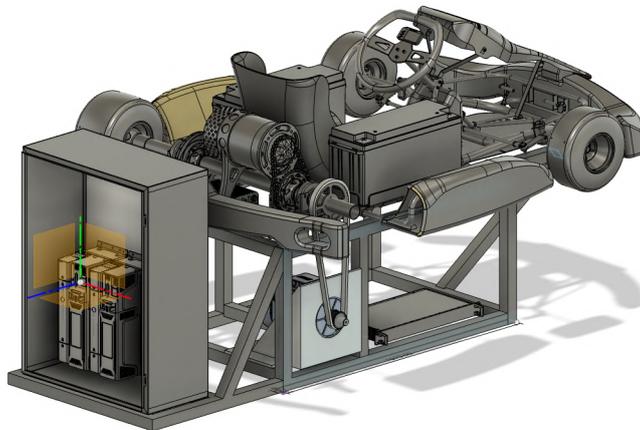


BACHELOR UNIVERSITAIRE DE TECHNOLOGIE
GÉNIE ÉLECTRIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

Développement d'une maquette pédagogique de banc de test pour un kart électrique

INSTITUT UNIVERSITAIRE DE TECHNOLOGIE DE L'INDRE
SEMESTRE 6



Étudiants :

M. Redwan BENMANSOUR
M. Corentin DA SILVA
M. Nathan GIGUELAY
Mme. Lyse ITOUA-POTO
M. Axel LABOUTE

Tuteurs/Clients :

M. Jean-Marc ROUSSEL
M. Pascal REBEIX
IUT de l'Indre

20 février 2025 (rev. b)

© 2024. This work is openly licensed via CC BY-NC-SA 4.0.



BACHELOR UNIVERSITAIRE DE TECHNOLOGIE
GÉNIE ÉLECTRIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

Développement d'une maquette pédagogique de banc de test pour un kart électrique

INSTITUT UNIVERSITAIRE DE TECHNOLOGIE DE L'INDRE
SEMESTRE 6

Étudiants :

M. Redwan BENMANSOUR
M. Corentin DA SILVA
M. Nathan GIGUELAY
Mme. Lyse ITOUA-POTO
M. Axel LABOUTE

Tuteurs/Clients :

M. Jean-Marc ROUSSEL
M. Pascal REBEIX
IUT de l'Indre

20 février 2025 (rev. b)

© 2024. This work is openly licensed via CC BY-NC-SA 4.0.



Résumé

Dans le cadre de la formation en Génie Électrique et Informatique Industrielle (GEII), l'IUT de l'Indre cherche à renouveler ses maquettes pédagogiques afin de mieux répondre aux évolutions de l'industrie et du génie électrique.

Pour cela, un banc de test pour un kart électrique a été conçu par des étudiants de deuxième et troisième année, avec l'appui de leurs enseignants. Ce projet, entièrement financé par l'IUT, a mobilisé un groupe de cinq étudiants sur plus de 200 heures.

Le résultat est une maquette fonctionnelle permettant de régler une charge mécanique sur l'arbre du kart. Une interface homme-machine assure la commande et l'exploitation des données en temps réel.

Ce projet a permis aux étudiants de développer des compétences techniques en GEII ainsi que des compétences transversales en gestion de projet et en travail d'équipe. L'IUT de l'Indre se félicite de cette réalisation, qui pourra bientôt être exploitée par les enseignants.

Abstract

As part of the Electrical Engineering and Industrial Computing (GEII) program, the IUT of Indre aims to renew its educational models to better align with the evolving challenges of industry and electrical engineering.

To achieve this, a test bench for an electric kart has been designed by second- and third-year students, with the support of their instructors. This project, fully funded by the IUT, engaged a group of five students for over 200 hours.

The result is a functional model that allows for mechanical load adjustment on the kart's shaft. A human-machine interface enables real-time control and data analysis.

Through this project, students have developed technical skills in GEII as well as transversal competencies in project management and teamwork. The IUT of Indre is pleased with this achievement, which will soon be utilized by instructors.

Remerciements

Avant tout, nous tenons sincèrement à remercier l'ensemble de l'équipe pédagogique de la formation GEII de l'IUT de l'Indre qui fut à notre disposition afin de répondre à nos questions et afin de nous fournir les ressources nécessaires tout au long de ce projet.

Nous tenons également à remercier particulièrement nos deux tuteurs, M. Roussel et M. Rebeix, pour leur aide, leur suivi et la confiance qu'ils nous ont accordée sur ce projet.

Enfin, nous tenons à remercier l'administration de l'IUT de l'Indre et l'Université d'Orléans pour avoir fourni le financement nécessaire à l'acquisition du matériel requis. De plus, nous les remercions de nous avoir offert la possibilité d'utiliser les outils pédagogiques disponibles sur le site de Châteauroux.

Avant-Propos

Dans le cadre de notre troisième et dernière année de BUT GEII (Génie Électrique et Informatique Industrielle), nous avons l'opportunité de développer nos compétences lors d'un projet. L'objectif pédagogique est de nous familiariser avec la démarche de projet et de développer des compétences en vue de nous préparer à notre future carrière professionnelle.

Ce projet prend la forme d'une SAÉ (Situation d'Apprentissage Évaluable) durant laquelle nous avons été encadrés par nos enseignants : M. Jean-Marc ROUSSEL et M. Pascal REBEIX. À travers ce projet, nous avons mis en application les différentes ressources acquises tout au long de l'année. Quatre compétences sont principalement mises en jeu durant ce projet :

- **Concevoir** : Contribuer à la rédaction d'un cahier des charges, Prouver la pertinence de ses choix technologiques, Rédiger un dossier de conception
- **Vérifier** : Évaluer la cause racine d'un dysfonctionnement, Proposer une solution correctrice à un dysfonctionnement, Produire une procédure d'essais pour valider la conformité d'un système
- **Maintenir** : Proposer une solution de maintenance, Évaluer les coûts d'indisponibilité et de maintenance d'un système, Produire une procédure de maintenance, Proposer un appui technique aux différents acteurs à l'échelle nationale et internationale
- **Installer** : Planifier l'installation et la mise en service d'un nouvel équipement, Produire une procédure d'installation et de mise en service d'un système, Produire le dossier de conformité du système en gérant le versionnage

Ce rapport vise à démontrer le développement de ces compétences pour la validation du diplôme de BUT GEII, au travers de l'examen du Portfolio. Ce rapport vise également à fournir de support pour nos tuteurs, et pour les prochains étudiants amenés à travailler sur cette maquette.

Ce rapport a une visée pédagogique et peut contenir des erreurs ou des imprécisions. Il n'engage en aucun cas la responsabilité des étudiants, des tuteurs de projet, de l'IUT de l'Indre ou de l'Université d'Orléans.

Certains documents inclus dans ce rapport sont la propriété de tiers et sont utilisés uniquement dans un cadre académique. Toute reproduction, diffusion ou utilisation en dehors de ce contexte est strictement interdite sans leur autorisation.

Table des matières

Résumé	5
Abstract	5
Remerciements	6
Avant-Propos	7
1 Introduction et cahier des charges	13
1. Contexte	13
2. Objectifs	13
2.1 Objectifs techniques	13
2.2 Objectifs pédagogiques	13
2.3 Livrable	14
3. Organisation du projet	14
3.1 Le Client	14
3.2 Les Tuteurs	14
3.3 Les Concepteurs	14
3.4 La démarche de travail	14
3.5 Moyens et méthodes de communication	16
3.6 Répartition des tâches	17
4. Principe de fonctionnement	18
5. Exigences et contraintes imposées	18
5.1 Le lieu d'implantation	18
5.2 Réseau électrique	18
5.3 Caractéristiques du kart	18
5.4 Normes	18
5.5 Autres documents référencés internes	19
5.6 Dates importantes	19
5.7 Documentation	19
6. Planning prévisionnel	19
2 Étude mécanique du banc de test	20
1. Contexte de l'étude mécanique	20
1.1 Support du kart électrique	20
1.2 Couplage et intégration du moteur	22
1.3 Support de l'armoire électrique	24
1.4 Intégration de l'alimentation continue	24
2. CAO du banc de test	25
2.1 Structure du kart	25
2.2 Support du moteur	27
2.3 Contraintes mécaniques	29

3.	Modélisation mécanique et simulation de scénarios	31
3.1	Caractéristiques du kart	31
3.2	Bilan des forces et expressions	31
3.3	Expression du couple	31
3	Étude électrique du banc de test	33
1.	Introduction	33
2.	Machine Asynchrone	34
2.1	Principe	34
2.2	Fonctionnement en "génératrice"	35
2.3	Bilan de puissance	36
3.	Commande vectorielle de la machine asynchrone	36
3.1	Transformée de Clarke (triphase/diphase)	36
3.2	Transformée de Park (statique/rotatif)	37
3.3	Expression du couple électromagnétique de la machine asynchrone	38
4.	Convertisseurs	39
4.1	Convertisseur AC/DC ou Redresseur	39
4.2	Convertisseur DC/AC ou Onduleur	41
5.	Stratégies de modulation	43
5.1	Modulation Pleine onde	43
5.2	MLI Sinus (SPWM)	45
5.3	MLI vectorielle (SVPWM)	47
5.4	Synthèse et comparaison des stratégies de modulation	50
5.5	Convertisseur AC/AC indirect (ou AC-DC-AC)	51
6.	Compatibilité Électromagnétique	52
6.1	Principe	52
6.2	Conséquences d'une pollution harmonique	52
6.3	Distorsion harmonique et puissance déformante	53
6.4	Simulation d'une MLI Sinus	54
6.5	Mesures de compatibilité électromagnétique	55
7.	Alimentation du kart électrique	57
7.1	Batteries obsolètes	57
7.2	Alimentation réversible	57
7.3	Choix de l'alimentation	57
8.	Dimensionnement	58
8.1	Dimensionnement du moteur	58
8.2	Dimensionnement des câbles	59
8.3	Dimensionnement des protections	60
8.4	Dimensionnement du filtrage	64
9.	Schémas électriques	65
9.1	Puissance	65
9.2	Commande	66
9.3	Implantation	66
4	Convertisseurs/Variateurs Unidrive M700	67
1.	Modes de fonctionnement	67
2.	Commande	68
2.1	Commande du variateur REGEN	68
2.2	Commande du variateur RFC-A	69
2.3	Codeur	70

3.	Paramétrage prérequis des Variateurs	71
3.1	Paramétrage réseau	71
3.2	Variateur REGEN	71
3.3	Variateur RFC-A	71
4.	Paramètres de supervision et de pilotage	73
4.1	Supervision : Lecture seule	73
4.2	Pilotage : Lecture écriture	73
5.	Synoptique de démarrage	74
5.1	Fonctionnement mode manuel	74
5.2	Fonctionnement mode IHM	74
5.3	Synoptique (page suivante)	74
5	IHM LabVIEW	76
1.	Communication avec les variateurs M700	76
1.1	Protocole Modbus TCP et réseau	76
1.2	Conversion des paramètres	76
1.3	Registres 32 bits	77
1.4	Entiers signés et décimales	77
2.	Communication avec l'alimentation programmable	78
3.	Plan d'adressage réseau	78
4.	Développement de l'IHM LabVIEW	79
4.1	Variateurs	79
4.2	Alimentation	82
5.	IHM	84
6	Installation et mise en route	85
1.	Câblage de l'armoire électrique	85
1.1	Partie Puissance	86
1.2	Partie Commande	89
1.3	Kart et moteur	90
2.	Assemblage de la structure	92
2.1	Composants électriques	92
2.2	Composants mécaniques	92
2.3	Résultat final	94
3.	Paramétrage des variateurs avec Nidec Connect	95
3.1	Parameter Listings	96
3.2	Motor and Feedback Setup	96
3.3	Block Diagrams	97
3.4	Onboard Scope	97
4.	Mise en route	98
4.1	Procédures	98
4.2	Diagnostic de pannes	98
4.3	Autocalibrage	100
4.4	Essais et visualisation	101
4.5	Caractéristique Couple/Vitesse	102
7	Synthèse	103
1.	Auto-évaluation	103
1.1	Objectifs atteints	103
1.2	Objectifs non atteints et conséquences	103

1.3	Difficultés et contraintes rencontrées	104
1.4	Axes d'amélioration	105
2.	Bilan financier du projet	107
2.1	Coût de production matériel	107
2.2	Charges de production	107
2.3	Coût d'étude	108
2.4	Retour sur investissement	108
3.	Conclusion	109
Liste des abréviations		110
Table des figures		111
Liste des tableaux		114
Liste des annexes		115
Bibliographie		116

Chapitre 1

Introduction et cahier des charges

1. Contexte

Le projet de banc de test de kart électrique répond à un besoin de la formation GEII de l'IUT de l'Indre. En effet, les nouveautés technologiques doivent être suivies afin d'adapter au mieux la formation au monde du travail. Les enjeux de maîtrise énergétiques en sont tout aussi importants, surtout dans la spécialité Électricité et Maîtrise de l'Énergie (EME) du BUT GEII. Afin d'être dans cette continuité de logique de développement durable, ce projet doit revaloriser l'acquisition du kart électrique, acheté par la formation il y a une dizaine d'années, pour un projet universitaire.

