

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département Électrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Électrotechnique

Etude et analyse des défauts de la chaîne de traction tramway et
proposition des améliorations

TOUAIT ABDELKADER

Sous la direction de **M. Youcef Azzoug** CITAL
Pr. Kamel Boughrara ENP

Présenté et soutenu publiquement le (29/06/2022)

Composition du jury :

Président :	A. Hellal	Pr.	ENP
Promoteurs :	M.Y.Azzoug	Ing.	CITAL
	K. Boughrara	Pr.	ENP
Examineurs :	L. Nezli	Pr.	ENP

ENP 2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département Électrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Électrotechnique

Etude et analyse des défauts de la chaîne de traction tramway et
proposition des améliorations

TOUAIT ABDELKADER

Sous la direction de **M. Youcef Azzoug** CITAL
Pr. Kamel Boughrara ENP

Présenté et soutenu publiquement le (29/06/2022)

Composition du jury :

Président :	A. Hellal	Pr.	ENP
Promoteurs :	M.Y.Azzoug	Ing.	CITAL
	K. Boughrara	Pr.	ENP
Examineurs :	L. Nezli	Pr.	ENP

ENP 2022

Remerciements

Je tiens tout d'abord témoigner ma reconnaissance à monsieur K.Bouhrara et monsieur Y.Azzoug pour leur suivi rigoureux et leur grande disponibilité. Je leur présente également mes remerciements pour leurs judicieux conseils et orientations.

Mes sincères remerciements vont également à M. Madjid TEGUAR Professeur à l'ENP. Une personne altruiste qui n'a jamais hésité à nous proposer son aide précieuse tout le long de mon projet.

Je remercie particulièrement Mr. A. Hellal professeur à l'ENP, qui me fait l'honneur de présider ce jury, ainsi que Mr.L. Nezli professeur à l'ENP, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je présente ma profonde gratitude et reconnaissance à mes chers parents pour leurs chaleureux encouragements, leurs sacrifices inestimables et leur grande confiance.

Finalement, mes vifs remerciements vont à l'ensemble de mes enseignants et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

ملخص : يُخدم خط الترامواي تكتل المنطقة الشرقية من الجزائر العاصمة التي تربط محطة "المعدومين" متعددة الوسائط بمحطة درقانة، وتضمن شركة (CITAL) صيانة هذا الأخير منذ بداية المشروع وتواجه مجموعة كبيرة من المشاكل في صيانة تركيبات الجر الكهربائي، تهدف هذه المذكرة إلى دراسة مشروع ترامواي الجزائر بشكل عام وتزويد محرك الجر والتحكم فيه بشكل خاص، مع الإشارة إلى المسار الذي تأخذه الطاقة من المصدر عبر المحولات إلى المحرك. يستخدم عاكس مصدر الجهد بشكل شائع لتزويد محرك تحريضي ثلاثي الطور بتردد متغير وجهد متغير لتطبيقات السرعة المتغيرة. يتم استخدام تقنية مناسبة لتعديل عرض النبضة للحصول على جهد الخرج المطلوب في جانب خط العاكس. في طريقة التحكم التفاعلي، يتم توفير متجه جهد مرجعي دوار كمرجع جهد بدلاً من موجات تعديل ثلاثية الطور. يتم التحكم في حجم

الكلمات الدالة: أونيكس، العاكس، الجر، الترام، سيتاديس، تحليل الأعطال.

Abstract : The EAST line of the tramway serves the agglomeration of the eastern region of Algiers connecting the multimodal station of "Ruisseaux" to the station DERGANA. The CITAL company ensures the maintenance of this last one since the beginning of the project and is confronted with a broad panel of problems of maintenance of its installations of electric traction, this memory has for objective to study the project of the tramway of Algiers in general and the supply and the control of the motor of traction in particular, while indicating the way that the energy takes from the source while passing by the converters until the motor. A voltage source inverter is commonly used to power a three-phase variable frequency, variable voltage induction motor for variable speed applications. An appropriate pulse width modulation (PWM) technique is used to obtain the required output voltage on the line side of the inverter. In SVPWM methods, a rotating reference voltage is provided as a voltage reference instead of three-phase modulating waves. Subsequently, there are several methods to detect faults in the string and detail them in the string faults.

keywords : Onix, Inverter, Traction, Tramway, Citadis, Fault analysis

Résumé : La ligne EST du tramway dessert l'agglomération de la région est d'Alger reliant la station multimodale de « Ruisseaux » à la station DERGANA. L'entreprise CITAL assure la maintenance de ce dernier depuis le début du projet et se trouve confronté à un large panel de problématiques de maintenance de ses installations de traction électrique. Ce mémoire a pour objectif d'étudier le projet du tramway d'Alger en générale et l'alimentation et la commande du moteur de traction en particulier, tout en indiquant le chemin que prend l'énergie de la source en passant par les convertisseurs jusqu'au moteur. Un onduleur de source de tension est couramment utilisé pour alimenter un moteur à induction triphasé à fréquence variable et tension variable pour les applications à vitesse variable. Une technique de modulation de largeur d'impulsion (PWM) appropriée est utilisée pour obtenir la tension de sortie requise du côté ligne de l'onduleur. Dans les méthodes SVPWM, une tension de référence tournante est fournie comme référence de tension au lieu d'ondes modulantes triphasées. Par la suite, il y a plusieurs méthodes pour détecter les pannes dans la chaîne et détailler dans les défaillances de ces dernières.

Mots clés : Onix, Onduleur, Traction, Tramway, Citadis, Analyse des défauts

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des abreviations

Introduction générale	11
1 Évolution de la chaîne de traction	13
1.1 Introduction	14
1.2 Présentation d'entreprise	14
1.3 Dates imminentes de l'histoire de la traction électrique	15
1.4 Historique de la traction électrique ferroviaire	15
1.4.1 Chemin ferroviaire	15
1.4.2 Traction électrique	16
1.5 Description du tramway <i>Alstom CITADIS 402</i>	20
1.5.1 Description technique du matériel roulant	20
1.5.2 Principales caractéristiques du véhicule	20
1.5.3 Les compartiment et architecture de la rame	21
1.6 Conclusion	21
2 Etude de la chaîne de traction-freinage	22
2.1 Introduction	23
2.2 Alimentation	23
2.2.1 Besoins de la rame en électricité	23
2.2.2 Le système d'alimentation	24
2.2.3 Infrastructures (sous-station)	25
2.2.4 Sectionneur d'isolement	29
2.3 Dynamique ferroviaire de la traction électrique	30
2.3.1 Efforts nécessaires en marche	30
2.3.2 L'adhérence	31
2.3.3 Caractéristique effort/vitesse	31
2.4 La chaîne de traction	32
2.4.1 Architecture générale de la fonction traction-freinage	33
2.5 Équipements de la chaîne de traction-freinage	34
2.6 Implantation des équipements de la chaîne	35
2.7 Description et fonctionnement des équipements de la chaîne	37
2.7.1 Le pantographe	37
2.7.2 Le parafoudre	38

2.7.3	Le coffre disjoncteur principal	40
2.7.4	Le coffre équipements traction-freinage ETF	42
2.7.5	L'AGATE control	49
2.7.6	Le manipulateur	51
2.7.7	Le GRF	53
2.7.8	Le bogie moteur	56
2.8	Conclusion	70
3	Analyse des défauts de la chaine de traction-freinage	71
3.1	Introduction	72
3.2	Maintenance chez <i>Cital</i>	72
3.3	Méthode d'analyse	73
3.3.1	Méthode abc	73
3.3.2	Le coefficient de Gini	74
3.4	Étude des défauts des équipements	74
3.5	Diagnostic	77
3.6	Module onduleur Onix	79
3.6.1	Modélisation de onix 808	79
3.6.2	Analyse fonctionnelle	81
3.7	Conclusion	82
4	Interprétation des résultats	84
4.1	Introduction	85
4.2	Les résultats de simulation	85
4.3	Résultat des test	87
4.3.1	Test de circuit de commande	87
4.3.2	Test de circuit de puissance	88
4.3.3	Teste du filtre	89
4.4	Solution	89
4.5	Conclusion	90
	Conclusion générale	91
	Bibliographie	94
	Annexes	96

Liste des tableaux

2.1	Organes de l'alimentation électrique de la rame	24
2.2	Caractéristiques techniques du SBE 922-V2.	37
2.3	Caractéristiques électriques et mécaniques du parafoudre[14]	39
2.4	Caractéristique Disjoncteur [9]	41
2.5	Dimensions du coffre ETF	43
2.6	ONIX 808, schéma de principe.	48
2.7	Caractéristiques du coffre ONIX	48
2.8	Caractéristiques du rhéostat de freinage	49
2.9	Caractéristiques de l'AGATE control	50
2.10	Positions du manipulateur et zones de traction	53
2.11	Caractéristiques électriques et mécaniques du moteur.	59
2.12	Caractéristiques mécaniques du moteur	60
2.13	Paramètres du schéma équivalent du moteur	61
2.14	Caractéristiques de roue dentée	65
2.15	Caractéristique du capteur	65
2.16	Caractéristiques générales du freinage	67
3.1	Le nombre des panne de sous syteme trac-frein	75
3.2	Les zones ABC et la saison (2016-2022)	76
3.3	Diagnostic de Zone A	78
3.4	Les Secteurs de la commande	81

Table des figures

1.1	Répartition des employés	14
1.2	Principe d'une chaîne de traction ancienne à tension continue.	16
1.3	Principe d'une chaîne de traction ancienne à tension monophasée et moteur direct.	17
1.4	Chaîne de traction ancienne à tension monophasée et redresseur	17
1.5	Schéma de principe d'une chaîne de traction actuelle bi-tension.	19
2.1	Ligne aérienne de contact.	25
2.2	Schéma des équipements de la sous-station	26
2.3	Vision globale d'un réseau d'alimentation électrique de tramway doté d'une LAC	28
2.4	Les deux modes de moteur	29
2.5	Organigramme de la chaîne de traction.	33
2.6	Composition de la chaîne de traction [12]	35
2.7	Implantation des équipements de la chaîne de traction	35
2.8	Emplacement des équipements de la chaîne de traction sur la rame	36
2.9	Schéma de puissance de la chaîne de traction	36
2.10	Pantographe monobras.	37
2.11	Composants structurels du pantographe.	38
2.12	Parafoudre	39
2.13	Courbe caractéristique du parafoudre	39
2.14	Coffre disjoncteur principal.	40
2.15	Disjoncteur.	40
2.16	Le circuit de précharge.	42
2.17	Les capteurs de tension.	42
2.18	Coffre ETF.	43
2.19	Équipements du coffre ETF.	43
2.20	Schéma synoptique du coffre ETF	44
2.21	Schéma synoptique puissance.	44
2.22	Circuit d'entrée.	45
2.23	Sectionneur d'isolement.	45
2.24	Court-circuiteur.	46
2.25	Filtres.	46
2.26	Ventilateur.	46
2.27	ONIX 808.	47
2.28	Rhéostat de freinage.	49
2.29	L'AGATE control.	49
2.30	Schéma des connexions de l'AGATE control	50

2.31	Schéma détaillé avec coupe transversale du manipulateur.	52
2.32	Schéma de fonctionnement du potentiomètre.	52
2.33	Différentes zones des positions du manipulateur	53
2.34	Constituants du GRF5.	54
2.35	Schéma hydraulique du circuit de refroidissement.	55
2.36	Vue éclatée du circuit de refroidissement des moteurs	56
2.37	Bogie moteur ARPEGE 4 HGA 1433.	56
2.38	Photo du moteur + plaque signalétique.	61
2.39	Schéma équivalent du moteur.	61
2.40	Schéma du moteur 4 HGA 1433.	63
2.41	Coupe transversale du moteur 4 HGA 1433.	64
2.42	Stator bobiné coupe transversale.	64
2.43	Capteur de vitesse et son emplacement sur le moteur	65
2.44	Mode de fonctionnement du freinage électrodynamique.	68
2.45	Frein à friction	69
2.46	Frein électromagnétique	70
3.1	Courbe de Lorenz (2016-2022)	77
3.2	La partie Onduleur/Hacheur	79
3.3	Vecteur d'espace V_s	80
3.4	Block Onduleur-Hacheur	81
3.5	Schéma teste IGBT	82
4.1	Angle et secteur.	85
4.2	Signaux de modulation.	85
4.3	Signaux de commande.	86
4.4	Tension de sortie d'onduleur	86
4.5	Les courant de sorties d'onduleur	86
4.6	Le THD des courants de sortie	87
4.7	Carte de commande	87
4.8	Test IGBT	88

Liste des abréviations

AEL	ARMOIRE ELECTRIQUE
AGATE	ADVANCED GEC ALSTHOM TRACTION ELECTRONICS
BP	BOUTON POUSSOIR
BT	BASSE TENSION
C1	CAISSE 1
C2	CAISSE 2
CC	CAISSE CENTRALE
CCE	HARGE EN CAPACITE EXCEPTIONNELLE
CCM	HARGE EN CAPACITE MAXIMALE DU VEHICULE
CCN	HARGE EN CAPACITE NORMALE DU VEHICULE
CEI	COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
CVS	CONVERTISSEUR STATIQUE
DJC	DISJONCTEUR PRINCIPAL
ECF	ELECTRONIQUE DE COMMANDE DE FREINAGE
EL4	CAPACITE CONFORT A 4 VOYAGEURS DEBOUT/M ²
EL6	CAPACITE CONFORT A 6 VOYAGEURS DEBOUT/M ²
EL8	CAPACITE CONFORT A 8 VOYAGEURS DEBOUT/M ²
ELE	TRAMWAY EN ETAT DE MARCHE SANS VOYAGEUR A BORD
EMC _o	EMETTEUR DE CONSIGNE
EN	NORME EUROPEENNE
EPR	ESSAIS A PUISSANCE REDUITE
ETF	EQUIPEMENT DE TRACTION FREINAGE
FDMS	FIABILITE – DISPONIBILITE – MAINTENABILITE – SECURITE
FIP	RESEAU INFORMATIQUE « FACTORY INSTRUMENTATION PROTOCOL »
FMS	FREINAGE MAXIMUM DE SERVICE
FS	FREINAGE DE SECURITE

LISTE DES ABRÉVIATIONS

FU	FREINAGE D'URGENCE
GPS	GLOBAL POSITIONING SYSTEM
GRF	GROUPE DE REFROIDISSEMENT FORCE
GTO	GATE TURN OVER
HT	HAUTE TENSION
IGBT	INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR
LAC	LIGNE AERIENNE DE CONTACT
M1	MOTRICE 1
M2	MOTRICE 2
MESD	MODULE ENTREES SORTIES DEPORTEES
MOSFET	METAL OXIDE SILICON FIELD EFFECT TRANSISTOR
MRF	MATERIEL ROULANT FERROVIAIRE
MRO	MATERIEL ROULANT
MT	MOYENNE TENSION
NFF	NORME FRANÇAISE FERROVIAIRE
NM	NACELLE MOTRICE
NP	NACELLE PORTEUSE
PCC	POSTE DE CONTROLE CENTRALISE
PK	POINT KILOMETRIQUE
PMR	PERSONNE A MOBILITE REDUITE
QDI	RELAIS DIFFERENTIEL D'INTENSITE
SAE	SYSTEME D'AIDE A L'EXPLOITATION
SD	SECOURS DETRESSE
SIE	SYSTEME INFORMATIQUE EMBARQUE
UD1N	UNITE DEPOSABLE DE PREMIER NIVEAU
UTF	UNITE DE TRAITEMENT FONCTIONNEL
VOM	VEHICULE EN ORDRE DE MARCHE (A VIDE AVEC LE CONDUCTEUR)

Introduction générale



Dans le domaine du transport, notamment le transport ferroviaire, pour analyser le processus, nous adoptons une vision large de la production ferroviaire dans son ensemble et de sa complexité.

L'étude d'une chaîne de traction électrique de tramway nécessite une vision et une connaissance du système dans son intégralité. Nous nous proposons dans ce mémoire d'étudier le tramway d'Alger et plus précisément le modèle de la Citadis 402 d'Alstom, qui utilise de nouvelles technologies qui ont permis l'exploitation des performances des moteurs asynchrones.

Dans le premier chapitre on va expliquer la chaîne de traction et son évolution en générale. En plus de la présentation de la rame Citadis 402 d'Alstom.

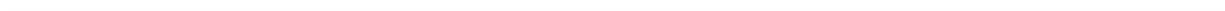
Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons à la phase de conception de la chaîne de traction. Il s'agit d'une étape qui nous permet de prédimensionner les composants en prenant des décisions importantes concernant des composants tels que les transmissions, les machines électromécaniques, l'électronique de puissance et les batteries. La conception individuelle de ces composants ne garantit pas qu'une fois assemblée donne lieu à une chaîne de traction haute performance. Cette partie décrit la méthodologie de conception employée afin de concevoir la motorisation des tramways puis les composants du véhicule étudié seront décrits.

Le troisième chapitre a pour but d'analyser les défauts de la chaîne de traction pour détecter l'équipement qui pose des problèmes en utilisant des méthodes mathématiques. Ensuite la modélisation de ou des équipements qui causent les défauts.

Enfin, le dernier chapitre interprète les résultats des tests et la modélisation de notre équipement afin suggérer des solutions appropriées aux pannes.

Chapitre 1

Évolution de la chaîne de traction



1.1 Introduction

Ce moyen de transport collectif, urbain, efficace et rapide qui est apparu au moment où tous les autres moyens (bus, automobiles, taxis) sont utilisés au maximum et en passe d'être saturés, surtout que notre pays est dans une période marquée par une prolifération du parc automobile (5 millions de véhicules sur un réseau routier de 76.028 Km) .Alors ce moyen de transport doit devenir un vecteur des projets d'urbanisation de nombreuses agglomérations notamment celles dont le nombre d'habitants dépasse les 300 000.

1.2 Présentation d'entreprise

Cital (Compagnie Industrielle des Transports Algériens), est née en 2011 de la volonté de l'Algérie de se doter de capacités industrielles moderne d'assemblage et de maintenance dans le domaine ferroviaire, elle est en charge de satisfaire les besoins en tramways des projets en cours et futurs en Algérie. L'assemblage est réalisé dans l'usine de Annaba.



On compte 6 systèmes de tramway qui sont maintenus par Cital : Alger depuis DECEMBRE 2010; Oran depuis AVRIL 2013 et Constantine depuis JUIN 2013. Sidi-Bel-Abbès depuis JUILLET 2017, Ouargla depuis MARS 2018 et Sétif depuis MAI 2018. Prochainement la maintenance des tramways de Mostaganem et celle des trains grande ligne CORADIA ALGERIE seront également assurées par Cital [1].



FIGURE 1.1 – Répartition des employés

Activité

- Assemblage des rames pour les Systèmes de Tramways algériens,
- Production des rames de Tramways et d'autres matériels roulants,
- Maintenance de rames de tramways et d'autres matériels roulants,
- Maintenance des infrastructures des lignes de tramways sur le territoire Algérien.

Le tramway d'Alger, desservant l'agglomération d'Alger, comprend :

- Une ligne à double voie de 23 km entre Alger et Dergana,

- Le matériel roulant est une flotte de 41 rames CITADIS 402 construites par ALSTOM,
- 36 stations et un dépôt (remisage + ateliers de maintenance), et un poste de commande centralisé (PCC),
- Alimenté électriquement par des lignes aériennes de contact (LAC),
- La circulation du tramway s'effectue en site propre (hors carrefours),
- Il est conçu pour une durée de vie de 30 années.

Il assure le transport de 65 000 personnes par jour, ce mode aéré et ouvert sur la ville offre une capacité de transport de 7000 voyageurs par heure dans chaque sens avec une capacité de plus de 400 personnes par rame. Il se caractérise par son accessibilité, sa grande capacité et son confort. Son plancher bas intégral et les 8 portes latérales facilitent l'accessibilité de plain-pied depuis les quais, notamment pour les personnes à mobilité réduite ; la climatisation et les grandes baies vitrées teintées, les sièges et les larges couloirs, les afficheurs d'informations-voyageurs en arabe et en français et la motorisation silencieuse sont prévus pour offrir des conditions de voyage agréables.

A Alger le tramway est devenu bien plus qu'un simple moyen de transport. Il est aujourd'hui un moyen de repenser la ville, de développer une mobilité durable, d'assurer une vraie qualité de service, de redynamiser l'espace urbain et de valoriser le patrimoine architectural.

1.3 Dates imminentes de l'histoire de la traction électrique

- Apparue pour la 1ere fois en 1830.
- Appliquée et généralisée dans les transports urbains : tramways, métros et chemins de fer métropolitains.
- Le modeste prix du charbon,
- La performance non négligeable des locomotives à vapeur qui ont atteint les 2000 chevaux-vapeur (environ 1500 KW),
- La vulnérabilité (fragilité) d'un réseau électrifié en cas de conflit en période de guerre.
- Après la guerre, le prix du charbon a augmenté, la mentalité a changé et on a commencé à se convaincre des performances exceptionnelles des locomotives électriques, surtout sur les lignes à profil difficile (en France, Italie, Allemagne, Autriche, Suisse) en général là où on disposait d'énergie hydraulique.
- En 1920 une locomotive à vapeur pouvait remorquer 160 tonnes à 35Km/h en rampe de 27%, alors qu'une électrique pouvait remorquer 260 tonnes à 60Km/h même rampe.

1.4 Historique de la traction électrique ferroviaire

1.4.1 Chemin ferroviaire

Les premiers chemins de fer ont été construits dans les mines du 16e siècle, afin de permettre aux hommes et aux chevaux de transporter des charges plus importantes en empruntant une route imposée. Les deux principales caractéristiques de la voie ferrée sont

la réduction de la résistance au roulement et le guidage. En matière de transport, le rail a un avantage énergétique important par rapport à la route. L'amélioration de la sécurité et le confort des passagers en plus de la réduction des temps de trajet constituent les avantages du transport par chemin de fer par rapport au transport routier. Ces avantages étaient plus marqués au début du 20^{ème} siècle qu'aujourd'hui. Voici quelques-unes des principales innovations à l'origine du développement de la traction ferroviaire, on compte :

- La machine à vapeur vers 1800,
- La traction électrique à partir de 1880,
- L'électronique de puissance à partir de 1970.

1.4.2 Traction électrique

Du début de la traction électrique, l'absence de convertisseurs de puissance commandés a pratiquement fait de la machine à collecteur à excitation série la seule technologie utilisée commercialement [2]. Deux solutions ont été trouvées pour alimenter des moteurs de ce type et régler le couple, respectivement à partir d'une caténaire continue et monophasée. D'une part, d'une caténaire de tension continue basse, de 600 V à 3 000 V, le couple peut être réglé par des résistances variables. Un avantage de la tension continue était l'indépendance par rapport au réseau industriel triphasé. En effet, les caténaires pouvaient être alimentées par des redresseurs à vapeur de Mercure, connectés au réseau industriel.

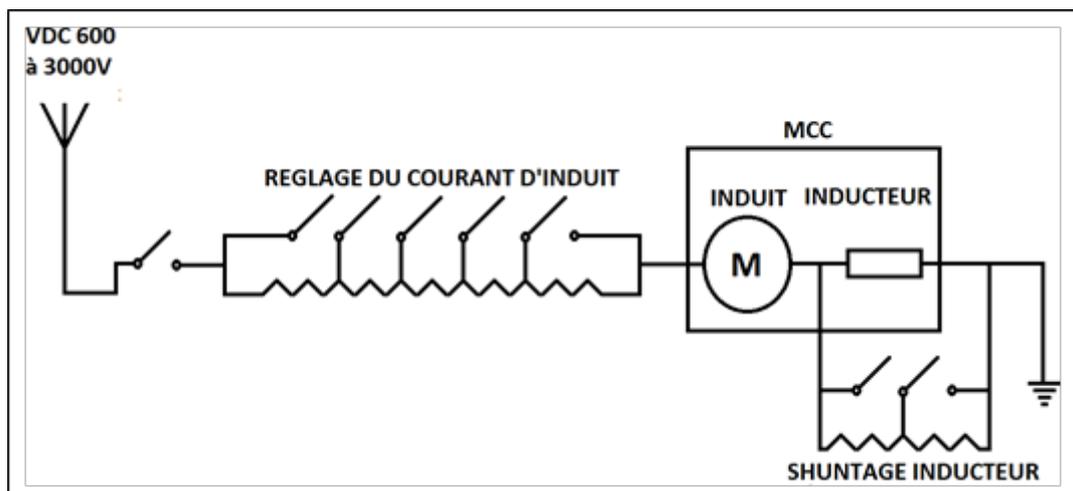


FIGURE 1.2 – Principe d'une chaîne de traction ancienne à tension continue.

D'autre part, d'une tension monophasée haute, de l'ordre de 12 kV à 15 kV, cette solution permet d'alimenter directement le moteur par une tension monophasée réduite, en utilisant un autotransformateur variable, dit transformateur à gradins ou encore gradateur. Le bon fonctionnement du moteur direct nécessitait d'utiliser des fréquences basses pour faciliter la commutation : 16.66 Hz à 25 Hz. Ces fréquences étaient difficiles à obtenir à partir du réseau industriel de 50 Hz. Il était nécessaire d'utiliser des groupes tournants et que la caténaire devait être dimensionnée en relation avec des courants importants. Cependant, à cette époque, l'exploitation des voies ferrées était réalisée par de multiples compagnies disposant parfois de leurs centrales de production électrique fournissant directement la fréquence adéquate. La commande du moteur était aussi plus facile et la masse embarquée plus faible, en l'absence de transformateur. Cependant, les pertes et la

chaleur à évacuer étaient importantes en raison de la puissance perdue dans les rhéostats, même si des évolutions techniques ont été trouvées pour réduire ces pertes, en plus de ça le moteur direct était de construction plus complexe, et n'était performant que pour une vitesse nominale, donc le démarrage de trains lourds était plus difficile.

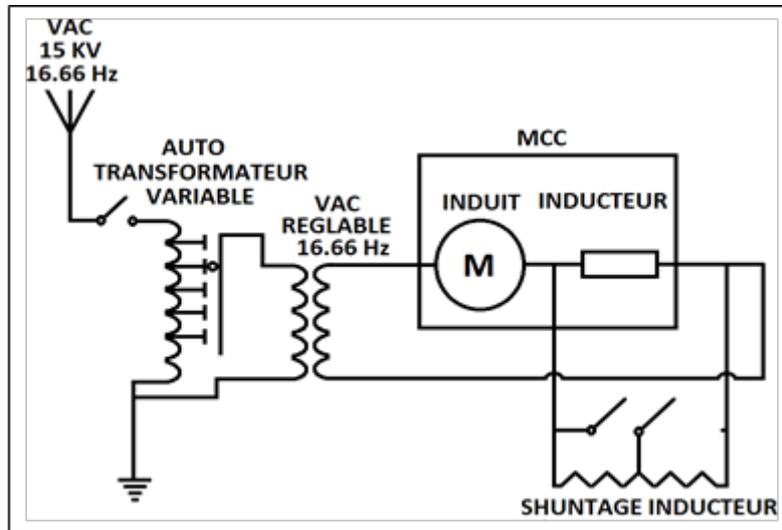


FIGURE 1.3 – Principe d'une chaîne de traction ancienne à tension monophasée et moteur direct.

À partir des années 1950, les premiers redresseurs embarqués permettent d'alimenter les trains grands lignes avec une tension monophasée à la fréquence industrielle de 50 Hz, qui combine les avantages des deux solutions antérieures. Les diodes du schéma étaient initialement des ignitions à vapeur de Mercure. Dans les nouvelles électrifications de grandes lignes, le 25 kV-50 Hz a pris le pas sur les autres tensions, avec l'avantage d'un nombre de sous-stations réduites. Pour les transports urbains, la tension continue de 600 V ou 750 V est restée la plus avantageuse jusqu'à nos jours. En effet, le transformateur est alors au sol, ce qui permet d'alléger le véhicule.

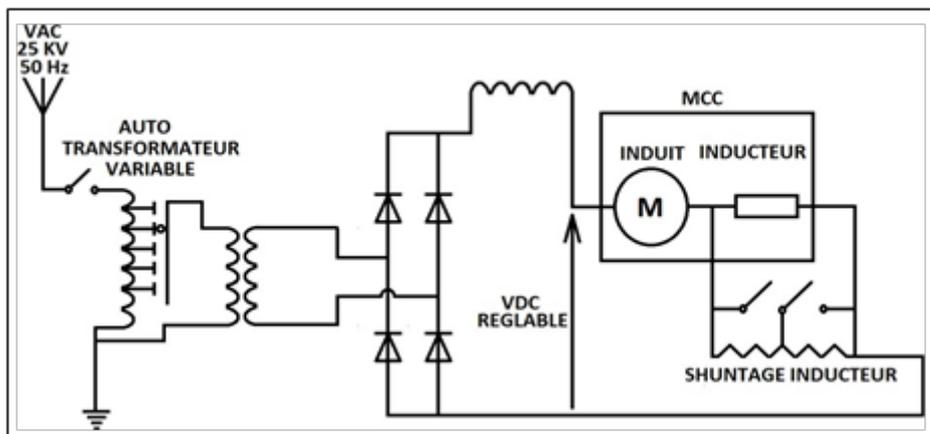


FIGURE 1.4 – Chaîne de traction ancienne à tension monophasée et redresseur

À partir de 1970, l'apparition des interrupteurs commandés va permettre les développements qui conduiront aux trains modernes. Appliquée au moteur à collecteur, l'électronique de puissance va permettre un contrôle plus fin du couple, par rapport à toutes

les solutions antérieures. En particulier, on s'affranchit des ruptures de couple dues aux positions discrètes du graduateur ou du rhéostat. La conséquence est une fiabilité accrue du moteur et de la transmission, un confort et des performances améliorés. Le contrôle de la tension se fait maintenant par un redresseur commandé sous la caténaire monophasée, ou bien par un hacheur sous caténaire continue. Étant donné que les interrupteurs commandés permettent de générer la tension souhaitée, la suppression du collecteur devient envisageable, avec l'avantage d'une maintenance réduite. D'autre part, la vitesse périphérique du rotor n'est alors plus limitée. Cela permet de concevoir des moteurs plus petits et plus rapides, pour une puissance équivalente.

Dans la décennie 1980-1990, il y a eu une révolution dans la traction électrique d'une part l'utilisation des différentes technologies de moteur, asynchrone à cage, synchrone à rotor bobiné, et enfin synchrone à aimants permanents, avec une progression en termes de puissance massique. Les moteurs asynchrones à fréquence variable (par exemple de 0 à 150 Hz environ) offrent l'avantage d'être moins lourds et moins volumineux que leurs équivalents à collecteur et un entretien nettement plus facile.

D'autre part, la propulsion à convertisseur continu/triphasé à fréquence variable et moteurs triphasés n'était rendue possible que grâce à l'évolution l'électronique de puissance, car les premiers schémas de puissance à thyristors étaient complexes et conduisaient à de lourds convertisseurs encombrants. Elle a pu se développer sur une large échelle grâce aux thyristors GTO et les transistors IGBT qu'ils ont simplifié le monde des convertisseurs qui sont également devenus de plus en plus compacts et légers. En outre, la qualité de la tension fournie au moteur et le contenu harmonique du courant appelé sur la caténaire, ainsi que le facteur de puissance ont été fortement améliorés.

Suit à cette progression d'électronique de puissance, on peut commander l'onduleur de tension pour fournir au moteur une tension triphasée réglable en amplitude et en fréquence qui a permis des performances élevées d'accélération et de décélération et un excellent contrôle de la vitesse, du patinage et du glissement des essieux moteurs. Comme le schéma ci-dessous, dans le cas d'une caténaire continue, le bus continu est relié à la caténaire par un filtre. Dans le cas d'une caténaire monophasée, la tension de bus est régulée par un redresseur commandé relié à un secondaire du transformateur. L'utilisation du hacheur à courant continu offre un réglage continu de l'effort de traction et de freinage (frein rhéostatique et frein à récupération d'énergie).

