous avons utilisé  $C = 10^{-6}F$  et  $L = 0,1H$  pour obtenir une tension de sortie continue avec des transitoires courts et sans ondulation. Le rapport cyclique est compris entre 0 et 1 car le temps de conduction  $T$  est compris entre 0 et 1. La conduction du commutateur et les temps d'arrêt peuvent être exprimés en fonction de  $\alpha$  et  $T$ .

- Durée de conduction :  $T_{cond} = \alpha T = 54.8\mu s$ .

- Durée de blocage :  $T_{off} = (1 - \alpha T) = 45.2\mu s$ .

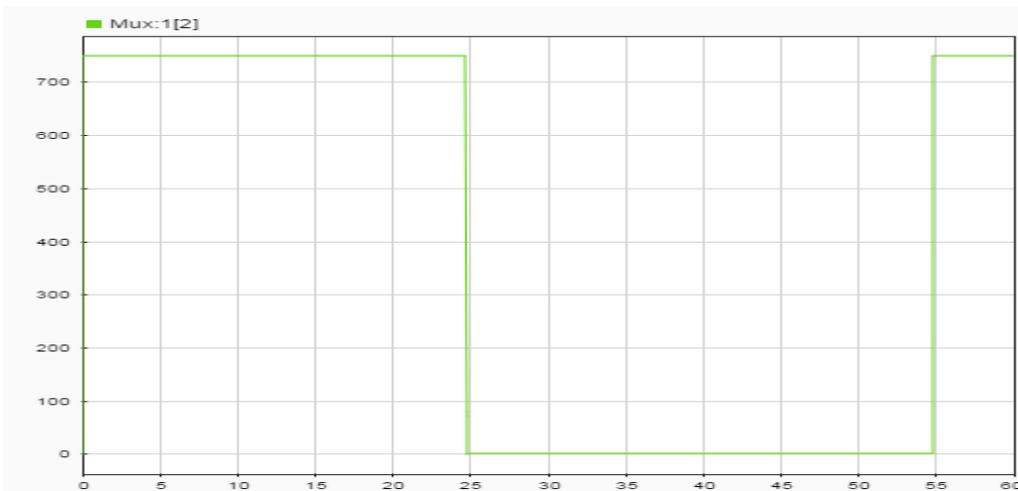


Figure IV.12: Signal de commande de l'interrupteur.

Donc on peut calculer notre rapport cyclique comme suit :

$$\alpha = \frac{T_{cond}}{T} = 0.548$$

Dans le chapitre précédent, nous avons confirmé que la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie d'un hacheur série est :

$$V_s = \alpha U$$

Donc :

$$V_s = 0.548 \times 1368 = 750V$$

La figure ci-dessous montre les tensions d'entrée et de sortie obtenues à partir d'un hacheur abaisseur.

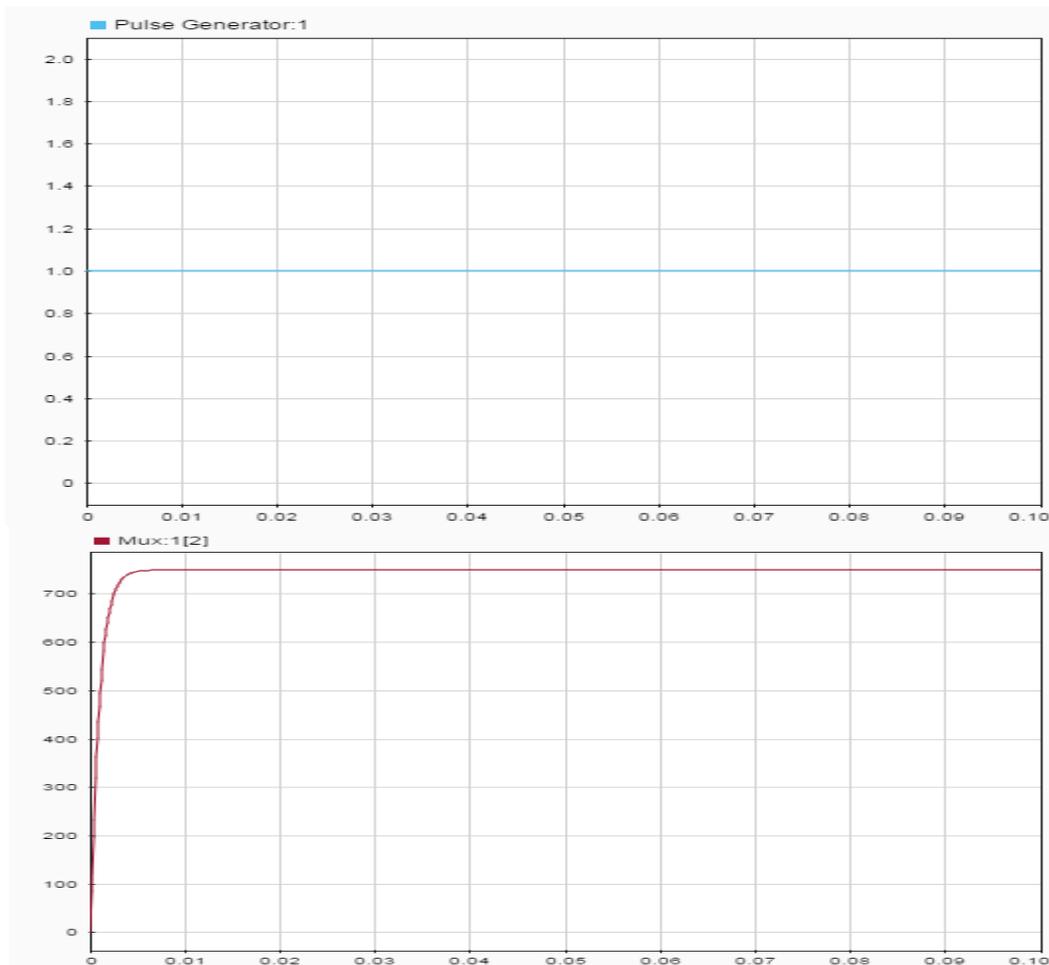


Figure IV.13: Tension d'entrée de sortie du hacheur série.