2. Objectifs

2.1 Objectifs techniques

Le projet a pour but la conception et l'installation d'une maquette d'électrotechnique de banc de test destinée à un kart électrique appartenant à l'IUT de l'Indre. L'objectif principal du banc de test est de fournir une charge active mécanique au kart tout en permettant de réinjecter l'énergie de freinage générée par la charge active dans le réseau en respectant les exigences en matière de pollution harmonique et de sécurité de distribution selon la norme NF C 15-100.

Le banc de test sera conçu pour analyser et mesurer les performances du kart électrique (couple, puissance, rendement...) tout en fournissant une visualisation par le biais d'une IHM LabVIEW, qui pourra être utilisée par les étudiants des deux années pour se former aux techniques de conversion d'énergie, de contrôle de puissance, et de gestion de l'énergie dans un contexte industriel.

2.2 Objectifs pédagogiques

Les objectifs pédagogiques visent à la fois les concepteurs et le public cible du projet, c'est-à-dire les étudiants. Ce projet doit nous former notamment aux applications industrielles de la variation de vitesse, à la distribution électrique et à la maîtrise de l'énergie. Le livrable doit faire de même au travers d'une maquette pédagogique intuitive et simple d'utilisation.

Pour cela, la conception d'une maquette de formation sous la forme d'un banc de test a été proposée. Elle devra intégrer des techniques d'asservissement de couple par des variateurs, ainsi que l'injection de l'énergie de freinage sur le réseau. Cette énergie était auparavant dissipée dans des résistances de freinage. C'est le même principe que le freinage régénératif des voitures hybrides. Dans un contexte industriel, sur de plus larges machines, la réduction du coût est non négligeable. L'objectif est de présenter cet aspect aux étudiants grâce à cette maquette.

2.3 Livrable

Le livrable est l'ensemble du banc de test soit la structure mécanique, l'armoire électrique, l'alimentation du kart, le câblage des composants, le paramétrage des appareils, l'IHM LabVIEW, les schémas électriques, la documentation et les procédures d'utilisation, conformes aux spécifications du besoin du Cahier Des Charges Fonctionnel.

3. Organisation du projet

3.1 Le Client

IUT de l'Indre – site de Châteauroux
Contact : contact.iut36@univ-orleans.fr

3.2 Les Tuteurs

M. Jean-Marc ROUSSEL, Enseignant à l'IUT de l'Indre – site de Châteauroux
(Contact : jean-marc.rousseau@univ-orleans.fr)
M. Pascal REBEIX, Enseignant à l'IUT de l'Indre – site de Châteauroux
(Contact : pascal.rebeix@univ-orleans.fr)

3.3 Les Concepteurs

Ce projet sera réalisé en collaboration entre les étudiants de 2e année (GEII2) et de 3e année (GEII3) du parcours Électricité et Maîtrise de l'Énergie (EME) au sein du BUT Génie Électrique et Informatique Industrielle.

Équipe GEII3

M. Redwan BENMANSOUR (redwan.benmansour@etu.univ-orleans.fr)
M. Corentin DA SILVA (corentin.da-silva1@etu.univ-orleans.fr)
Mme. Lyse ITOUA-POTO (lyse.itoua-poto@etu.univ-orleans.fr)

Équipe GEII2

M. Axel LABOUTE (axel.laboute@etu.univ-orleans.fr)
M. Nathan GIGUELAY (nathan.giguelay@etu.univ-orleans.fr)

3.4 La démarche de travail

Suivi de l'avancement

- Réunions avec le client à chaque fin de phase et compte-rendu de réunion.
- Réunions avec l'équipe sur l'avancement du projet chaque fin de semaine, soit deux par phase.
- Planning prévisionnel et planning d'avancement (cf. Figure 2).

Étapes du projet

Phase 1 : Étude et conception S41 S42 (S=Semaine)

Étude Électrique

- Schéma électrique : Conception de l'ensemble des schémas électriques
- Dimensionnement des Composants : Sélection des protections, variateurs et câblage.
- Commande et Approvisionnement : Demande de devis et validation auprès des fournisseurs.
- Étude du paramétrage des variateurs

Étude Mécanique

- Mesures : Prise de mesures du kart et des pièces mécaniques

- Conception mécanique : CAO et DAO de la structure mécanique du banc
- Dimensionnement de l'accouplement du moteur asynchrone charge active avec l'arbre du kart (respect du rapport de réduction)

Phase 2 : Installation et paramétrage S43 S50

Paramétrage des Variateurs

- Paramétrage : Configuration de la commande en couple et mode régénération.
- Communication : Étude des échanges de données entre variateurs et IHM.

Développement de l'IHM LabVIEW

- Création de l'interface : Supervision et acquisition de données en temps réel des variateurs, données de vitesse, de couple, de tension, de fréquence, de courant et de puissance.
- Ajout de sécurités supplémentaires en commande

Étude des communications avec LabVIEW

- Étude de la communication des variateurs de la charge active : Contrôle des modes de fonctionnement, commande en couple du moteur asynchrone de simulation de freinage.
- Étude de la communication de l'alimentation programmable du variateur du kart électrique : Ajustement des paramètres de tension et courant et supervision des données.

Installation

- Assemblage de la Structure : Montage de la plateforme et intégration des composants mécaniques.
- Positionnement, câblage, et connexion des équipements.

Phase 3 : Mise en route et vérification S51 S2

Mise en Route

- Mise en Route et vérification mécanique et électrique.
- Production des documentations et des procédures.

Étude du variateur du kart

- Étude de faisabilité de la supervision des données et intégration si possible avec LabVIEW
- Étude de faisabilité du pilotage du variateur et intégration si possible avec LabVIEW

3.5 Moyens et méthodes de communication

Le diagramme ci-dessous décrit les moyens et méthodes de communication internes au projet et avec les tuteurs/clients.

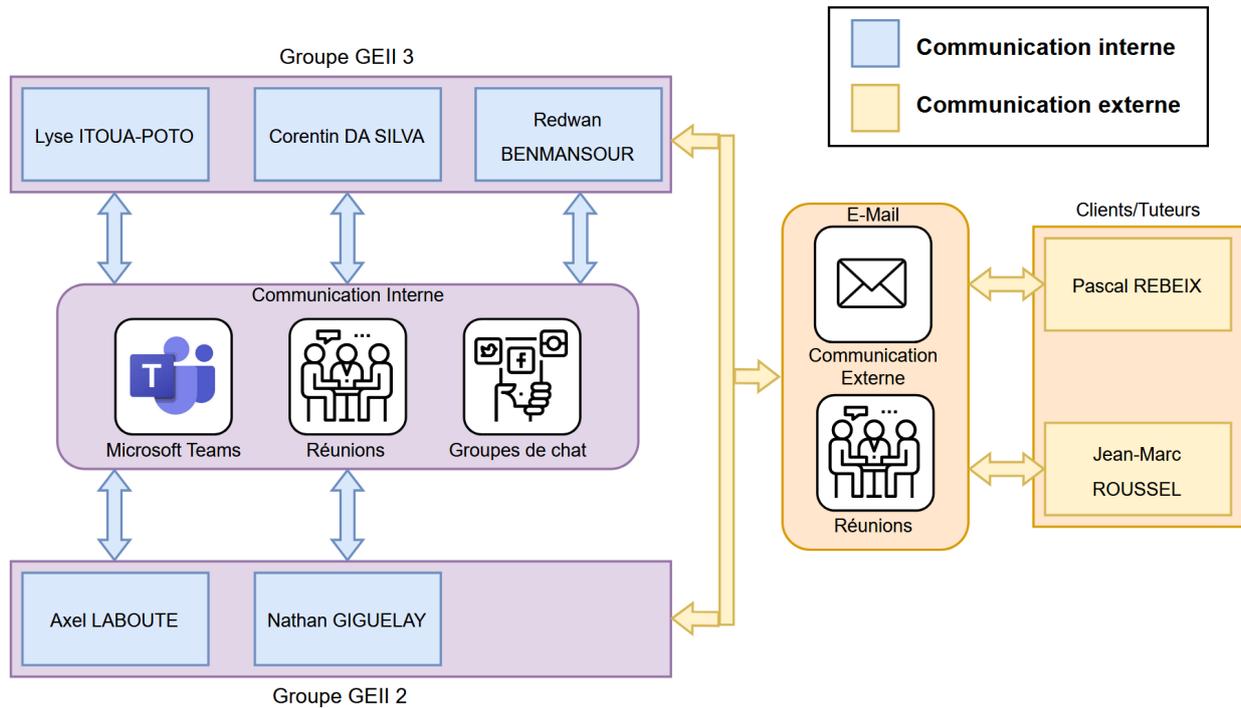


FIGURE 1.1 – Diagramme des moyens de communication

Nos outils de communication internes sont :

- **Microsoft Teams** : Permet de planifier les tâches à effectuer, de sauvegarder des fichiers de conception et une banque de documentation et d'échanger ponctuellement.
- **Réunions** : Permet de discuter en détail d'un sujet, d'aborder plus facilement les problèmes et de mieux expliquer une situation ou un ordre.
- **Groupes de chat** : Permet d'échanger en continu sur plusieurs sujets et permet une communication rapide et instantanée avec chaque membre du groupe

Nos outils de communication avec nos clients sont :

- **Mails** : Permet d'établir une discussion concernant un sujet en particulier, de partager et de proposer des fichiers de conception et permet d'échanger ponctuellement.
- **Réunions** : Permet de discuter en détail d'un sujet, d'aborder plus facilement les problèmes et de mieux expliquer une situation ou un ordre.

3.6 Répartition des tâches

Le tableau suivant décrit la répartition des tâches dans les différentes phases du projet.

	Phase 1 : Étude et conception	Phase 2 : Installation et paramétrage	Phase 3 : Mise en route et vérification
M. Redwan BENMANSOUR <i>Chef de projet</i>	- Lancement du projet - Gestion des équipes - Communication avec le client - Étude du paramétrage des variateurs	- Assemblage de la structure - Paramétrage des variateurs	- Livraison et mise en route avec le client - Étude du variateur du Kart
M. Corentin DA SILVA	- Conception générale des schémas électriques	- Câblage de l'armoire électrique - Développement de l'IHM sur LabVIEW	- Communication entre le variateur du kart et LabVIEW
Mme Lyse ITOUA-POTO	- Rédaction du CDCF - Dimensionnement des composants	- Câblage de l'armoire électrique - Étude de la communication et du pilotage de l'alimentation avec LabVIEW	- Production des documentations et procédures
M. Axel LABOUTE	- Conception des schémas électriques : Étude des protections	- Câblage de l'armoire électrique - Étude de la communication et du pilotage des variateurs avec LabVIEW	- Vérifications et mesures lors de la mise en route
M. Nathan GIGUELAY	- Prises de mesures et CAO/DAO de l'ensemble mécanique	- Assemblage de la structure - Étude de la communication et du pilotage des variateurs avec LabVIEW	- Vérifications et mesures lors de la mise en route

TABLE 1.1 – Tableau de la répartition des tâches

Un rapport de projet sera continuellement produit lors des différentes phases du projet, avec pour objectif que chacun y ajoute les explications de son travail.