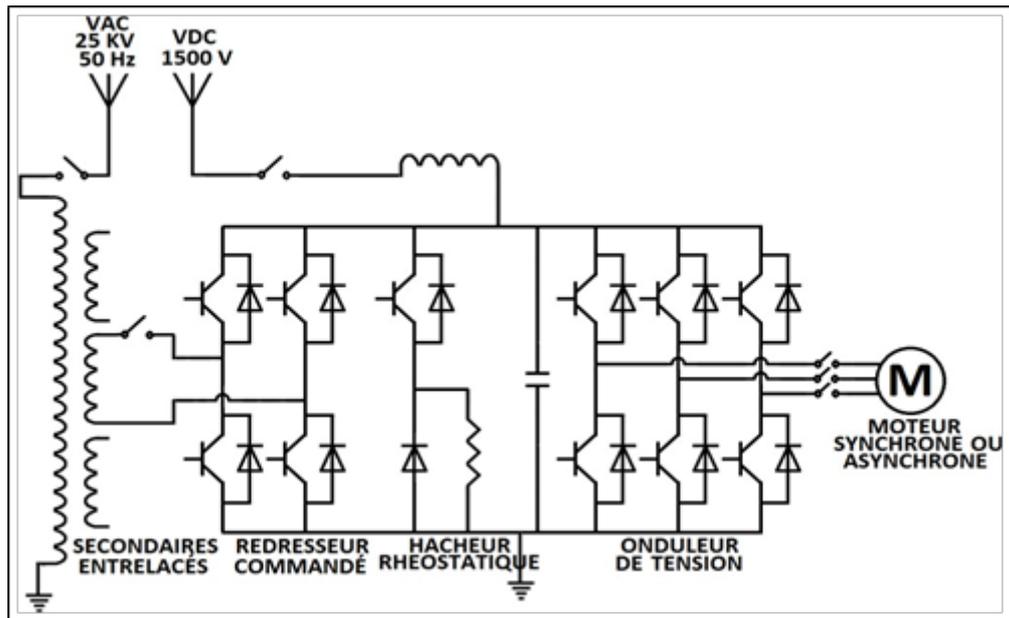


FIGURE 1.5 – Schéma de principe d'une chaîne de traction actuelle bi-tension.

Objectifs de l'industrie manufacturière au cours de ses dernières années

La tendance actuelle est à des systèmes de traction de plus en plus compacts. Cette compacité a pour but de faciliter l'intégration du système de traction dans le véhicule, et de maximiser l'espace pour les voyageurs. Une autre problématique actuelle est la réduction de la consommation. Historiquement, la suppression des rhéostats avec les débuts de l'électronique de puissance a permis une réduction significative de la consommation des grains soumis à des démarrages fréquents. Auparavant, le couple était réglé le plus souvent par un rhéostat en série avec l'induit des machines à courant continu, en plus du réglage du courant de l'inducteur[2]. À bord des trains actuels, une résistance contrôlée par un hacheur subsiste. La fonction de cette résistance est de dissiper l'énergie renvoyée par les moteurs lors des freinages non récupératifs, ou freinages dissipatifs.

La diminution de la consommation des équipements de traction actuels passe principalement par la réduction du recours à ces freinages dissipatifs. Cette réduction peut être amenée par une gestion coordonnée des différents trains, par la mise en place de sous-stations récupératrices, ou encore par l'installation de moyens de stockage embarqués ou au sol.

Dans le cas d'un transport urbain, métro ou tramway, le cycle de fonctionnement consiste en une suite de démarrages et d'arrêts, les périodes de fonctionnement à vitesse constante sont limitées. La diminution des freinages dissipatifs est donc un moyen incontournable pour diminuer la consommation. Concernant la consommation, une autre amélioration peut être apportée par l'augmentation du rendement intrinsèque des convertisseurs et des moteurs. La réduction de la consommation est une problématique appelée à devenir de plus en plus prégnante avec l'augmentation du coût de l'énergie.

Comme d'autres industries, les préoccupations de l'industrie ferroviaire, et plus particulièrement celles de notre partenaire ALSTOM TRANSPORT, sont aujourd'hui focalisées sur l'écoconception de ses produits. Ce fabricant de matériel ferroviaire a déjà appliqué certaines normes environnementales dont la plus remarquable, en termes de matériaux, est celle liée à l'utilisation des substances interdites telles que l'arsenic, le cadmium, le

plomb.

Les composants ferroviaires présentent des particularités par rapport aux autres composants électromagnétiques. En effet, ces composants fonctionnent avec des fortes puissances, ils sont utilisés pour des applications embarquées (soumises à des contraintes de volume et de poids), consomment beaucoup de matériaux et de ressources dans la phase de fabrication et sont difficiles à modéliser puisqu'ils impliquent plusieurs disciplines interdépendantes. Enfin, ils doivent assurer un fonctionnement régulier sur une durée de vie importante (jusqu'à une trentaine d'année). Toutes ces particularités nous renseignent sur la complexité du problème d'éco-conception de ces produits, notamment les difficultés dans la modélisation et le dénombrement des flux entrant et sortant pour l'estimation des impacts environnementaux.

1.5 Description du tramway *Alstom CITADIS 402*

Alstom

C'est Leader mondial dans les infrastructures de production et de transmission d'électricité ainsi que dans celles du transport ferroviaire, *Alstom* est une référence en termes de technologies innovantes et Également, il offre un grand choix de solutions pour la transmission d'électricité ; en particulier dans le domaine des réseaux "intelligents" (smart grids) [3].

1.5.1 Description technique du matériel roulant

L'*ALSTOM CITADIS402* est un véhicule à plancher bas intégral de la gamme *CITADIS*. Il a une longueur de 44 mètres environ, bidirectionnel, pouvant transporter 302 personnes en charge normale ($EL4 = 4p/m^2$). C'est un véhicule de 2,65 mètres de large à faces galbées, largement vitré et accessible par 6 portes doubles et deux portes simples aux extrémités.

La propulsion est assurée par 6 moteurs asynchrones (2 par bogie moteur) alimentés par deux onduleurs ONIX 808 . A chaque bogie motorisé est associé un Equipement de Traction Freinage (ETF).

1.5.2 Principales caractéristiques du véhicule

- Hauteur 3270mm sans pantographe (3,348 pantographe replié),
- Masse en tare : 54t,
- Fonctionnement en unité simple,
- Pas d'attelage – Barre de remorquage/poussage pour mode secours,
- Largeur de passage portes doubles : 1300 mm,
- Largeur de passage portes simples : 800 mm,
- Un pantographe/rame,
- Résistance à la compression : 400kN,
- Hauteur plancher/niveau supérieur rail : 350 mm,
- Niveau d'accès passagers : 320 mm,
- Niveau de plancher cabine : 678 mm,

- pas des sièges : 624
- Largeur des sièges 431 mm.
- La tension ligne au pantographe est de 750 V.
- Le refroidissement est assuré par fluide caloporteur distribué par un groupe de refroidissement.
- Vitesse maximale du véhicule : 70 km/h maxi.
- Kilométrage annuel prévisionnel : 80 000 km/an/véhicule.

1.5.3 Les compartiment et architecture de la rame

La ram *CITADIS* 402 est composé de 7 modules, 6 intercirculations et 2 cabines de conduite. Les modules sont les suivants :

- 2 motrices avec cabine de conduite (M1 et M2),
- 1 nacelle porteuse (NP),
- 1 nacelle motrice (NM),
- 3 caisses suspendues (C1, CC et C2),

Motrices avec cabine de conduite (M1 ET M2)

Elles sont constituées d'une caisse attachée à une cabine conducteur, avec une porte d'accès (une de chaque côté), en toiture un coffre BT, un coffre ETF avec ses 4 compartiments, un groupe GRF, une antenne RCA radio ainsi qu'une antenne wifi, sous le châssis un bogie moteur.

Caisses suspendues (C1, CC, C2)

Elles sont constituées d'une caisse plus grande par rapport aux autres compartiments, avec une porte d'accès double pour chaque côté, en toiture, sur C1 on trouve le groupe de climatisation, le rhéostat de freinage ainsi que les coffres batteries, sur C2 au lieu des coffres batteries, on trouve le convertisseur statique CVS et sur CC au lieu du CVS on trouve un coffre basse tension BT. Pas de bogies sous le châssis.

Nacelle porteuse (NP)

Elle est constituée d'une petite caisse sans portes d'accès, sur laquelle on trouve le pantographe en toiture, d'où le nom de la « porteuse », ainsi que le parafoudre et le coffre disjoncteur. Sous le châssis, un bogie porteur.

Nacelle motrice (NM)

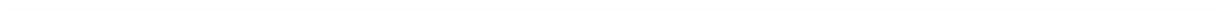
Pareil à la NP, une petite caisse sans portes d'accès, sur laquelle est disposé un coffre ETF et un groupe GRF. « Motorisée » puisque contrairement à la porteuse, elle dispose d'un bogie moteur sous le châssis.

1.6 Conclusion

L'architecture électromécanique du matériel moteur ferroviaire a bénéficié d'une révolution grâce à l'expérience acquise au fil du temps. En effet, le développement des semi-conducteurs contrôlés associés à la commande par calculateurs et le moteur asynchrone a supplanté quasi complètement le moteur à collecteur à courant continu. Cette partie nous a permis de connaître l'architecture de la rame Citadis 402.

Chapitre 2

Etude de la chaine de traction-freinage



2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la conception de la chaîne de traction. Il s'agit d'une étape qui nous permet de redimensionner des composants tels que les transmissions, les machines électromécaniques, l'électronique de puissance et les batteries. Chaque interaction forme un système indépendant de ces composants. La conception individuelle de ces composants ne garantit pas qu'une fois assemblée, une chaîne de traction de haute performance. Cette partie décrit la méthodologie de conception employée afin de concevoir la motorisation des tramways puis les composants du véhicule étudié seront décrits.

2.2 Alimentation

Le chemin de fer a une spécificité depuis le développement de l'électricité industrielle : la voie ferrée est équipée d'une ligne d'alimentation, de sorte que l'énergie électrique est «captée», et non plus embarquée, par le véhicule sur rails. Réponse à une demande de trafic. Cela signifie disponibilité et fiabilité, ainsi que la fourniture de l'énergie requise, tant du point de vue du schéma que des équipements utilisés.

2.2.1 Besoins de la rame en électricité

En exploitation, la rame est alimentée en Haute Tension (HT) 750 V continu :

- Par ligne aérienne de contact (LAC), au moyen du pantographe,
- La HT est captée et transmise aux organes de puissance et au CVS par l'intermédiaire du disjoncteur principal.

La Basse Tension (BT) utilisée sur la rame est délivrée par :

- Une batterie autonome 24 V,
- Un Convertisseur Statique (CVS) qui transforme la HT en 24 V continu et en Moyenne Tension (MT) 400 V – 50 Hz.

L'état (Présent ou Absent) des tensions 24 V, 400 V et 750 V nécessaires au fonctionnement du tramway ainsi que l'état (Ouvert ou Fermé) du disjoncteur principal sont visualisables sur la console du Système Informatique Embarqué (SIE).

TABLE 2.1 – Organes de l'alimentation électrique de la rame

	Haute Tension (HT)	Basse et Moyenne Tension (BT et MT)
Eléments	Captation et ensemble des circuits d'alimentation HT 750 V	CVS
Fonction de chaque élément	Alimentation en HT 750V de la rame	Transforme la HT 750V en BT 24V et en MT 400V triphasé 50 HZ
Equipement et fonction alimentés	Moteur de traction via Onduleur/Hacheur CVS Groupe de climatisation	MT 400V-50HZ : Groupe de climatisation cabines Groupe de refroidissement moteur GRF
		BT 24V : Basse tension permanente Basse tension permanente secours Basse tension préparée et cabine en service
Batterie (autonomie d'environ 30 minutes avec délestage des fonctions girouettes latérales et frontales, éclairage complémentaire, dégivrage pare-brise)	Elle est chargée par le CVS Elle permet : La montée et la descente du pantographe et les alimentations électrique des auxiliaires nécessaires à la phase de préparation (basse tension permanente) Lorsque d'une avarie du CVS, l'alimentation électrique nécessaire à certains auxiliaires basse tension pour finir la course(basse tension permanente, basse tension préparée et cabine en service)	

2.2.2 Le système d'alimentation

Lignes aériennes de contact

Les *LAC* sont le moyen le plus traditionnel pour transporter les courants entre les sous-stations et les rames d'un réseau de tramway. La ligne aérienne est divisée en sections, ce qui permet d'isoler une portion du réseau en cas de défaut, et d'assurer des services provisoires d'exploitation. Les *LAC* sont suspendues à des poteaux tous les 30 m ou 60 m (en fonction de la technique de pose) [4] ou accrochées aux façades des immeubles. Leur hauteur légale est de 6 m (de manière à permettre le transit de convois routiers, exceptionnels). Le matériau utilisé dans la fabrication des *LAC* est du cuivre électrolytique tréfilé et les sections des conducteurs varient généralement de 107 mm² à 150 mm² [5].

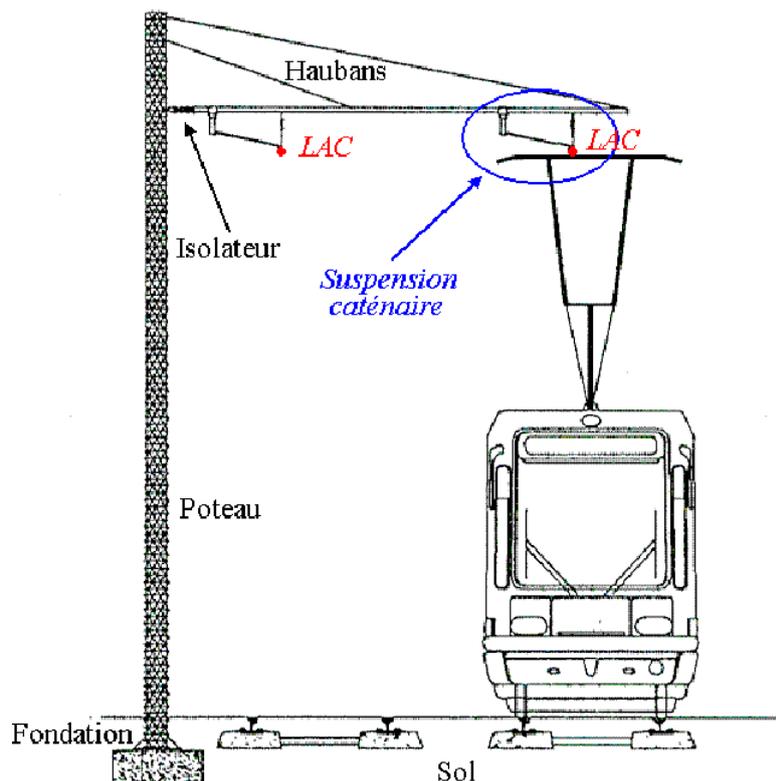


FIGURE 2.1 – Ligne aérienne de contact.

2.2.3 Infrastructures (sous-station)

Les tramways urbains sont toujours alimentés en courant continu (cc) car cela crée peu de parasites sur les autres circuits électriques ou radioélectriques. La tension d'alimentation est passée progressivement de 500 V à 750 V, valeur unifiée par la Commission Électrotechnique Internationale, afin de diminuer les chutes de tension dans les lignes et de garantir une sécurité optimale d'exploitation, on s'efforce de disposer les sous-stations le plus près de la ligne à des intervalles moyens de 2 km à 2,5 km environ. La puissance disponible est, suivant les constructeurs, de 900 kW à 1 200 kW [6].

Dimensionnement et Caractéristiques requises des installations fixes

Lors de chaque projet d'électrification de ligne ou de renforcement d'installation existante, il est nécessaire d'effectuer une étude de dimensionnement afin d'offrir au maître d'ouvrage un choix de solutions répondant aux besoins du futur trafic. Setram possède un logiciel de calcul très performant appelé « SAE-TD » qui prend en compte les paramètres spécifiques à la dynamique ferroviaire (graphe de circulation des trains, type et caractéristiques des engins moteurs, masse et vitesse des trains, profil de la ligne...) ainsi que les paramètres propres à la maintenance et à la géométrie de la voie :

- Écartement de rail
- Dénivellement
- Devers
- Hauteur désaxement du lac

Chaque système d'alimentation du réseau de traction – tension continue ou monophasée - sera détaillé selon les trois aspects techniques suivants :

- Raccordement au réseau haute tension (poste HT de la sous-station)
- Conversion et distribution de l'énergie (sous-station)
- Schéma d'alimentation

La commande centralisée des installations fixes sera l'objet d'une analyse commune.

L'architecture

Les sous-stations de traction assurent la transformation de l'énergie alternative en énergie continue et la distribuent sur la ligne. Les sous-stations de traction se situent le long de la ligne et permettent d'alimenter les différentes sections électriques. Une section électrique est alimentée par plusieurs sous-stations et le nombre de sous-stations dépend de la longueur de la section électrique. Les sous-stations ont deux fonctions principales : la production de l'énergie continue et la distribution de cette énergie vers la ligne aérienne de contact (LAC). Chaque sous-station est interfacée avec le Poste de Commande Centralisée (PCC) et avec les autres sous-stations de la même section électrique [7].

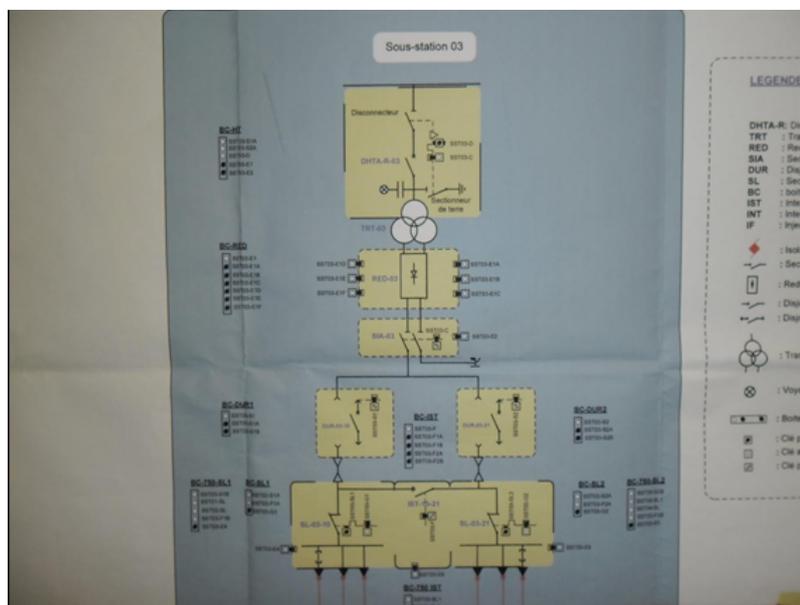


FIGURE 2.2 – Schéma des équipements de la sous-station

Production et Distribution Courant Continu

L'architecture utilisée pour la production courant continu de chaque sous station est de type mono-groupe, c'est à dire qu'elle est constituée d'un groupe transfo-redresseur. Les redresseurs utiliseront la technologie 12-pulses, la tension continue sera alors le résultat des 12 impulsions filtrées.

La ligne est composée de plusieurs sections électriques. Chaque section est alimentée par une ou plusieurs sous-stations. Deux architectures de distribution CC seront présentes :

- En 'T' : un disjoncteur ultra-rapide (DUR) alimente et protège la section électrique
- En 'TT' : deux disjoncteurs ultra-rapides (DUR) alimentent et protègent deux sections électriques indépendantes séparées par un sectionnement électrique (IS ou lame d'air) au droit de la sous station

Sous-station mono-groupe

La production cc est réalisée à l'aide des 4 équipements suivants :

- Disjoncteur DHTA-R de protection (DHTA-R)
- Transformateur de traction (TRT) :

Le transformateur de traction permet d'abaisser la tension alternative DHTA- R en une tension alternative BT qui alimente le groupe redresseur [7].

- Redresseur (RED) : Le redresseur permet de transformer l'énergie alternative BT de sortie du transformateur en énergie continue. La protection du redresseur est réalisée de la manière suivante :
 - Fusion Fusible - Diode (uniquement applicable pour les branches de redresseur composées de deux ou plusieurs diodes en parallèle) : En cas de fusion de ce fusible, un ordre de déclenchement est envoyé au disjoncteur alternatif DHTA-R amont.
 - Fusion Fusible – circuit RC : Les circuits RC protègent les diodes contre les surtensions dues à l'ouverture et à la fermeture du disjoncteur alternatif DHTA-R amont. En cas de fusion de ce fusible, une alarme est envoyée au PCC mais aucun ordre de déclenchement n'est envoyé au disjoncteur alternatif DHTA-R amont. La ré-fermeture de ce disjoncteur n'est pas autorisée s'il y a eu fusion du fusible.
 - Température – diode : Dans tous les cas la fermeture du disjoncteur DHTA-R amont n'est possible que si la température est redescendue sous le seuil « alarme ».

Alimentation de chaine de traction

L'alimentation de la ligne de tramway d'Alger est assurée par 15 Sous -stations de Traction (SST). Les SST sont alimentés en 10 KV par le réseau SONELGAZ. La SST 11 alimente la ligne et le dépôt, ainsi que le poste de commandement PCC.

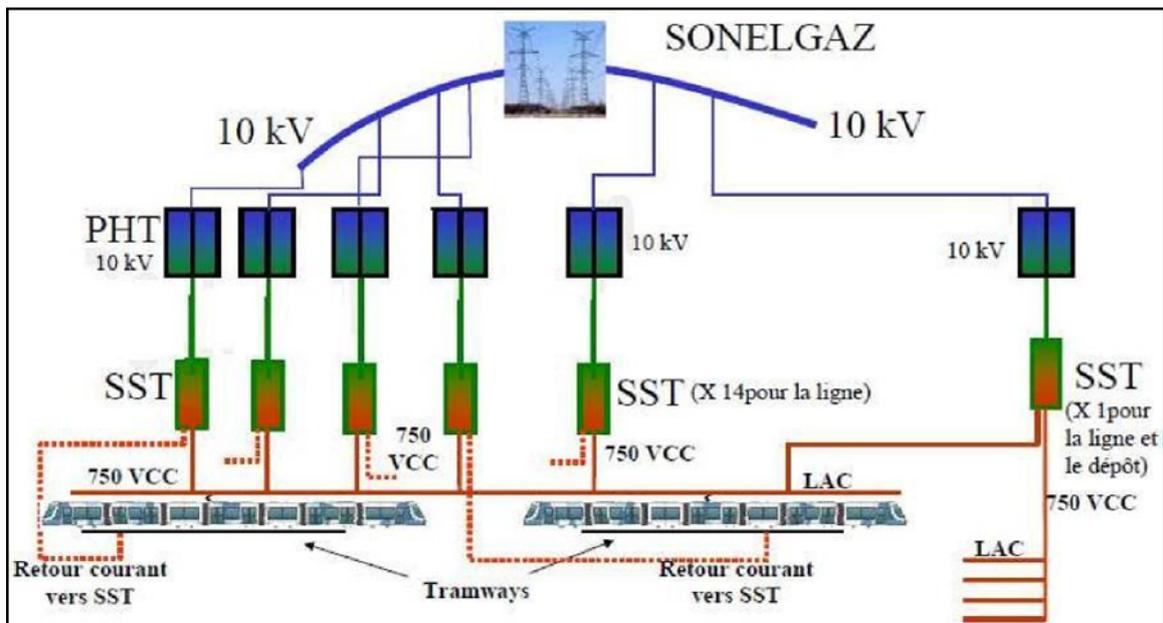


FIGURE 2.3 – Vision globale d'un réseau d'alimentation électrique de tramway doté d'une LAC

La fonction principale de la sous station de traction est d'assurer la transformation et le redressement du 10 KV en 750 VCC pour l'alimentation en énergie électrique du matériel roulant. Elle dispose des équipements permettant d'assurer la sécurité de la distribution d'énergie, en ligne et sur les sites d'exploitation et de maintenance.

Outre l'énergie électrique du matériel roulant, la SST fournit un courant triphasé de 400V +N pour les stations-voyageurs encadrantes les plus proches de la SST (les autres stations sont alimentées par SONALGAZ). Elle fournit également une alimentation de 220V.

Une sous-station de traction est l'interface entre le réseau HTA local (10Kv à 20Kv), et le réseau continu (750v DC). 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.

Les sous-stations peuvent toutefois être relativement éloignées les unes des autres (2 km par exemple) si des moyens de maintien de la tension sont installées. Pour ce faire, les solutions les plus couramment employées consistent à utiliser des Feeders (généralement des conducteurs en aluminium de section importante) en parallèle des voies ou à doubler certaines LAC, afin de limiter les chutes de tension.

La puissance d'une sous-station monogroupe redresseur est généralement de 900 kW, débitant ainsi 1200 A sous 750 V. Un transformateur Dy 20 KV / 590 V se situe en

amont du groupe redresseur [8]. Sa puissance apparente est de 1000 KVA. Un disjoncteur DC ultrarapide (durée d'ouverture inférieure à 20 ms) se positionne en sortie du groupe redresseur. Des éléments de comptage se greffent à chaque sous-station, en particulier si elle représente un point de comptage du réseau de tramway.

Les sous-stations de traction peuvent également être dotées de deux groupes redresseurs connectés en parallèle ou en série, si les besoins en puissance du réseau ou les contraintes d'implantation le nécessitent.

Dans ce cas, les deux groupes sont usuellement raccordés au réseau AC amont via un transformateur Dy 20 kV / 2x590 V.

La gestion des sous-stations est assurée par un automate programmable qui transmet les données à un Poste de Commandes Centralisées (PCC). Ce dernier opère en temps réel aux manœuvres sur les diverses sous-stations[9].

Pendant le freinage d'un tramway, ce dernier devient un générateur de courant continu. Le potentiel du pantographe augmente graduellement jusqu'à 900 V DC. Si une charge est connectée au réseau continu (tramway en phase de traction, équipements fixes), l'énergie cinétique du tramway en phase de freinage sera transformée en énergie électrique et sera utilisée par le tramway en traction. Si aucune charge n'est connectée au réseau lors du freinage d'un tramway, l'énergie électrique sera alors dissipée dans des résistances rhéostatiques (fixées en toiture du matériel roulant). L'insertion d'onduleurs de récupération sur la ligne continue (généralement dans les sous-stations) permet de transférer l'énergie excédentaire (c'est-à-dire celle qui n'est pas dissipée rhéostatiquement) du réseau continu vers le réseau alternatif[10].



FIGURE 2.4 – Les deux modes de moteur

2.2.4 Sectionneur d'isolement

Le sectionneur d'isolement automatique permet d'isoler les polarités positives et négatives du redresseur. En fonctionnement normal, le SIA est fermé et en mode automatique. Pour des raisons de sécurité, d'exploitation, de maintenance et en cas d'incident, le circuit de distribution de l'énergie est découpé en 7 sections. Chaque section est isolée de celle adjacente par un interrupteur d'isolement. Cette sectorisation permet essentiellement de limiter les risques de détérioration de la ligne en cas de court-circuit et autorise l'exploitation du tramway sur certains secteurs avec d'autres secteurs en défaut. En fonctionnement normal, les sections sont mises en continuité.

2.3 Dynamique ferroviaire de la traction électrique

On peut faire un classement de 2 grandes familles de la traction électrique :

- Les transports urbains suburbains : tramways modernes, trolleybus et métros, ils sont équipés en courant continu à basse tension (600 à 1500V BTA - BTB), 750 et 1500V CC sont les plus utilisés.
- Les grandes lignes appelées aussi la « grande traction » : TGV, AEV, autorail et autres grandes distances pour voyageurs, marchandises, ils sont équipés en :
 - Courant continu de plus de 1500 à 3000V (HTA),
 - Monophasé à fréquence spéciale,
 - Monophasé à fréquence industrielle [2].

La définition des caractéristiques générales d'un engin moteur, c'est-à-dire la définition de ses performances, exige au préalable la connaissance complète du programme de traction qui lui sera confié : types de trains à remorquer avec leur masse, rampes à gravir, accélérations souhaitées, vitesse maximale, régimes dégradés de traction, etc.

2.3.1 Efforts nécessaires en marche

En traction ferroviaire, l'équation fondamentale de la dynamique appliquée à un train de masse M et caractérisé par une accélération « γ » s'écrit :

$$F_j - R - M g \sin a = k M \gamma$$

- F_j : représente l'effort total aux jantes de la locomotive avec tous ses moteurs en service (que nous exprimerons ici en kilonewtons, délaissant le traditionnel « déca-newton »).
- R : représente la résistance à l'avancement du train sur voie horizontale et alignée. Cette résistance s'exprime en fonction de la vitesse V par une équation du type

$$(A + B V + C V^2)$$

Dans laquelle :

- Le terme $(A + B V)$ représente la résistance due au roulement et aux frottements mécaniques,
- Le terme $(C V^2)$ représente la résistance aérodynamique du train avec la constante C qui caractérise sa pénétration dans l'air.
- $M g \sin a$: représente la composante de la gravité : effort résistant en rampe et accélérateur en pente (g étant l'accélération due à la pesanteur).
- K : représente le coefficient d'inertie des masses tournantes. C'est un coefficient sans dimension, légèrement supérieur à 1, qui majore la masse du train proprement dite, afin de tenir compte de la présence des différentes pièces en rotation qui possèdent leur propre moment d'inertie, par exemple les essieux, les transmissions et les rotors des moteurs.

Avec les unités citées, l'équation fondamentale de la dynamique (1) s'écrit :

$$F_j - R - M .0,00981 i (\text{‰}) = k M \gamma \text{ (m/s}^2\text{)}$$

En résumé, pour qu'un train de masse M (t) et de résistance à l'avancement R (kN) dispose d'une accélération g sur une ligne de profil i , l'engin moteur doit développer à ses jantes un effort total F_j (kN) que l'on calcule par la formule (2) pour chaque vitesse remarquable. On ramène ensuite cette valeur d'effort au niveau du couple à l'arbre d'un moteur C_m (kN.m) de l'engin de traction par la relation :

$$C_m = \frac{F_j r}{N \eta \rho}$$

Avec

- N nombre de moteurs de l'engin de traction,
- ρ rapport de démultiplication entre la roue et le moteur,
- r (m) rayon de la roue,
- η rendement de la transmission entre la roue et le moteur ($\eta \gg 0,98$).

C'est avec des paramètres tels que le couple au démarrage, le temps de démarrage, le couple au régime continu, la vitesse au régime continu (km / h) et la vitesse maximale que l'on dimensionne le moteur de la locomotive ainsi que son convertisseur d'alimentation. Signalons enfin que la puissance à la jante P_j (kW) de la locomotive s'exprime par la formule pratique :

$$P_j = \frac{1}{3.6} \cdot F_j V$$

Et permet de déterminer le rendement global de la locomotive (rapport entre la puissance à la jante et la puissance absorbée au pantographe)[11].

2.3.2 L'adhérence

L'action d'un couple moteur sur une roue posée sur un rail se traduit par un effort à la jante de cette roue tant que celle-ci trouve un appui sur le rail : c'est ce qu'on appelle l'adhérence. Lorsqu'une roue appuie sur un rail avec une certaine charge verticale 'son poids', il se produit une déformation élastique des matériaux en contact. Si l'on applique un effort tangentiel 'le couple moteur' à la jante de cette roue, il y a déplacement relatif des surfaces en contact de la roue et du rail en raison de cette déformation élastique. On définit donc un glissement relatif de la roue par rapport au rail dont la valeur possède une grande influence sur l'effort transmissible par la roue. On définit le coefficient d'adhérence (μ) d'une roue comme le rapport entre l'effort maximal transmissible ($F_j \text{ max}$) et le poids ($M g$) qui charge cette roue : $\mu = F_j \text{ max} / M g$

La valeur de μ dépend beaucoup de l'état du rail [11].