Nous pouvons donc voir que la tension est passée de 1368V à 750V. La tension de sortie est continue avec un transitoire de 0,04 seconde.

## IV.2.5 Simulation des composants du tramway

Les tramways sont principalement constitués de hacheurs rhéostatiques, d'onduleurs et de moteurs asynchrones.

### IV.2.5.1 Simulation de le hacheur rhéostatique

Pendant le remorquage, il est utilisé comme convertisseur abaisseur ou hacheur série pour abaisser la tension continue entrant dans le tramway et l'alimenter vers l'onduleur.

Dans le freinage électrique, un moteur asynchrone est utilisé comme générateur et l'onduleur agit comme un simple redresseur à diode. Cet agencement ressemble donc à un moteur à courant continu faisant office de générateur, et cette énergie de freinage est réinjectée dans le circuit de traction, entraînant la destruction de l'équipement de traction concerné.

Donc une façon de résoudre ce problème est de dissiper l'énergie renvoyée aux résistances du tram.

Via hacheur de freinage parallèle (Boost).

Le schéma ci-dessous montre l'assemblage du hacheur en mode remorquage.

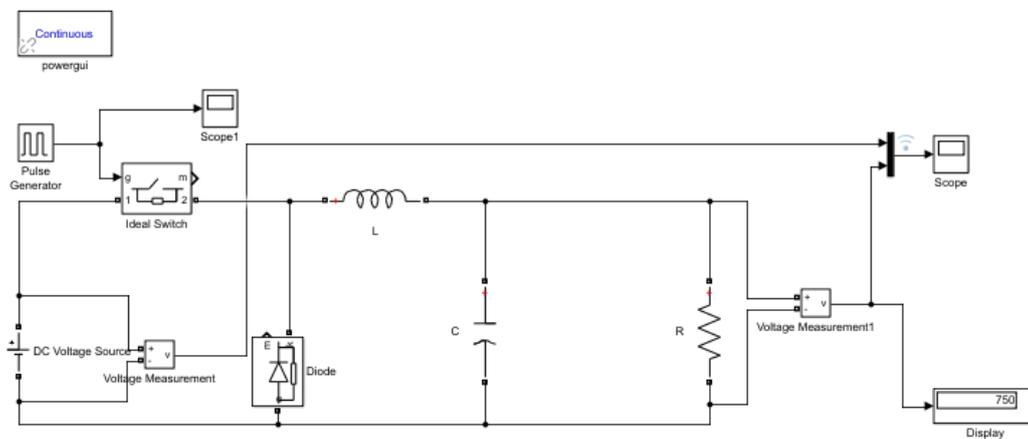


Figure IV.14: Montage du hacheur rhéostatique en mode traction

Nous avons gardé les mêmes valeurs de  $C = 10^{-6}\text{F}$  et  $L = 0.1\text{H}$ . Le rapport cyclique est compris entre 0 et 1 car le temps de conduction  $T$  est compris entre 0 et 1. La conduction du commutateur et les temps d'arrêt peuvent être exprimés en fonction de  $\alpha$  et  $T$ .

- Durée de conduction :  $T_{cond} = \alpha T = 80\mu\text{s}$ .

- Durée de blocage :  $T_{off} = (1 - \alpha T) = 20\mu\text{s}$ .

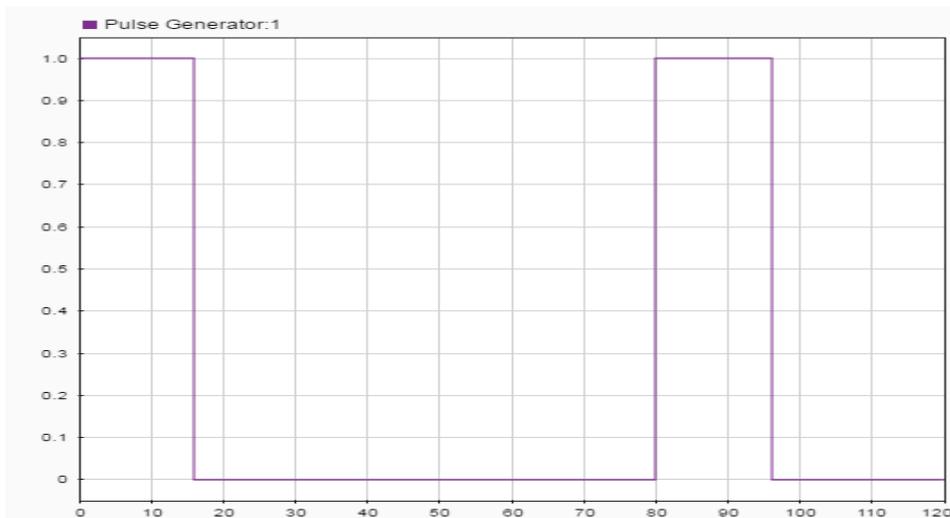


Figure IV.15: Signal de commande de l'interrupteur

On peut donc calculer le rapport cyclique comme suit :

$$\alpha = \frac{T_{cond}}{T} = \frac{80}{100} = 0.8$$

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie d'un hacheur série est :

$$V_s = \alpha U$$

Donc :

$$V_s = 0.8 \times 750 = 600V$$

La figure ci-dessous montre la tension de sortie du hacheur série tombant à 600V.