4. Principe de fonctionnement

À partir des données du cahier des charges, nous pouvons définir une première synoptique étant la solution la plus générale au besoin. Cette synoptique est la suivante.

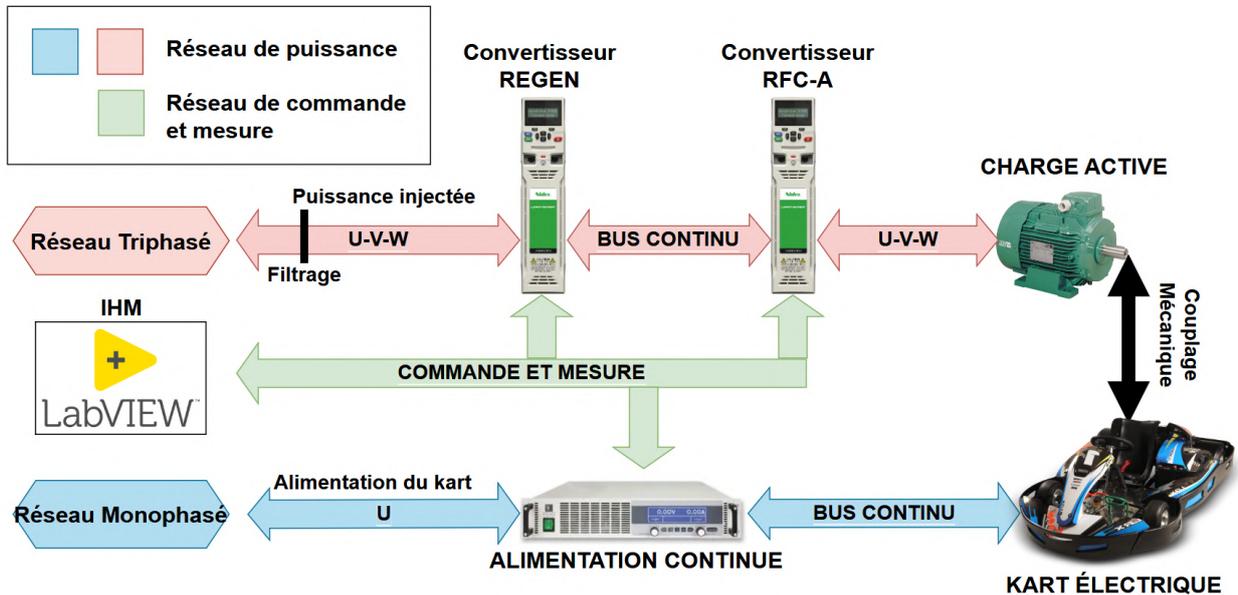


FIGURE 1.2 – Synoptique du système

Le kart électrique sera alimenté par un convertisseur monophasé AC vers DC. L'arbre moteur du kart sera couplé à la charge active qui sera un moteur asynchrone à contrôle vectoriel de flux. Ce moteur sera commandé en couple par une structure de double convertisseurs DC/AC (variateurs de vitesse) montés en tête-bêche. Un convertisseur gèrera la commande en couple et le flux moteur, l'autre gèrera l'injection en triphasé au réseau. Une IHM basée sur LabVIEW permettra de piloter et superviser les variateurs et l'alimentation.

5. Exigences et contraintes imposées

5.1 Le lieu d'implantation

Le banc de test sera situé au plateau technique de l'IUT de l'Indre.

5.2 Réseau électrique

Réseau de l'IUT Triphasé 415V/50Hz Monophasé 240V/50Hz

Pollution harmonique : THD inférieur à 2%

5.3 Caractéristiques du kart

Puissance du moteur du kart : 5.5kW, bridé à 3kW

Puissance de la charge active : 3kW

Vitesse max moteur : 7000tr/min

Alimentation du kart en 48V DC

Couplage en 1 :1 avec la charge

5.4 Normes

L'ensemble de la distribution électrique doit respecter la norme NF C 15-100

5.5 Autres documents référencés internes

Comptes rendus des années précédentes sur le projet kart et éolien.

Schéma électrique du kart.

Documentation variateur Nidec M700.

5.6 Dates importantes

Date	Événement
07 octobre 2024	Remise du cahier des charges
17 octobre 2024	Soutenance 5 minutes
Décembre 2024	Installation des équipements
Janvier 2025	Configuration et mise en route avec le client
Février 2025	Remise des rapports et soutenance finale

TABLE 1.2 – Calendrier des dates importantes

5.7 Documentation

Livraison avec schéma électrique de l'ensemble du système

Livraison avec modélisation 3D du banc de test

Rapport de projet comportant un détail de l'étude mécanique, électrique, des paramètres du variateur et du fonctionnement de l'interface LabVIEW

6. Planning prévisionnel

Le planning prévisionnel est le suivant :



FIGURE 1.3 – Planning prévisionnel

Les dates importantes ont été ajoutées sur le planning afin de pouvoir réajuster certaines ressources en cas d'imprévu. L'objectif principal est de respecter la dernière date de mise en route afin d'avoir une machine fonctionnelle.

Chapitre 2

Étude mécanique du banc de test

1. Contexte de l'étude mécanique

Afin de mener à bien cette étude, notre projet nécessitera une structure mécanique pour le support du kart, avec des contraintes spécifiques imposées par le client dans la conception. Les contraintes suivantes devront donc être respectées :

- Support du **kart électrique** ;
- Support de l'**armoire électrique** derrière le kart ;
- Intégration de la **machine asynchrone** sous le kart ;
- Intégration de l'**alimentation continue** sous le kart ;
- **Couplage** du kart et de la machine asynchrone ;

1.1 Support du kart électrique

La principale contrainte du support mécanique est de supporter de manière stable et à une hauteur définie le kart électrique. Le châssis sera construit en forme de losange, avec un ensemble de tubulures carrées de 50x50mm en acier de 2mm d'épaisseur. Il aura une hauteur de 50cm afin de laisser la place à la charge active sous le kart électrique.

Pour concevoir la structure, il est essentiel de connaître les points d'appui du kart sur le support ainsi que ses dimensions. Nous avons choisi de soutenir le kart par ses traverses avant et arrière, son berceau et ses longerons. Nous relevons donc les dimensions de ces composants et basons les dimensions du banc sur celles-ci.

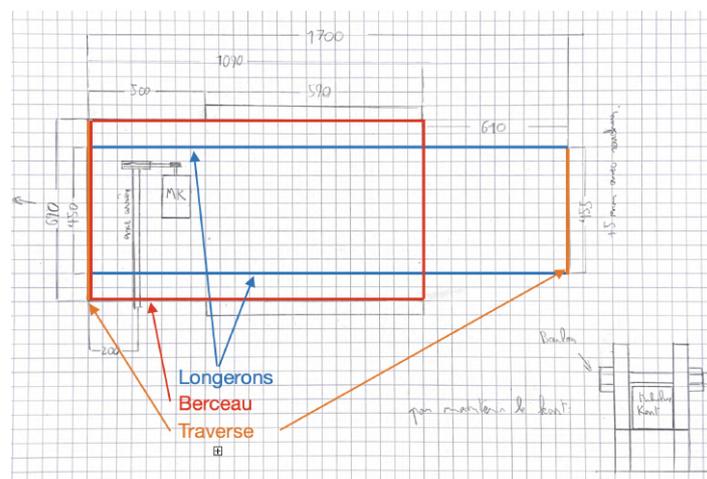


FIGURE 2.1 – Prises des cotes du châssis du kart

Nous avons pu ensuite réaliser les dessins ci-dessous à l'aide du logiciel AutoCAD à fin de nous donner un premier aperçu de la forme du châssis :

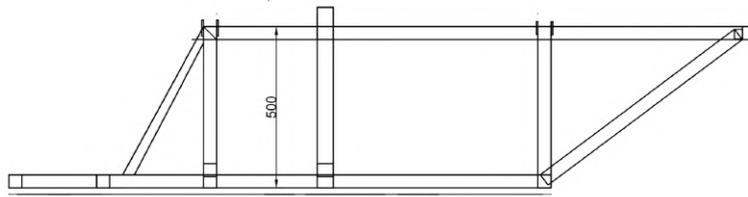


FIGURE 2.2 – Dessin de la structure vue de coté

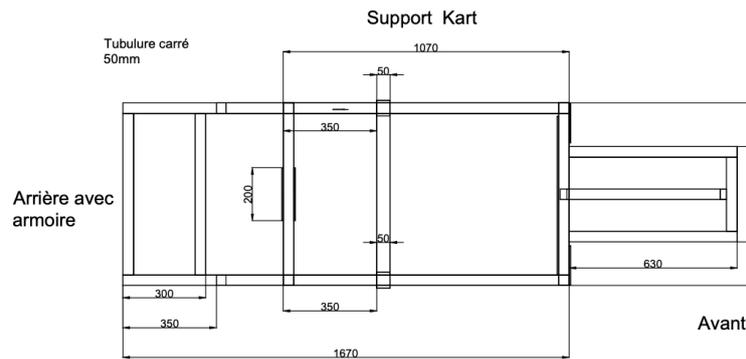


FIGURE 2.3 – Dessin de la structure vue du dessus

On peut apercevoir des bouts de tubulures dépasser sur le dessus de la structure : il s'agit des lamelles qui vont permettre de maintenir le kart de manière stable. En effet, le kart sera posé entre ces lamelles à sept endroits différents. On mettra des silentblocs qui seront disposés sur les tubulures de la structure à cinq endroits prévus pour les lamelles de support. Ces silentblocs prévus sous les traverses et les longerons du kart ont pour but de supporter le kart et de limiter les vibrations. Les lamelles prévues pour ces cinq endroits ont donc pour unique tâche de maintenir les silentblocs. Les deux autres endroits prévus pour les lamelles de support permettront la stabilité latérale du kart sous son berceau. Il est prévu à ces endroits une méthode pour sceller le kart au banc, ce qui fait que nous utiliserons le même type de lamelles que précédemment, mais avec une hauteur cette fois-ci de 100mm. Cela permet le passage d'une vis pour pouvoir boulonner le châssis du kart au banc.

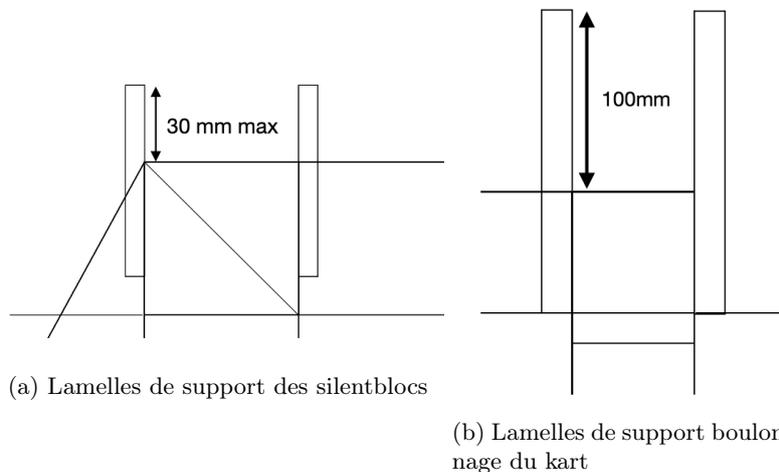


FIGURE 2.4 – Vues de coupe des dessins des lamelles de support du kart

1.2 Couplage et intégration du moteur

Pour loger les composants, nous avons choisi une hauteur de 500mm pour le banc. Pour continuer, nous devons prévoir la liaison entre le moteur du kart et la charge active. Pour disposer de l'espace nécessaire pour la MAS ainsi qu'une marge de réglage, nous avons dû calculer la longueur d'une nouvelle courroie.