2.3.3 Caractéristique effort/vitesse

Comme nous venons de le voir, l'engin moteur doit développer un effort à ses jantes supérieures aux efforts résistants présentés par le train pour que le convoi puisse démarrer et accélérer. Ces performances sont représentées sur une courbe que l'on appelle la caractéristique effort/vitesse de l'engin moteur [11].

Effort maximal au démarrage

Il est obtenu par un courant moteur maximal qui transmet un effort maximal à la jante de la roue et donc au crochet de traction de la locomotive, sous réserve de l'adoption d'un coefficient d'adhérence « réaliste » de l'ordre de 30 à 35 %.

Démarrage

Il faut démarrer vite avec un courant moteur important ; la période de démarrage constitue ce que l'on appelle un « régime de surcharge de courte durée ». C'est la capacité de surcharge de l'équipement électrique qui va conditionner le courant, donc l'effort maximal réalisable durant tout le démarrage.

Régime continu

C'est le point de « définition » de l'équipement qui est inscrit dans le contrat avec l'exploitant. On peut le définir comme le point de fonctionnement le plus contraignant pouvant être soutenu sans limitation de durée (aucun organe de la chaîne de traction ne devant dépasser les limites d'échauffement autorisées).

Hyperbole d'équi-puissance

Au régime continu, l'équipement a atteint sa pleine puissance. Il est donc intéressant de pouvoir conserver cette valeur de puissance pour accélérer au-delà de la vitesse du régime continu. Cette excursion s'obtient généralement par le « dé-fluxage » ou la « désexcitation » des moteurs à puissance constante.

Vitesse maximale

Sa valeur, ainsi que l'essai de survitesse à 120 % imposé par les sur les moteurs de traction, conditionnent essentiellement la construction mécanique du rotor du moteur, après que l'on aie choisi judicieusement le rapport de démultiplication rotor/roue ainsi que le diamètre des roues [11].

2.4 La chaîne de traction

La chaîne de traction d'un véhicule électrique est l'ensemble des éléments depuis la source d'énergie jusqu'à la transmission mécanique. L'organigramme est donné sur la figure suivante :

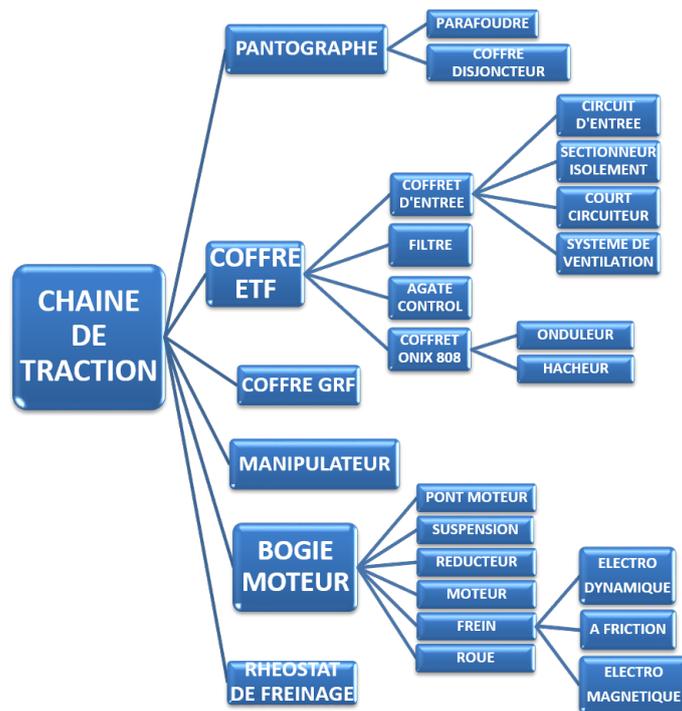


FIGURE 2.5 – Organigramme de la chaîne de traction.

2.4.1 Architecture générale de la fonction traction-freinage

La fonction traction-freinage se décompose en huit sous-fonctions :

- **Gestion des consignes** : regroupe les interfaces homme machine (IHM) relatives à la sélection du mode de conduite, des régimes de marche et de la gestion des consignes de traction ou freinage spécifiées par l'intermédiaire du manipulateur,
- **Gestion de l'appareillage et de la captation** : traite la gestion des alimentations HT des dispositifs de traction et de freinage. L'essentiel de l'appareillage, assurant cette sous-fonction, est inclus dans le coffre disjoncteur.
- **Mesure de vitesse** : regroupe les équipements concourants à la mesure de vitesses effectives au niveau de chaque bogie et au calcul des vitesses nécessaires au pilotage des moteurs.
- **Pilotage moteur de traction** : comprend les équipements de contrôle-commande et de puissance associés à la commande des moteurs de traction ainsi qu'au freinage électrodynamique.
- **Ventilation des coffres de traction ETF** : regroupe l'appareillage de refroidissement des onduleurs de puissance dans les ETF.
- **Gestion des défauts** : regroupe les éléments de signalisation, à l'attention du conducteur, situé sur le pupitre.
- **Refroidissement moteur** : regroupe l'appareillage de refroidissement des moteurs de traction.
- **Freinage** : regroupe les équipements de freinage et leur mise en œuvre.

Le véhicule comprend trois équipements de traction freinage (ETF) indépendants.

La captation et les circuits d'alimentation haute tension (disjoncteur DJC, circuit de pré charge associé) sont communs à l'alimentation de la traction et des auxiliaires (CVS chargeur, groupes de climatisation) et sont situés dans un coffre séparé (coffre DJC).

Les retours de courant s'effectuent sur les bogies moteurs (un par essieu). Chaque ETF possède son propre relais différentiel de protection (QDI).

Les coffres ETF sont identiques. Chacun d'eux comprend un onduleur triphasé alimentant deux moteurs en parallèle, un sectionneur d'isolement destiné à isoler le circuit de puissance en cas de défaut, un hacheur de freinage rhéostatique faisant également office d'écrêteur en traction, ainsi que l'ensemble des dispositifs de protection et des capteurs nécessaires au bon fonctionnement de l'ensemble. Ces coffres possèdent également leur propre système de ventilation alimenté à partir du réseau BT du véhicule.

Les moteurs de traction sont refroidis par circulation d'eau. Cette circulation est assurée par un système de refroidissement comprenant une pompe, un échangeur eau air ventilé et un vase d'expansion.

les ETF limitent leur puissance de façon à ce que le courant total consommé par le véhicule ne dépasse pas 1500A au pantographe. Il est également prévu la possibilité d'alimenter les moteurs des motrices M1 ou M2 d'un même bogie par un onduleur atelier externe via une prise atelier située en toiture lors des opérations de profilage des roues. Dans ce cas, la rame est dé préparée.

2.5 Équipements de la chaîne de traction-freinage

La chaîne de traction du tramway se compose de 6 éléments principaux, comme illustré dans la figure ci-dessous, qu'on va développer au fur et à mesure. Ces éléments sont :

- Le pantographe avec le parafoudre et le disjoncteur,
- Le coffre ETF (équipement traction freinage),
- Le bogie moteur,
- Le coffre GRF (groupe de refroidissement),
- Le rhéostat de freinage,
- Le manipulateur[12].

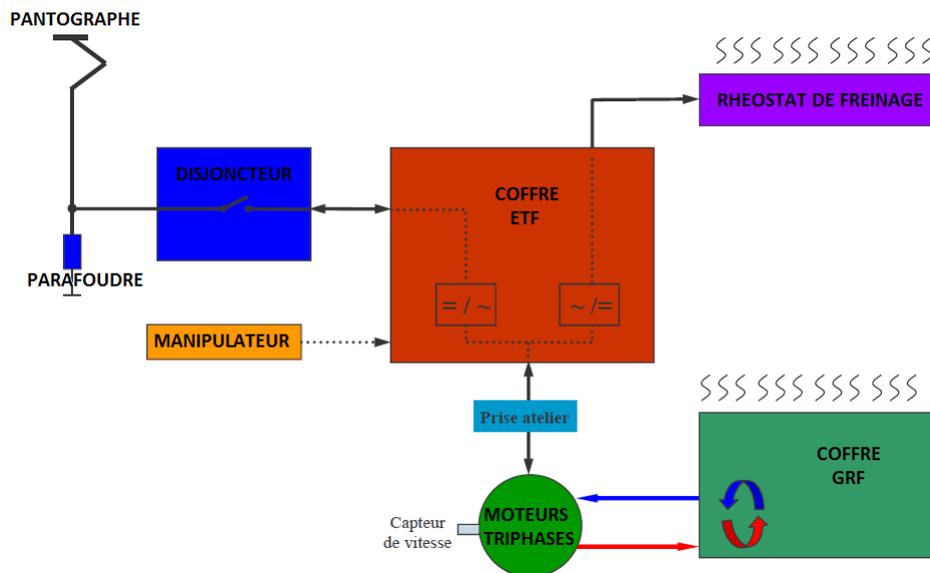


FIGURE 2.6 – Composition de la chaine de traction [12]

2.6 Implantation des équipements de la chaine

- Le pantographe se trouve sur NP avec le parafoudre et le disjoncteur,
- Les 3 coffres ETF + 3 coffres GRF + 3 bogies moteurs se trouvent sur les toits et les châssis de M1, NM et M2,
- Les 3 rhéostats de freinage sont implantés sur les toits de C1, C2 et CC,
- Les 2 manipulateurs se trouvent chacun dans l'une des 2 cabines conducteur[12].

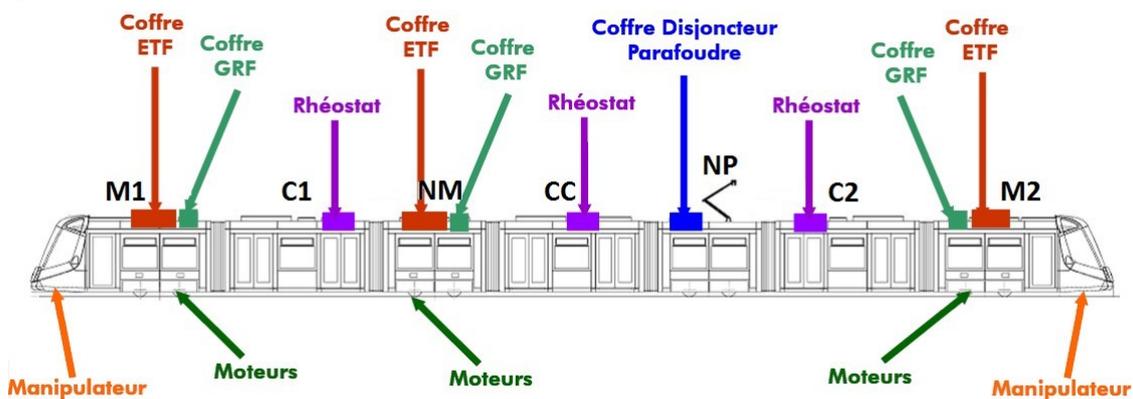


FIGURE 2.7 – Implantation des équipements de la chaine de traction

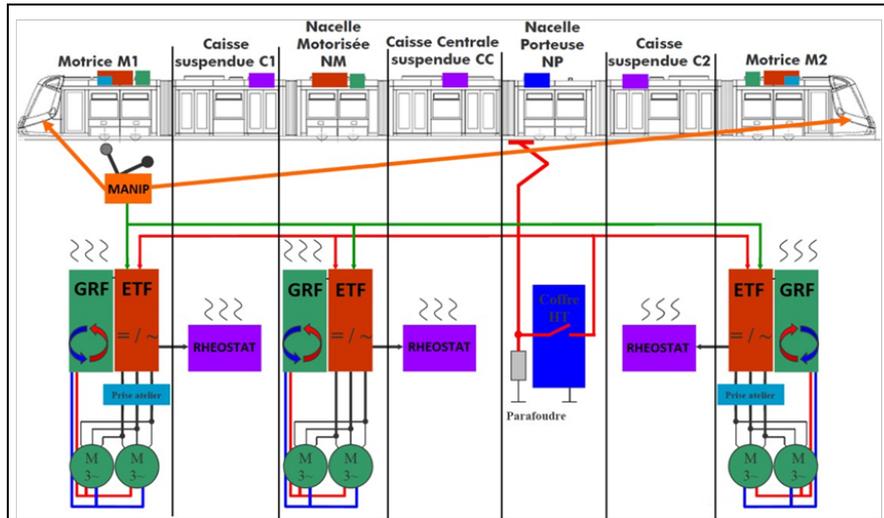


FIGURE 2.8 – Emplacement des équipements de la chaîne de traction sur la rame

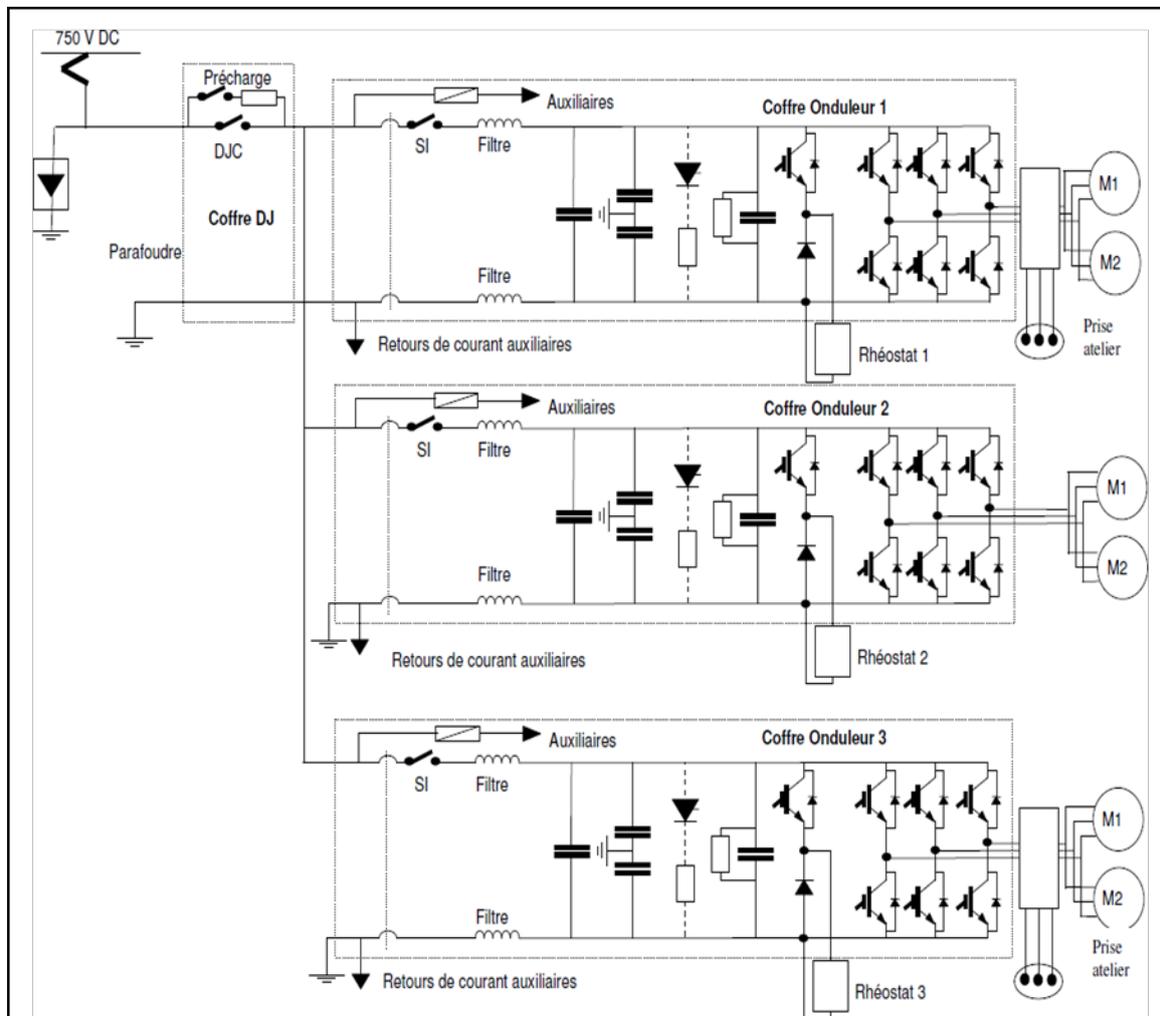


FIGURE 2.9 – Schéma de puissance de la chaîne de traction

2.7 Description et fonctionnement des équipements de la chaîne

2.7.1 Le pantographe

Description

Le pantographe est le dispositif articulé qui permet à la rame électrique de capturer le courant par frottement contre la caténaire.

Le Shunk mono-bras SBE 922-V2, équipé du Citadis 402, satisfait aux exigences d'alimentation des véhicules de traction électrique, notamment les véhicules de chemin de fer et autres véhicules de transport.

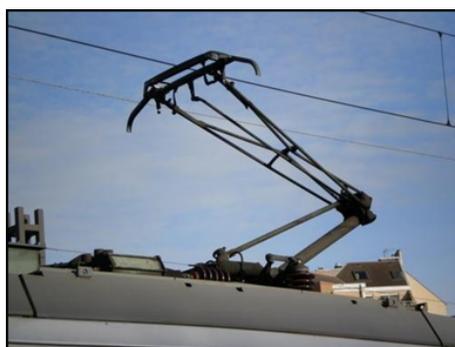


FIGURE 2.10 – Pantographe monobras.

Caractéristiques électriques & mécaniques

Les caractéristiques techniques et les éléments de structure du pantographe sont présentés dans le tableau et la figure ci-dessous.

TABLE 2.2 – Caractéristiques techniques du SBE 922-V2.

Hauteur minimale avec isolateurs	300 mm (± 10 mm)
Largeur de l'archet	1700 mm (± 10 mm)
Poids total avec les isolateurs	env. 145 kg
Longueur des bandes de frottement de courant	1050 mm
Matériau des bandes de frottement de courant	carbone métallisé
Tension	500 V à 900 V
Courant	max. 1500 A
Masse réduite tube supérieur	env. 28 kg
Force statique vers le haut du pantographe	85 N (± 10 N)
Vitesse maximale avec une caténaire en bon état	120 km/h

La figure suivante représente les composants structurels du pantographe :

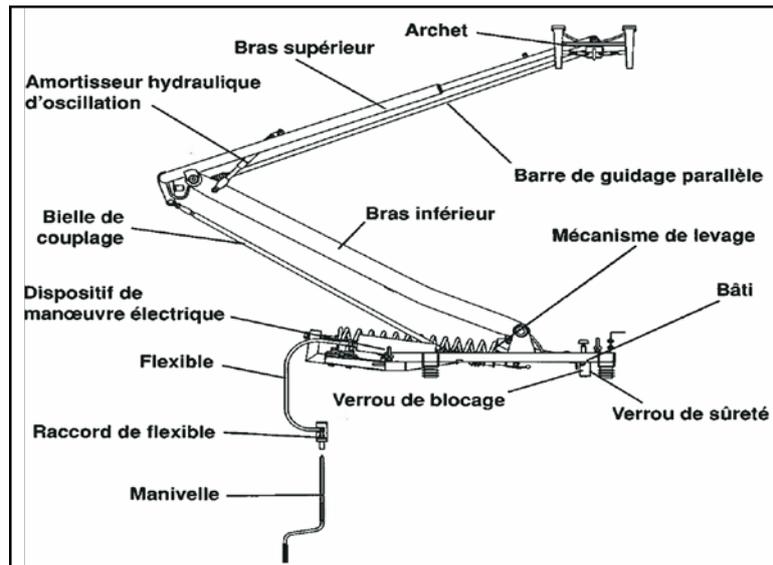


FIGURE 2.11 – Composants structurels du pantographe.

Fonctionnement

Des bandes de carbone sont attachées à l'archet généralement deux jusqu'à huit pour certains modèles adaptés au 1500V DC qui font office de frotteurs sur la ligne aérienne de contact et permettent de capter l'énergie. Ces bandes peuvent être fermement courbées ou montées sur ressort indépendamment. Un système d'amortissement est fixé au pantographe pour maintenir la pression des bandes de carbone sur la caténaire aussi constante que possible [13].

Cet amortissement utilise généralement des ressorts mécaniques et/ou des vérins pneumatiques. Dans le cadre du pantographe pneumatique, l'extension du bras est garantie par un vérin pneumatique qui permet à la caténaire de maintenir une pression constante. Le pantographe se replie par gravité, lorsque la pression d'air est annulée. Dans le cadre du pantographe électrique, le cas du Citadis 402, un moteur électrique supplémentaire garantit la montée et la descente.

Un mauvais contact avec la caténaire provoque un des éclairs bleutés dus à la différence de potentiel entre la caténaire et le pantographe. Les causes sont variées, On peut citer des impuretés sur la caténaire, des défauts mécaniques de la caténaire, la présence de glace sur la caténaire, le passage sur un isolateur, des sauts de pantographe.

2.7.2 Le parafoudre

Description

Le parafoudre *VARISIL HDC 1* est conçu pour protéger contre les surtensions du matériel alimenté sous une tension nominale de 750 V en courant continu. Ce dernier est de technologie à oxyde de zinc sans éclateur et avec enveloppe synthétique. C'est un parafoudre 10 kA classe 2 par référence à la Norme CEI60099-4 [14].

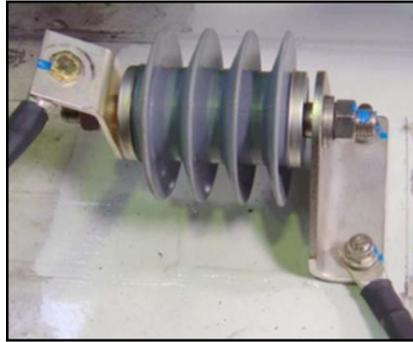


FIGURE 2.12 – Parafoudre

Caractéristiques

Le tableau suivant présente les caractéristiques électriques et mécaniques du parafoudre.

TABLE 2.3 – Caractéristiques électriques et mécaniques du parafoudre[14]

Tension nominale	600 – 700 V
Tension maximale	900 V
Tension exceptionnelle	1000 V
Tension de service permanent (U_c)	900 V
Tension assignée	1000 V / 300 s
Courant nominal de décharge	10 KA
Classe de décharge de ligne	Classe 2
Tenus aux chocs de courants de grande amplitude (2 impulsions)	100 KA
Tenus aux chocs de courants de longue durée (6x3 impulsions)	500 A
Tension résiduelle (niveau de protection)	2.4 KV – 3.2 KV crête
Capacité d'absorption d'énergie (1 impulsion)	3 KJ / KV de U_c
Masse	1.133 Kg
Température ambiante de fonctionnement	-40°C à +70°C

La figure ci-dessous illustre l'allure de la courbe caractéristique du parafoudre :

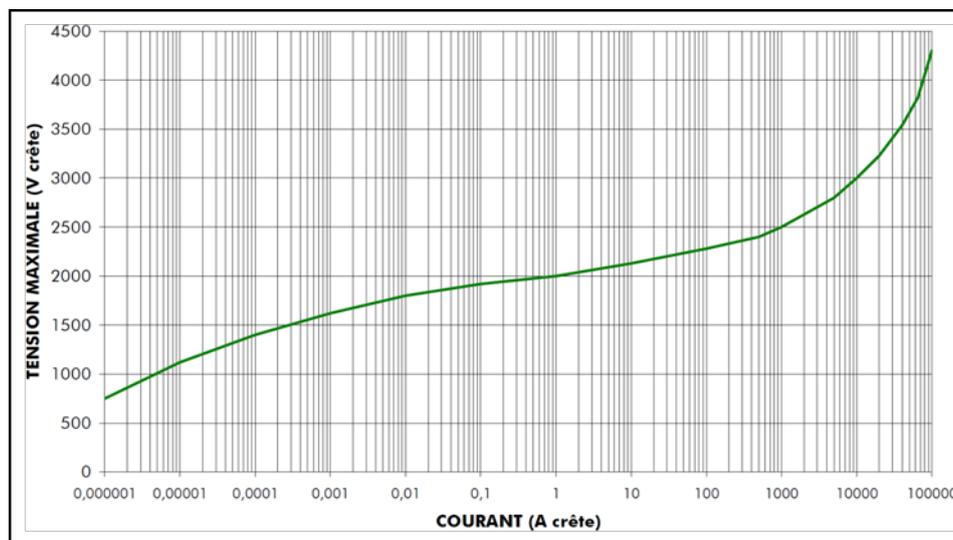


FIGURE 2.13 – Courbe caractéristique du parafoudre

2.7.3 Le coffre disjoncteur principal

Description

Il se compose du **disjoncteur**, du **circuit de précharge** ainsi que le **capteur de tension**. La figure suivante 4.8 représente le coffre disjoncteur principal.



FIGURE 2.14 – Coffre disjoncteur principal.

Le disjoncteur

Description

C'est un dispositif de sécurité qui permet d'interrompre un courant de surcharge ou de court-circuit, il est conçu pour protéger des équipements électriques qui suivent sur la chaîne de traction contre les dommages causés par un courant excessif et le bon fonctionnement de ces derniers.

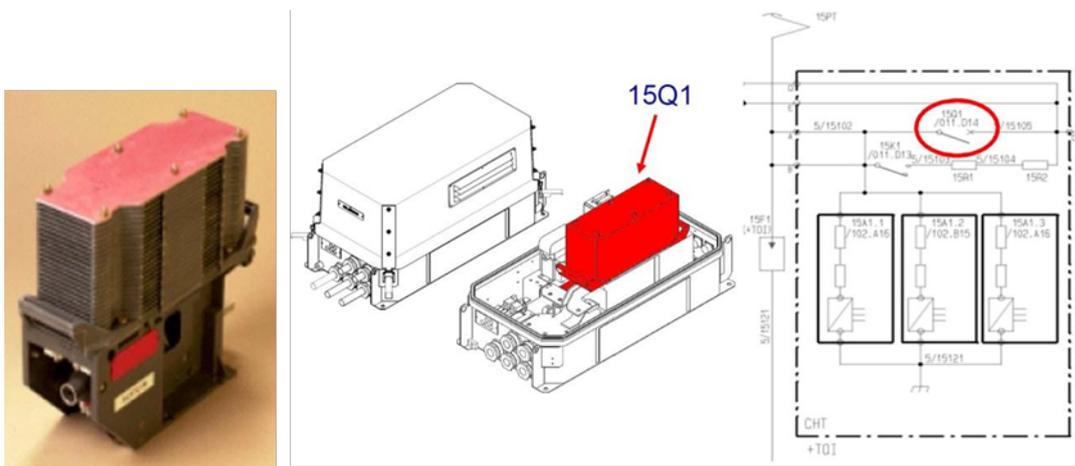


FIGURE 2.15 – Disjoncteur.

Fonctionnement

Le disjoncteur assure l'isolement de la chaîne de traction ainsi que la protection :

- sur ordre d'une des commandes de traction
- par son circuit de déclenchement intrinsèque (seuil 2 400 A) il est associé à une platine de commande contrôlée par l'AGATE Contrôles qui assure sa fermeture (commande de maintien et commande d'enclenchement) et son ouverture (par coupure du maintien)

Caractéristiques : Les différentes caractéristiques du disjoncteur sont regroupées dans le tableau 2.3

TABLE 2.4 – Caractéristique Disjoncteur [9]

Tension nominale d'utilisation	750 V
Courant d'utilisation	1200 A
Réglage du seuil de surintensité	2400 A
Tension d'isolement (suivant CEI-77)	3000 V
Tension d'essai électrique	3875 V / 50 Hz / 1 min
Tension de tenue aux chocs	18 KV – 1.5 / 50 μ s
Contacts auxiliaires	
Nombre maximum	8
Calibre thermique	8A
Tension de tenue diélectrique entre contacts	1500 V / 50 Hz / 1 min
Pouvoir de coupure	
U = 200 V L / R = 15 ms I = 1 A	
U = 110 V L / R = 15 ms I = 5 A	
U = 40 V L / R = 15 ms I = 15 A	
Caractéristiques de coupure	
Courts-circuits	
Pouvoir assigné de fermeture-coupure en CC	33 KA, L / R = 15 ms, U = 900 V
Surtensions de manœuvres générées	< ou = 1 875 V
Courants critiques	
Interruption de tous courants jusqu'à un courant nul résistifs ou inductifs	(L / R = 0 ... 30 ms)
Surtensions de manœuvres générées	< ou = 1 875 V
Caractéristiques temporelles	
Durée d'ouverture de commande par	f(di/dt) : 2 à 8 ms le déclencheur à maximum d'intensité
Durée d'ouverture de commande par coupure du maintien	6 à 11 ms Durée d'ouverture mécanique
Par déclencheur à maximum d'intensité	20 ms
Par coupure de maintien	25 ms
Durée de fermeture	< ou = 120 ms
Masse	28.5 Kg

Le circuit de précharge

Description

C'est un dispositif de sécurité et de prévention de dégâts contre les surtensions. Il limite le courant à la mise sous tension. Le contacteur de pré-charge est commandé par l'*AGATE* Contrôles qui vérifie la charge du filtre onduleur avant de commander l'enclenchement du disjoncteur.

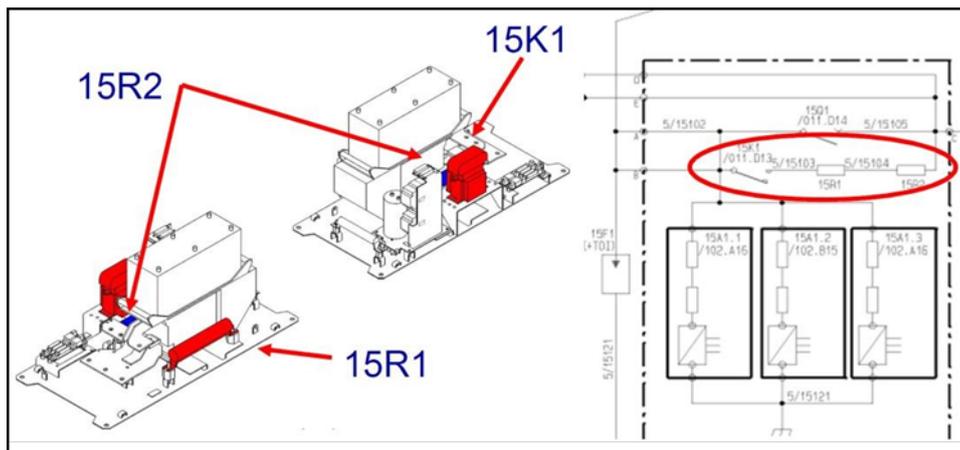


FIGURE 2.16 – Le circuit de précharge.

Les capteurs de tension

Description

C'est une sorte de transformateurs de courant qui au passage d'un courant sur son primaire arrivent à calculer son intensité sur leurs secondaires. Ils indiquent la tension caténaire aux commandes de traction.

Les *AGATE* Contrôle sur détection de présence de tension caténaire (entre 400 1000V) autorisent la séquence de précharge des filtres onduleur et la fermeture du disjoncteur.