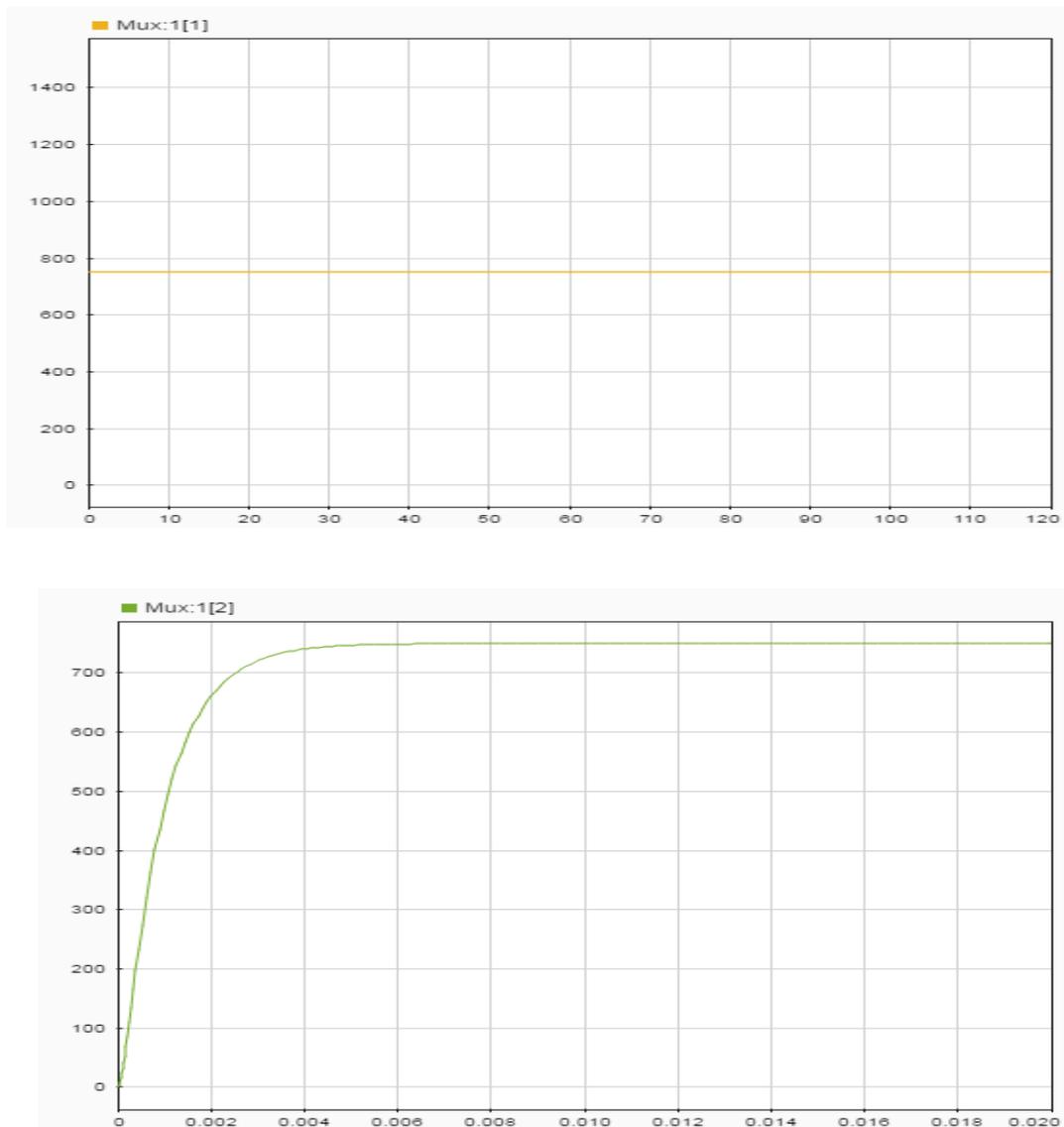


Figure IV.16 : Tension d'entrée et de sortie de le hacheur en traction

Nous pouvons donc clairement voir que la tension de sortie du hacheur est de 600V DC. Le transitoire est de 0,05 seconde.