Voici une équation qui nous permet de calculer la longueur de la courroie :

$$L = \left((D_G + D_P) \times \frac{\pi}{2} \right) + (D_G - D_P) \times \arcsin \left(\frac{D_G - D_P}{2L} \right) + 2\sqrt{(L^2 - 0,25 \times (D_G - D_P)^2)} \quad (2.1)$$

Avec :

- D_g = diamètre grande poulie
- D_p = diamètre petite poulie
- L = distance entre les axes des poulies.

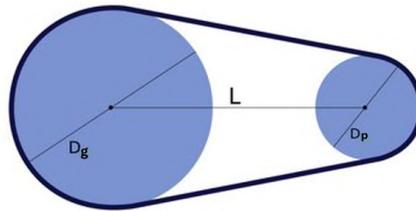


FIGURE 2.5 – Représentation de la longueur d'une courroie entre deux poulies

Pour avoir le diamètre des poulies, nous utilisons la relation suivante :

$$D_p = \frac{N \cdot p}{\pi} \quad (2.2)$$

où :

- D_p est le diamètre d'une poulie,
- N est le nombre de dents de la roue,
- p est la taille du pas (distance entre deux dents),



FIGURE 2.6 – Poulie de test

La grande poulie a 80 dents de 8mm soit un diamètre de 200mm et la petite poulie a 24 dents soit un diamètre de 60mm. À l'aide de ces valeurs, nous avons pu déterminer la longueur de la courroie qui nous permettrait une distance entre les deux axes optimale.

Pour déterminer la distance entre les poulies, nous avons pris en compte deux facteurs principaux :

- Tout d'abord, nous devons respecter les plages de distances permises par les différents éléments du système. Il était nécessaire d'avoir une distance minimale suffisante pour loger la MAS, tout en veillant à ne pas dépasser une distance maximale imposée par la taille de la structure.
- Ensuite, nous avons considéré les longueurs de courroies standards disponibles sur le marché. La courroie standard que nous avons choisie possède un pas de 8 mm et une largeur de 30 mm. Les longueurs disponibles pour ce type de courroie synchrone sont donc : 500 mm, 800 mm, 1000 mm, 1200 mm, 1500 mm, 2000 mm, etc.
- Lors du test initial réalisé par les enseignants, une courroie de 800 mm avait été utilisée, ce qui est ici beaucoup trop court. Cependant, une courroie de 1000 mm ne permettait pas une distance suffisante entre l'axe du kart et l'axe du MAS. Nous avons donc opté pour une courroie de 1200 mm.
- Cette courroie permet une distance de 390 mm entre les deux axes des poulies. Afin de conserver une marge de réglage, nous avons fixé la distance entre les deux axes à 370 mm, réglable grâce à l'ajout d'un galet tendeur. Cette distance de 370 mm est déterminée par la hauteur de la MAS, définie par le support que nous avons conçu.
- Enfin, nous avons dû prendre en compte l'alignement axial des deux poulies. Cet alignement est essentiel pour garantir une transmission fluide de la puissance, sans torsion ni usure prématurée de la courroie. Pour cela, nous avons prévu une marge sur le support de la MAS permettant un déport du moteur de 3 cm vers l'extérieur du banc. Nous pourrions également ajuster le déport de la poulie sur l'axe de propulsion du kart, qui peut être déplacée si nécessaire.

La structure a été conçue de manière à offrir une marge suffisante pour permettre les différents réglages nécessaires du système, que ce soit pour la position des poulies, l'ajustement de la MAS ou l'alignement axial, tout en assurant une transmission fluide et stable.

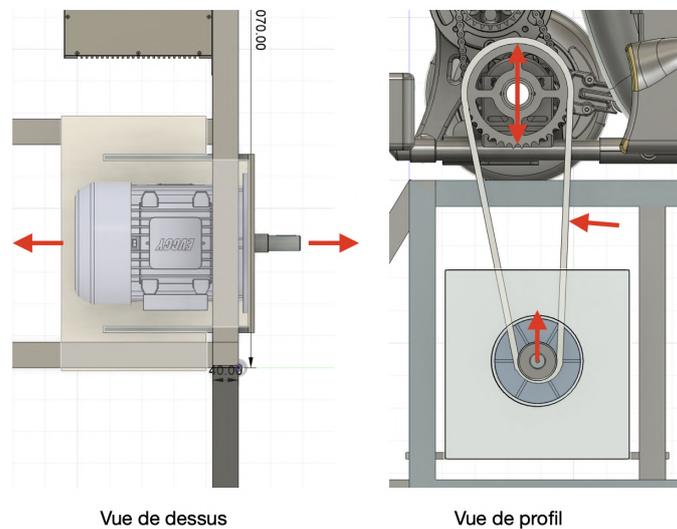


FIGURE 2.7 – Illustration des marges permises par la conception mécanique du banc

1.3 Support de l'armoire électrique

L'armoire électrique sera fixée à l'arrière de la structure, entre les deux tubulures espacées de 30cm. Elle aura une hauteur de 105cm et contiendra les deux variateurs M700 ainsi que les autres composants électriques. Voici une modélisation 3D qui nous permet de voir l'emplacement de l'armoire sur la structure et de se rendre compte de la place qu'elle prendra par rapport au kart électrique :

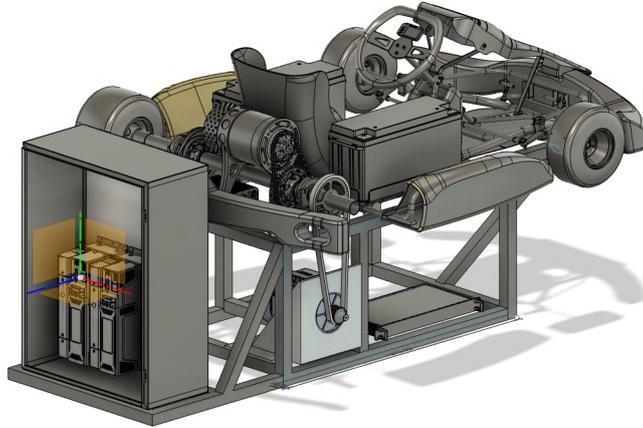


FIGURE 2.8 – Vue arrière de l'armoire électrique

1.4 Intégration de l'alimentation continue

Une planche en bois aux dimensions de 720x690 permettra de fixer l'alimentation continue à la structure, en dessous du kart.



FIGURE 2.9 – Alimentation EA-PSB 10000 2U

2. CAO du banc de test

2.1 Structure du kart

Pour fournir un support en vue de l'établissement d'un devis auprès d'un artisan, nous avons réalisé le dessin industriel de la structure sur le logiciel AutoCAD. Ce dessin respecte l'ensemble des spécifications définies lors de la phase d'étude mécanique du banc. Voici le dessin industriel réalisé respectant les contraintes définies lors de cette phase d'étude :

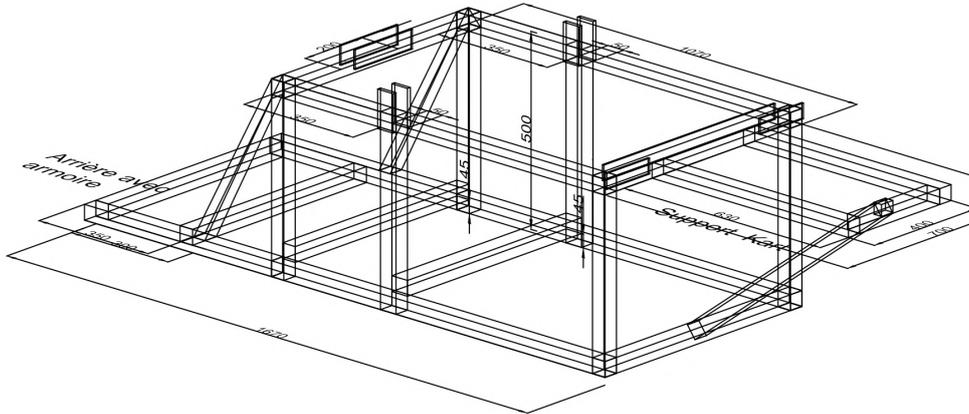


FIGURE 2.10 – Dessin industriel du banc en vue isométrique

Concernant les lamelles de support du kart, voici une vue conceptuelle qui va nous permettre d'avoir un réel aperçu de leur place sur la structure :

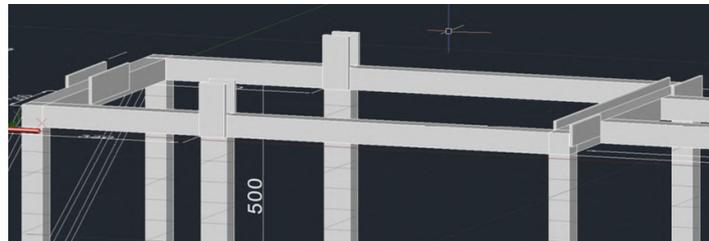


FIGURE 2.11 – Vue conceptuelle des supports pour les silentblocks du kart

Pour enrichir la conception assistée par ordinateur (CAO) de ce projet, nous avons également réalisé des modélisations 3D à l'aide du logiciel Fusion. La structure du banc, le support moteur et la courroie ont été modélisés par l'étudiant du projet assigné à la CAO, tandis que les modèles du kart, de l'alimentation, du moteur asynchrone, de l'armoire et des variateurs ont été téléchargés sur Internet. Cette modélisation permet de mieux se rendre compte de l'échelle du projet et du résultat que nous voulons obtenir.



FIGURE 2.12 – Représentation 3D de la structure mécanique

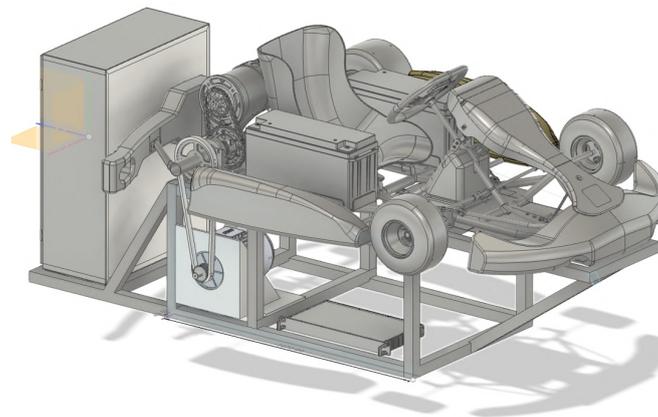


FIGURE 2.13 – Vue trois quarts avant de la modélisation 3D

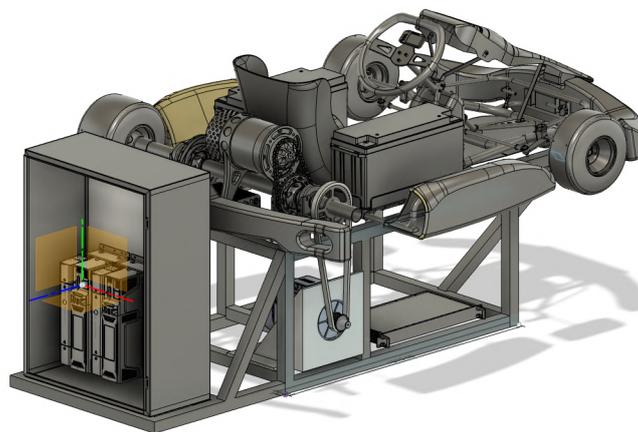


FIGURE 2.14 – Vue trois quarts arrière de la modélisation 3D

2.2 Support du moteur

Le moteur bénéficie d'un support sur-mesure spécialement conçu pour son montage sur la structure du kart. Cette pièce doit prendre en compte toutes les contraintes formulées lors de l'étude mécanique faite en amont. Elle doit aussi permettre un montage simple sur la structure du kart.