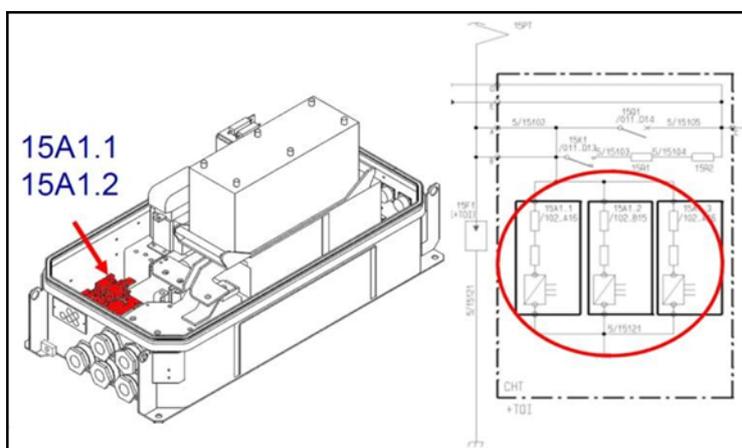


FIGURE 2.17 – Les capteurs de tension.

2.7.4 Le coffre équipements traction-freinage ETF

Les trois coffres d'électronique traction - freinage (ETF) de la rame sont identiques. Ils comportent un onduleur triphasé alimentant deux moteurs en parallèle, un sectionneur d'isolement et un hacheur de freinage rhéostatique faisant également office d'écrêteur en traction.



FIGURE 2.18 – Coffre ETF.

Ils comportent de plus un système de ventilation autonome alimenté à partir du réseau 24 V. L'équipement électronique traction - freinage (ETF) est divisé en 4 compartiments :

- Coffret 1 : contient un circuit d'entrée, un sectionneur d'isolement, un court-circuiteur et un système de ventilation.
- Coffret 2 : contient des filtres inductifs (self).
- Coffrets 3 : appelé « ONIX 808 » contient un onduleur, un hacheur rhéostatique et des condensateurs du filtre.
- Coffret 4 : contient un automate de contrôle appelé « *AGATE* contrôle ».

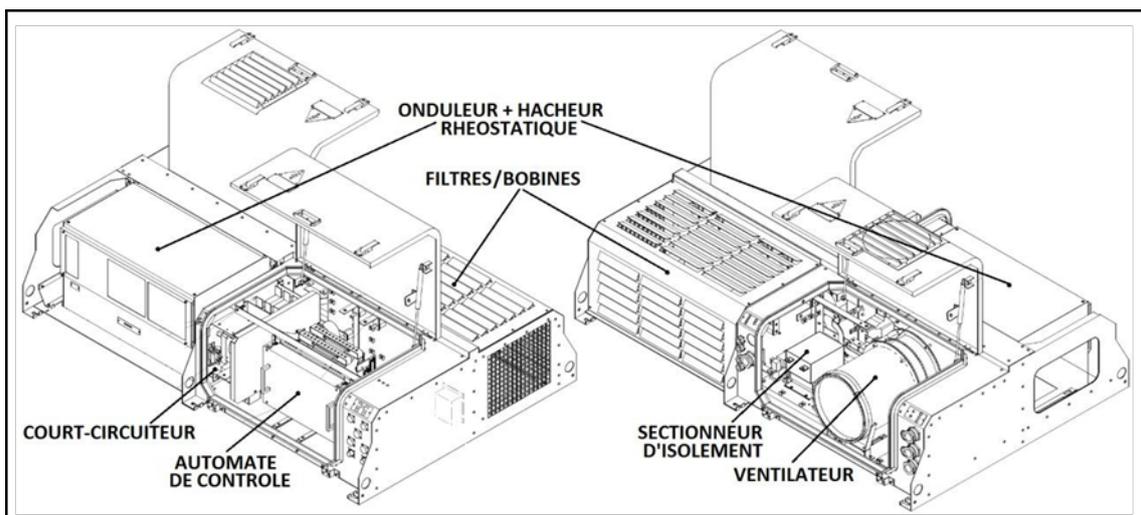


FIGURE 2.19 – Équipements du coffret ETF.

Dimensions

Dimensions	
Longueur	2 000 mm
Largeur	1 295 mm
Hauteur	460 mm
Masse	490 Kg

TABLE 2.5 – Dimensions du coffret ETF

Les schémas suivants montrent la synoptique et les schémas de puissance de l'ETF.

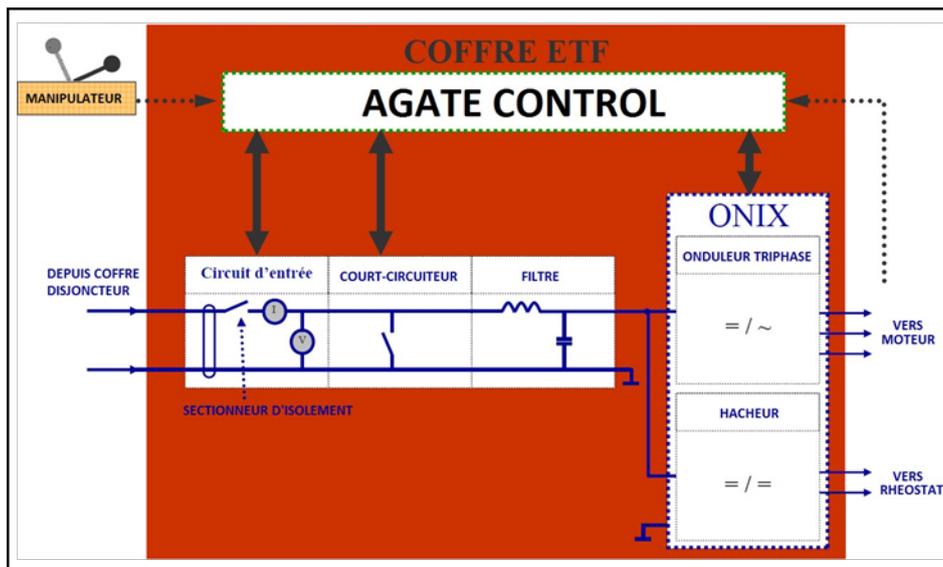


FIGURE 2.20 – Schéma synoptique du coffre ETF

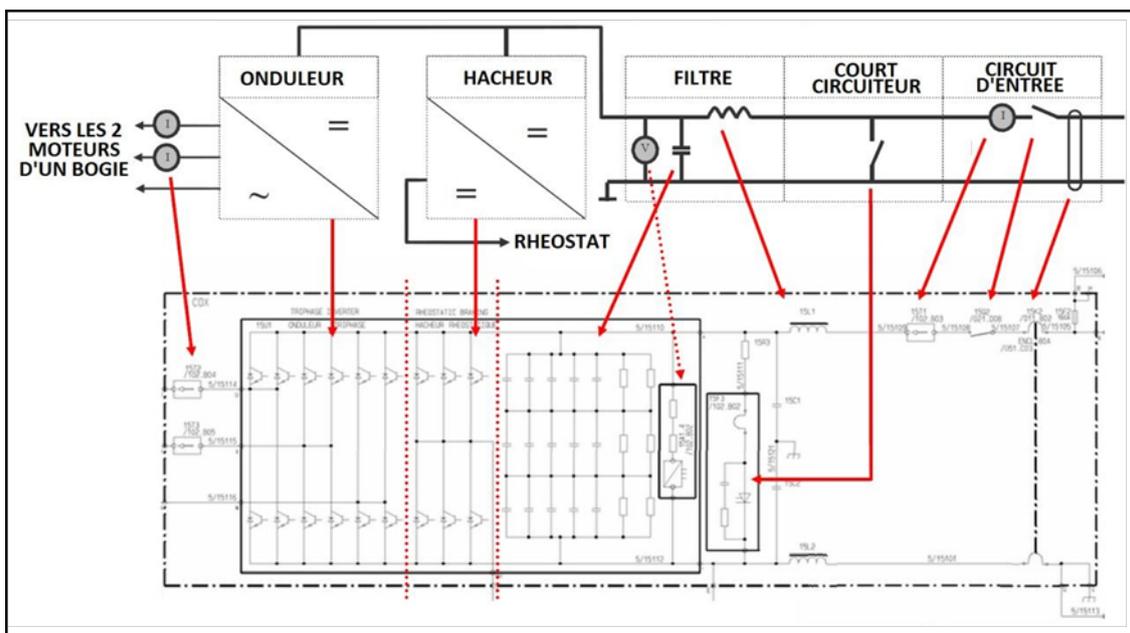


FIGURE 2.21 – Schéma synoptique puissance.

Le circuit d'entrée

C'est l'entrée de Onix 808 et de 750 V DC, il est constitué de :

- une alimentation du convertisseur auxiliaire,
- d'un relais différentiel qui assure la détection des défauts de masse.
- d'un sectionneur d'isolement.

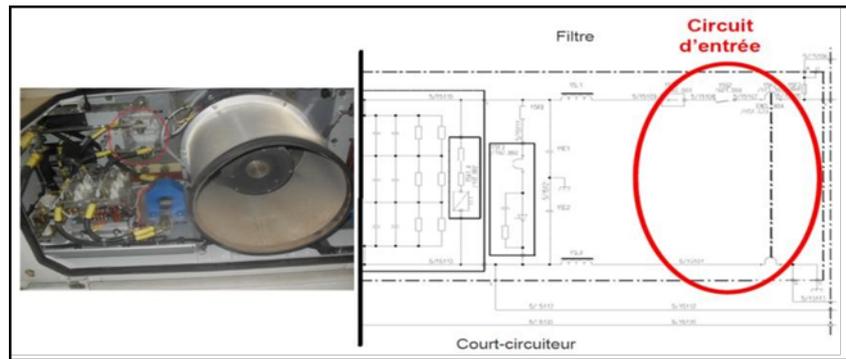


FIGURE 2.22 – Circuit d’entrée.

Sectionneur d’isolement

C’est un appareil électromécanique permettant de séparer, de façon mécanique, un circuit électrique et son alimentation, tout en assurant physiquement une distance de sectionnement satisfaisante électriquement.

En cas de défaut confirmé d’un ETF, celui-ci est en mesure de s’isoler automatiquement en commandant l’ouverture de son sectionneur d’isolement. L’ouverture des sectionneurs est commandée par les défauts définitifs d’isolement bogie.

La séquence d’isolement est la suivante : ouverture du DJC, puis commande d’ouverture du sectionneur après une temporisation. Le retour d’état “ ouvert ” du sectionneur autorise alors la réalimentation de la boucle de maintien du disjoncteur et donc sa re-fermeture.

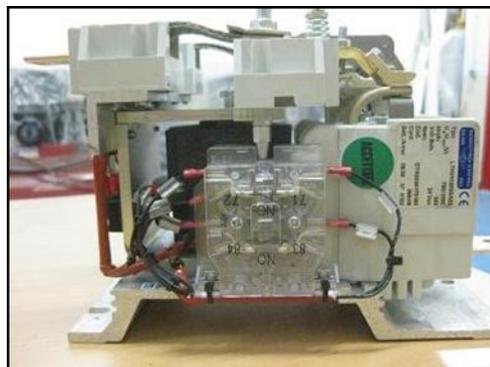


FIGURE 2.23 – Sectionneur d’isolement.

Le court-circuiteur

Un court-circuit est un phénomène électrique qui se produit notamment lorsque deux fils électriques sont mis en contact direct, le plus souvent suite à un défaut d’isolation. Il protège l’équipement des surtensions apparaissant sur la caténaire[15].

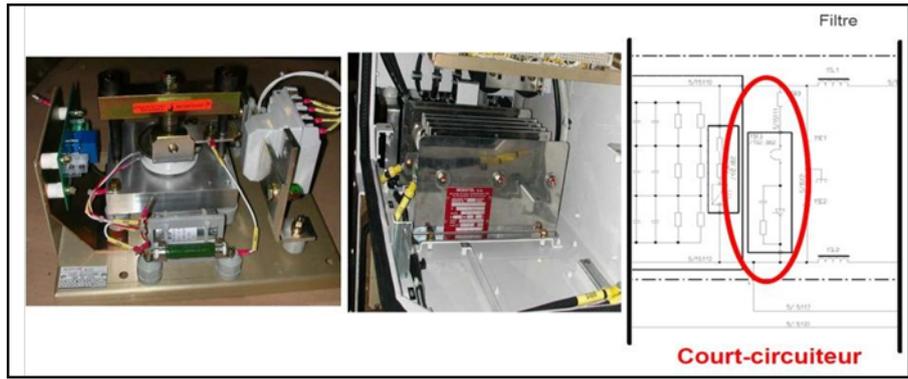


FIGURE 2.24 – Court-circuiteur.

Le filtre inductif

Le filtre inductif est constitué d'une bobine qu'on appelle souvent bobine de lissage. Cette dernière est placée en série avec la résistance de charge[16]. La principale propriété d'une bobine est de s'opposer à toute variation brusque de courant. Ils atténuent les courants perturbateurs (harmoniques) sur la caténaire.

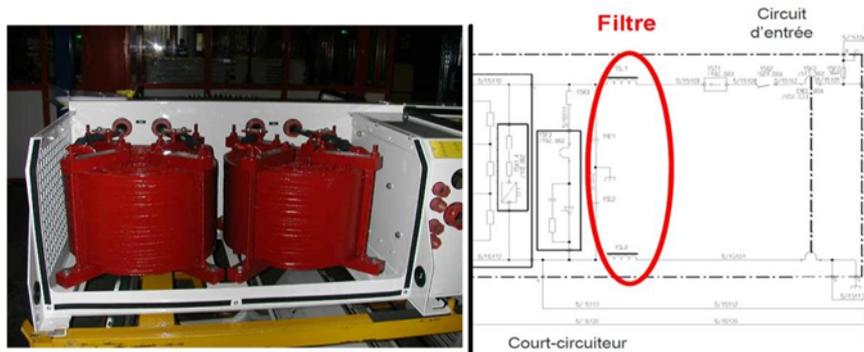


FIGURE 2.25 – Filtres.

Le système de ventilation

C'est un système de refroidissement à l'air ambiant forcé, il absorbe l'air frais de l'extérieur des parois de l'ETF et le fait passer dans l'ONIX à l'aide d'un radiateur pour refroidir les commutateurs de l'onduleur qui se trouve derrière ce coffret.

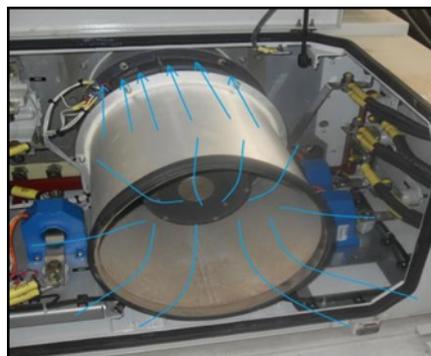


FIGURE 2.26 – Ventilateur.

Le coffre *ONIX*

C'est le coffre principal de l'équipement de traction freinage, il est constitué de trois fonctions qui sont :

- Onduleur
- Hacheur rhéostatique
- Condensateurs du filtre

Condensateurs du filtre

Le condensateur de filtrage permet de réduire la variation de tension en sortie d'une alimentation. Après le redressement, la tension de sortie est positive, mais n'est toujours pas constante[17]. Pour lisser cette tension, la transformée en tension continue, on utilise donc un condensateur de filtrage qui va stocker l'énergie lorsque la tension est proche de son maximum et la restituer pendant les « trous », lorsque la tension est faible. En rajoutant des résistances, il deviendra un filtre passe-bas qui est un filtre qui laisse passer les basses fréquences et qui atténue les hautes fréquences, c'est-à-dire les fréquences supérieures à la fréquence de coupure. Il pourrait également être appelé filtre coupe-haut[18].

L'onduleur de tension

Il est intégré dans le module *ONIX* 808, l'onduleur assure l'ondulation du courant continu entrant de tension 750 VDC de la caténaire à un courant alternatif triphasé de tension 290/500 V (tension phase et entre phases) et de ce fait alimente les moteurs de traction.

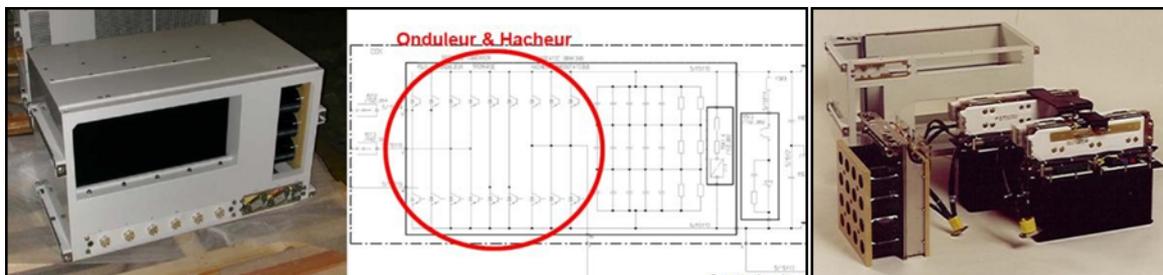


FIGURE 2.27 – *ONIX* 808.

Les convertisseurs de puissance actuels utilisent exclusivement des IGBT. Les fabricants proposent des packs IGBT comprenant le transistor IGBT et sa diode en antiparallèle dans le même boîtier . Ces packs comprennent sur leur face supérieure les différentes connectiques haute et basse tension. La face inférieure est une surface plane destinée à transmettre la chaleur. Les packs sont ensuite montés sur une plaque à eau ou un radiateur. Les connectiques haute tension sont reliées par l'intermédiaire de bus bar. L'ensemble formé peut constituer un bras d'onduleur ou un onduleur entier, il comprend la commande rapprochée et constitue une unité élémentaire facilement déposable. Ces modules comprennent de façon courante l'onduleur et le bras du hacheur rhéostatique.

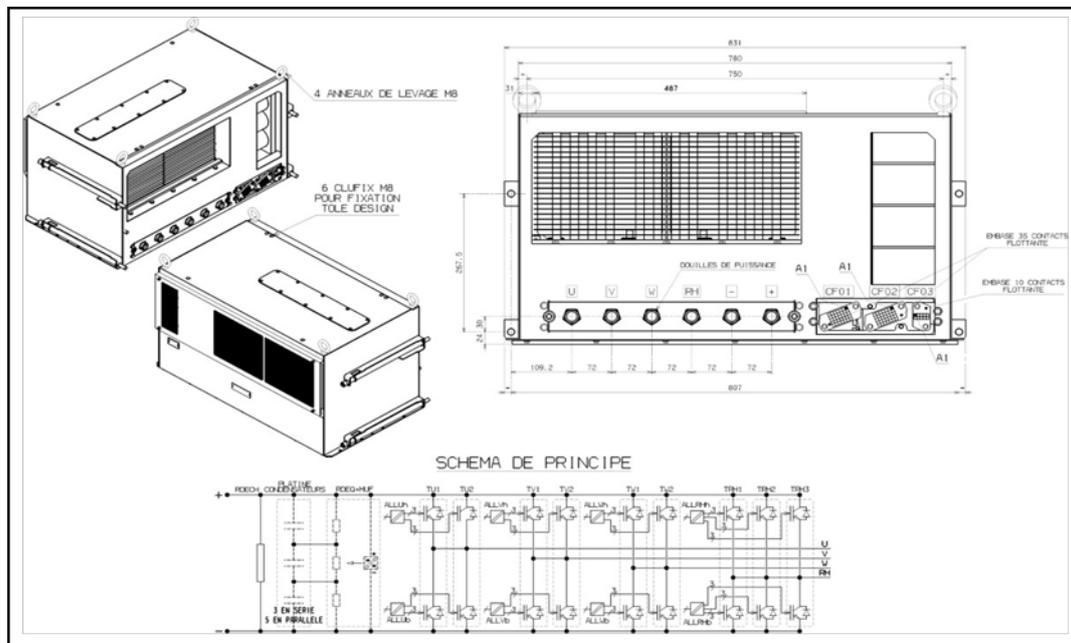
Il est constitué de 6 bras qui sont repartis deux bras pour chaque phase, et cela, pour diviser le grand courant de la source que l'IGBT ne le support pas. Le bras est composé de 2 IGBT 800 A en parallèle. Dans le mode traction et à l'aide de la loi de découpe de type MLI asynchrone, la tension continue de la caténaire est transformé en une tension alternative triphasée de fréquence et de tension variable. Dans le mode de freinage, joue le rôle d'un convertisseur destiné récupère de l'énergie au réseau qui nécessite de l'être par

une tension et un courant, tous deux les plus continus possibles, à partir d'une source (les deux moteurs en mode génératrice) de tension alternative.

TABLE 2.6 – ONIX 808, schéma de principe.

Longueur	831 mm
Hauteur	446 mm
Masse	135 Kg
Tension onduleur	
Tension phase et entre phases en mode traction (Pleine onde, fondamental RMS)	290/500 V
Tension phase et entre phases en mode freinage (Pleine onde, fondamental RMS)	360/625 V
Commande de l'onduleur	
2 points	type IGBT
MLI logiciel de type « intersective asynchrone »	1250 Hz

TABLE 2.7 – Caractéristiques du coffre ONIX



Le hacheur rhéostatique

Durant une décélération, l'inertie motrice provoque une réjection d'énergie qui par l'effet de découpage onduleur, le hacheur rhéostatique est associé à un rhéostat qui est implanté sur les caisses C. Le hacheur assure :

- le frein électrique lorsque la caténaire n'est pas récupératrice (pas de consommateur).
- le maintien de la tension à une valeur acceptable pour tous les composants.
- La protection des équipements vis-à-vis des surtensions.



FIGURE 2.28 – Rhéostat de freinage.

Dimensions hors tout

Longueur	1 400 mm
Largeur	836 mm
Hauteur	450 mm
Masse	100 Kg
Nombre de résistances	2
Résistances à froid	0.8 à 0.9 Ohm
Résistances à chaud	1 à 1.5 Ohm
Puissance moyenne	64 KW
Inductance parasite à 1 000 Hz	10 μ H
Courant crête impulsionnel	1 220 A

TABLE 2.8 – Caractéristiques du rhéostat de freinage

2.7.5 L'AGATE control

AGATE (Advanced Gec Alsthom Traction Electronics) C'est l'ordinateur de bord, le cerveau de commande et l'automate qui gère toutes les fonctions et consignes de la chaîne de traction du tramway. Tous les capteurs se trouvant sur le tramway sont reliés à cet ordinateur.



FIGURE 2.29 – L'AGATE control.

Le tableau suivant représente les caractéristiques de l'AGATE control

TABLE 2.9 – Caractéristiques de l'AGATE control

Dimensions	
Longueur	460 mm
Largeur	290 mm
Hauteur	270 mm
Masse	15 Kg
Tension d'alimentation	24 V
Température de fonctionnement	-25°C à +70 °C

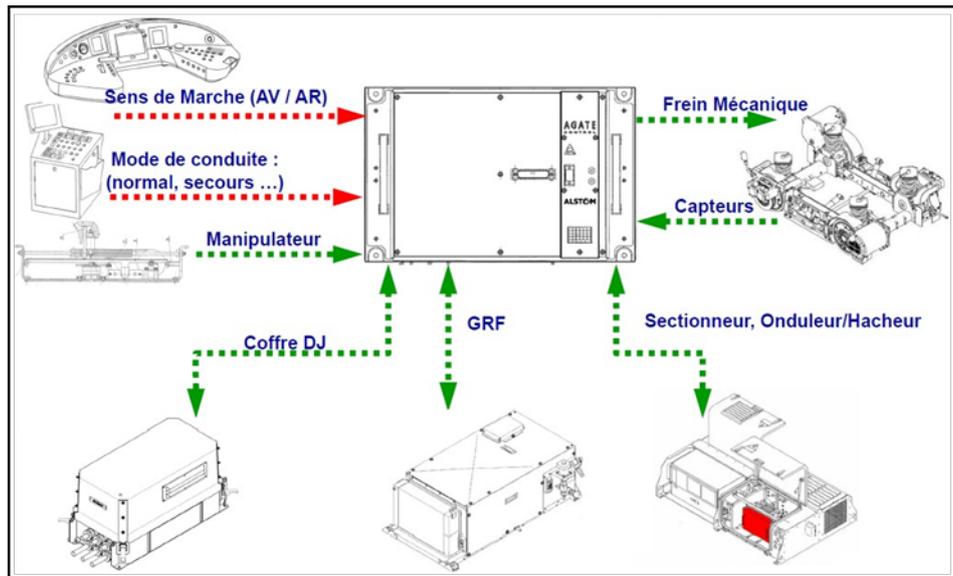


FIGURE 2.30 – Schéma des connexions de l'AGATE control

Fonctions réalisées par la commande AGATE control

Émetteur de consigne :

Réception de la consigne analogique du manipulateur et émission par l'EMCO de la consigne d'effort vers les Agate Control sous forme de signal PWM.

Surveillance et validation des ordres de conduite :

Réception des lignes de train sens de marche, traction / freinage et modes de conduite (normale, manœuvre, secours, remorquage / poussage).

Traitement des modes de conduite :

Validation du sens de marche, du régime de marche (traction / freinage) et du mode de conduite.

Élaboration de l'effort électrique :

Calcul de la consigne d'effort électrique à la jante en traction / freinage dans les différents modes de conduite et en fonction de la charge de la rame.

Élaboration de l'effort de freinage mécanique :

Calcul de la consigne d'effort mécanique en fonction de l'effort électrique réalisé et transmission à l'ETF du bogie moteur.

Traitement des mesures de vitesse :

Signaux de vitesse des capteurs du bogie moteur local, d'un capteur du bogie porteur et d'un capteur du bogie moteur adjacent. Détection sens de marche et dérive.

Anti-patinage, Anti-enrayage :

Calcul d'une vitesse de référence, détection de patinage ou d'enrayage, régression de l'effort et adaptation à l'adhérence disponible.

Commande Appareillage (disjoncteur, sectionneur) :

Commande de la précharge du filtre onduleur, fermeture / ouverture du disjoncteur, fermeture du sectionneur, isolement de l'onduleur sur défaut.

Pilotage moteur :

À partir de la consigne de couple moteur, génération des impulsions IGBT onduleur à partir :

- des courants phases moteur, de la tension filtre onduleur (PAG et PNG).
- des tensions entre phase moteur (PAG uniquement).

Protection (surtension / surintensité)

- Commande du court-circuiteur si tension filtre onduleur $> 1300V$.
- Commande écrêteur si tension filtre onduleur $> 1000 V$.

Commande GRF :

Commande de la pompe et du ventilateur (PV / GV). Surveillance du pressostat et des thermostats dans le GRF. Surveillance des contacteurs et niveau de liquide GRF5 uniquement.

Maintenance :

Logiciel de diagnostic MMAP, enregistreur d'évènements / de défauts.

Tests :

Autotests de la commande, essais à puissance réduite (EPR) de la chaîne de traction.

2.7.6 Le manipulateur

Description

Le manipulateur est un actionneur mécanique qui donne la permission au conducteur de commander la traction, le sens de marche, le freinage et l'arrêt du véhicule.

Le manipulateur transmet de la cabine aux *AGATE* Control :

- des informations logiques traction, freinage.
- une consigne d'effort analogique.

Il comprend un bouton de veille automatique implanté en extrémité de la poignée, du côté gauche une touche sensitive à effet capacitif permet par son effleurement de valider la fonction vigilance.

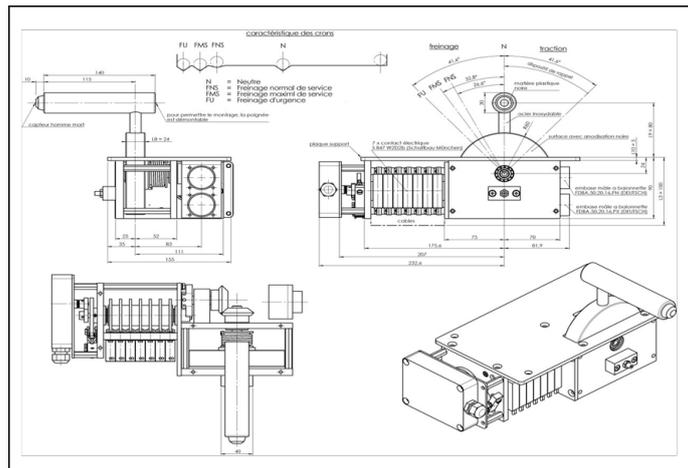


FIGURE 2.31 – Schéma détaillé avec coupe transversale du manipulateur.

Fonctionnement

- Par actionnement en rotation dans un plan vertical de la poignée, il permet :
 - la commande progressive de l'effort de traction,
 - la commande progressive de l'effort de freinage,
 - la commande de frein d'urgence.
- Par effleurement d'une touche sensitive en bout de poignée, la veille automatique est validée.

Lors des manœuvres, le manipulateur actionne l'axe d'un potentiomètre rotatif (combinateur à cames) délivrant au niveau de son curseur la consigne d'effort. Le manipulateur actionne également lors des manœuvres 7 contacts.

Caractéristiques du potentiomètre

Potentiomètre rotatif bipiste ; chaque piste à une valeur ohmique de $600 \Omega \pm 10$ Les bornes homologues sont câblées en parallèle à l'extérieur du boîtier du potentiomètre.

Le boîtier du potentiomètre est classé IP65 selon norme CEI 529.

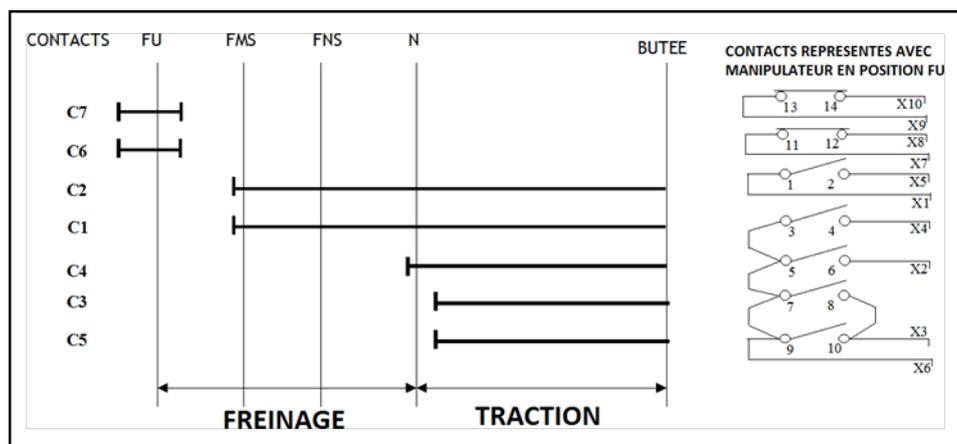


FIGURE 2.32 – Schéma de fonctionnement du potentiomètre.

Positions du manipulateur et zones de traction-freinage

La poignée du manipulateur peut occuper les positions crantées suivantes :

TABLE 2.10 – Positions du manipulateur et zones de traction

Position haute	traction
Position centrale N	marche sur l'erre
Position FNS	freinage normal de service
Position FMS	freinage maximal de service
Position FU	freinage d'urgence

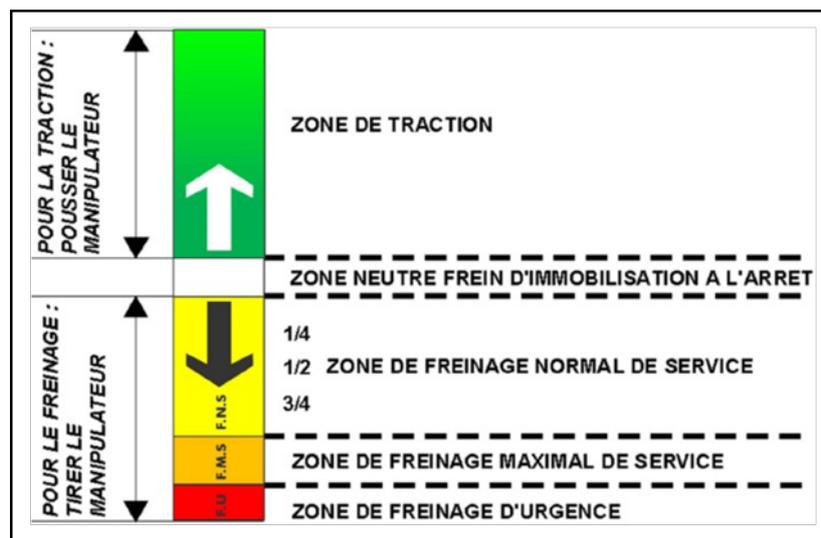


FIGURE 2.33 – Différentes zones des positions du manipulateur

Les positions N et FMS sont matérialisées par un cran fort, les autres positions par un cran faible.