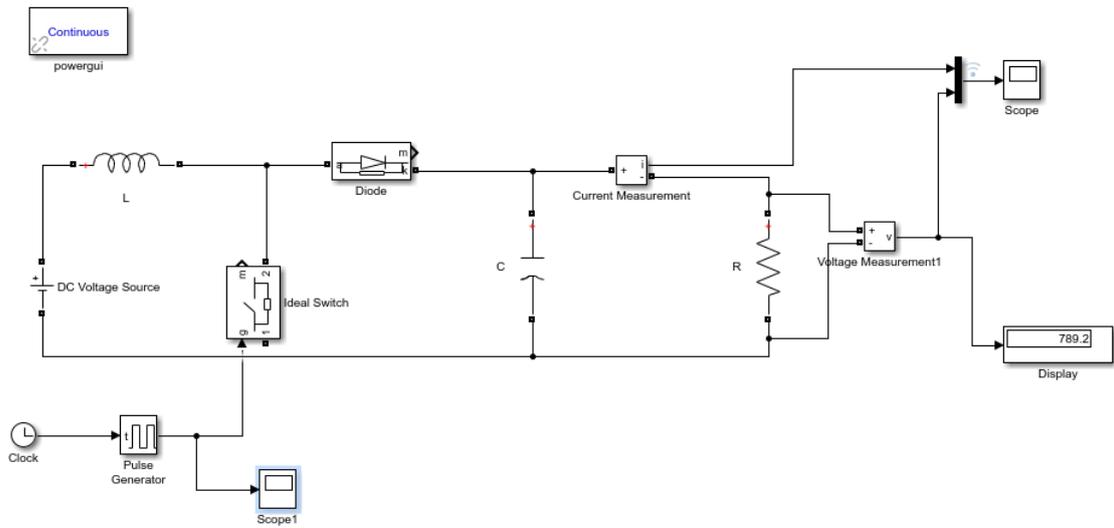


Figure IV.17: Montage du hacheur rhéostatique en mode freinage

Durée de conduction et d'interruption de l'interrupteur en fonction de  $\alpha$  et T :

- Durée de conduction :  $T_{cond} = \alpha T = 37.7 \mu s$ .
- Durée de blocage :  $T_{off} = (1 - \alpha)T = 62.3 \mu s$ .



Figure IV.18 : Signal de commande de l'interrupteur

On peut donc calculer le rapport cyclique comme suit :

$$\alpha = \frac{T_{cond}}{T} = \frac{37.7}{100} = 0.377$$

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie du hacheur parallèle est :

$$V_s = \frac{U}{1 - \alpha}$$

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie du hacheur parallèle est :

$$V_{red} = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi} v = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi} 400 = 935v$$

Donc :

$$V_s = \frac{935}{1 - 0.377} = 1500v$$

Et on obtient les valeurs de la tension et courant suivante :

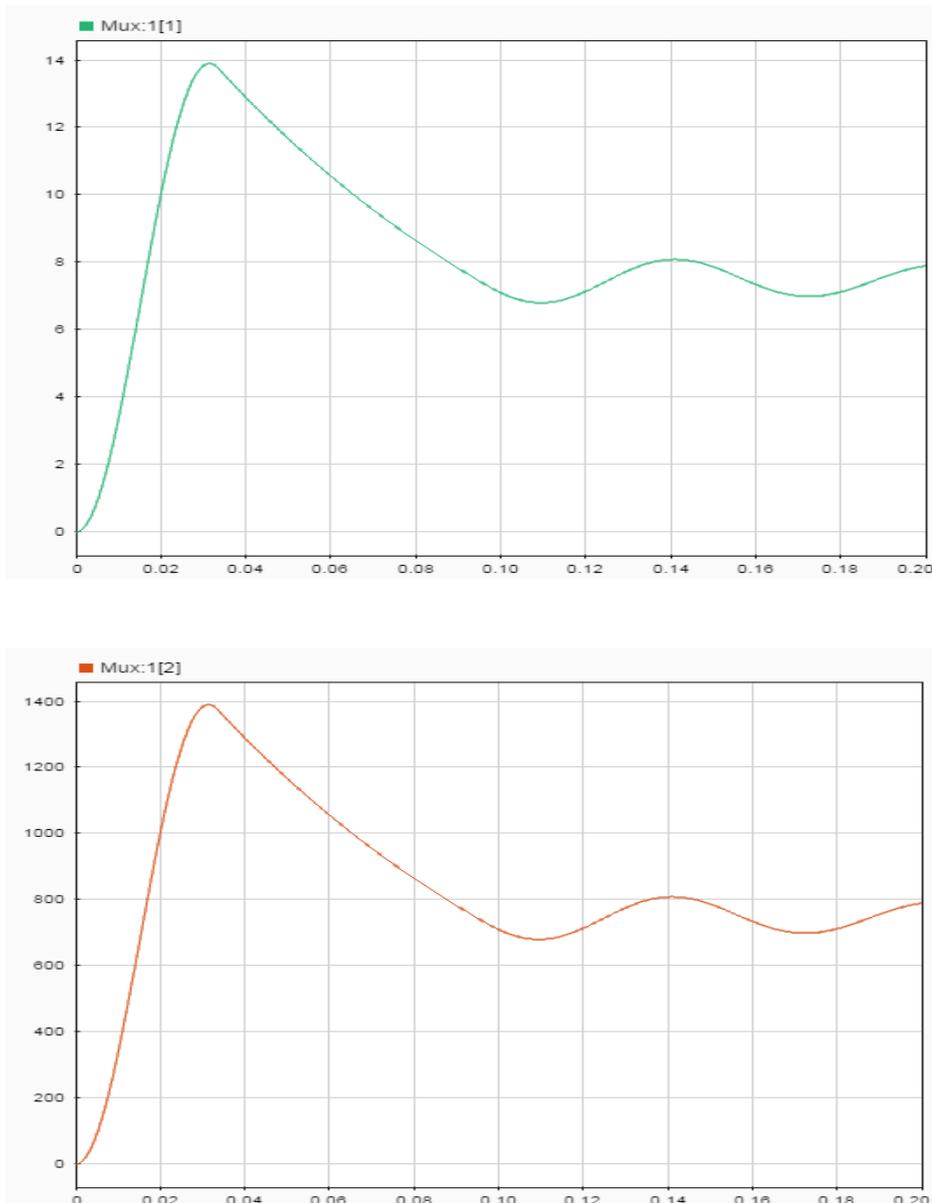


Figure IV.19 : Tension et courant de sortie du hacheur en mode freinage

D'après les chiffres, vous pouvez immédiatement voir que la tension et le courant étaient très élevés. Ou vous pouvez voir que la tension de sortie est de 1500V avec un court transitoire de 0,03 seconde.