Le moteur asynchrone est un moteur à montage à bride B5. Ce type de montage consiste à fixer le moteur via une bride circulaire avec des trous de fixation disposés autour de l'axe mécanique du moteur. La bride est une extension de matière saillante sur le support de fixation du moteur qui permet de le maintenir dans son support.

Le support moteur doit donc être suffisamment solide pour supporter le moteur de 33kg en suspens. Pour ce faire, nous avons conçu un support type équerre par des triangulations en plaque d'acier de 10mm. La production de la plaque moteur devra également être très précise, car le constructeur suggère un diamètre pour la bride de 180H.

Remarque :

Le chiffre "180" fait simplement référence au diamètre nominal de la pièce en millimètres, tandis que la lettre "H" est une tolérance issue du système ISO des ajustements pour les dimensions d'alésage (trou).

Ce système est utilisé pour définir les écarts admissibles par rapport au diamètre nominal. Dans notre cas, la tolérance H signifie que la dimension réelle de l'alésage peut être exactement égale ou légèrement plus grande que la dimension nominale, mais jamais plus petite. Ces tolérances sont spécifiées par la norme ISO 286-1, qui appartient à une série de standards internationaux définissant les marges admissibles pour les dimensions linéaires des arbres et des alésages, employés dans les assemblages mécaniques.

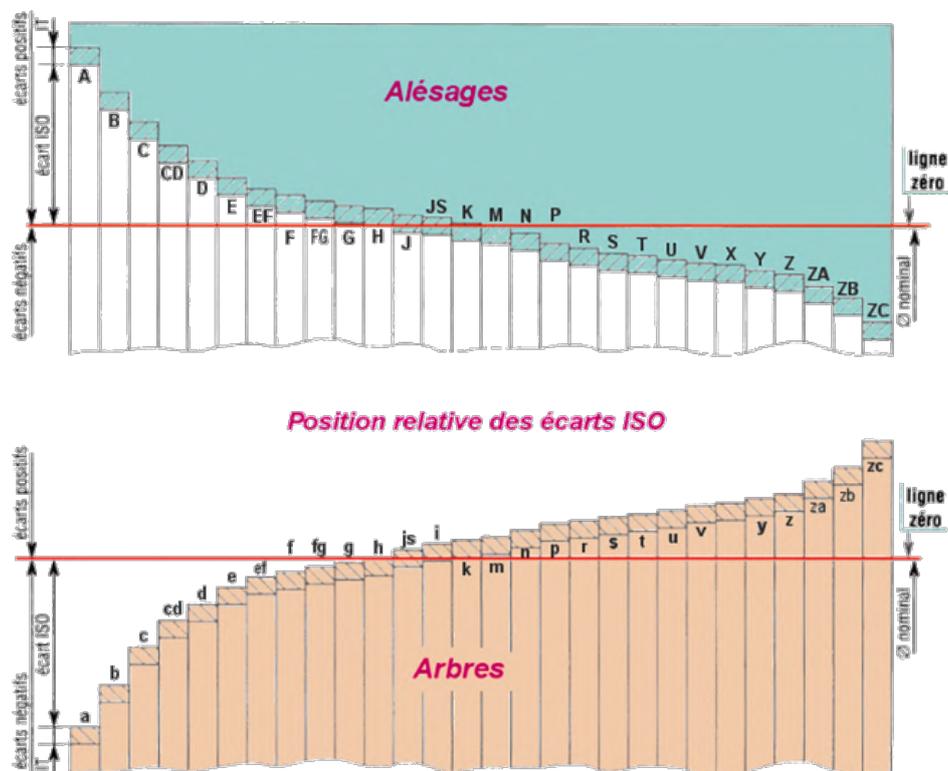


FIGURE 2.15 – Tableau des tolérances d'ajustements (ISO 286-1)

La partie en bleu est la zone qui doit être alésée pour le support moteur. Cette zone ne nous permet aucun support mécanique, celui-ci est assuré par la zone en rouge. La zone en rouge est la partie sur laquelle le moteur va être en contact avec son support.

Voici donc le support qui a été conçu pour satisfaire le type de montage du moteur :

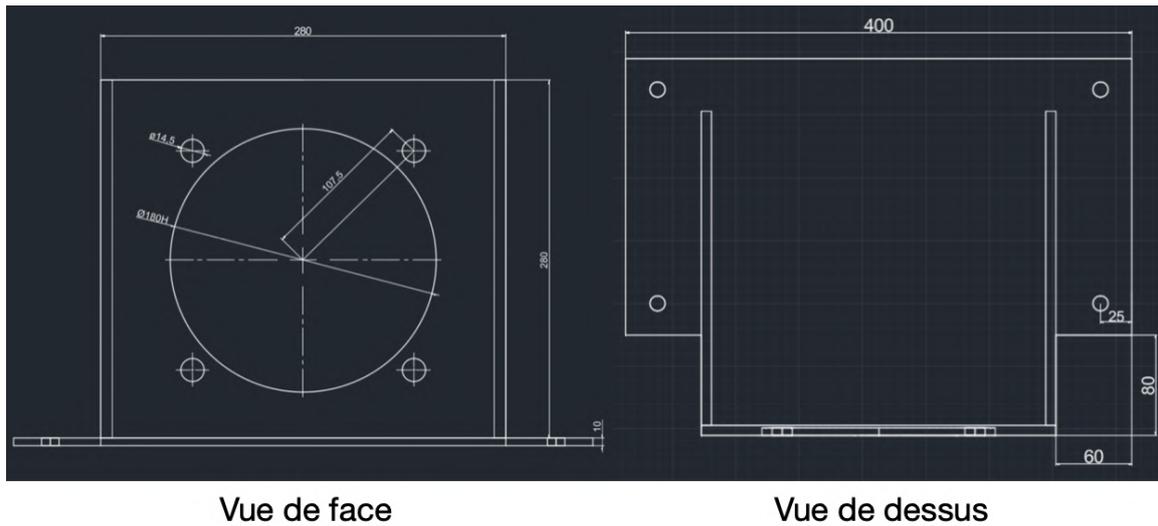


FIGURE 2.16 – Dessins et côtes du support pour la charge active

En regardant la figure 2.7 plus précisément, on peut apercevoir une cote de 80 mm en bas à droite de l'image. Cette cote correspond aux 30 mm de marges prévues pour le réglage de l'alignement axial des poulies. Le cadre de la structure était en tubulures de 50 mm, installer le support moteur en butée contre la structure permet le déport requis de 30 mm.

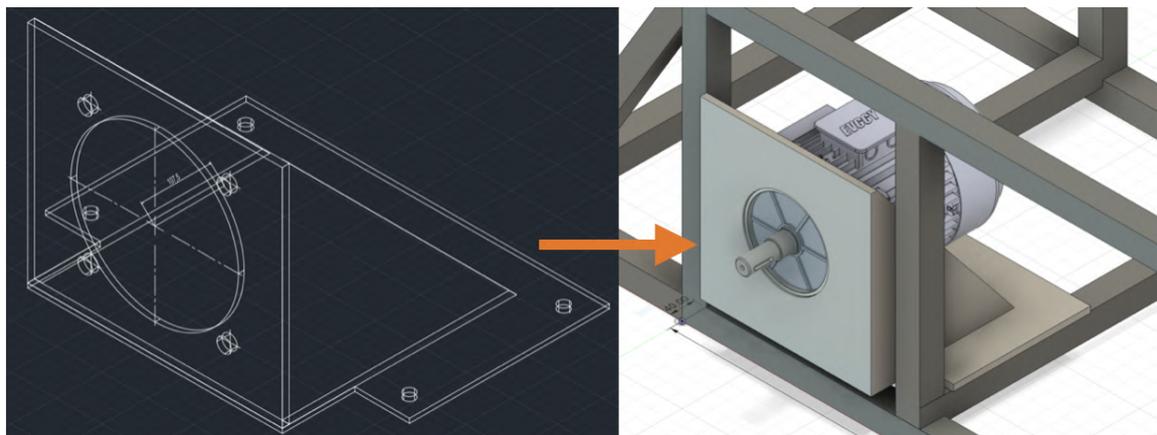


FIGURE 2.17 – Aperçu du support moteur en dessin et dans la structure

Ci-dessus, vous trouverez une vue d'ensemble du support moteur intégré à la structure. Le moteur présenté est une représentation 3D indicative, destinée uniquement à illustrer l'aspect final attendu.

2.3 Contraintes mécaniques

a) Explications des tests virtuels

Pour nous assurer que la structure serait en capacité de soutenir tous les éléments du système, nous avons fait une simulation mécanique de la structure sur le logiciel Fusion. Nous avons appliqué la force de pesanteur terrestre ainsi que les forces de pesanteur des différents éléments du banc, avec des valeurs surestimées par sécurité. Le kart sans conducteur est estimé à 80 kg, et nous avons rajouté 100kg au cas où on en rajouterait un. La majorité du poids du kart se trouve à l'arrière avec le moteur, ce qui fait que nous avons réparti la masse du kart en 3 : 50% à l'arrière, 30% sous l'avant du berceau et 20% sous la traverse avant. Le moteur a été estimé à un total de 50 kg avec son support, réparti également sur deux barres le supportant. L'armoire électrique a été largement estimée à 70 kg, répartie sur les deux traverses à l'arrière de la structure lui étant dédiées.

Nous avons poursuivi les tests mécaniques sur la seconde pièce mécanique que nous avons conçue : le support pour la charge active. Pour les valeurs de simulation, nous les avons encore une fois surestimées par mesure de sécurité. Le moteur asynchrone a une masse de 33 kg. Comme expliqué lors de la conception, le moteur a un montage à bride, ce qui veut dire qu'il va appliquer une force de levier sur la surface de son support. Pour ce faire, nous avons appliqué sur cette même surface une force déportée de 30 cm équivalente à la force de pesanteur du moteur.

Afin de réaliser ces tests de contrainte mécanique de façon optimale, nous allons également devoir appliquer les critères du **facteur de sécurité**, ainsi que de la **limite de déformation plastique** :

Facteur de sécurité

Le facteur de sécurité (FoS) est un concept fondamental en ingénierie et en conception de structures. Il représente le rapport entre la résistance réelle d'un matériau ou d'une structure et la charge ou les contraintes auxquelles il est soumis dans des conditions normales de service. Il est défini par la formule suivante :

$$\mathbf{FoS} = \frac{\text{Résistance ultime}}{\text{Charge ou contrainte appliquée}} \quad (2.3)$$

Avec :

- **Résistance ultime** : Charge ou contrainte maximale que peut supporter un matériau avant de céder ou de se déformer de manière irréversible.
- **Charge ou contrainte appliquée** : Charge ou conditions maximales attendues auxquelles la structure sera soumise en utilisation normale.

Pour nos critères de tests, le FoS doit être supérieur ou égal à 3 ce qui équivaut aux critères appliqués pour les machines industrielles.

Limite de déformation plastique

La déformation plastique correspond à une déformation permanente d'un matériau. Elle s'oppose à la déformation élastique, qui est la capacité d'un matériau à se déformer sous une charge, mais à revenir à sa forme d'origine une fois la charge retirée. Ici, on parle de limite de déformation plastique, qui correspond donc à la limite à partir de laquelle une force appliquée crée des dommages irréversibles à un matériau.

Pour nos tests, nous allons appliquer la norme européenne des structures en acier (NF EN 1993) qui stipule que la déformation d'une poutre ne doit pas excéder un 250ème de la longueur de celle-ci (L/250).

b) Résultats des tests de contraintes mécanique

Structure du kart : Les forces appliquées à la structure sont visibles sur l'image extraite du logiciel ci-dessous.