La poignée peut également se déplacer sur les 2 plages suivantes :

- Plage TR située vers l'avant du cran N : commande progressive de l'effort de traction
- Plage F située à l'arrière du cran N en allant vers FNS : commande progressive de l'effort de freinage.

2.7.7 Le GRF

Le GRF, appelé GRF5 pour 5e génération est le groupe de refroidissement des moteurs de traction de la gamme Citadis. Il assure le refroidissement par une circulation d'eau dans les deux moteurs de traction du bogie. Il est prévu pour équiper l'ensemble des nouvelles rames Citadis 400 – 500.

Il est équipé d'une pompe à entraînement magnétique (au lieu d'une pompe à garniture pour les versions précédentes) ainsi qu'un détecteur de niveau de liquide installé sur le vase d'expansion. Le fluide de refroidissement du groupe est composé d'eau + mono éthylène glycol 40 % et d'additifs anticorrosion, marque Elf Antar, Réf. : CoolElf SUPRA.

Les moteurs de pompe et de ventilateur sont alimentés par le 400 V 50 Hz fourni par le CVS (convertisseur Statique). La température ambiante maximale de fonctionnement est de 50 °C.

Composants du GRF

Le groupe de refroidissement moteur GRF comprend un ensemble moto pompe, une pompe à entraînement magnétique, un moteur de pompe, un groupe Moto-Ventilateur,

un moteur du ventilateur, un ventilateur, un échangeur, un filtre (carter + cartouche), un vase d'expansion, un détecteur de niveau, une tuyauterie, un pressostat différentiel, des thermostats (85°, 105°C), des contacteurs triphasé, un bloc de 4 contacts auxiliaires, des protection thermique pour moteur de ventilateur GV et PV et pour moteur de pompe, un relais monostable et un relais temporisateur.

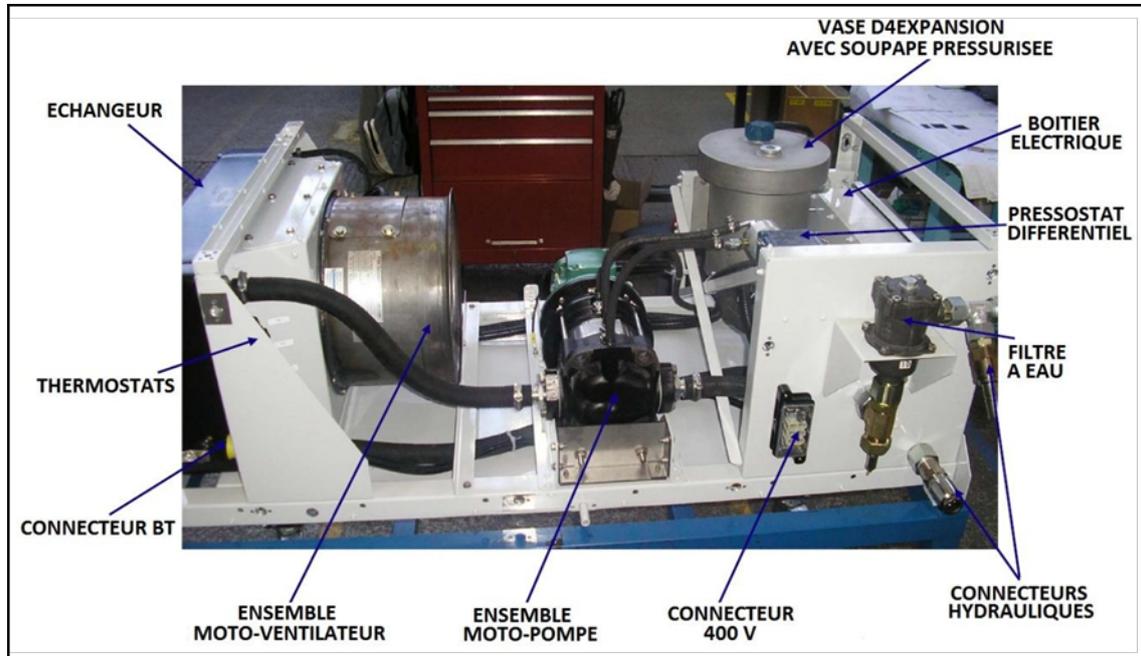


FIGURE 2.34 – Constituants du GRF5.

Fonctionnement

La pompe assurant la circulation du liquide de refroidissement, elle est alimentée à vitesse nominale dès que le véhicule est préparé et que le convertisseur principal CVS fonctionne. En cas de disparition de la haute tension, la pompe reste alimentée pendant environ 20 minutes. Il en va de même pour le cas du véhicule, mais la pompe tourne alors à vitesse réduite.

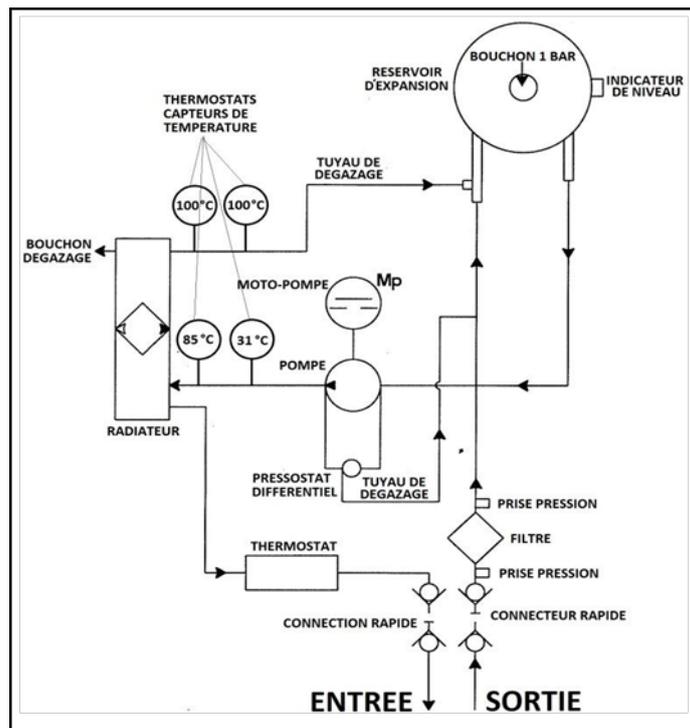


FIGURE 2.35 – Schéma hydraulique du circuit de refroidissement.

La ventilation du groupe de refroidissement des moteurs est alimentée quand la température du liquide de refroidissement est supérieure à 30 °C. Si la vitesse du véhicule est nul (arrêt en station par exemple) ou si la température du liquide est inférieure à la température haute maximale 85 °C ou en cas de défaut du chargeur de batterie, la vitesse de ventilation est réduite de moitié.

L'équipement traction-freinage est isolé en cas de dépassement de la température du liquide de refroidissement de 95 °C ou de débit insuffisant. Le dépassement d'un premier seuil de température de 85 °C provoque une réduction de puissance (25 %) des moteurs de traction du bogie concerné. Cette situation est réversible lorsque la température redescend en dessous des 85 °C.

Des informations des défauts des GRF sont transmises pour l'exploitation et la maintenance par les ETF. Les moteurs de traction ne sont pas refroidis pendant les opérations de remorquage du véhicule.

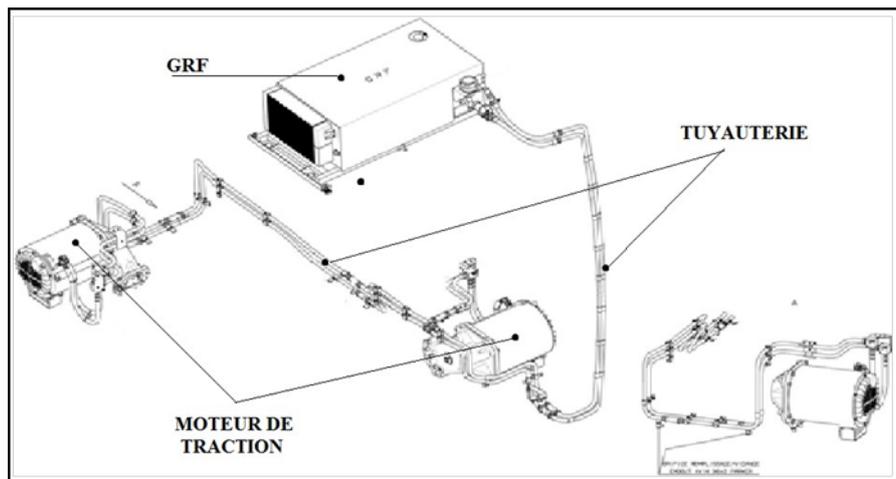


FIGURE 2.36 – Vue éclatée du circuit de refroidissement des moteurs

2.7.8 Le bogie moteur

Chaque élément CITADIS 402 est composé de 7 caisses sous lesquelles sont implantés des bogies ARPEGE 350 M 2 bogies moteurs extrêmes pour plancher bas, 1 bogie moteur intermédiaire pour plancher bas et 1 bogie porteur pour plancher bas. Chaque bogie moteur ARPEGE 350 M est bimoteur à roulement sur fer et comporte 2 châssis - ponts moteurs.

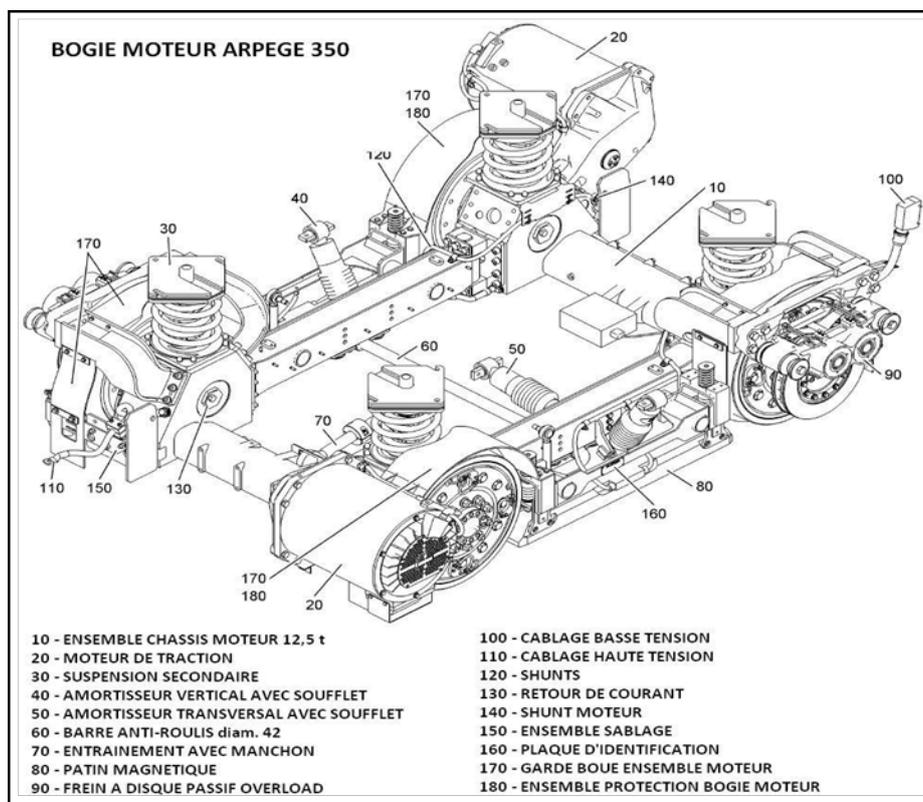


FIGURE 2.37 – Bogie moteur ARPEGE 4 HGA 1433.

Ces principaux constituants sont :

- Le pont moteur,

- La suspension,
- Le moteur de traction,
- Le réducteur,
- Les essieux et les roues,
- Les freins.

Le pont moteur

Un châssis pont - moteur est constitué d'un pont moteur, et d'un longeron fixé rigidement au pont moteur. Chaque châssis - pont moteur fait office d'essieu et de demi - châssis de bogie, le pont réalisant la partie transversale du 1/2 châssis de bogie. Chaque moteur est fixé rigidement à un pont et entraîne la chaîne cinématique sans accouplement. Le pont est muni de 2 moyeux sur lesquels sont fixées les roues fer élastiques.

La suspension

Afin d'amortir, d'entraîner et d'absorber les chocs sur la rame en mouvement, en freinage et à l'arrêt,

Le moteur

A) Description

Le moteur de traction 4 HGA 1433 est destiné à la motorisation des tramways standards modulaires à plancher bas 100 % de type Citadis "Arpège " défini ci-dessous.

Chaque véhicule de référence Citadis 402 est composé de 6 essieux motorisés sur lesquels on trouve :

- Un moteur de traction disposé parallèlement à l'essieu et flasqué sur le réducteur.
- Un réducteur à double réduction, le moteur entraînant un premier étage à partir duquel le mouvement est distribué par l'intermédiaire d'un deuxième étage, directement sur la roue côté moteur et via un arbre de transmission sur la roue côté opposé du moteur.
- Le moteur est flasqué sur le carter secondaire du pont moteur. Le moteur est centré sur le carter par un alésage et bridé au carter (le pignon d'entrée du réducteur est calé sur l'arbre moteur).

B) Conception

Ce moteur de traction est un moteur triphasé, asynchrone 4 pôles, à cage d'écureuil, fermé et refroidi par fluide caloporteur (Le groupe de refroidissement « GRF » est dimensionné par l'intégrateur électricien selon les besoins du moteur).

La conception du moteur de traction est similaire aux moteurs déjà développés et en service pour les applications urbaines et suburbaines, depuis l'utilisation des onduleurs de traction triphasés.

Le refroidissement global moteur est fait par une circulation de liquide à l'intérieur d'une enveloppe concentrique, dimensionnée en fonction des performances du train,

des pertes à évacuer, du volume imposé par le bogie et la caisse (pignon et étanchéité à chicanes), des contraintes de masse, de bruit, du type de fixations, ainsi que des contraintes de coût, de disponibilité et de maintenance.

Les objectifs techniques et particularités de la conception ALSTOM Ornans sont les suivants :

- Augmenter la disponibilité du produit,
- Réduire les coûts de maintenance,
- Réduction du volume et masse du produit dans le volume imposé,
- Réduction du bruit.

La conception du moteur 4 HGA 1433 est similaire aux machines installées sur le tramway de Bruxelles, trolley CIVIS, CRISTALIS et Automotrices CORADIA LIREX et CORADIA X60 pour la Suède :

- Moteur totalement fermé et protégé contre l'eau, la neige et les poussières,
- Aucune absorption d'humidité et d'eau par l'isolation,
- Aucun risque d'obstruction du circuit d'air par la pollution,
- Aucun risque de d'usure de l'isolation par abrasion,
- Aucun risque de dépôt conducteur dans le bobinage et connections,
- Pas de pollution au niveau de la graisse des roulements.

Ce type de conception permet d'obtenir des qualités de service optimales :

- Totale protection du moteur dans toutes les conditions de service,
- Refroidissement permanent lors des phases d'arrêt,
- Excellent rendement,
- Très faible bruit à toutes les vitesses.

C) Caractéristiques spécifiées du moteur

Les principaux paramètres de dimensionnement du moteur sont les suivantes :

TABLE 2.11 – Caractéristiques électriques et mécaniques du moteur.

Type	750 V
Tension ligne nominale pour performance	
Tension ligne, mode traction	750 V DC
Tension ligne, mode freinage	900 V DC
Tension onduleur	
Tension phase et entre phases, mode traction pleine onde, fondamental RMS	500 V / 290 V
Tension phase et entre phases, mode freinage pleine onde, fondamental RMS	625 V / 360 V
Régime continu (Puissance nominale à l'arbre)	120 KW
Tension phase et entre phase	290 / 500 V
Intensité	168 A
Vitesse moteur	2 600 tr/min
Fréquence	88,1 Hz
Rendement	94 %
Plage de vitesse	0 à 4 563 tr/min
Refroidissement	par fluide caloporteur
Débit d'eau mini par moteur	840 L/heure (14 L/min)
Température max du fluide en entrée	80 °C
Alimentation	effectuée par 3 câbles, raccordés dans une boîte à bornes
Transmission	accouplée au réducteur par pignon
Montage	disposé à axe parallèle à l'essieu et flasqué sur le réducteur
Carcasse	polygonale de type mécano soudé, à l'intérieur de laquelle le circuit de refroidissement est incorporé
Palier - coté commande	roulement à rouleaux
Palier - coté opposé	commande roulements à billes
Largeur	400 mm
Hauteur	451 mm
Longueur	623 mm
Masse rotor à cage équipée	92 Kg
Masse totale	335 Kg
Vitesse max du véhicule	70 km/h
Vitesse moteur (pour 70 km/h et roues mi-usées)	4563 tr/min
Vitesse moteur (pour 70 km/h et roues usées)	4820 tr/min

Couples / Efforts maximaux développés

Les couples moteurs maximaux en mode traction et en mode freinage sont calculés à partir des caractéristiques d'entraînement et des caractéristiques du véhicule de référence « Citadis 402 Générique », définies ci-dessus, pour un diamètre de roue mi- usée.

Effort de traction par véhicule, 6 moteurs	
Effort jante total	113.25 KN
Couple de démarrage à l'arbre moteur (roues mi-usées)	1200 Nm
Effort de freinage par véhicule, 6 moteurs	
Effort jante total	110.55 KN
Couple de freinage à l'arbre moteur (roues mi-usées)	1080 Nm
Effort de traction par véhicule, traction surrégime, 2 moteurs	
Effort jante total	68.74 KN
Couple de démarrage à l'arbre moteur (roues mi-usées)	1456 Nm

TABLE 2.12 – Caractéristiques mécaniques du moteur

Performances de motorisation

Le moteur de traction 4 HGA 1433 est dimensionné pour :

- Fournir, au démarrage, un couple maximum de 1200 Nm pour un courant absorbé de 420 A (fondamental RMS, pleine onde 290 V / 500 V),
- Fournir au démarrage mode « surrégime », un couple maximum de 1456 Nm pour un courant absorbé de 511 A (fondamental RMS, pleine onde 290 V / 500 V),
- Fournir en freinage, un couple maximum de 720 Nm dans la plage de vitesse 57 Km/h - 6 Km/h (soit 400 tr/min à 3760 tr/min roues mi-usées) pour un courant maximum de 300 A (fondamental RMS, pleine onde 360 V / 625 V).

Les performances de motorisation sont garanties à tension ligne nominale (décrites ci-dessus) et pour tout point de la caractéristique couple / vitesse en traction et freinage avec un écart de diamètre de roue entre essieux d'un même bogie maximal de 1 %.

Les moteurs sont conçus pour réaliser l'effort global garanti pour un fonctionnement de 2 moteurs en parallèle sur le même onduleur.

Les différences de diamètre de roue conduisent à un déséquilibre des couples sur ces moteurs en parallèle. Ceux-ci sont donc conçus pour accepter les déséquilibres de charge résultant de ce schéma.

La compensation est garantie tant que l'écart de diamètre de roue est inférieur à 1 %. Au-delà, l'onduleur continue de fonctionner, mais l'effort global est réduit et limité par les limites de transfert de puissance entre moteurs[19].



FIGURE 2.38 – Photo du moteur + plaque signalétique.

D) **Schéma équivalent**

Le schéma équivalent pour le moteur de traction 4 HGA 1433 est représenté sur la figure suivante : Inductance totale du court-circuit : 0,76 mH (+0 % ; - 10 %), Inductance de magnétisation : 12.1 mH (+0 % ; + 10 %) au flux maximum.

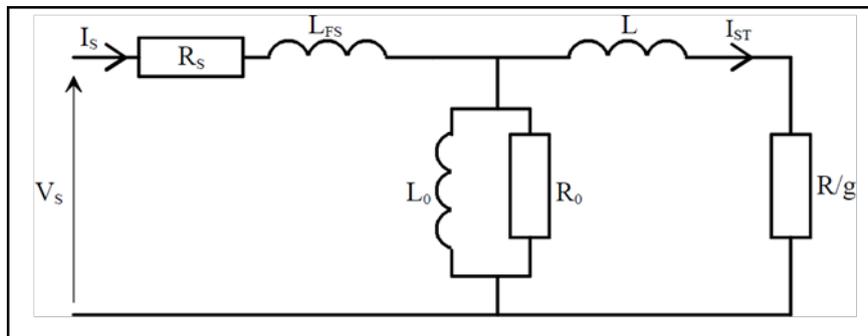


FIGURE 2.39 – Schéma équivalent du moteur.

TABLE 2.13 – Paramètres du schéma équivalent du moteur

P	Nombre de paires de pôles	Température	2
R1	Résistance statorique	à 20 0C	24.8 mW
		à 150 0C	37.5 mW
R2	Résistance rotorique	à 20 0C	17.3 mW
		à 150 0C	24 mW
L1	Inductance de fuite statorique		0.456 mH
L2	Inductance de fuite rotorique		0.304 mH
n	Flux nominal		0.515 Wb

E) **Technologie du moteur 4 HGA 1433**
Généralités

Le moteur est de type asynchrone à cage d'écureuil, 4 pôles, fermé refroidis par liquide, moteur à deux paliers de roulements dont un est refroidis par l'huile de réducteur. Le moteur est flasqué au réducteur et l'entraîne par un pignon solidaire de l'arbre moteur.

Déscriptif de la technologie du moteur

(a) Carcasse externe et circuit d'eau

La carcasse externe cylindrique est en acier moulé, usinée et protégée contre la corrosion.

Le circuit d'eau est un circuit série, usiné longitudinalement dans la carcasse. Ce circuit d'eau est ensuite fermé par une enveloppe soudée sans joints, sur la périphérie de la carcasse.

L'étanchéité de chaque circuit est contrôlée sous une pression d'eau chaude de 5 bars par le fournisseur des carcasses. La pression normale du circuit est de 1 à 2 bars et la perte de charge entre entrée et sortie d'eau est de l'ordre de 0.5 bar. Les raccords des entrées et sorties d'eau sur la carcasse sont adaptées au débit demandé pour un refroidissement nominal de la machine (14 L/min minimum par moteur) et sont disposées sur la carcasse pour un montage optimal des connexions hydrauliques entre moteur et bogie.

(b) Enveloppe du moteur

La structure du moteur consiste en une enveloppe massive rigide garantissant la rigidité mécanique de la machine dans laquelle le circuit d'eau est usiné. Le circuit magnétique stator est monté, bobiné et imprégné (VPI) par frettage à chaud dans la carcasse moteur. Des canaux axiaux sont organisés entre la périphérie du circuit magnétique stator et la carcasse, permettant la circulation d'air interne au moteur et facilitant les échanges thermique.

(c) Bobinage stator

Le circuit magnétique est constitué de tôles magnétiques empilées et frêtées à l'intérieur de la structure moteur. Le bobinage est formé de bobines de fil de cuivre méplat isolé par un film polyamide «Kapton». L'isolation par rapport à la masse des bobines est assurée par rubans de «verre Samica» et de verre. Les bobines sont disposées dans les encoches préalablement protégées par une capote NOMEX KAPTON. L'ensemble bobinage est traité par imprégnation sous vide et pression avec une résine silicone de classe 200 (échauffement maximum toléré de 210 K pour une ambiante max de 40°C et une température d'eau maximale de 80°C).

(d) Rotor

Le rotor comprend un circuit magnétique monté à chaud sur l'arbre, et une cage d'écureuil formée de barres et de cercles brasés à haute température. Les barres, en cuivre au chrome zirconium, sont formées d'un conducteur tréfilé directement à la forme trapézoïdale finale. Les cercles en cuivre au chrome zirconium sont obtenus par forgeage et sont traités thermiquement pour assurer la résilience nécessaire à leur bonne tenue mécanique.

(e) Arbre moteur

L'arbre moteur est réalisé en acier allié à haute limite élastique.

(f) Roulements

Le roulement, côté opposé à l'accouplement, assure le guidage axial et radial du rotor. Il est composé d'une butée axiale et d'un roulement à rouleaux radial. Ce palier est lubrifié par une graisse à haute caractéristique thermique. Un graisseur permet des apports périodiques de lubrifiant sans dépose.

Le roulement, côté réducteur, assure la tenue à la charge radiale de la transmission. Il est lubrifié à l'huile du réducteur.

(g) Roue phonique et capteur de vitesse

Une roue phonique et un boîtier de capteurs de vitesse sont montés côté opposé commande.

Le boîtier capteur permet de monter jusqu'à 2 capteurs (sens de rotation, vitesse..). Ce couple capteur/roue phonique est défini par l'ensemblier intégrateur en fonction des signaux de commande désirés.

(h) Système d'étanchéité moteur/réducteur

L'étanchéité à l'huile du réducteur, entre moteur et réducteur, est effectuée sans joint frottant, par un système à chicanes tournantes, ceci dans un espace extrêmement réduit.

Cette solution d'étanchéité à chicane, permet (par rapport à l'utilisation de joints frottant) en plus de sa fonction propre d'étanchéité, de :

- Garantir au client une étanchéité entre moteur et réducteur, à condition que l'ensemble motoréducteur soit maintenu et utilisé dans des conditions normales en ligne (niveau d'huile réducteur respecté, reniflards réducteurs non obstrués, dévers de voie maîtrisés),
- S'affranchir de tous problèmes mécaniques (chocs, vibrations dues à la voie),
- Augmenter la fiabilité du système en service.

Il est à noter qu'une étanchéité totale utilisant des systèmes frottant comme non frottant n'existe pas. Il subsiste toujours dans le temps un débit de fuite de par l'existence d'un brouillard d'huile. Ce débit de fuite ne perturbe en rien le fonctionnement ni la fiabilité de la machine [19].

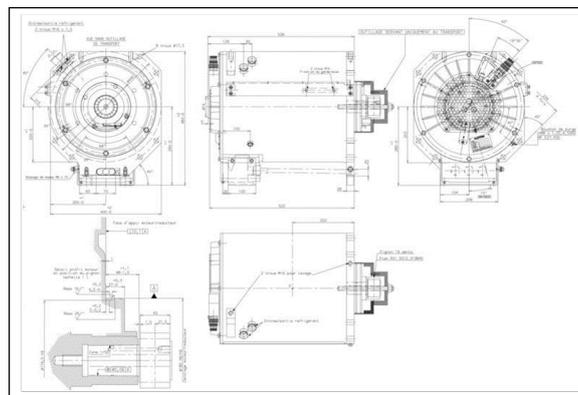


FIGURE 2.40 – Schéma du moteur 4 HGA 1433.

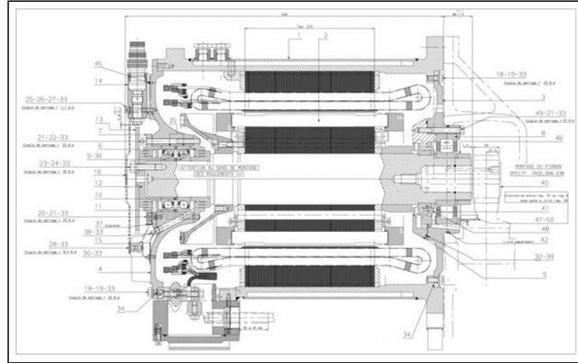


FIGURE 2.41 – Coupe transversale du moteur 4 HGA 1433.

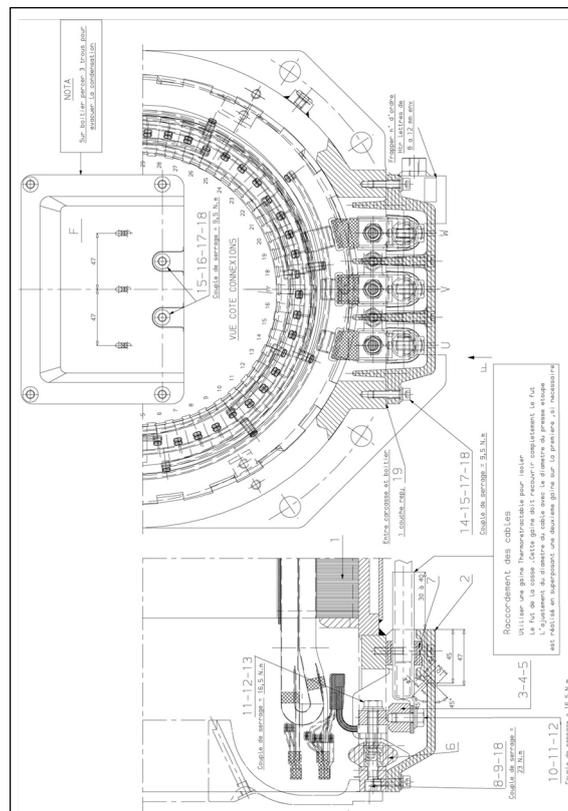


FIGURE 2.42 – Stator bobiné coupe transversale.

F) Capteur de vitesse

La mesure de vitesse des moteurs est réalisée par un capteur qui réagit à la variation de réluctance créée par une roue dentée. Son axe est perpendiculaire à l'axe de cette roue.

Afin de pouvoir déterminer le sens de rotation, deux capteurs sont utilisés sur chaque moteur.

La roue dentée

Elle est solidaire de l'arbre du moteur de traction

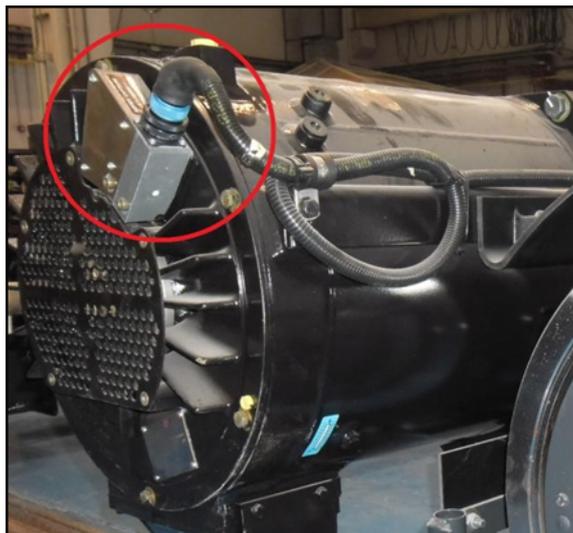


FIGURE 2.43 – Capteur de vitesse et son emplacement sur le moteur

TABLE 2.14 – Caractéristiques de roue dentée

Diamètre extérieur	456 mm +0 / -0.06
Nombre de dents	120
Profondeur des dents	$p = 6 \text{ mm} +0 / - 0.5$
Largeur des encoches	$l = 6 \text{ mm} +/-0.05$
Rapport cyclique	$\frac{1}{2}$
Épaisseur	$e = 12 \text{ mm} +/-0.1$
Matière	acier ordinaire Fe 360 suivant EN 10025

Spécification du positionnement des capteurs

Le montage permettra d'obtenir un entrefer :

$$e = 0.8 \text{ mm} +/- 0.1 \text{ mm}$$

Décalage des deux capteurs :

$$D = kL + L/4 +/- 0.1 \text{ mm}$$

K étant un entier dont la valeur est libre

Les deux capteurs doivent être montés côté entrée d'air de refroidissement et sont protégés mécaniquement contre toute projection.

Placés dans le flux d'air pollué, ils sont étanches. Ils sont montés à l'écart de toute zone où le champ magnétique est important.