Ainsi, comme le montre la figure, nous obtenons la dérivée de l'énergie produite à des courants élevés.

IV.3 Modélisation et simulation du système global du tramway

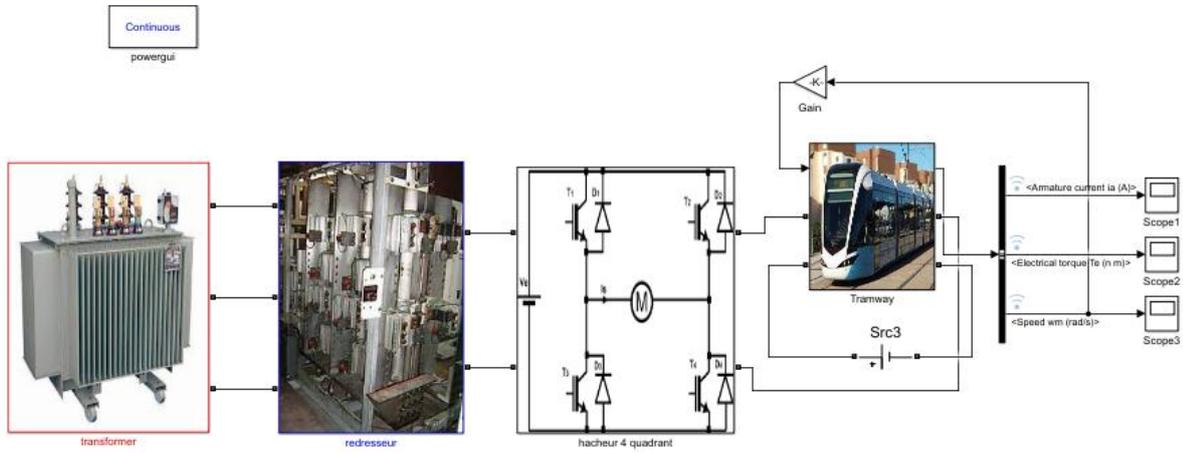


Figure IV.20: simulation de système global du tramway

IV.3.1 Mode de traction

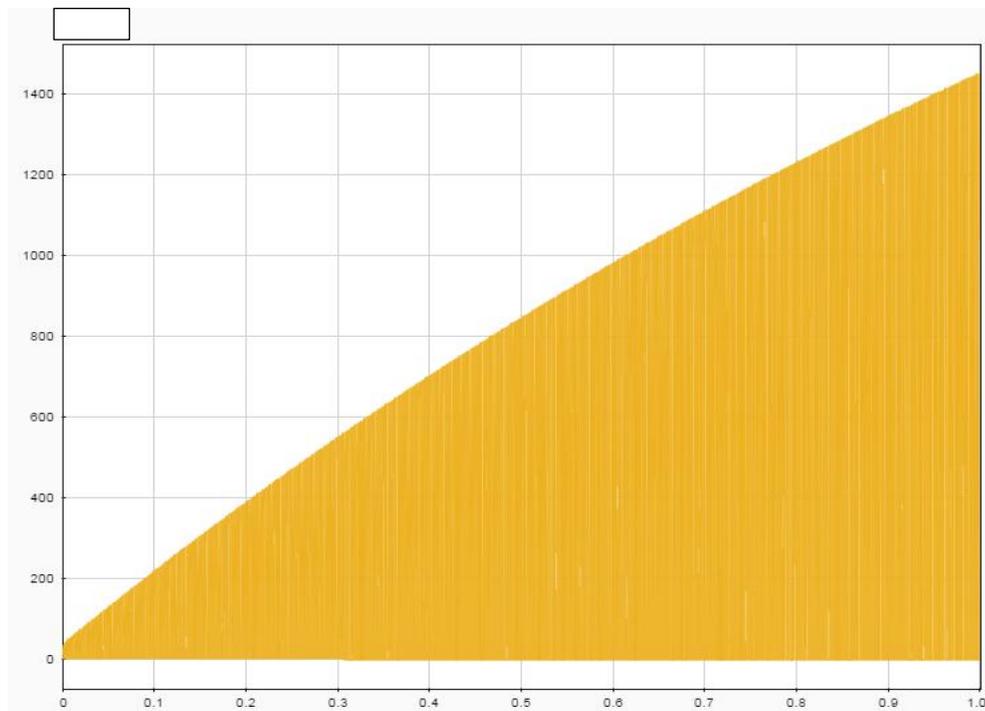