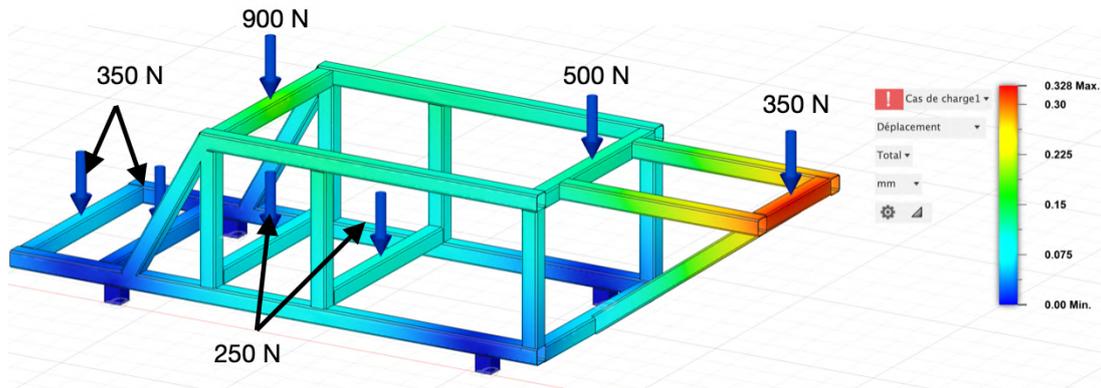


FIGURE 2.18 – Simulation mécanique logicielle des forces appliquées à la structure

D'après l'échelle de couleur à droite, la distorsion maximale de la structure, qui se situe à l'avant, est de 0.328 mm, ce qui peut être considérée comme négligeable. Nous pouvons donc valider la solidité de cette structure.

Vérifications du respect des critères :

- **FoS** : Entre 8 et 15 d'après le logiciel, ce qui est bien supérieur à 3, donc cohérent ;
- **L/250** : 1,6 mm soit 5 fois supérieur à la distorsion maximale de la structure obtenue en simulation.

Support moteur : Les forces appliquées au support de la charge active sont visibles sur l'image extraite du logiciel ci-dessous.

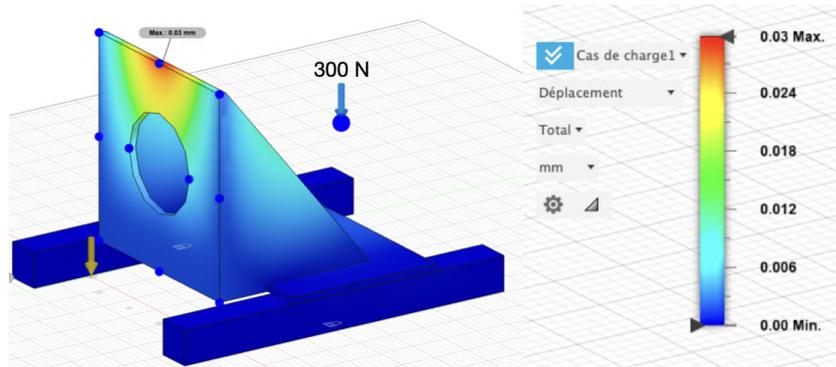


FIGURE 2.19 – Rendu de la simulation mécanique logicielle du support pour MAS

Vérifications du respect des critères

- **FoS** : Entre 10 et 15 d'après le logiciel, ce qui est bien supérieur à 3, donc cohérent ;
- **L/250** : 1,12 mm soit 40 fois supérieur à la distorsion maximale de la structure obtenue en simulation.

3. Modélisation mécanique et simulation de scénarios

L'objectif du banc de test est de pouvoir simuler des scénarios de route sur le kart. Pour cela, il est nécessaire de connaître la valeur de couple à imposer en fonction de l'environnement à simuler. Nous resterons sur des représentations simplifiées afin de simplement illustrer l'aspect mécanique du kart.

3.1 Caractéristiques du kart

Les caractéristiques physiques du kart sont les suivantes :

- $m_k = 200 \text{ kg}$: masse totale du kart avec pilote
- $\rho_{\text{air}} = 1,28 \text{ kg.m}^{-3}$: masse volumique de l'air
- $SC_x = 0,3 \text{ m}^2$: coefficient de pénétration dans l'air
- $D_r = 270 \text{ mm}$: diamètre des roues
- $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$: constante de pesanteur
- $C_r = 0,01$: coefficient de roulement
- $K_r = 24/40=1,67$: rapport de réduction moteur/roue

3.2 Bilan des forces et expressions

Un total de trois forces résistives sera retenu pour la modélisation mécanique du kart :

- F_{roll} : Résistance au roulement
- F_{aero} : Traînée aérodynamique
- F_{pente} : Force due à la pente

Leurs valeurs sont les suivantes :

$$F_{\text{roll}} = C_r \times m_k \times g = 0.01 \times 200 \times 9.81 \approx 19.62\text{N} \quad (2.4)$$

Cette force est **constante**.

$$F_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} SC_x v^2 \quad (2.5)$$

Cette force dépend de la **valeur instantanée de la vitesse**.

$$F_{\text{pente}} = m_k g \frac{p\%}{100} \quad (2.6)$$

Cette force dépend d'une **valeur de pente à définir**.

3.3 Expression du couple

L'expression des forces peut être facilement convertie en couple moteur. Le total des forces est :

$$F_{\text{total}} = F_{\text{roll}} + F_{\text{aero}} + F_{\text{pente}} \quad (2.7)$$

On peut en déduire le couple nécessaire à la roue par son diamètre :

$$T_{\text{roue}} = F_{\text{total}} \times R_{\text{roue}} \quad (2.8)$$

On peut en déduire le couple nécessaire au moteur par le rapport de réduction :

$$T_{\text{moteur}} = \frac{T_{\text{roue}}}{K_r} \quad (2.9)$$

Finalement, en prenant en compte tous les derniers éléments, on obtient :

$$\begin{aligned}
 T_{\text{moteur}} &= \frac{(F_{\text{roll}} + F_{\text{aero}} + F_{\text{pente}}) \times R_{\text{roue}}}{K_r} \\
 T_{\text{moteur}} &= \frac{[(C_r \times m_k \times g) + (\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} S C_x v^2) + (m_k g \frac{p\%}{100})] \times R_{\text{roue}}}{K_r} \\
 T_{\text{moteur}} &= \frac{[(0,01 \times 200 \times 9,81) + (\frac{1}{2} \times 1,28 \times 0,3 \times v^2) + (200 \times 9,81 \times \frac{p\%}{100})] \times 0,135}{1,67} \\
 T_{\text{moteur}} &= \frac{[19,62\text{N} + 0,192\text{kg/m} \cdot v^2 + 19,62\text{N} \cdot p\%] \cdot 0,135\text{m}}{1,67}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Afin de simuler le comportement du kart sur la route, seule la **vitesse instantanée** et une **consigne de pente** sont nécessaires. La vitesse du moteur pourra être récupérée par le variateur et la consigne de pente pourra se faire par le biais de l'IHM.

Application numérique : Prenons par exemple une pente à **20%** et une vitesse de **50km/h (13.9m/s)** :

$$\begin{aligned}
 T_{\text{moteur}} &= \frac{[19,62 + 0,192 \cdot 13,89^2 + 19,62 \cdot 0,2] \cdot 0,135}{1,67} \\
 T_{\text{moteur}} &= 4.9\text{Nm}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Le couple résistant à appliquer au moteur est alors de **4.9 Nm**.

Chapitre 3

Étude électrique du banc de test

1. Introduction

L'objectif de cette partie est d'expliquer le fonctionnement des différents éléments électriques du banc de test, et de justifier certains choix technologiques. Le schéma électrique suivant permet de voir les différents éléments du banc de test.

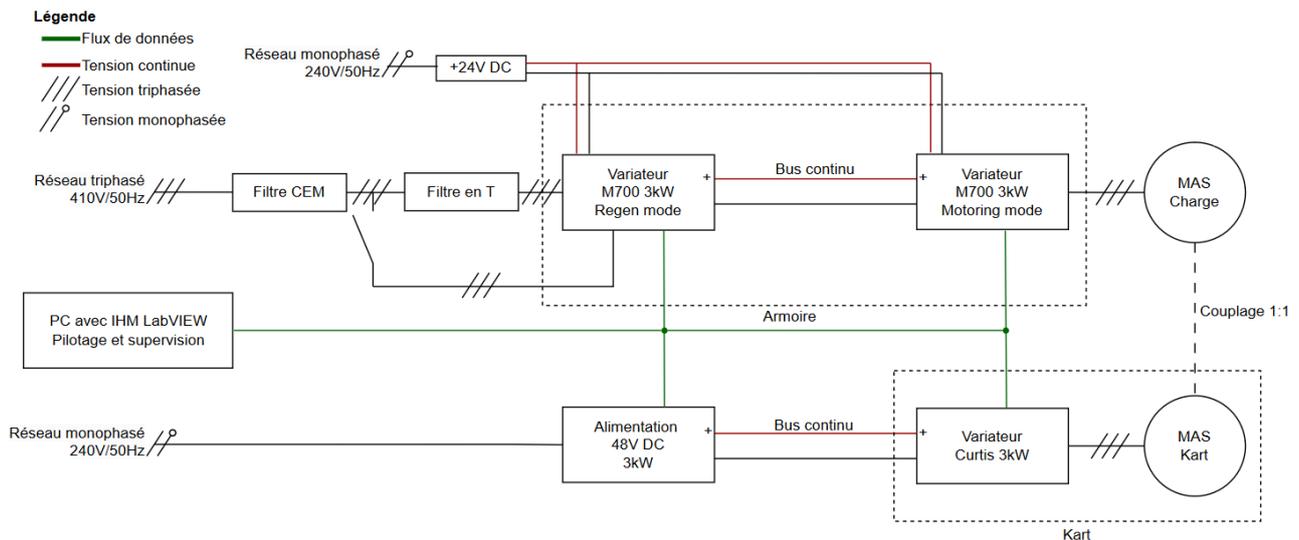


FIGURE 3.1 – Schéma électrique de principe

Dans un premier temps, nous verrons comment fonctionne la machine asynchrone et quel rôle elle joue dans le système. Nous verrons ensuite comment fonctionnent les convertisseurs, quels sont leurs avantages et leurs limites, notamment en termes de pollution harmonique. Nous verrons comment filtrer cette pollution et protéger les autres éléments du système de cette pollution. Nous expliquerons ensuite comment fonctionne l'alimentation continue du kart. Finalement, nous expliquerons les étapes du dimensionnement des appareils et nous finirons avec les schémas électriques.

2. Machine Asynchrone

2.1 Principe

Rappelons quelques généralités sur la machine asynchrone en fonctionnement moteur. La machine asynchrone à rotor à cages fonctionne en induisant un champ magnétique statorique qui interagit avec le champ magnétique du rotor, lequel est généré par les courants induits dans les barres du rotor en raison du champ statorique. Cette interaction génère un couple électromagnétique et donc un déplacement du rotor. La vitesse du champ statorique est alors définie par la fréquence d'alimentation ainsi que le nombre de paires de pôles du moteur.

$$\Omega = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2\pi f}{p} = \frac{\omega}{p} \quad (3.1)$$

N_s : Vitesse angulaire champ statorique (tr/min)

Ω_s : Vitesse angulaire champ statorique (rad/s)

Où : ω : Pulsation réseau (rad/s)

f : Fréquence réseau (Hz)

U : Tension réseau (V)

p : Nombre de paires de pôles de la machine

La vitesse du rotor ne tourne pas à la même vitesse. "Si le rotor tournait à la vitesse synchrone, donc aussi vite que le flux, le flux à travers chacune des bobines rotoriques serait constant. Au rotor, il n'y aurait plus de f.e.m. induite, donc plus de courant et plus de couple (SÉQUIER et NOTELET 2006)." Il existe alors une différence de vitesse qui s'exprime par le paramètre appelé glissement :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (3.2)$$

L'expression du couple moteur de la machine asynchrone est donc intrinsèquement liée à la valeur du glissement. Elle dépend également des paramètres de construction du moteur et de la fréquence d'alimentation.

$$T_{em} = 3 \frac{p V_s^2}{\Omega_s} \frac{\frac{R'_r}{g}}{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + (N_r \omega)^2} \quad (3.3)$$

On aperçoit que le signe du couple électromagnétique est défini par le signe du glissement, puisque tous les autres paramètres sont positifs.