Spécification des capteurs

TABLE 2.15 – Caractéristique du capteur

Il est alimenté à partir d'une tension continue	
Température de fonctionnement	-25 °C à + 80 °C
Température de stockage	-40 °C à + 80 °C
Humidité relative	95 % max

Le réducteur

La transmission du mouvement entre moteur et roues est assurée par un réducteur à 2 étages de réduction. Le moteur entraîne un premier étage à partir duquel le mouvement est distribué, par l'intermédiaire d'un deuxième étage, directement sur la roue coté moteur et via un arbre de transmission (passant sous la partie basse du plancher de caisse à 350 mm) sur la roue côté opposé au moteur.

Le premier étage est réalisé par une succession de 4 pignons destinés à donner l'entraxe nécessaire au positionnement du moteur à proximité de la roue de roulement. Le deuxième étage est réalisé par un engrenage dont la roue dentée est liée au moyeu de la roue de roulement. L'ensemble des pignons et roues dentées est de type à denture hélicoïdale. Le pignon d'entrée du réducteur est solidaire de l'arbre moteur. La lubrification de la mécanique est commune à celle des roulements des moyeux de roue. La lubrification du roulement moteur coté réducteur (coté commande) est réalisée par celle de la mécanique du pont [20].

Type	Pont réducteur à 2 étages
6.881	6.881
Premier étage	19 / 58 / 57 / 36
	1.895
Deuxième étage	69 / 19
	3.632
Type de denture	Hélicoïdales

L'essieu et les roues

Les 2 roues d'un même essieu sont entraînées par un unique moteur de traction, ce par l'intermédiaire d'une chaîne cinématique en "oméga" logée en partie dans la poutre du pont réducteur et en partie dans un carter secondaire, dit carter support moteur, solidaire de cette poutre.

On peut considérer de ce fait qu'une roue peut transmettre de 20 à 80 % du couple fourni par le moteur, le couple moyen transmis restant égal à 50 % .

Les freins

Trois dispositifs de freinage sont mis en œuvre, indépendamment ou conjointement, en fonction du mode de conduite sélectionné et de la consigne du freinage :

- Un dispositif de freinage électrodynamique,
- Un dispositif de frein à friction,
- Un dispositif de patins de freins électromagnétiques.

Le freinage du véhicule est essentiellement assuré par un freinage électrodynamique agissant sur les essieux moteurs. Ce freinage est du type à récupération d'énergie avec adjonction d'un frein rhéostatique. La répartition de la dissipation d'énergie entre le frein à récupération et le frein rhéostatique est réalisée automatiquement par le coffre de traction ETF en fonction de la capacité récupératrice de la ligne d'alimentation HT.

Par ailleurs, un frein à friction (du type frein à disques) est monté sur les essieux des bogies moteurs et sur les roues du bogie porteur. L'actuation de ces freins à disques est électro-hydraulique de type indirect (effort de freinage assuré par des ressorts) sur les

bogies moteurs, et de type direct (effort de freinage assuré par la pression hydraulique) sur le bogie porteur.

Enfin, tous les bogies sont équipés de patins de freins électromagnétiques. Ces derniers n'interviennent qu'en freinage d'urgence ou de sécurité. Les efforts de freinage des freins électrodynamiques et à friction sont asservies à la charge du véhicule en freinage de service ou d'urgence.

Les coffres de traction ETF assurent la conjugaison des freins électrodynamiques et à friction. Ils envoient à l'électronique de frein une consigne de freinage mécanique, pour le frein à friction, issue de la conjugaison.

TABLE 2.16 – Caractéristiques générales du freinage

Vitesse maximum	70 Km / h
Gradient maximum	8 %
Freinage de service	1.5 m / s ²
Freinage d'urgence	3 m / s ²
Limitation de Jerk	
Freinage de service	1.5 m / s ²
Freinage d'urgence	8 m / s ²

1. Freinage électrodynamique ou électrique

Appelé aussi frein à récupération d'énergie. Les chaînes de traction électriques sont utilisées pour ralentir les trains ou maintenir leur vitesse dans les pentes raides. Alstom a largement étudié cette option lors de la réalisation du premier TGV pour pouvoir l'appliquer à tous les types de freinage, conformément aux spécifications d'interopérabilité technique, dont le freinage d'urgence pour lequel seul le frein à frottement était autrefois obligatoire. Le freinage électrique est encore plus respectueux de l'environnement. En effet, ce dernier contribue non seulement à éviter l'usure, mais il permet par-dessus tout de récupérer l'énergie électrique [3].

Mode de fonctionnement

En phase de freinage avec récupération, l'énergie produite par les moteurs de traction est renvoyée aux caténaires par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance. Lorsque l'énergie ne peut pas être récupérée, l'électricité se dissipe comme c'est le cas pour la chaleur dans les résistances embarquées (freinage dit « rhéostatique ») [3]. Des composants électroniques haute sécurité contrôlent la traction et les convertisseurs de sorte que le moteur de traction génère de l'électricité pendant les phases de freinage. Ils activent le frein électrique proportionnellement à la pression exercée par le conducteur sur les commandes et peuvent le combiner au frein à frottement. Le dispositif gère l'adhérence pendant le freinage et offre donc une protection contre l'enrayage .

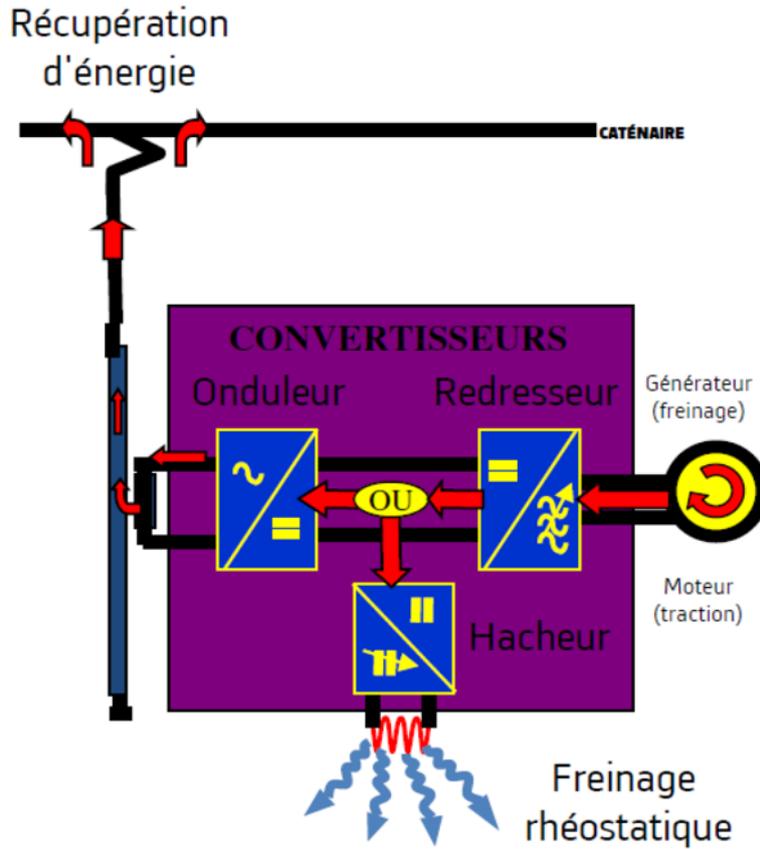


FIGURE 2.44 – Mode de fonctionnement du freinage électrodynamique.

2. Freins a friction

Il s'agit d'un étrier fonctionnant par un système hydroélectrique équipé de plaquettes de frein qui applique une pression sur un disque fixé à la roue du véhicule et par friction aboutit à le freiner. L'étrier de frein fait partie d'un système de frein électro-hydraulique se composant par ailleurs d'un circuit électronique de freinage, d'une commande de moteur de pompe, d'une centrale électro-hydraulique et d'un accumulateur hydraulique (sauf dans les centrales hydrauliques sans accumulateur). Il convertit la pression dans la conduite hydraulique en effort de freinage.



FIGURE 2.45 – Frein à friction

3. Freins électrodynamique

Le patin magnétique est un électro-aimant. Il se compose d'un enroulement autour d'un noyau de fer, qui, alimenté par un courant continu, crée un champ magnétique provoquant un effort de freinage qui s'exerce sur le rail par voie magnétique. Sa force d'adhérence atteint 64 KN.

Par suite de l'adhérence entre la roue et le rail, l'effet de systèmes de freins montés directement sur les roues des véhicules ferroviaires, est limité. Des sabots de frein à friction appliqués sur le rail diminuent la charge par essieu de sorte que les roues commencent rapidement à glisser sur les rails. Mais si l'effort de freinage s'exerce sur le rail par voie magnétique, aucune contre-réaction provoquant une décharge des axes ne se manifeste.

Le frein sur rail électromagnétique est un frein supplémentaire indépendant de l'adhérence des roues. Le frein électromagnétique sur rail a déjà été essayé sur des véhicules roulant à 250 km/h maxi, et s'utilise aujourd'hui sur des trains, tramways et chemins de fer miniers, aussi bien comme frein d'urgence que frein de service. Comme les patins électromagnétiques nettoient les rails, l'adhérence entre la roue et le rail durant le freinage est augmentée.

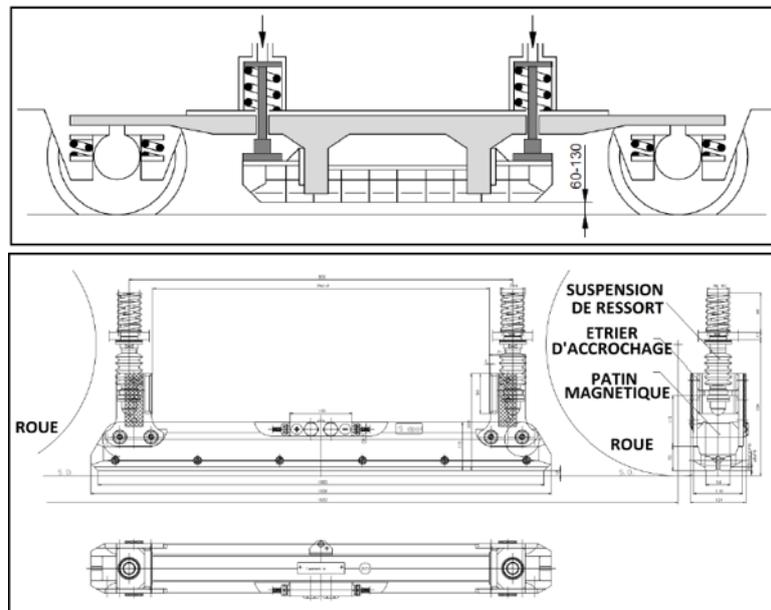


FIGURE 2.46 – Frein électromagnétique

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu la spécifications du projet de tramway d'Alger et nous avons pu étudier la conception de la Citadis 402 d'Alstom ainsi qu'au différents aspects, son alimentation auxquels nous avons pu y contribuer au saint de l'entreprise CITAL. Nous nous somme ensuite intéressé a l'équipement de traction freinage et des différents constituants de la chaine de traction au niveau du modèle de voiture utilisé par l'entreprise C-tram qui assure son exploitation .

Chapitre 3

Analyse des défauts de la chaîne de traction-freinage

3.1 Introduction

Toutes les entreprises industrielles sont régulièrement confrontées à des problèmes de qualité des produits ou des pannes. Pour les résoudre, les ingénieurs mettent souvent en œuvre des approches de résolution de problèmes basées sur des approches expérimentales. L'objectif principal de notre travail est d'identifier les équipements qui causent le plus de pannes et définir les raisons pour les éviter à l'avenir. Cette méthode a pour but la mise en place d'une approche plus rapide de la cause du problème mais aussi, à fournir un guide pour l'application des différentes méthodes d'analyse de données ou d'expérimentation. Il s'agit d'effectuer une analyse du mode de défaillance et de ses effets, qui est déclenché à chaque fois qu'une défaillance se produit dans un environnement de production.

3.2 Maintenance chez *Cital*

La maintenance des tramways se fait dans l'enceinte d'un établissement dénommé dépôt. Celui-ci comprend généralement deux zones distinctes : la zone de remisage avec ses annexes techniques et l'atelier. La zone de remisage est constituée d'un faisceau de voies où stationnent les rames réputées bonnes pour être mises en service commercial. Il n'est pas indispensable de couvrir cette zone puisque, avant la prise de service, il est possible de préchauffer et dégivrer les rames par leur simple préparation. Le remisage est généralement très proche de la station-service, local, maintenu hors-gel, où l'on trouve :

- Une machine à laver par brosses, laquelle peut être fixe ou mobile ;
- Un aspirateur fixe pour le nettoyage intérieur ;
- Une centrale à sable destinée à remplir les sablières disposées au-dessus des roues motrices. L'atelier est équipé de voies aménagées pour la maintenance, préventive et curative, et les réparations.

La maintenance préventive est préconisée par le constructeur du matériel roulant et ses sous-traitants. Il en résulte des gammes qui se font souvent sur un multiple de 5 000 km :

- 5 000 km : examen général de la rame, des plaquettes de freins, du pantographe, des principaux organes électromécaniques, contrôle des niveaux.
- 15 000 km : nettoyage des filtres à air, contrôle et graissage des mécanismes de portes, reprofilage des bandages de roues, examen des bogies, refroidissement des onduleurs et des moteurs de traction.
- 30 000 km : contrôle de tous les éléments des cabines de conduite, révision des centrales hydrauliques des freins mécaniques, examen des disques des freins mécaniques, remplacement de panneaux d'habillage fatigués.
- 60 000 km : contrôle de l'armature des sièges, des baies vitrées, des éléments de chauffage et d'air conditionné, vidange des réducteurs, examen des bogies.
- 120 000 km : contrôle des revêtements de plancher, de tous les auxiliaires et de leurs accessoires, de l'appareillage électrique de protection, renouvellement de la batterie de l'enregistreur de marche, contrôle de toutes les armoires électriques, dépollution du circuit hydraulique(freinage).
- 240 000 km : Les listes des opérations sont cumulatives : une révision après 15 000 km comprend toutes les opérations énumérées dans la révision des 5 000 km.

Un atelier de tramway comprend naturellement aussi les machines-outils les plus classiques mais surtout des bancs-test pour les freins mécaniques, les pantographes, les appareils de puissance tels que les onduleurs ou les convertisseurs statiques. Les logiques à relais ayant cédé la place aux logiques programmées, le personnel de maintenance sont à présent doté de valises test à l'aide desquelles on peut facilement modifier des paramètres. Les interventions sur les cartes électroniques restent souvent limitées au premier niveau car les bancs-test pour ces cartes ont un coût d'acquisition qui ne se justifie pas pour beaucoup de réseaux de tramways qui se limitent à repérer la carte défectueuse, de la renvoyer au fournisseur et de procéder à son remplacement. La cabine de peinture reste encore indispensable pour maintenir l'aspect extérieur en bon état. Depuis l'apparition des matériels modulaires, on peut s'équiper de cabines de plus petites dimensions.

3.3 Méthode d'analyse

Afin de poursuivre une étude donnée, semblable à celle qui est traitée dans ce memoire, il serait judicieux de prendre en compte les différentes caractéristiques de la méthode analytique et ce, afin de fournir des informations relatives au domaine d'étude, en fonction des résultats souhaités. Pour cela, il est important d'établir une définition du domaine ainsi qu'une identification des attentes. En s'appuyant sur ces dernières on peut finalement déterminer la méthode d'analyse qui convient au cas traité.

3.3.1 Méthode abc

Activity-Based Costing (ABC) est une méthode de calcul des coûts qui affecte les frais généraux et les coûts indirects aux produits et services connexes. Cette méthode comptable de calcul des coûts reconnaît la relation entre les coûts, les activités de frais généraux et les produits fabriqués, en affectant les coûts indirects aux produits de façon moins arbitraire que les méthodes traditionnelles de calcul des coûts. Cependant, certains coûts indirects, tels que les salaires des cadres et du personnel de bureau, sont difficiles à affecter à un produit.

La comptabilité par activités (CPA) est surtout utilisée dans l'industrie manufacturière car elle améliore la fiabilité des données sur les coûts, ce qui permet de produire des coûts presque réels, et de mieux classer les coûts encourus par l'entreprise au cours de son processus de production.

Activity-Based Costing (ABC) est une méthode d'affectation des frais généraux et des coûts indirects, tels que les salaires et les services publics, aux produits et services. Le système ABC de comptabilité analytique est basé sur les activités, qui sont considérées comme tout événement, unité de travail ou tâche ayant un objectif spécifique. Une activité est un inducteur de coûts, comme les bons de commande ou les réglages de machines [21]. Le taux d'inducteur de coût, qui correspond au total du regroupement de coûts divisé par l'inducteur de coût, est utilisé pour calculer le montant des frais généraux et indirects liés à une activité particulière. L'ABC est utilisé pour mieux appréhender les coûts, ce qui permet aux entreprises d'élaborer une stratégie de prix plus appropriée.

Ce système de calcul des coûts est utilisé pour le calcul du coût de revient cible, le calcul du coût de revient du produit, l'analyse de la rentabilité de la ligne de produits, l'analyse de la rentabilité du client et la tarification des services. La comptabilité par activités est utilisée pour mieux appréhender les coûts, ce qui permet aux entreprises d'élaborer une stratégie de prix plus appropriée [21].

3.3.2 Le coefficient de Gini

Le coefficient de Gini est un chiffre unique qui indique le degré d'inégalité dans la répartition des revenus et des richesses. Il est utilisé pour estimer dans quelle mesure la répartition des richesses ou des revenus d'un pays s'écarte d'une répartition totalement égale.

En termes de percentiles de population classés par revenu, le coefficient de Gini est le déficit cumulé de la part égale du revenu total jusqu'à chaque percentile. Ce manque à gagner cumulé est ensuite divisé par la valeur qu'il aurait dans le cas d'une égalité totale [22].

Le coefficient de Gini est généralement défini mathématiquement sur la base de la courbe de Lorenz, qui représente la proportion du revenu total de la population (axe des y) qui est gagnée cumulativement par les x derniers de la population (voir diagramme). La ligne à 45 degrés représente donc une égalité parfaite des revenus. Le coefficient de Gini peut alors être considéré comme le rapport de la zone située entre la ligne d'égalité et la courbe de Lorenz (marquée A dans le diagramme) sur la zone totale sous la ligne d'égalité (marquée A et B dans le diagramme) [22].

3.4 Étude des défauts des équipements

En prenant en considération l'historique sur les pannes des équipements établi par l'entreprise *Cital* depuis 2016, le choix de la méthode d'analyse adéquate s'est porté sur la méthode abc avec un coefficient de Gini défini grâce à la courbe de *Lorenz* représentant sur l'axe des ordonnées le nombre de pannes, ainsi que le nombre de pannes cumulées des équipements, et sur l'axe des abscisses les équipements en question.

TABLE 3.1 – Le nombre des panne de sous syteme trac-frein

Equipement	Annee				
	2016/2017	2018/2019	2020/2021	2022	TOT
PANTOGRAPHE	9	18	18	0	45
Bande carbone	14	39	21	5	79
Moteur électrique	20	14	5	0	39
Carte pantographe	0	5	7	1	13
Amortisseur	0	0	0	0	0
Shunts de masses	5	0	0	0	5
Bielle de couplage	0	1	2	0	3
Ressort de montée	1	0	0	0	1
Cornes	0	0	1	0	1
Isolateurs	0	0	1	0	1
TOTALE	49	77	55	6	187
COFFRE DISJONCTEUR	0	0	2	0	2
Disjoncteur	1	2	2	0	5
Contacteur auxiliaire disjoncteur	1	2	1	0	4
Fusible HT	0	0	1	0	1
TOTALE	2	4	6	0	12
COFFRE DE TRACTION	7	5	15	0	27
Module onduleur Onix	47	69	92	0	208
Commande électronique <i>AGATE</i>	29	51	134	5	219
Self	0	0	5	0	5
Moto-ventilateur	5	4	2	0	11
Tiroir ventilation Agate	0	0	0	0	0
Ventilateur brasseur	0	0	0	0	0
Contacteur de ligne	0	1	0	0	1
Fusible	0	0	0	0	0
Contacteur de précharge	0	0	0	0	0
Sectionneur	3	1	4	4	12
TOTALE	91	131	252	9	483

ANALYSE DES DEFAUTS DE LA CHAINE DE TRACTION-FREINAGE

Equipement	Annee				
	2016/2017	2018/2019	2020/2021	2022	TOT
GROUPE DE REFROIDISSEMENT	6	0	6	0	12
Motopompe	5	2	15	2	24
Motoventilateur	1	3	12	0	16
Radiateur	0	0	0	0	0
Filtre	0	0	0	0	0
Thermostat	0	0	0	0	0
Pressostat	0	0	3	0	3
Contacteur motopompe	2	0	1	0	3
Contacteur motoventilateur petite vitesse	0	0	0	0	0
Contacteur motoventilateur grande vitesse	0	0	0	0	0
Roulement GMV	16	10	7	0	33
Liquide GRF	2	0	3	0	5
Flexible	0	0	4	0	4
TOTALE	32	15	51	2	100
MOTEUR DE TRACTION	11	6	5	0	22
Capteur de vitesse sur moteur	1	0	1	0	2
Capteurs de vitesse sur bogie	0	1	5	1	7
RHEOSTAT DE FREINAGE	0	0	0	0	0
PARAFOUDRE	0	0	0	0	0
RETOUR DE COURANT	0	0	0	0	0
Axe Frotteur retour de courant	0	0	0	0	0
Charbons retour de courant	0	0	0	0	0
PRISE ATELIER	0	0	0	0	0
CAPTEUR DE CHARGE	10	3	0	0	13
COMMUTATEUR DE CONDUITE	15	3	3	0	21
MANIPULATEUR DE TRACTION	12	13	22	1	48
VEILLE AUTOMATIQUE	17	11	5	0	33
totale	66	37	41	2	146
TOTALE DE PANNE	240	264	405	19	928

Après avoir utilisé la méthode ABC, on choisit comme critère le nombre de panne et on calcule le coefficient de Gini qui est égale à 0.82 on aura nos zones ABC et la courbe de Lorenz comme le suit :

TABLE 3.2 – Les zones ABC et la saison (2016-2022)

Indice de Gini =0,82		
Les Zones		
A	B	C
20%	20%	60%

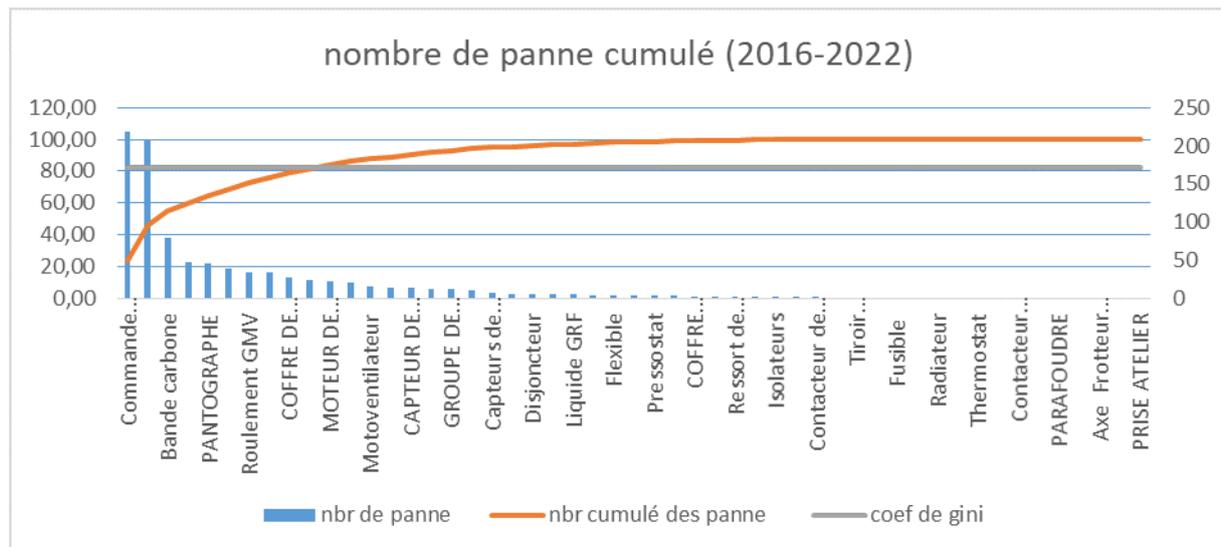


FIGURE 3.1 – Courbe de Lorenz (2016-2022)

3.5 Diagnostique

Après avoir appliqué la méthode abc et le coefficient de Gini sur les données fournis par l'entreprise, nous nous intéresserons dans ce qui suit à la zone A qui représente 20 % des équipements de sous-système traction freinage, cette dernière cause 82 % des pannes depuis 2016 jusqu'à présent. Ces constatations nous ont menés a un diagnostique plus détaillé sur les équipements dans l'optique d'une meilleure détermination des pannes, leurs causes ainsi que les différentes interventions de l'entreprises dans le but de réparer ces dernières. Ceci est récapitulé dans le tableau suivant.

TABLE 3.3 – Diagnostique de Zone A

Equipement	Panne	Cause	Intervention
Commande électronique <i>AGATE</i>	Defaut ETF	-Defaut QDI -Tension ligne	RAZ IB
Module onduleur Onix	Defaut ETF	-Infiltration d'eau	Net-Sech
Bande carbone	Usée		Changé
Manipulateur de traction	-Les vis -Manque de graissage -Bras aml fixe		Réglée
Pantographe	Généralement c'est des défauts mécaniques	-Tige -Clavette -Monte -Chassie	Changé
Moteur électrique	Pantographe	Défaut vérin	
Roulement GMV	Bruit GMV	Roulement gmv	Changé
Veille automatique	-	-	-
Coffre de traction	Defaut ETF	-Defaut QDI -Tension ligne -Infiltration d'eau	-Changé QDI -Net-Sech -Raz IB
Motopompe	Bruit GRF	Motopompe	Changé

1. Coffre équipement traction freinage :

Coffre ETF ou coffre de traction, Nous avons relevé deux défaillances qui se reproduisent plusieurs fois dans ce dernier (près de la moitié des défaillances de l'entreprise). Ceux-ci se trouvent dans les compartiments commande électronique *AGATE* et le module onduleur Onix. Les causes de l'erreur sont la tension de ligne, l'infiltration d'eau et défaut QDI (défaut d'isolement). Les interventions pour ces problèmes techniques sont d'une part le RAZ-IB pour l'*AGATE*, ce qui signifie le réarmement d'ETF qui permet de remettre ETF dans sa position initiale, à la suite d'un déclenchement. En revanche, nettoyez et séchez le module onduleur Onix est une intervention temporaire car la véritable cause de la panne est inconnue.

2. Pantograohe

— **Bande carbone :**

Les bandes en carbone ne sont généralement pas un problème technique, mais ils sont usés en raison de leur durée de vie. L'intervention dans la bande de carbone consiste à les changer.

— **Pantographe et Moteur électrique :**

Ces pannes sont ordinairement des problèmes mécaniques dans les différents composants du pantographe comme il était mentionné dans le chapitre précédent (tige, clavette, chassie, monte,) en plus le moteur électrique affiche défaut vérin. L'intervention du technicien vise à remplacer ces composants.

3. Roulement GMV et Motopompe :

Ce sont des dispositifs de refroidissement de la chaîne de transmission. Les défauts sont détectés lorsque du bruit se produit dans le GMV et le GRF. Premièrement, la cause de GMV est les roulements GMV qui doivent être remplacés pour éliminer

le bruit. Deuxièmement, la motopompe est à l'origine de bruit de GRF et doit être remplacée pour assurer la sécurité de l'unité.

4. Veille automatique et manipulateur de traction

3.6 Module onduleur Onix

Tout d'abord, le module onduleur Onix est à l'origine de 23% des pannes de Cital dues à l'infiltration d'eau, sachant que l'entreprise a beaucoup d'Onix qui sont à l'arrêt. En deuxième lieu, on ne connaît pas le composant de ce module responsable de la panne. À cette fin, nous allons le modéliser sur MATLAB Onix 808 et nous concentrer sur l'analyse des défauts sur ce module. Il se divise en trois parties séparées, deux parties pour l'onduleur/hacheur et une troisième partie pour le filtre.

Le courant qui passe par onix est un courant très fort qui nécessite un câble d'une section importante. Pour cette raison, Alstom propose une solution qui utilise des jeux de barres pour connecter différentes parties, cette technologie minimise le volume de ce module.

Le compartiment onduleur/hacheur se compose de deux parties chacune avec son propre radiateur sur l'un d'eux se trouve quatre bras d'IGBT (2 bras pour chaque phase d'onduleur) et pour le deuxième se trouve cinq bras (2 bras pour la troisième phase de l'onduleur et 3 bras pour le hacheur).



FIGURE 3.2 – La partie Onduleur/Hacheur

Le compartiment du filtre est constitué de condensateurs et de résistances connectés en parallèle. Le but de cette partie est de lisser la tension continue.

3.6.1 Modélisation de onix 808

Modélisation de la commande

L'onix 808 est commandé par la Modulation de largeur d'impulsion autrement dit MLI. Parmi les types de MLI on trouve la commande PWM classique et la commande SVPWM ou :

- La PWM : est une technique couramment utilisée pour synthétiser des signaux pseudo analogiques à l'aide de circuits numériques (tout ou rien, 1 ou 0), ou plus généralement à états discrets [23].

- La SVPWM : La technique de modulation vectorielle est une variante de la commande par modulation de largeur d'impulsion qui se base sur la représentation vectorielle des tensions dans le plan complexe [24].

Les résultat d'une étude de simulation indiquent que les harmoniques sont réduites dans le modèle SVPWM par rapport au modèle PWM et que le THD du couple électromagnétique de PWM et SVPWM est de 48,18% et 21,10% respectivement. Pour cela on va utiliser la commande SVPWM pour la modélisation de l'onduleur [25].

SVPWM

$$\begin{cases} V_1 = V \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t) \\ V_2 = V \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ V_3 = V \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases}$$

Détermination des tensions de références V_α, V_β :

$$\begin{cases} V_\alpha = \sqrt{3}(2V_1 - V_2 - V_3) \\ V_\beta = \frac{3}{4}(V_2 - V_3) \end{cases}$$

La modulation de largeur d'impulsion par vecteur spatial (SVPWM) a été développée à l'origine comme une approche vectorielle de la modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour les onduleurs triphasés. La méthode de modulation de largeur d'impulsion par vecteur spatial (SVPWM) est une méthode PWM avancée, nécessitant des calculs intensifs, et probablement la meilleure technique pour les applications d'entraînement de moteur à induction. Nous utilisons cette méthode pour réduire les pertes de commutation et, par conséquent, la distorsion harmonique totale, ce qui constitue l'avantage de la méthode SVPWM.

$$\begin{cases} V_{ref} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \\ \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_\alpha}{V_\beta}\right) \end{cases}$$

Calcul des temps T_1, T_2, T_0 pour avoir les signaux de modulation :

$$\begin{cases} T_1 = \sqrt{3} \frac{V_{ref}}{V_{DC}} T_s \sin\left(\frac{n\pi}{3} - \alpha\right) \\ T_2 = \sqrt{3} \frac{V_{ref}}{V_{DC}} T_s \sin\left(\alpha - \frac{(n-1)\pi}{3}\right) \\ T_0 = T_s - T_1 - T_2 \end{cases}$$

Principe de la MLI à vecteur spatial :

L'idée principale de la MLI à vecteur spatial est de diviser le plan 2D en six zones égales, chacune d'entre elles étant appelée un secteur. Pour chaque échantillon de temps, nous pouvons déterminer le secteur contenant V_{ref} et calculer la période de temps pour chaque vecteur du secteur déterminé [24].