Figure IV.21 : le courant de traction

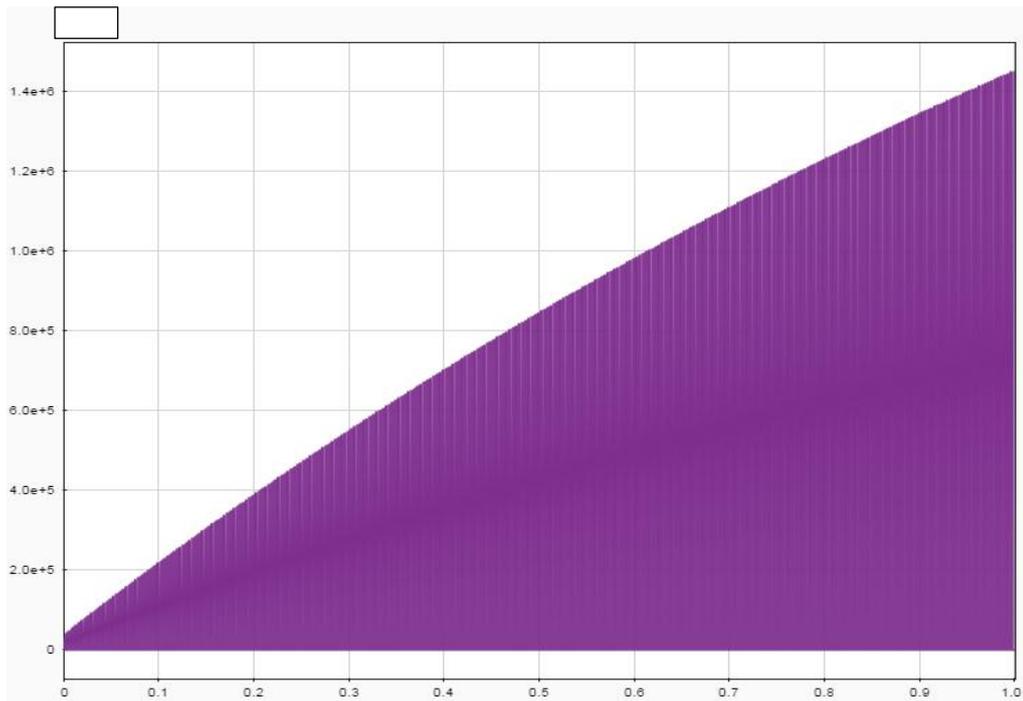


Figure IV.22: le couple de traction

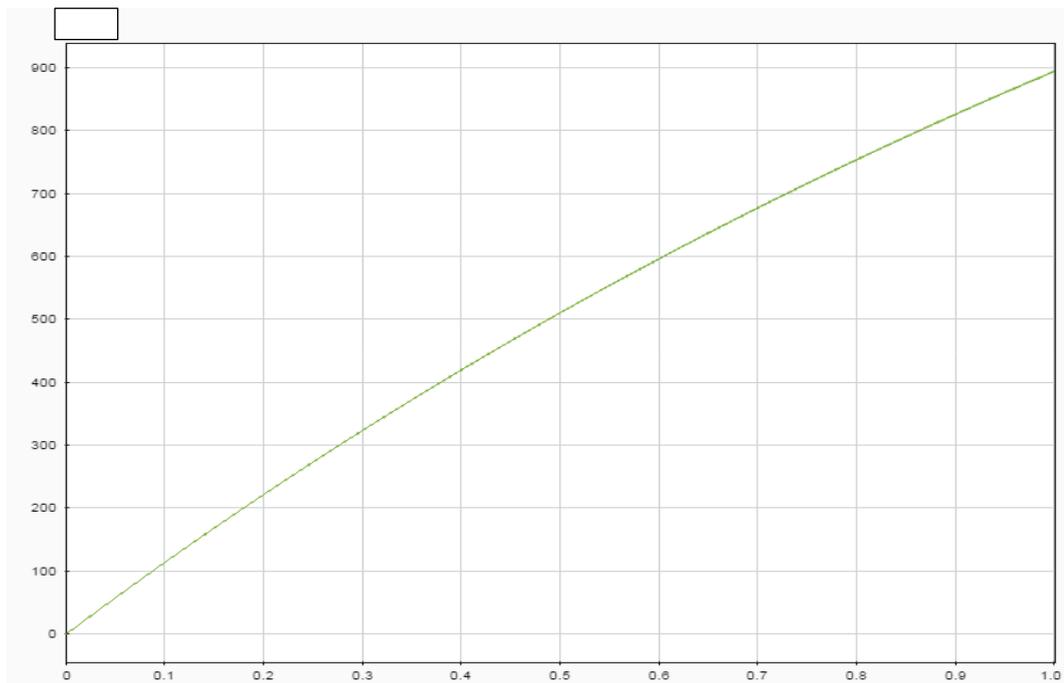


Figure IV.23: la vitesse de traction

## IV.3.2 Mode de freinage

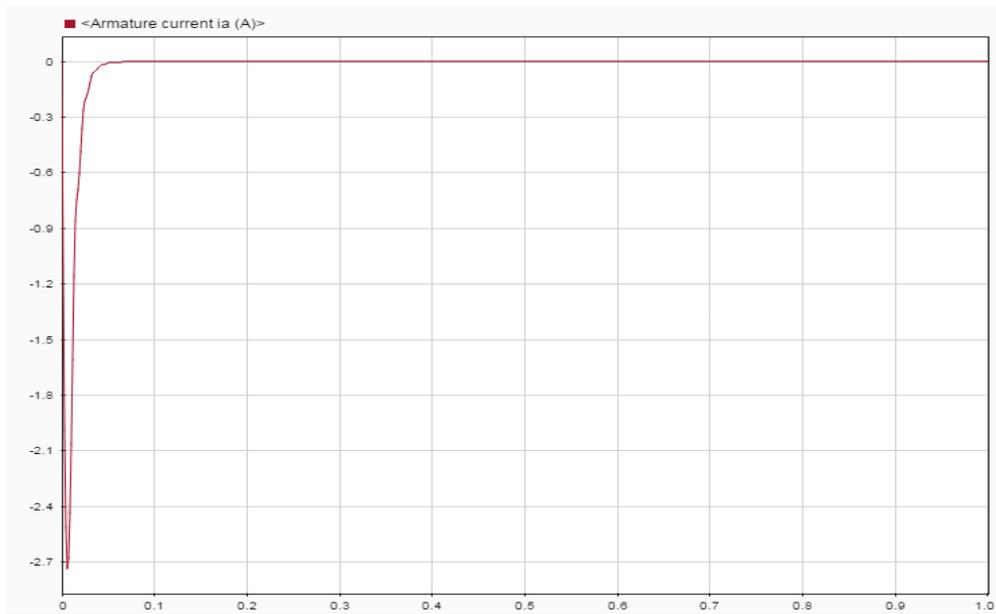


Figure IV.24: le courant de freinage