Le rotor tournera toujours moins rapidement que la vitesse de son champ statorique, et d'autant moins lorsque le couple résistant augmente. On observe sur la caractéristique ci-dessous que la machine asynchrone est assez robuste et sa vitesse varie peu face aux variations de couple. Un couple trop élevé peut toutefois faire passer la machine en régime instable (crête de la courbe).

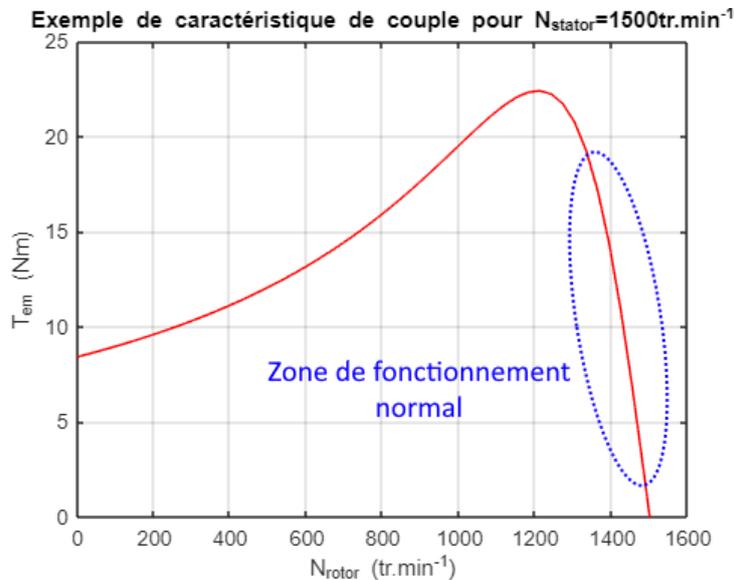


FIGURE 3.2 – Exemple de caractéristique de couple pour $N_{\text{stator}} = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$

2.2 Fonctionnement en "génératrice"

D'après l'expression du couple, la machine peut fonctionner en "génératrice" pour un glissement négatif, soit une vitesse stator inférieure à la vitesse rotor (hypersynchronisme). La machine consomme alors de la puissance réactive, mais renvoie de la puissance active au réseau. En fonctionnement "génératrice" la vitesse rotor est définie par la source mécanique. Le point de fonctionnement n'est alors non plus défini par la fréquence d'alimentation/vitesse stator, mais par la vitesse du rotor. Pour faire varier le couple et donc la puissance, on fait varier la fréquence d'alimentation du stator.

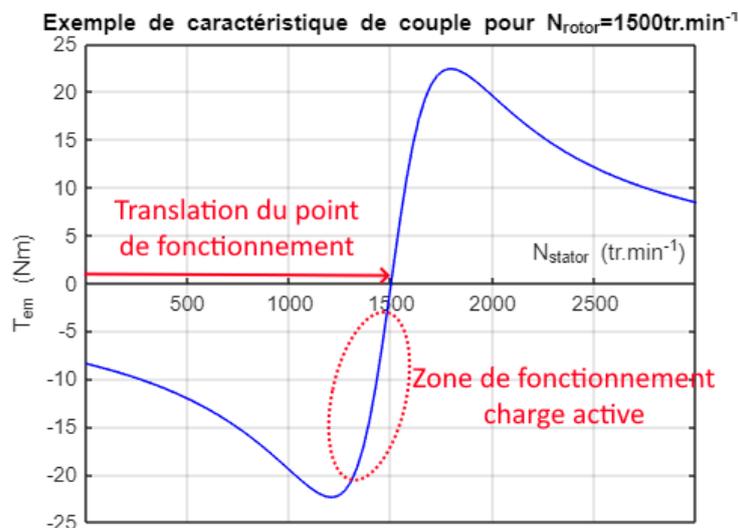


FIGURE 3.3 – Exemple de caractéristique de couple pour $N_{\text{rotor}} = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$

On observe dans cet exemple que pour une vitesse rotor de 1500tr.min^{-1} , il suffit d'un champ stator tournant à 1400tr.min^{-1} pour un couple de -15Nm . C'est dans cette logique que la commande en couple fonctionne.

2.3 Bilan de puissance

La génératrice asynchrone absorbe une puissance mécanique par son arbre. Pour obtenir la puissance électrique utile, on peut soustraire à cette puissance les pertes joules rotor, les pertes joules stator, les pertes fer stator et les pertes mécaniques liées à l'accouplement moteur.

$$\boxed{P_{elec} = P_{meca} - pertes} = \Omega T - p_{js} - p_{jr} - p_{fs} - p_{meca} \quad (3.4)$$

C'est cette puissance active électrique qui sera injectée dans le réseau. Dans la mesure où la vitesse du kart est constante et régulée, et que notre charge active soit commandée en couple, il sera possible de faire varier la puissance active générée en faisant varier la consigne de couple.

La génératrice nécessite cependant une puissance réactive afin de pouvoir fonctionner et générer le flux. Afin de générer assez de puissance réactive, il est possible de mettre en parallèle à la génératrice des batteries de condensateurs. Une partie de la puissance active sera alors convertie en puissance réactive. Il est aussi possible de récupérer la puissance réactive du réseau, mais cela a un impact sur le facteur de puissance.

3. Commande vectorielle de la machine asynchrone

Les premiers variateurs de fréquences sont arrivés dans les années 1960 et ont révolutionné la variation de vitesse. Grâce aux travaux de recherche et à l'amélioration des semi-conducteurs et de la puissance de calcul, les premiers variateurs en commande vectorielle (FOC) sont apparus dans les années 1980. Ces innovations ont permis un contrôle précis des machines en séparant la commande du flux et du couple.

La commande vectorielle se base sur un principe simple : le changement de repère. Les machines triphasées peuvent être modélisées dans un système à trois axes pour les trois phases. Cependant, ce système n'est pas réellement un système à trois dimensions. L'objectif est alors de passer d'une représentation triphasée, vers une représentation diphasée, grâce à d'astucieuses combinaisons linéaires. On pourra ensuite changer le référentiel des grandeurs diphasées du stator pour suivre le référentiel du rotor (Field Oriented Control) et ajuster le couple et le flux.

3.1 Transformée de Clarke (triphase/diphasé)

Pour rappel, un système triphasé équilibré possède la relation suivante :

$$x_a + x_b + x_c = 0 \quad (3.5)$$

On appelle cette somme la composante homopolaire. Cela nous montre qu'un système triphasé équilibré n'est pas linéairement indépendant. On peut alors effectuer une transformation triphasée/diphasée sans perte d'information. Cette transformation est connue sous le nom de transformation de Clarke.

$$[x_{tri}] = C_{32} [x_{\alpha\beta}] \quad (3.6)$$

Dans le cas d'un système non équilibré, la composante homopolaire peut être prise en compte de la manière suivante :

$$[x_{tri}] = C_{32} [x_{\alpha\beta}] + C_{31} x_0 \quad (3.7)$$

La composante homopolaire n'apporte aucun bénéfice en termes de conversion électromécanique. Dans le cas d'une machine asynchrone à cage d'écureuil, la composante homopolaire est nulle.

Pour rappel, un système triphasé peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$[x_{tri}] = X_{\max} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Grâce à la relation trigonométrique $\cos(a-b) = \cos a \cos b + \sin a \sin b$, il est possible d'établir une combinaison linéaire pour chaque phase.

$$[x_{tri}] = X_{\max} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{pmatrix} = X_{\max} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

On voit que chaque phase est une combinaison linéaire de $\cos \theta$ et $\sin \theta$, et la matrice des scalaires est appelée matrice de Clarke C_{32} . Les matrices de Clarke ont l'avantage de pouvoir se multiplier à leur transposée et de se simplifier. C'est le cas pour les matrices suivantes :

$$\begin{aligned} C_{32}^t C_{32} &= \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ C_{32}^t C_{31} &= \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ C_{31}^t C_{32} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \\ C_{31}^t C_{31} &= 3 \end{aligned} \quad (3.10)$$

En utilisant cette propriété, on obtient la transformation triphasée/diphassée :

$$\begin{aligned} C_{32}^t [x_{tri}] &= C_{32}^t C_{32} [x_{\alpha\beta}] + C_{32}^t C_{31} x_0 \\ C_{32}^t [x_{tri}] &= \frac{3}{2} [x_{\alpha\beta}] + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} x_0 = C_{32}^t [x_{tri}] \end{aligned} \quad (3.11)$$

On obtient finalement :

$$[x_{\alpha\beta}] \triangleq \frac{2}{3} C_{32}^t [x_{tri}] \quad (3.12)$$

Cette transformée permet de passer vers un système diphassé, mais ne donne pas de sens physique aux grandeurs. Pour cela un changement de référentiel est nécessaire, c'est la transformée de Park.

3.2 Transformée de Park (statique/rotatif)

La matrice de Park d'angle ξ est une matrice de rotation qui permet un passage du repère $\alpha\beta$ vers le repère dq .

$$[x_{\alpha\beta}] \triangleq P(\xi) [x_{dq}] \quad (3.13)$$

La matrice de Park d'angle ξ est la suivante :

$$P(\xi) = \begin{bmatrix} \cos \xi & -\sin \xi \\ \sin \xi & \cos \xi \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Cette matrice possède de nombreuses propriétés permettant de simplifier les calculs de courants en électrotechnique.

3.3 Expression du couple électromagnétique de la machine asynchrone

Selon Park, la puissance électrique instantanée de la machine asynchrone s'écrit :

$$p(t) = (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) + 3v_{0s} i_{0s} \quad (3.15)$$

Dans un référentiel lié au champ tournant, on peut déterminer l'énergie électrique fournie au stator en négligeant les pertes fer :

$$dW_{es} = \left[\frac{3}{2} R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + 3R_s i_{s0}^2 \right] dt + \left[\frac{3}{2} (d\psi_{ds} i_{ds} + d\psi_{qs} i_{qs}) + 3\psi_{0s} i_{0s} \right] + \left[\frac{3}{2} \omega_s (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) dt \right] \quad (3.16)$$

L'énergie se décompose en trois termes :

- Le premier terme représente l'énergie perdue par effet Joule au stator ;
- Le second terme représente la variation d'énergie magnétique statorique ;
- Le troisième terme représente l'énergie transférée du stator au rotor à travers l'entrefer.

Le couple électromagnétique développé par le champ tournant s'obtient en divisant le 3^{ème} terme de l'équation précédente par $\Omega_s dt$:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (3.17)$$

Il existe une autre expression en travaillant sur l'énergie électrique fournie au rotor :

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\psi_{qr} i_{dr} - \psi_{dr} i_{qr}) \quad (3.18)$$

En explicitant les flux statoriques et rotoriques en fonction des inductances, on vérifie :

$$T_{em} = \frac{3}{2} p M_{sr} (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3.19)$$

Cette relation très importante met en évidence le fait que le couple résulte de l'interaction des composantes de courants statoriques et rotoriques.

Cependant, les courants rotoriques ne sont pas des grandeurs accessibles. Les seules grandeurs que l'on peut imposer en alimentant la machine par le stator sont les courants i_{ds} et i_{qs} . En fonction des grandeurs i_{ds} , i_{qs} , ψ_{dr} et ψ_{qr} , l'expression du couple devient :

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\psi_{dr} i_{qs} - \psi_{qr} i_{ds}) \quad (3.20)$$

Le but est d'obtenir une expression du couple similaire à la machine à courant continu. Il suffit, pour ce faire, d'orienter le repère dq de manière à annuler la composante de flux en quadrature. C'est-à-dire, de choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct (d) et donc d'avoir $\psi_{qr} = \mathbf{0}$. Ainsi $\psi_r = \psi_{dr}$ uniquement. Le couple s'écrit alors :

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\psi_r i_{qs}) \quad (3.21)$$

On observe que l'expression du couple dépend maintenant que de deux termes. La commande d'une machine triphasée se rapporte à la commande d'une machine à courant continu. En agissant sur la composante i_{ds} on règle le **flux**, et en agissant sur la composante i_{qs} on règle le **couple**.