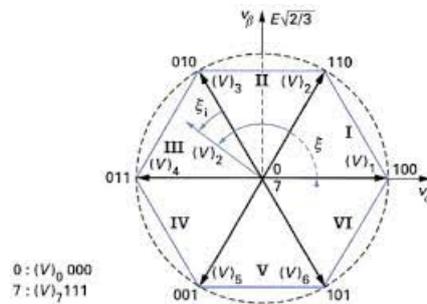


FIGURE 3.3 – Vecteur d'espace V_s

Par conséquent, on aura les secteurs comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

TABLE 3.4 – Les Secteurs de la commande

Sector	Upper Switches(1,3,5)	Lower Switches(2,4,6)
1	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_3 = T_2 + T_0/2$ $S_5 = T_0/2$	$S_2 = T_0/2 + T_1 + T_2$ $S_4 = T_0/2$ $S_6 = T_1 + T_0/2$
2	$S_1 = T_1 + T_0/2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_5 = T_0/2$	$S_2 = T_2 + T_0/2$ $S_6 = T_0/2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0/2$
3	$S_1 = T_0/2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_5 = T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_6 = T_0/2$ $S_2 = T_1 + T_0/2$
4	$S_1 = T_0/2$ $S_3 = T_1 + T_0/2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_6 = T_2 + T_0/2$ $S_2 = T_0/2$
5	$S_1 = T_2 + T_0/2$ $S_3 = T_0/2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_0/2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_2 = T_0/2$
6	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_3 = T_0/2$ $S_5 = T_1 + T_0/2$	$S_4 = T_0/2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_2 = T_2 + T_0/2$

Après avoir défini les secteurs, modéliser la commande dans MATLAB Simulink et ainsi obtenir le schéma fonctionnel. Ensuite, le bloc onduleur/hacheur contient neuf bras, chacun avec deux IGBT, et ce compartiment est relié à un filtre monté en parallèle, comme le montre la figure ci-dessous :

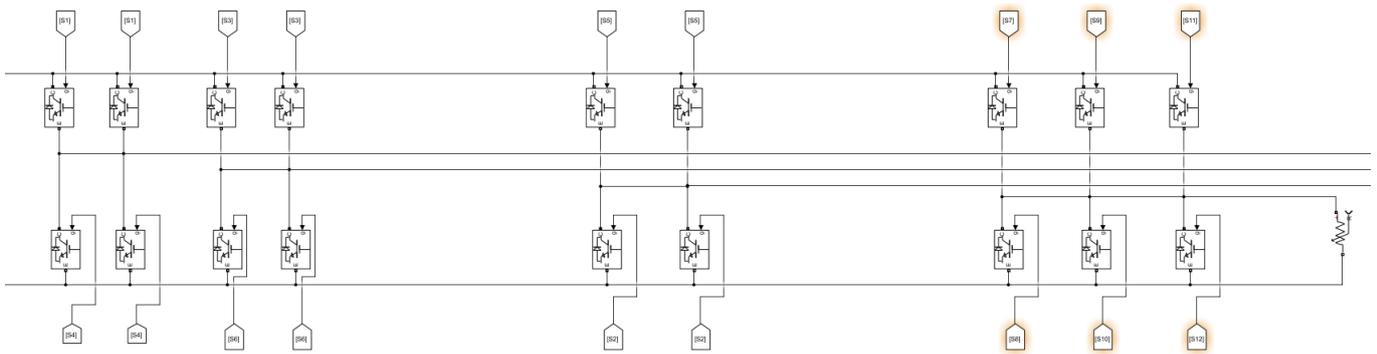


FIGURE 3.4 – Block Onduleur-Hacheur

3.6.2 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle est une méthode qui contribue à générer les fonctions de service et techniques relatives à un produit afin de répondre aux exigences de base du produit. Cette méthode est utilisée au début de la phase de conception ou pour améliorer des concepts existants. Les différents tests exécutables sur le module onix 808 se décomposent en trois fonction :

— fonction de circuit commande :

Elle consiste à tester les cartes commande des onduleurs, et cela, en testant la commande PWM et la mise en œuvre de la carte de circuit imprimé, les composants et les signaux de sortie. Le test d'une carte électronique s'effectue avec un Voltmètre et se fait sous tension[26].

- Généralement, rechercher la tension d'alimentation de la carte électronique aux bornes du cordon secteur. Mesurer la tension avec le voltmètre.
- Rechercher la tension de sortie qui doit alimenter l'élément contrôlé. La tension aux bornes de la fiche menant à l'onduleur/hacheur doit être la même que celle de la commande.
- Si la carte électronique est correctement alimentée et que la tension de sortie est incorrecte, il est fort probable que cette carte soit défectueuse.
- Pour tester un composant, une mesure électrique est effectuée, similaire à la mesure d'un composant sur une carte à l'aide d'un simple multimètre. Le test visuel peut compléter.

— fonction du circuit puissance :

Ce test affecte les composants du circuit, c'est-à-dire tous les IGBT, s'ouvrant et se fermant à l'arrivée de l'impulsion. Tout d'abord, créer un circuit de résistance fermé entre l'émetteur et le collecteur IGBT alimenté par une batterie. Deuxièmement, on place un des appareils de mesure, un voltmètre en parallèle avec une résistance. Un oscilloscope est utilisé pour avoir les fermetures et les ouvertures à temps réel. On peut utiliser un ampèremètre en série avec la résistance pour assurer le passage du courant. Troisièmement, un générateur d'impulsions est utilisé pour envoyer une impulsion à la porte IGBT.

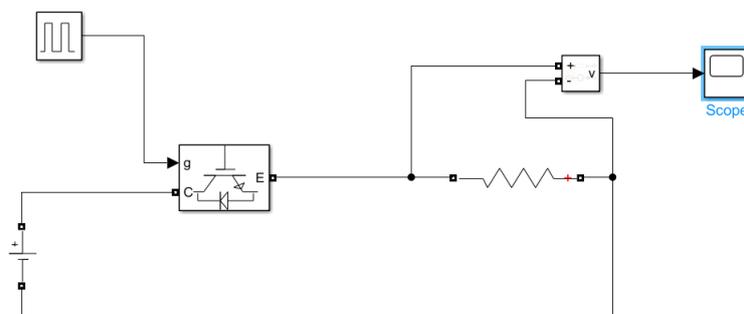


FIGURE 3.5 – Schéma teste IGBT

— fonction de filtre :

Tester les condensateurs et les résistances de ce filtre pour voir s'ils sont en bon état. Cela peut se faire avec un multimètre sans alimenter le filtre ou bien les alimenter et mesurer avec un voltamètre la tension aux bornes de ces composants.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une analyse des défaillances de la chaîne de transmission chez Cital. Puis, vérifié la procédure de maintenance en interne, et

utilisé la méthode ABC et le coefficient de Gini pour montrer que l'onix est la cause de la plupart des pannes de la chaîne. Enfin, après avoir effectué la modélisation de l'onduleur Onix sur MATLAB pour voir l'efficacité de la commande, on a proposé quelques tests qu'il faut faire pour détecter la défaillance des composants du module.

Chapitre 4

Interprétation des résultats

4.1 Introduction

Dans cette partie nous simulons le block de la modulation vectorielle ainsi que les tensions à la sortie de l'onduleur à 2 niveaux. Ensuite nous donnons les résultats des tests dans Onix et leurs interprétation. Enfin, nous proposerons les différentes solutions possibles pour éviter les pannes de l'onduleur onix.

4.2 Les résultats de simulation

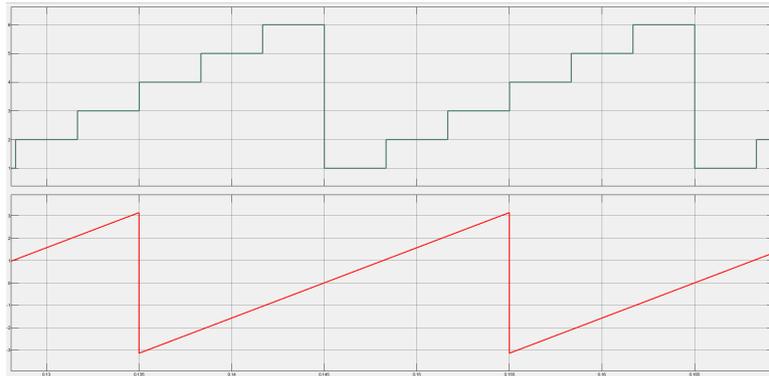


FIGURE 4.1 – Angle et secteur.

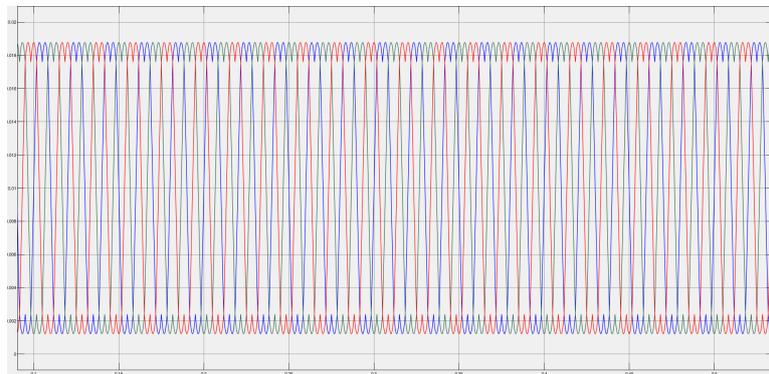


FIGURE 4.2 – Signaux de modulation.

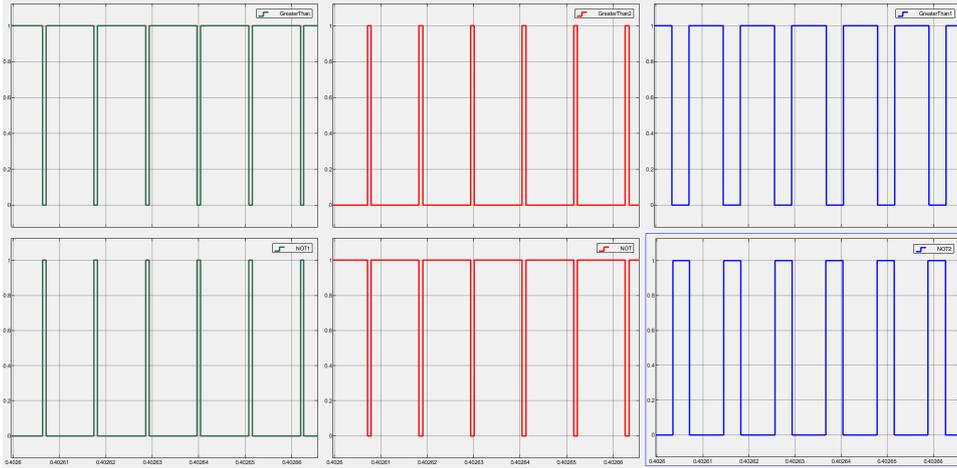


FIGURE 4.3 – Signaux de commande.

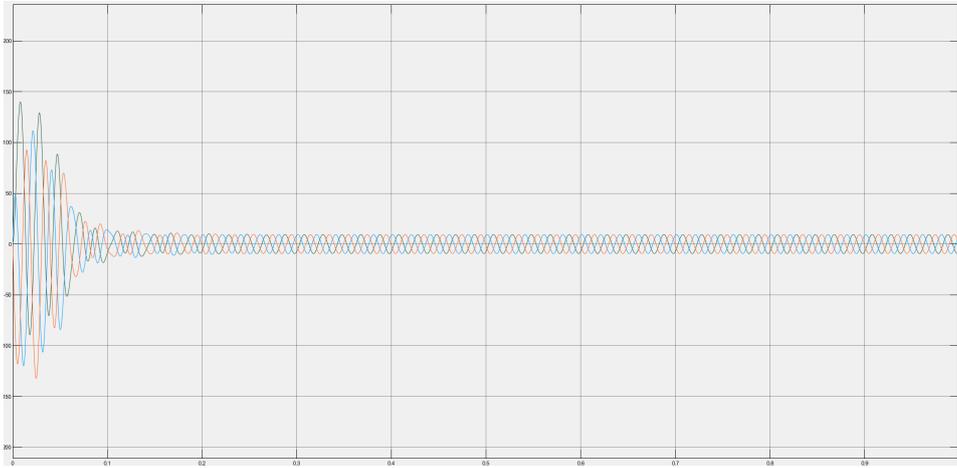


FIGURE 4.4 – Tension de sortie d'onduleur



FIGURE 4.5 – Les courant de sorties d'onduleur

Les Figure 4.1 et Figure 4.2, présentent respectivement l'évolution du secteur S avec angle et les trois signaux de modulation Tcm1, Tcm2, Tcm3. Le signal triangulaire

doit être comparé avec les trois modulant afin d'obtenir les signaux de commande pilotant le convertisseur, dont on représente les impulsions de la commande pour chaque IGBT de l'onduleur à la Figure 4.3 . La Figure 4.4 et la Figure 4.5 montrent les allures des tensions et courant de sortie de l'onduleur . Après le régime transitoire le THD des courants de sortie et de 2.45 % comme montré dans la Figure 4.6.

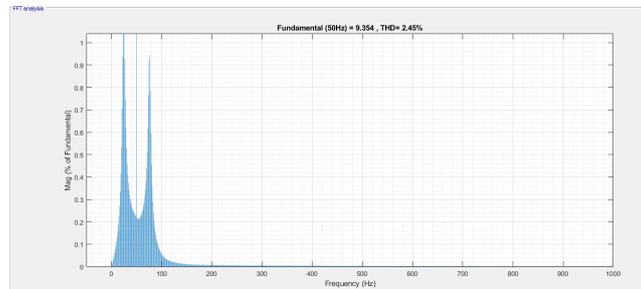


FIGURE 4.6 – Le THD des courants de sortie

Les résultats de simulation obtenus permettent de mettre en évidence la faisabilité et les performances du système de commande à base d'un contrôleur SVPWM.

4.3 Résultat des test

4.3.1 Test de circuit de commande

Le circuit de contrôle n'est pas testé en raison du manque de fiches techniques du contrôleur et de la carte.

En premier lieu, nous avons essayé de faire ce qu'on appelle l'ingénierie inverse mais l'industrie manufacturière a effacé les références des composants. Ensuite, nous avons pu tester la résistance et la capacité de la carte avec les composants exposés et constaté que ces derniers sont fonctionnels. De plus, il n'y a aucune apparence de composants cassés ou brisés.

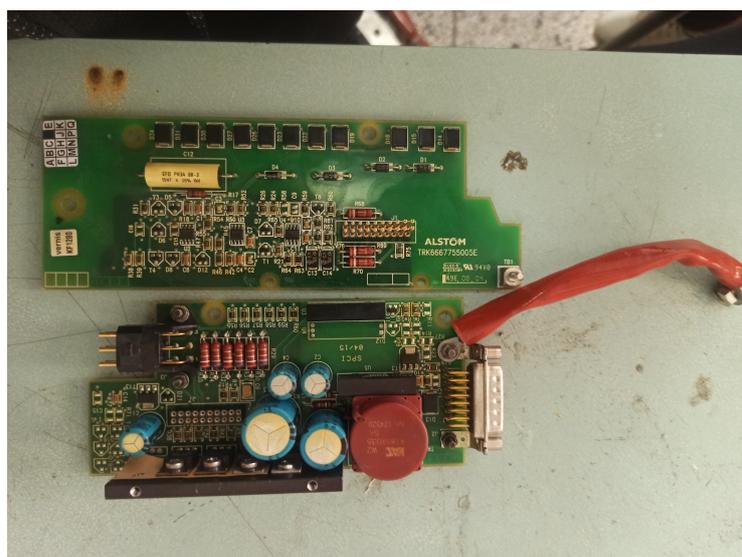


FIGURE 4.7 – Carte de commande

4.3.2 Test de circuit de puissance

Les résultats de ce test indiquent que tous les IGBT sont en bon état. ces derniers suivent l'impulsion du générateur d'impulsion

Bras	numéro d'IGBT	Etat
V1	1	bon fonctionnement
	2	bon fonctionnement
V2	1	bon fonctionnement
	2	bon fonctionnement
U1	1	bon fonctionnement
	2	bon fonctionnement
U2	1	bon fonctionnement
	2	bon fonctionnement
W1	1	bon fonctionnement
	2	bon fonctionnement
W2	1	bon fonctionnement
	2	bon fonctionnement
TH1	1	bon fonctionnement
	2	bon fonctionnement
TH2	1	bon fonctionnement
	2	bon fonctionnement
TH3	1	bon fonctionnement
	2	bon fonctionnement

La figure ci-dessous illustre la tension aux bornes du voltmètre pour chaque IGBT testé :

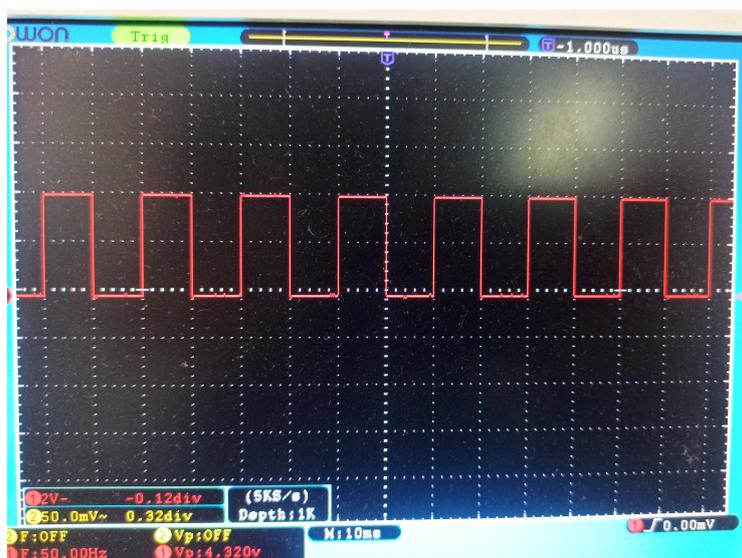


FIGURE 4.8 – Test IGBT

4.3.3 Teste du filtre

En terme de defaillances, et en raison de la pénétration d'eau et de l'étanchéité à l'air du dispositif une défaillance du filtre a eu lieu. ajouter a cela que la résistance est brulée, ce qui peut être confirmé visuellement. Le composant du filtre a été détruit par la pénétration d'eau au niveau de l'onduleur, provoquant un court-circuit.

La défaillance du filtre cause des perturbations dans la tension redressée qui retourne au réseau ce qui engendre des problèmes dans le coffre traction freinage.

4.4 Solution

— Pantographe :

Le plus clair des défauts est dû à l'usure du ressort de montage de la bande de Carbone du billet de couplage qui sont remplacés en cas d'usure totale ça peut aussi s'agir d'une carte brûlée. En ce qui concerne les problèmes dus à l'usure ils peuvent être réglés en changeant la fréquence des révisions préventives

— *AGATE* :

Concernant les problèmes de l'AGATE, cela peut être ajusté en trouvant le composant brûlé sur le banc d'essai et en le remplaçant. Les défaillances logicielles sont très rares et peuvent être corrigées en réinitialisant ou en réinsérant le programme.

— Moteur de traction

Le capteur de vitesse de bogie brûlé produit une erreur d'incohérence de vitesse de référence. Pour protéger le capteur contre les surintensités, il faut utiliser un porte-fusible pour l'entrée d'alimentation du capteur

— Le module ONIX 808 :

Solution a Court-terme :

Il serait intéressant de changer les composants détruits de filtre avec de nouveaux composants.

Solution a long-terme :

Afin de résoudre le problème, il faut régler la pénétration d'eau au niveau de l'ONIX.

Premièrement il faut créer un cache sur l'ONIX et une cale au-dessous. L'application de cette idée a déjà été mise en œuvre par l'entreprise, mais certains prototypes se sont avérés présenter des erreurs de calcul et des infiltrations d'eau résiduelles.

Deuxièmement, le boîtier Onix doit être modifié pour qu'il soit fermé et ce en s'assurant d'utiliser un système de ventilation actif, ceci est expliqué par le fait que les composants électroniques à l'intérieur de l'onduleur sont très sensibles aux températures élevées. L'onduleur doit être refroidi pour éviter la surchauffe de ces composants.

La technologie de refroidissement actif est standard sur tous les appareils. Son but est d'éviter activement les points chauds en utilisant un ventilateur intérieur et en contrôlant l'évacuation de l'air chaud. Un ou plusieurs ventilateurs assurent la circulation de l'air dans l'onduleur et le maintiennent à basse température.

Pour les IGBT, l'utilisation de gel de silicone pour ces derniers est un moyen très courant de protéger l'IGBT et de limiter la propagation des dommages.

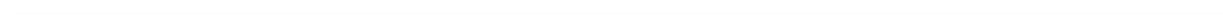
4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les résultats de la simulation du système global et confirmer la validité du modèle du système énergétique ainsi que sa mise en correspondance avec le système de traction. On a conclu que les résultats de la commande MLI vectorielle sont précis.

De plus, nous avons pu interpréter les résultats des tests sur l'onduleur et identifier le composant qui a causé la panne dans Onix.

Enfin, nous avons proposé des solutions aux problème des divers défauts de la chaîne de traction du tramway d'Alger.

Conclusion générale



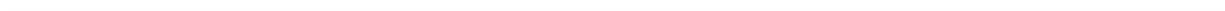
Ce mémoire fait l'objet d'une transition entre le domaine de l'électrotechnique et l'une de ces utilisations quotidiennes. Entre l'architecture électromagnétique complexe du matériel roulant, la façon de l'alimenter et sa maintenance. Le tramway représente un sujet d'étude passionnant.

Plusieurs aspects du projet ont été traités, à savoir : Les alimentations électriques des tramways, l'électricité dans laquelle nous avons défini la conception de ses besoins électriques réseaux d'alimentation générale, sous-stations, caténaies, etc. Ainsi que la, « Traction Brake Chains », qui est le résultat de notre travail et de nos recherches approfondies. On a montré comment ce système complexe (l'assemblage de différentes marques et de différents fournisseurs et ce morceau d'équipement) peuvent être assemblés pour un véhicule entièrement contrôlé.

En second lieu, une analyse détaillée des pannes de la chaîne de traction-freinage de Cital a été effectuée à l'aide de la méthode ABC et du coefficient de Gini, nous avons identifié les appareils engendrant de nombreux problèmes à l'entreprise, tels que les modules d'agate, les bandes de carbone et l'Onix, et nous avons procédé à un diagnostic de ces derniers. Suite à cela, un onduleur a été transporté au sein du Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) de l'ENP pour approfondir l'analyse étant donné qu'il cause la majorité des pannes. Pour cela, nous avons modélisé le module dans Simulink et le commandé avec la commande svpwm pour vérifier son authenticité. Enfin, nous avons suggéré quelques tests qui doivent être effectués pour détecter les pannes dans les composants du module.

En guise de conclusion, Les résultats obtenus lors de la simulation en utilisant SVPWM sont exploitables et significatifs comme il a été mentionné précédemment dans la partie interprétation des résultats. Nous pouvons aussi conclure que le composant incriminé dans Onix à l'aide d'une analyse fonctionnelle est le filtre qui peut être redimensionné. Et afin d'aboutir à une étude complète touchant à tous les aspects du projet de fin d'études effectué nous avons proposé quelques solutions à court et à long terme pour remédier aux différentes pannes du système.

Bibliographie



Bibliographie

- [1] CITAL. « A propos de nous ». In : <https://www.cital-dz.com/cital/a-propos-de-nous> (2015).
- [2] Jean-Marc ALLENBACH et al. *Traction électrique*. PPUR presses polytechniques, 2008.
- [3] ALSTOM. « Alstom transport. » In : <https://www.alstom.com/company> (2022).
- [4] Perrin Jean-Paul & Venard CHARLES. « Transports électriques urbains. Distribution d'énergie, automatismes de contrôle. » In : *Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique D5554v1* (Juin 1991).
- [5] Éric MORIN. « Modélisation d'un réseau électrique de tramway : du composant au système » In : (2005).
- [6] Christian COURTOIS et Jean COUMEL. « Traction électrique ferroviaire-Dynamique ferroviaire et sous-stations ». In : (2009).
- [7] Muller GEORGES. « « TRAMWAYS Alimentation, conception, performances et design ». » fr. In : (fév. 2012). *Techniques de l'ingénieur Infrastructure ferroviaire, exploitation et sécurité base documentaire*. (Visité le 23/06/2022).
- [8] POWEREX. « RA20 3600A General purpose rectifier ». In : ()
- [9] ALSTOM. « Caractéristiques techniques du disjoncteur ARC 812M ». In : *Document interne* (juin 1999).
- [10] Yii Shen TZENG, Ruay-Nan WU et Nanming CHEN. « Electric network solutions of DC transit systems with inverting substations ». In : *IEEE Transactions on vehicular technology* 47.4 (1998), p. 1405-1412.
- [11] FRANÇOIS LACÔTE, MARC PROVOOST, CHRISTIAN COURTOIS, VICTOR SABATÉ. *Traction électrique ferroviaire- Introduction*. fr. *Techniques de l'Ingénieur*. Mai 1998. (Visité le 23/06/2022).
- [12] Stéphane BARBIER. « Formation Citadis Alger – Chaîne de traction ». In : *Document interne* (Sep 2012).
- [13] *Tramways de Bordeaux | bordeauxdecouvertes.fr*.
- [14] ALSTOM. « T&D Parafoudres – VARISIL HDC1. Component definition technical specification ». In : *Document interne* (oct 2012).
- [15] *Qu'est-ce qu'un court-circuit ?* <https://www.energuide.be/fr/questions-reponses/quest-ce-quun-court-circuit/1188/>. (Visité le 23/06/2022).
- [16] *Circuit de filtrage*. fr-FR. MAXICOURS. (Visité le 23/06/2022).

- [17] *Condensateur de filtrage alimentation*. <https://electroniqueschema.blogspot.com/2017/03/condensateur-de-filtrage-alimentation.html>. Condensateur de filtrage alimentation. (Visité le 23/06/2022).
- [18] *Calcul de condensateur de filtrage - Le blog de Nononux*. <http://nononux.free.fr/index.php?page=elec-brico-outils&#!elec-brico-outil-lissage-tension>. (Visité le 23/06/2022).
- [19] E BOMIN. « Spécifications techniques et plans – Moteur de traction 4 HGA 1433 ». In : *ALSTOM Transport* (Jan 2005).
- [20] ALSTOME. « Bogie Arpège 350 M 1600 – Pont moteur ». In : *Etablissement – Le Creusot* (Dec 2003.).
- [21] *Définition de l'accounting par activités (ABC)*. <https://www.investirsorcier.com/definition-de-lactivity-based-costing-abc/>. (Visité le 23/06/2022).
- [22] *Clairement expliqué: coefficient de Gini et courbe de Lorenz*. fr. <https://ichi.pro/fr/clairement-explique-coefficient-de-gini-et-courbe-de-lorenz-17484641786887>. ICHI.PRO. (Visité le 23/06/2022).
- [23] *Modulation de largeur d'impulsion*. fr. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Modulation_de_largeur_d%27impulsion&oldid=194302220. Wikipédia. Juin 2022. (Visité le 23/06/2022).
- [24] Bousehaba MOUSSA. *Space Vector PWM – SVPWM*. <https://spacevectorpwm.wordpress.com/>. Juill. 2017. (Visité le 23/06/2022).
- [25] Richa PARMAR. *Performance comparaison between pwm and svpwm techniques in induction motor drive*. (Visité le 23/06/2022).
- [26] *Comment tester une carte électronique de puissance machine à bière - miss-pieces.com*. https://www.miss-pieces.com/comment-tester-une-carte-electronique-puissance-machine-biere-reparation-blog__c37265.html. (Visité le 23/06/2022).