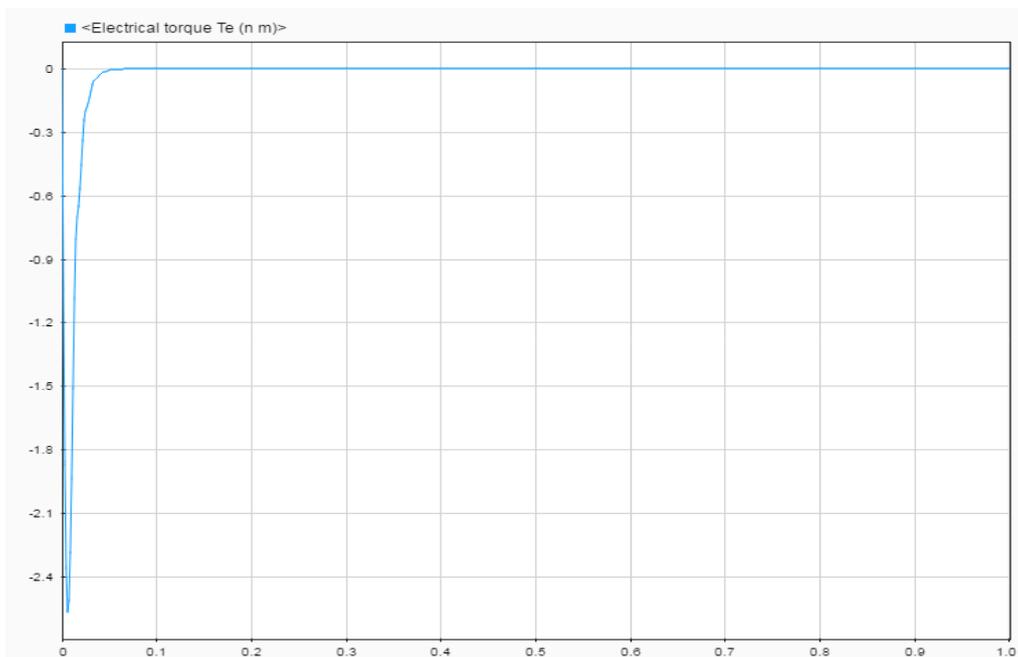


Figure IV.25: le couple de freinage

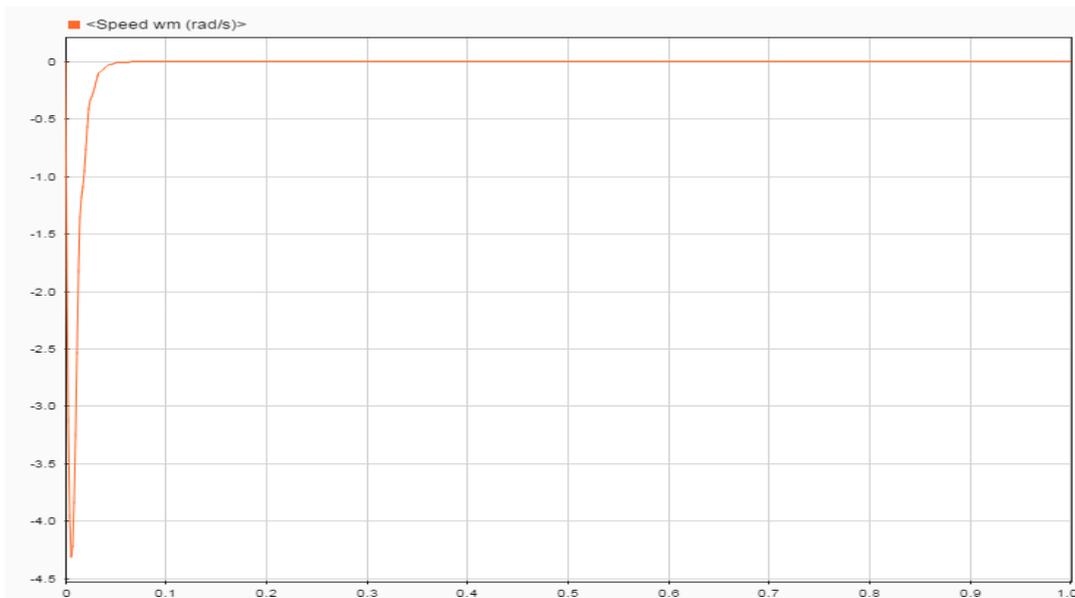


Figure IV.26: la vitesse de freinage

On remarque que la vitesse u tramway est devient négative pour un pic (0.001s) à cause de freinage de moteur après la vitesse devient nulle (arrêt de tramway).