Annexes

SAISON
(2016-2022)

num equip	Equipement	nombre de panne	nbr cumule	% cumule
0	Commande électronique Agate	219	219	23,60
1	Module onduleur Onix	208	427	46,01
2	Bande carbone	79	506	54,53
3	MANIPULATEUR DE TRACTION	48	554	59,70
4	PANTOGRAPHES	45	599	64,55
5	Moteur électrique	39	638	68,75
6	Roulement GMV	33	671	72,31
7	VEILLE AUTOMATIQUE	33	704	75,86
8	COFFRE DE TRACTION	27	731	78,77
9	Motopompe	24	755	81,36
10	MOTEUR DE TRACTION	22	777	83,73
11	COMMUTATEUR DE CONDUITE	21	798	85,99
12	Motoventilateur	16	814	87,72
13	Carte pantographe	13	827	89,12
14	CAPTEUR DE CHARGE	13	840	90,52
15	Sectionneur	12	852	91,81
16	GROUPE DE REFROIDISSEMENT	12	864	93,10
17	Moto-ventilateur	11	875	94,29
18	Capteurs de vitesse sur bogie	7	882	95,04
19	Shunts de masses	5	887	95,58
20	Disjoncteur	5	892	96,12
21	Self	5	897	96,66
22	Liquide GRF	5	902	97,20
23	Contacteur auxiliaire disjoncteur	4	906	97,63
24	Flexible	4	910	98,06
25	Bielle de couplage	3	913	98,38
26	Pressostat	3	916	98,71
27	Contacteur motopompe	3	919	99,03
28	COFFRE DISJONCTEUR	2	921	99,25
29	Capteur de vitesse sur moteur	2	923	99,46
30	Ressort de montée	1	924	99,57
31	Cornes	1	925	99,68
32	Isolateurs	1	926	99,78
33	Fusible HT	1	927	99,89
34	Contacteur de ligne	1	928	100,00
35	Amortisseur	0	928	100,00
36	Tiroir ventilation Agate	0	928	100,00

37	Ventilateur brasseur	0	928	100,00
38	Fusible	0	928	100,00
39	Contacteur de précharge	0	928	100,00
40	Radiateur	0	928	100,00
41	Filtre	0	928	100,00
42	Thermostat	0	928	100,00
43	Contacteur motoventilateur petite vitesse	0	928	100,00
44	Contacteur motoventilateur grande vitesse	0	928	100,00
45	RHEOSTAT DE FREINAGE	0	928	100,00
46	PARAFOUDRE	0	928	100,00
47	RETOUR DE COURANT	0	928	100,00
48	Axe Frotteur retour de courant	0	928	100,00
49	Charbons retour de courant	0	928	100,00
50	PRISE ATELIER	0	928	100,00

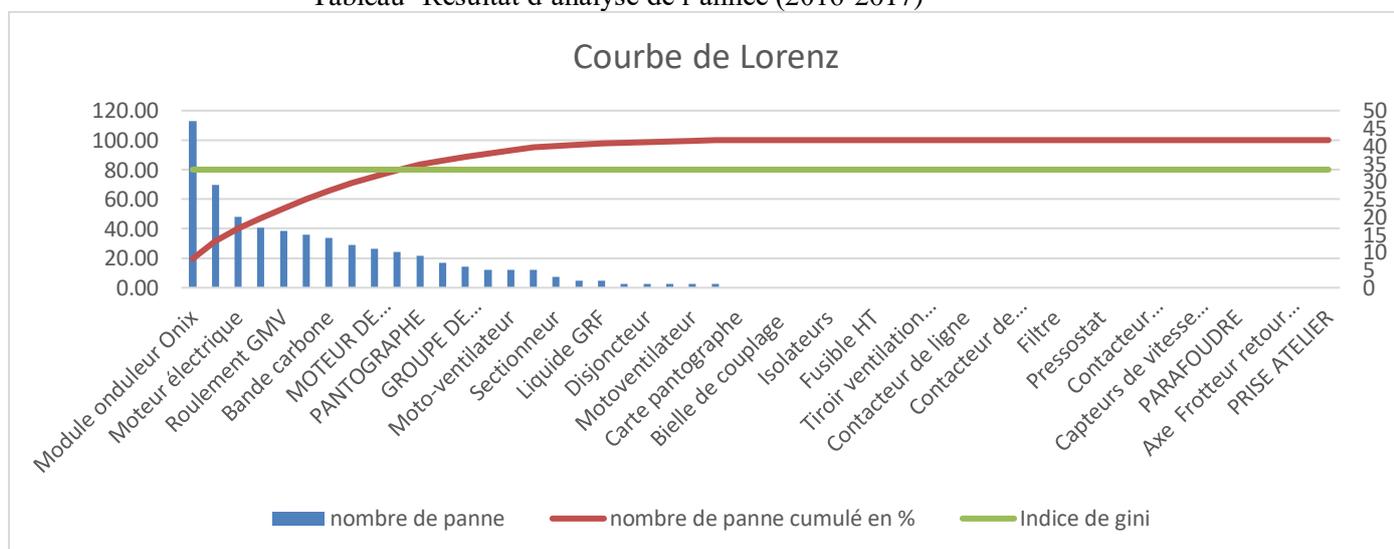
Tableau- Résultat d'analyse de l'année (2016-2022)

SAISON (2016-2017)

num equip	Equipement	nombre de panne	nbr cumule	% cumule
0	Module onduleur Onix	47	47	19,58
1	Commande électronique Agate	29	76	31,67
2	Moteur électrique	20	96	40,00
3	VEILLE AUTOMATIQUE	17	113	47,08
4	Roulement GMV	16	129	53,75
5	COMMUTATEUR DE CONDUITE	15	144	60,00
6	Bande carbone	14	158	65,83
7	MANIPULATEUR DE TRACTION	12	170	70,83
8	MOTEUR DE TRACTION	11	181	75,42
9	CAPTEUR DE CHARGE	10	191	79,58
10	PANTOGRAPHE	9	200	83,33
11	COFFRE DE TRACTION	7	207	86,25
12	GROUPE DE REFROIDISSEMENT	6	213	88,75
13	Shunts de masses	5	218	90,83
14	Moto-ventilateur	5	223	92,92
15	Motopompe	5	228	95,00
16	Sectionneur	3	231	96,25
17	Contacteur motopompe	2	233	97,08
18	Liquide GRF	2	235	97,92
19	Ressort de montée	1	236	98,33
20	Disjoncteur	1	237	98,75
21	Contacteur auxiliaire disjoncteur	1	238	99,17
22	Motoventilateur	1	239	99,58

23	Capteur de vitesse sur moteur	1	240	100,00
24	Carte pantographe	0	240	100,00
25	Amortisseur	0	240	100,00
26	Bielle de couplage	0	240	100,00
27	Cornes	0	240	100,00
28	Isolateurs	0	240	100,00
29	COFFRE DISJONCTEUR	0	240	100,00
30	Fusible HT	0	240	100,00
31	Self	0	240	100,00
32	Tiroir ventilation Agate	0	240	100,00
33	Ventilateur brasseur	0	240	100,00
34	Contacteur de ligne	0	240	100,00
35	Fusible	0	240	100,00
36	Contacteur de précharge	0	240	100,00
37	Radiateur	0	240	100,00
38	Filtre	0	240	100,00
39	Thermostat	0	240	100,00
40	Pressostat	0	240	100,00
41	Contacteur motoventilateur petite vitesse	0	240	100,00
42	Contacteur motoventilateur grande vitesse	0	240	100,00
43	Flexible	0	240	100,00
44	Capteurs de vitesse sur bogie	0	240	100,00
45	RHEOSTAT DE FREINAGE	0	240	100,00
46	PARAFONDRE	0	240	100,00
47	RETOUR DE COURANT	0	240	100,00
48	Axe Frotteur retour de courant	0	240	100,00
49	Charbons retour de courant	0	240	100,00
50	PRISE ATELIER	0	240	100,00

Tableau- Résultat d'analyse de l'année (2016-2017)



Courbe de Lorenz de saison (2016-2017)

Indice
gini=0,81

A	B	C
20%	20%	60%

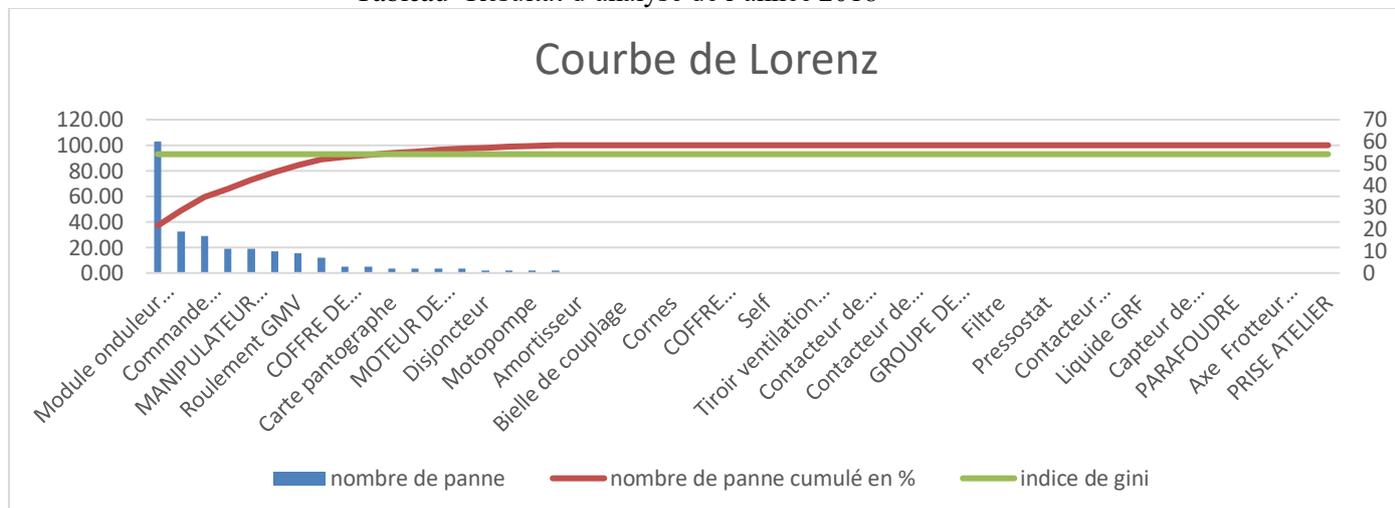
Les zones ABC de saison (2016-2017)

ANNEE 2018

num equip	Equipement	nombre de panne	nbr cumule	% cumule
0	Module onduleur Onix	60	60	37,04
1	Bande carbone	19	79	48,77
2	Commande électronique Agate	17	96	59,26
3	Moteur électrique	11	107	66,05
4	MANIPULATEUR DE TRACTION	11	118	72,84
5	PANTOGRAPHE	10	128	79,01
6	Roulement GMV	9	137	84,57
7	VEILLE AUTOMATIQUE	7	144	88,89
8	COFFRE DE TRACTION	3	147	90,74
9	CAPTEUR DE CHARGE	3	150	92,59
10	Carte pantographe	2	152	93,83
11	Motoventilateur	2	154	95,06
12	MOTEUR DE TRACTION	2	156	96,30
13	COMMUTATEUR DE CONDUITE	2	158	97,53
14	Disjoncteur	1	159	98,15
15	Contacteur auxiliaire disjoncteur	1	160	98,77
16	Motopompe	1	161	99,38
17	Capteurs de vitesse sur bogie	1	162	100,00
18	Amortisseur	0	162	100,00
19	Shunts de masses	0	162	100,00
20	Bielle de couplage	0	162	100,00
21	Ressort de montée	0	162	100,00
22	Cornes	0	162	100,00
23	Isolateurs	0	162	100,00
24	COFFRE DISJONCTEUR	0	162	100,00
25	Fusible HT	0	162	100,00
26	Self	0	162	100,00
27	Moto-ventilateur	0	162	100,00
28	Tiroir ventilation Agate	0	162	100,00
29	Ventilateur brasseur	0	162	100,00
30	Contacteur de ligne	0	162	100,00

31	Fusible	0	162	100,00
32	Contacteur de précharge	0	162	100,00
33	Sectionneur	0	162	100,00
34	GROUPE DE REFROIDISSEMENT	0	162	100,00
35	Radiateur	0	162	100,00
36	Filtre	0	162	100,00
37	Thermostat	0	162	100,00
38	Pressostat	0	162	100,00
39	Contacteur motopompe	0	162	100,00
40	Contacteur motoventilateur petite vitesse	0	162	100,00
41	Contacteur motoventilateur grande vitesse	0	162	100,00
42	Liquide GRF	0	162	100,00
43	Flexible	0	162	100,00
44	Capteur de vitesse sur moteur	0	162	100,00
45	RHEOSTAT DE FREINAGE	0	162	100,00
46	PARAFOUDRE	0	162	100,00
47	RETOUR DE COURANT	0	162	100,00
48	Axe Frotteur retour de courant	0	162	100,00
49	Charbons retour de courant	0	162	100,00
50	PRISE ATELIER	0	162	100,00

Tableau- Résultat d'analyse de l'année 2018



Courbe de Lorenz de l'année 2018

Indice
gini=0,85

A	B	C
20%	20%	60%

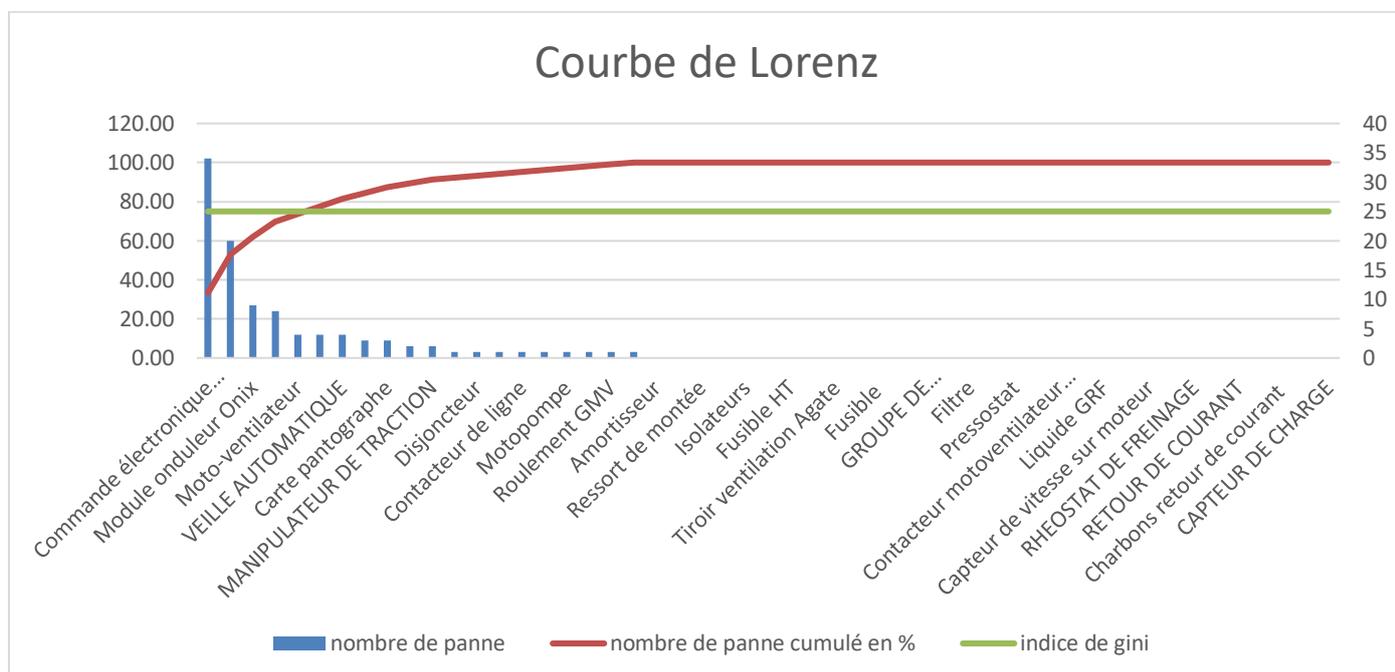
Les zones ABC de l'année 2018

ANNEE 2019

num equip	Equipement	nombre de panne	nbr cumule	% cumule
0	Commande électronique Agate	34	34	33,33
1	Bande carbone	20	54	52,94
2	Module onduleur Onix	9	63	61,76
3	PANTOGRAPHE	8	71	69,61
4	Moto-ventilateur	4	75	73,53
5	MOTEUR DE TRACTION	4	79	77,45
6	VEILLE AUTOMATIQUE	4	83	81,37
7	Moteur électrique	3	86	84,31
8	Carte pantographe	3	89	87,25
9	COFFRE DE TRACTION	2	91	89,22
10	MANIPULATEUR DE TRACTION	2	93	91,18
11	Bielle de couplage	1	94	92,16
12	Disjoncteur	1	95	93,14
13	Contacteur auxiliaire disjoncteur	1	96	94,12
14	Contacteur de ligne	1	97	95,10
15	Sectionneur	1	98	96,08
16	Motopompe	1	99	97,06
17	Motoventilateur	1	100	98,04
18	Roulement GMV	1	101	99,02
19	COMMUTATEUR DE CONDUITE	1	102	100,00
20	Amortisseur	0	102	100,00
21	Shunts de masses	0	102	100,00
22	Ressort de montée	0	102	100,00
23	Cornes	0	102	100,00
24	Isolateurs	0	102	100,00
25	COFFRE DISJONCTEUR	0	102	100,00
26	Fusible HT	0	102	100,00
27	Self	0	102	100,00
28	Tiroir ventilation Agate	0	102	100,00
29	Ventilateur brasseur	0	102	100,00
30	Fusible	0	102	100,00
31	Contacteur de précharge	0	102	100,00
32	GROUPE DE REFROIDISSEMENT	0	102	100,00
33	Radiateur	0	102	100,00
34	Filtre	0	102	100,00
35	Thermostat	0	102	100,00
36	Pressostat	0	102	100,00
37	Contacteur motopompe	0	102	100,00
	Contacteur motoventilateur petite			
38	vitesse	0	102	100,00
	Contacteur motoventilateur grande			
39	vitesse	0	102	100,00

40	Liquide GRF	0	102	100,00
41	Flexible	0	102	100,00
42	Capteur de vitesse sur moteur	0	102	100,00
43	Capteurs de vitesse sur bogie	0	102	100,00
44	RHEOSTAT DE FREINAGE	0	102	100,00
45	PARAFOUDRE	0	102	100,00
46	RETOUR DE COURANT	0	102	100,00
47	Axe Frotteur retour de courant	0	102	100,00
48	Charbons retour de courant	0	102	100,00
49	PRISE ATELIER	0	102	100,00
50	CAPTEUR DE CHARGE	0	102	100,00

Tableau- Résultat d'analyse de l'année 2019



Courbe de Lorenz de l'année 2019

n=0,86

A	B	C
10%	20%	70%

Les zones ABC de l'année 2019

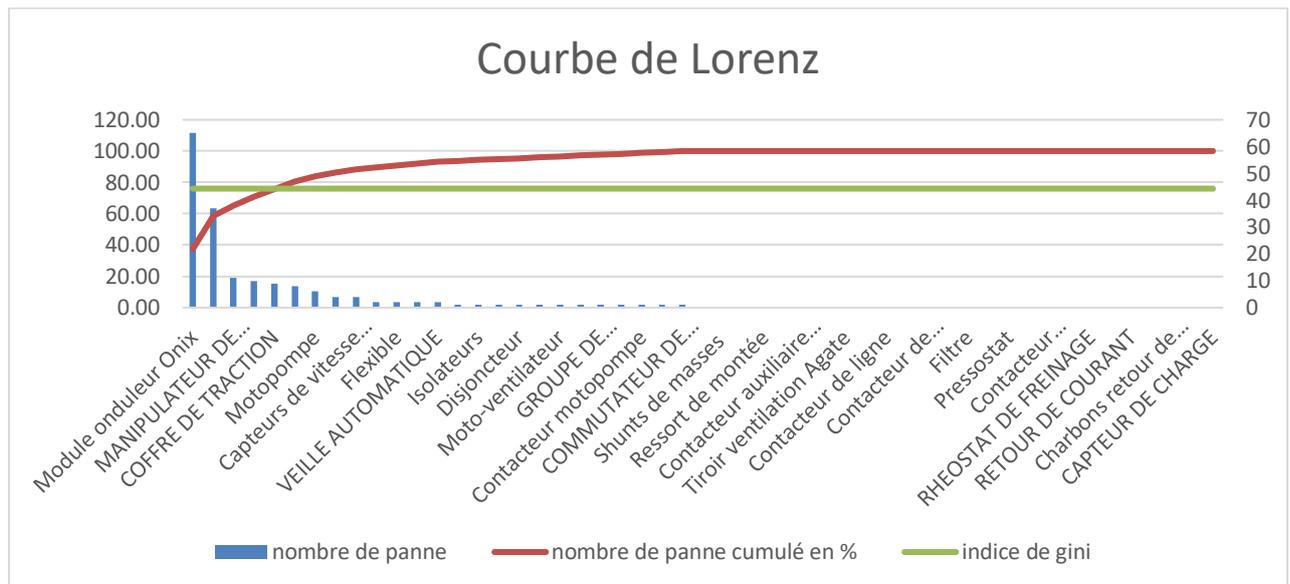
ANNEE 2020

num equip	Equipement	nombre de panne	nbr cumule	% cumule
0	Module onduleur Onix	65	65	37,36
1	Commande électronique Agate	37	102	58,62
2	MANIPULATEUR DE TRACTION	11	113	64,94
3	PANTOGRAPHES	10	123	70,69

4	COFFRE DE TRACTION	9	132	75,86
5	Bande carbone	8	140	80,46
6	Motopompe	6	146	83,91
7	Roulement GMV	4	150	86,21
8	Capteurs de vitesse sur bogie	4	154	88,51
9	Carte pantographe	2	156	89,66
10	Flexible	2	158	90,80
11	MOTEUR DE TRACTION	2	160	91,95
12	VEILLE AUTOMATIQUE	2	162	93,10
13	Moteur électrique	1	163	93,68
14	Isolateurs	1	164	94,25
15	COFFRE DISJONCTEUR	1	165	94,83
16	Disjoncteur	1	166	95,40
17	Fusible HT	1	167	95,98
18	Moto-ventilateur	1	168	96,55
19	Sectionneur	1	169	97,13
20	GROUPE DE REFROIDISSEMENT	1	170	97,70
21	Motoventilateur	1	171	98,28
22	Contacteur motopompe	1	172	98,85
23	Liquide GRF	1	173	99,43
24	COMMUTATEUR DE CONDUITE	1	174	100,00
25	Amortisseur	0	174	100,00
26	Shunts de masses	0	174	100,00
27	Bielle de couplage	0	174	100,00
28	Ressort de montée	0	174	100,00
29	Cornes	0	174	100,00
30	Contacteur auxiliaire disjoncteur	0	174	100,00
31	Self	0	174	100,00
32	Tiroir ventilation Agate	0	174	100,00
33	Ventilateur brasseur	0	174	100,00
34	Contacteur de ligne	0	174	100,00
35	Fusible	0	174	100,00
36	Contacteur de précharge	0	174	100,00
37	Radiateur	0	174	100,00
38	Filtre	0	174	100,00
39	Thermostat	0	174	100,00
40	Pressostat	0	174	100,00
41	Contacteur motoventilateur petite vitesse	0	174	100,00
42	Contacteur motoventilateur grande vitesse	0	174	100,00
43	Capteur de vitesse sur moteur	0	174	100,00
44	RHEOSTAT DE FREINAGE	0	174	100,00
45	PARAFOUDRE	0	174	100,00
46	RETOUR DE COURANT	0	174	100,00

47	Axe Frotteur retour de courant	0	174	100,00
48	Charbons retour de courant	0	174	100,00
49	PRISE ATELIER	0	174	100,00
50	CAPTEUR DE CHARGE	0	174	100,00

Tableau- Résultat d'analyse de l'année 2020



Courbe de Lorenz de l'année 2020

Indice
gini=0,86

A	B	C
10%	20%	70%

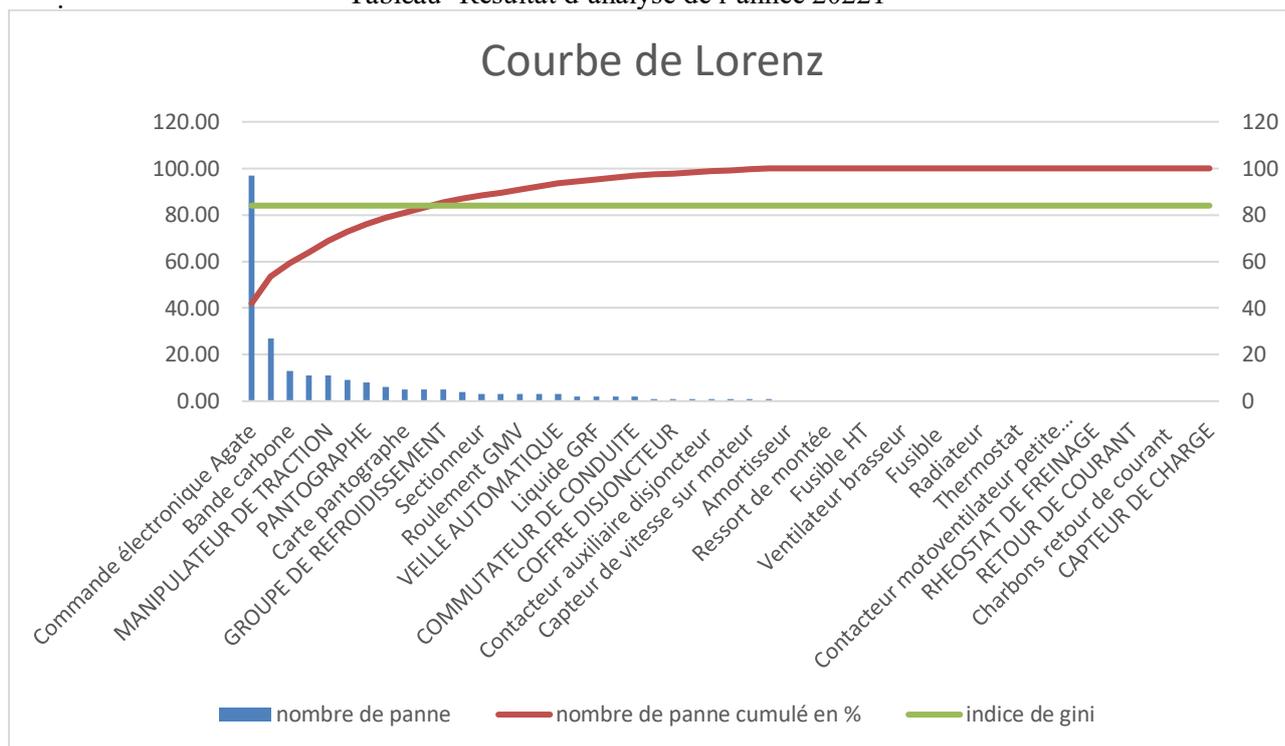
Les zones ABC de l'année 2020

ANNEE 2021

num equip	Equipement	nombre de panne	nbr cumule	% cumule
0	Commande électronique Agate	97	97	41,99
1	Module onduleur Onix	27	124	53,68
2	Bande carbone	13	137	59,31
3	Motoventilateur	11	148	64,07
4	MANIPULATEUR DE TRACTION	11	159	68,83
5	Motopompe	9	168	72,73
6	PANTOGRAPHE	8	176	76,19
7	COFFRE DE TRACTION	6	182	78,79

8	Carte pantographe	5	187	80,95
9	Self	5	192	83,12
10	GROUPE DE REFROIDISSEMENT	5	197	85,28
11	Moteur électrique	4	201	87,01
12	Sectionneur	3	204	88,31
13	Pressostat	3	207	89,61
14	Roulement GMV	3	210	90,91
15	MOTEUR DE TRACTION	3	213	92,21
16	VEILLE AUTOMATIQUE	3	216	93,51
17	Bielle de couplage	2	218	94,37
18	Liquide GRF	2	220	95,24
19	Flexible	2	222	96,10
20	COMMUTATEUR DE CONDUITE	2	224	96,97
21	Cornes	1	225	97,40
22	COFFRE DISJONCTEUR	1	226	97,84
23	Disjoncteur	1	227	98,27
24	Contacteur auxiliaire disjoncteur	1	228	98,70
25	Moto-ventilateur	1	229	99,13
26	Capteur de vitesse sur moteur	1	230	99,57
27	Capteurs de vitesse sur bogie	1	231	100,00
28	Amortisseur	0	231	100,00
29	Shunts de masses	0	231	100,00
30	Ressort de montée	0	231	100,00
31	Isolateurs	0	231	100,00
32	Fusible HT	0	231	100,00
33	Tiroir ventilation Agate	0	231	100,00
34	Ventilateur brasseur	0	231	100,00
35	Contacteur de ligne	0	231	100,00
36	Fusible	0	231	100,00
37	Contacteur de précharge	0	231	100,00
38	Radiateur	0	231	100,00
39	Filtre	0	231	100,00
40	Thermostat	0	231	100,00
41	Contacteur motopompe	0	231	100,00
42	Contacteur motoventilateur petite vitesse	0	231	100,00
43	Contacteur motoventilateur grande vitesse	0	231	100,00
44	RHEOSTAT DE FREINAGE	0	231	100,00
45	PARAFOUDRE	0	231	100,00
46	RETOUR DE COURANT	0	231	100,00
47	Axe Frotteur retour de courant	0	231	100,00
48	Charbons retour de courant	0	231	100,00
49	PRISE ATELIER	0	231	100,00
50	CAPTEUR DE CHARGE	0	231	100,00

Tableau- Résultat d'analyse de l'année 2021



Courbe de Lorenz de l'année 2021

n=0,82

A	B	C
20%	20%	60%

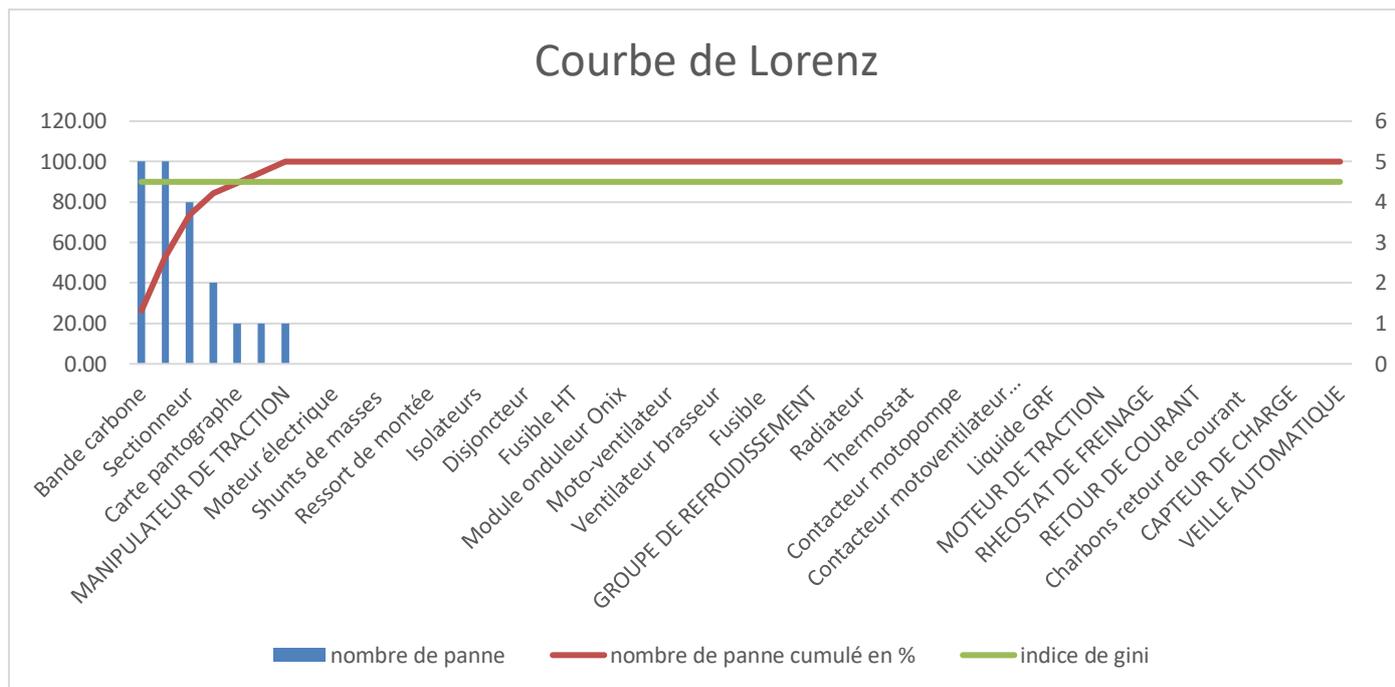
Les zones ABC de l'année 2021

ANNEE 2022

num equip	Equipement	nombre de panne	nbr cumule	% cumule
0	Bande carbone	5	5	26,32
1	Commande électronique Agate	5	10	52,63
2	Sectionneur	4	14	73,68
3	Motopompe	2	16	84,21
4	Carte pantographe	1	17	89,47
5	Capteurs de vitesse sur bogie	1	18	94,74
6	MANIPULATEUR DE TRACTION	1	19	100,00
7	PANTOGRAPHE	0	19	100,00
8	Moteur électrique	0	19	100,00
9	Amortisseur	0	19	100,00
10	Shunts de masses	0	19	100,00
11	Bielle de couplage	0	19	100,00
12	Ressort de montée	0	19	100,00

13	Cornes	0	19	100,00
14	Isolateurs	0	19	100,00
15	COFFRE DISJONCTEUR	0	19	100,00
16	Disjoncteur	0	19	100,00
17	Contacteur auxiliaire disjoncteur	0	19	100,00
18	Fusible HT	0	19	100,00
19	COFFRE DE TRACTION	0	19	100,00
20	Module onduleur Onix	0	19	100,00
21	Self	0	19	100,00
22	Moto-ventilateur	0	19	100,00
23	Tiroir ventilation Agate	0	19	100,00
24	Ventilateur brasseur	0	19	100,00
25	Contacteur de ligne	0	19	100,00
26	Fusible	0	19	100,00
27	Contacteur de précharge	0	19	100,00
28	GROUPE DE REFROIDISSEMENT	0	19	100,00
29	Motoventilateur	0	19	100,00
30	Radiateur	0	19	100,00
31	Filtre	0	19	100,00
32	Thermostat	0	19	100,00
33	Pressostat	0	19	100,00
34	Contacteur motopompe	0	19	100,00
	Contacteur motoventilateur petite			
35	vitesse	0	19	100,00
	Contacteur motoventilateur grande			
36	vitesse	0	19	100,00
37	Roulement GMV	0	19	100,00
38	Liquide GRF	0	19	100,00
39	Flexible	0	19	100,00
40	MOTEUR DE TRACTION	0	19	100,00
41	Capteur de vitesse sur moteur	0	19	100,00
42	RHEOSTAT DE FREINAGE	0	19	100,00
43	PARAFOUDRE	0	19	100,00
44	RETOUR DE COURANT	0	19	100,00
45	Axe Frotteur retour de courant	0	19	100,00
46	Charbons retour de courant	0	19	100,00
47	PRISE ATELIER	0	19	100,00
48	CAPTEUR DE CHARGE	0	19	100,00
49	COMMUTATEUR DE CONDUITE	0	19	100,00
50	VEILLE AUTOMATIQUE	0	19	100,00

Tableau- Résultat d'analyse de l'année 2022



Courbe de Lorenz de l'année 2022

n=0,9

A	B	C
10%	20%	70%

Les zones ABC de l'année 2022