**IV.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le logiciel de simulation (MATLAB/SIMULINK), la variation de rapport cyclique varie la tension ou borne de moteur à courant continu donc varie la vitesse de tramway et on peut aussi inverse la sens de rotation du moteur avec un hacheur 4 quadrant. Les résultats obtenus après simulation sont très encourageant.



# **Conclusion générale**

## **Conclusion Générale :**

Dans ce travail j'ai présenté l'alimentation électrique avec le réseau de traction. J'ai commencé par une représentation de haut niveau du réseau de transport et j'ai décrit l'architecture du réseau. Types de réseaux et composants de la ligne de transmission.

Dans la deuxième partie, nous définissons le système marin et introduisons ces propriétés et composants.

J'ai terminé mon travail par une simulation de sous stations et une simulation des composant de tramway. En détectant la commande et l'analyse harmonique du système d'alimentation

Enfin, ce travail est le résultat d'un stage dans la gestion du projet Mostaganem. Mon stage court a été un enrichissement, tant sur le plan professionnel que personnel, j'ai pu vivre l'expérience et comprendre et trouver ma future vocation et le domaine dans lequel je souhaiterais m'orienter.

## Références Bibliographiques :

### Chapitre I :

- [1] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Reseau-electrique.html>
- [2] <https://www.semanticscholar.org/paper/ARCHITECTURES-DES-R%C3%89SEAUX-DE-DISTRIBUTION-DU-FUTUR-Alvarez-H%C3%A9rault/19331a674e010d80df2dec459e65dd1532c413da>
- [3] SIEMENS, « **Power Engineering Guide - Transmission and Distribution** » 4th Edition, 2005.
- [4] J.M. DELBARRE, « **Postes à HT et THT - Rôle et Structure** », Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique, D 4570, 2004.
- [5] M. ZELLAGUI, « **Etudes des protections des réseaux électriques MT (30 & 10kV)** », Mémoire de Magistère en Electrotechnique, UniversitéMentouriConstantine, 2010.
- [6] Groupe Sonelgaz, XD, « **Guide Technique de Distribution** », Document technique de Groupe SONELGAZ, 1984.
- [7] Schneider Electric, « **Architecteur de Réseau de Distribution** », 2007.
- [8] VALENTIN CRASTAN «Les réseaux d'énergie électrique2» Edition LAVOISIER. Année2006.
- [9] VALENTIN CRASTAN «Les réseaux d'énergie électrique1» Edition LAVOISIER. Année2006.
- [10] [file:///C:/Users/pc/Downloads/CHAP4%20postes%20electrique%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/pc/Downloads/CHAP4%20postes%20electrique%20(1).pdf)
- [11] <http://fr.coppercanada.ca/videos-publications/publications/pub23/23e-section3.html>
- [12] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/problematiques-communes-des-reseaux-electriques-ingenierie-42267210/lignes-aeriennes-materiels-d4422/>
- [13] : MICHEL CRAPPE « **Commande et régulation des réseaux électriques** » Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.

## Chapitre II et Chapitre III:

- [1] H.DAHAR et Y.BEKARA. :modélisation et simulation du réseau du tramway. Mémoire de Master ,Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, 2020.
- [2]: ERIC M. : Modélisation d'un réseau électrique de tramway(du composant au système). thèse de doctorat , Université Joseph-Fourier-Grenoble, 2005.
- [3] M.BENSALAH et H.MHARZI et A.ELOUADI. : Building information modeling pour des applications ferroviaires (conception d'une sous-station de tramway). Thèse de doctorat ,Université d'Ibn Tofail, 2018
- [4] G.MULLER. : Traction ferroviaire : les tramways : Systèmes, exploitation et conception. journal Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, 2007
- [5] R.VIAL. : Vers un dimensionnement optimal structure-commande de système multiconvertisseurs. : Application aux réseaux de tramways. thèse de doctorat , Université de Grenoble, 2012.
- [6]. J.FABRE. : Etude et mise en oeuvre de modules de puissance mosfet sic pour leurs futures utilisations dans des convertisseurs ferroviaires. thèse de doctorat , Institut National Polytechnique de Toulouse, 2013.
- [7]. K.HARICHLI. J.MAKIK. : Spécification d'alimentations externes pour équipements du tramway. Mémoire de Master, Université Sidi Mohammed Ben Abdellahr, 2014.
- [8] Catalogue de vonroll-hydro.world ,courants vagabonds – "la solution" ,2005.
- [9] Document alstom : Support de formation a la chain de traction 2013.
- [10] R.VIAL. : Vers un dimensionnement optimal structure-commande de système multiconvertisseurs. : Application aux réseaux de tramways. thèse de doctorat , Université de Grenoble, 2012.
- [11] M.BENSALAH et H.MHARZI et A.ELOUADI. : Building information modeling pour des applications ferroviaires (conception d'une sous-station de tramway). Thèse de doctorat ,Université d'Ibn Tofail, 2018.
- [12] <https://www.setram.dz/site/fr/content/tramway-de-mostaganem>
- [13] : Spécification fonctionnelle de traction -tramway de Mostagnem
- [14] : spécification générale LAC
- [15] : Document Maintenance LAC tramway de Setif.