La position en temps réel du champ rotor est nécessaire afin d'appliquer la transformée de Park dans la boucle de régulation. Dans notre cas, cela sera assuré par un **codeur**.

4. Convertisseurs

4.1 Convertisseur AC/DC ou Redresseur

a) Structure

Un redresseur permet de convertir une tension **alternative** en une tension **continue**. Il existe plusieurs types de redresseurs (commandés, mono/double alternance), mais nous nous intéressons à la structure la plus simple : Le pont à diodes. Le pont à diodes ne nécessite aucune commande. Il fournit une tension continue dépendant de l'amplitude de la tension d'entrée. En triphasé, sa structure est la suivante :

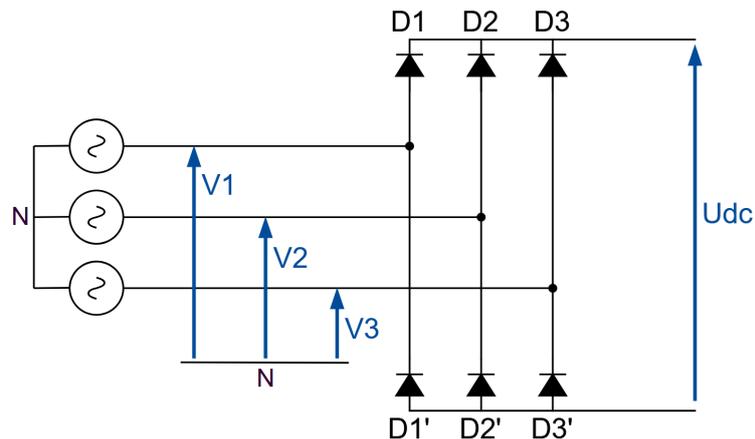


FIGURE 3.4 – Schéma de principe du pont à diodes

Les tensions alternatives V_1 , V_2 et V_3 arrivent en entrée du pont, sur les trois branches respectives. La tension retenue par le pont est toujours la plus élevée. Seules deux diodes peuvent être passantes simultanément, et les diodes d'une même branche ne sont jamais passantes en même temps. Cela implique que la tension de sortie du pont correspond toujours à la tension composée la plus élevée parmi les trois phases.

Tensions V_1, V_2, V_3	Diodes passantes	Diodes bloquées	Tension de sortie U_{DC}
$V_1 > V_2 > V_3$	$D1, D3'$	$D2, D1', D2', D3$	$V_1 - V_3$
$V_2 > V_3 > V_1$	$D2, D1'$	$D1, D2', D3, D3'$	$V_2 - V_1$
$V_3 > V_1 > V_2$	$D3, D2'$	$D1, D2, D3', D1'$	$V_3 - V_2$
$V_1 > V_3 > V_2$	$D1, D2'$	$D2, D3, D3', D1'$	$V_1 - V_2$
$V_2 > V_1 > V_3$	$D2, D3'$	$D1, D2', D3, D1'$	$V_2 - V_3$
$V_3 > V_2 > V_1$	$D3, D1'$	$D1, D2, D2', D3'$	$V_3 - V_1$

TABLE 3.1 – États des diodes et tensions dans un pont triphasé

De cette manière, la tension de sortie est toujours positive. On ne peut cependant pas dire que cette tension soit continue puisqu'il subsiste l'ondulation des tensions alternatives.

b) Formes d'ondes

Les formes d'ondes des tensions sont les suivantes :

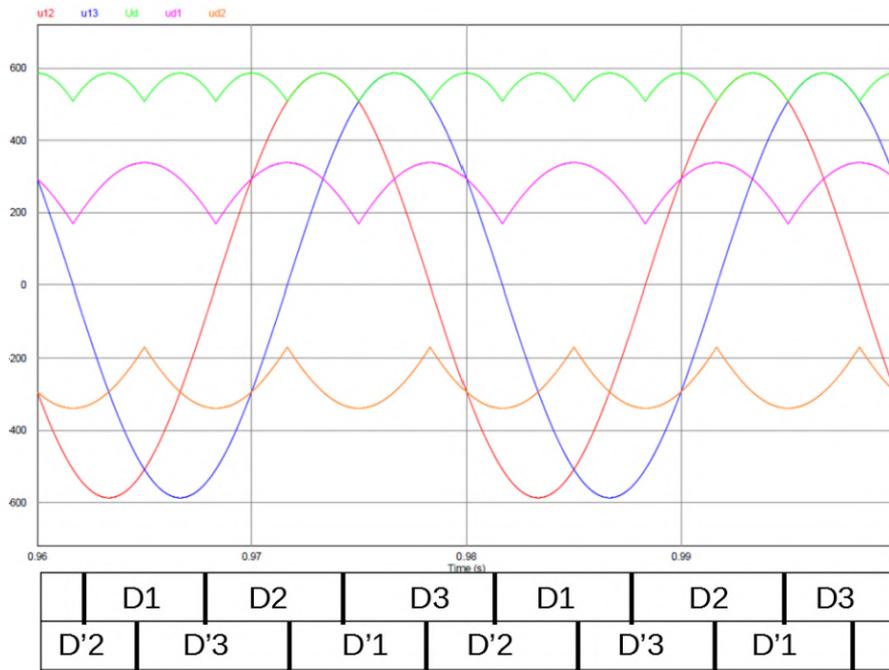


FIGURE 3.5 – Formes d'ondes de tension d'un pont à diodes

L'avantage d'un pont à diodes triphasé est que l'ondulation de tension est nettement moins importante que celle d'un pont monophasé. Celle-ci peut être absorbée par un **filtre LC**.

c) Expression de la tension de sortie

La valeur de sortie d'un pont à diodes dépend de la valeur d'entrée du pont, soit :

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{6}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{2\pi}{6}} U \cdot \sqrt{2} \sin(2\theta) d\theta \\
 U_d &= \frac{6\sqrt{3}U}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{2\pi}{6}} \sin(2\theta) d\theta \\
 U_d &= \frac{6\sqrt{3}U}{\pi} \left[-\frac{1}{2} \cos(2\theta) \right]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{2\pi}{6}} \\
 U_d &= \frac{3\sqrt{3}U}{\pi} \left[-\cos\left(2 \cdot \frac{2\pi}{6}\right) + \cos\left(2 \cdot \frac{\pi}{6}\right) \right] \\
 U_d &= \frac{3\sqrt{3}U}{\pi} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right] \\
 U_d &= \frac{3\sqrt{3}U}{\pi}
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

La tension moyenne en sortie du BUS continu dépend uniquement de la tension alternative d'entrée.

4.2 Convertisseur DC/AC ou Onduleur

a) Structure

L'objectif d'un onduleur triphasé est de transformer une tension continue en une tension alternative triphasée. Il existe plusieurs types d'onduleurs, le plus simple étant l'onduleur à deux niveaux. Sa structure est la suivante :

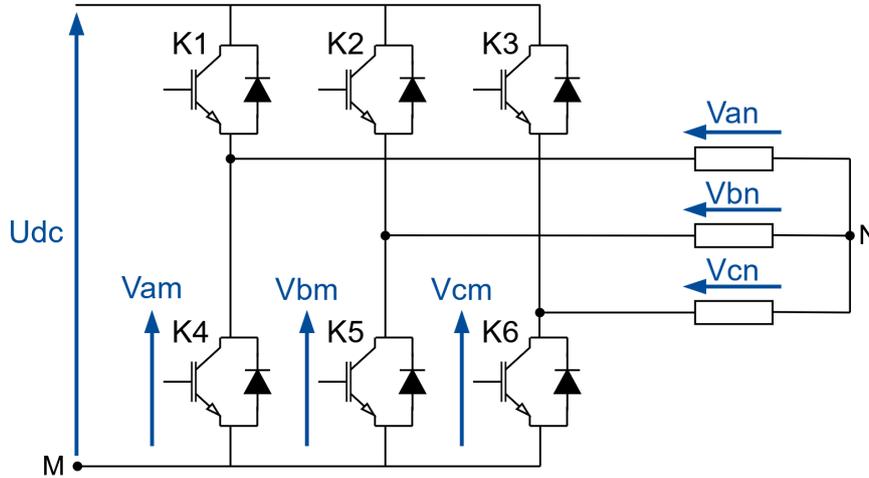


FIGURE 3.6 – Structure onduleur triphasé

b) Vecteurs de tension de l'état de l'onduleur

On peut définir trois variables d'état de commande de l'onduleur :

- c_a pour K1 fermé et K4 ouvert
- c_b pour K2 fermé et K5 ouvert
- c_c pour K3 fermé et K6 ouvert

On peut donc écrire :

$$\begin{bmatrix} v_{aM} \\ v_{bM} \\ v_{cM} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} c_a \\ c_b \\ c_c \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Or, d'après la loi des mailles :

$$\begin{bmatrix} v_{aN} \\ v_{bN} \\ v_{cN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{aM} - v_{NM} \\ v_{bM} - v_{NM} \\ v_{cM} - v_{NM} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\begin{bmatrix} v_{aM} \\ v_{bM} \\ v_{cM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{aN} + v_{NM} \\ v_{bN} + v_{NM} \\ v_{cN} + v_{NM} \end{bmatrix}$$

Supposons une charge triphasée équilibrée. D'après le théorème de Millman :

$$v_{NM} = \frac{v_{aM} + v_{bM} + v_{cM}}{3} \quad (3.25)$$

$$v_{NM} = \frac{V_{DC}}{3} \cdot (c_a + c_b + c_c)$$

On peut donc en déduire

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} v_{aN} \\ v_{bN} \\ v_{cN} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} V_{DC} \cdot c_a - \frac{v_{DC}}{3} \cdot (c_a + c_b + c_c) \\ V_{DC} \cdot c_b - \frac{v_{DC}}{3} \cdot (c_a + c_b + c_c) \\ V_{DC} \cdot c_c - \frac{v_{DC}}{3} \cdot (c_a + c_b + c_c) \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} v_{aN} \\ v_{bN} \\ v_{cN} \end{bmatrix} &= \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_a \\ c_b \\ c_c \end{bmatrix} = \frac{2V_{DC}}{3} C_{32} \cdot C_{32}^t \cdot \begin{bmatrix} c_a \\ c_b \\ c_c \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

On en déduit chaque tension de sortie en fonction des états de l'onduleur :

Vecteur	c_a	c_b	c_c	V_{aN}	V_{bN}	V_{cN}	V_{NM}	Type
V_0	0	0	0	0	0	0	0	Vecteur de roue libre
V_1	1	0	0	$\frac{2V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	Vecteur actif
V_2	1	1	0	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{2V_{DC}}{3}$	$\frac{2V_{DC}}{3}$	Vecteur actif
V_3	0	1	0	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{2V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	Vecteur actif
V_4	0	1	1	$-\frac{2V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{2V_{DC}}{3}$	Vecteur actif
V_5	0	0	1	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{2V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	Vecteur actif
V_6	1	0	1	$\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{2V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{2V_{DC}}{3}$	Vecteur actif
V_7	1	1	1	0	0	0	V_{DC}	Vecteur de roue libre

TABLE 3.2 – Tableau des tensions en fonction des variables d'état de l'onduleur

5. Stratégies de modulation

5.1 Modulation Pleine onde

Le principe de la modulation pleine onde est d'utiliser uniquement les vecteurs V1 à V6. On se donne une période de modulation T_m . On applique chaque vecteur à la suite pendant $T_m/6$.

a) Formes d'ondes

On observe ici chaque vecteur (ou combinaison d'états) appliqué afin de former un signal périodique.

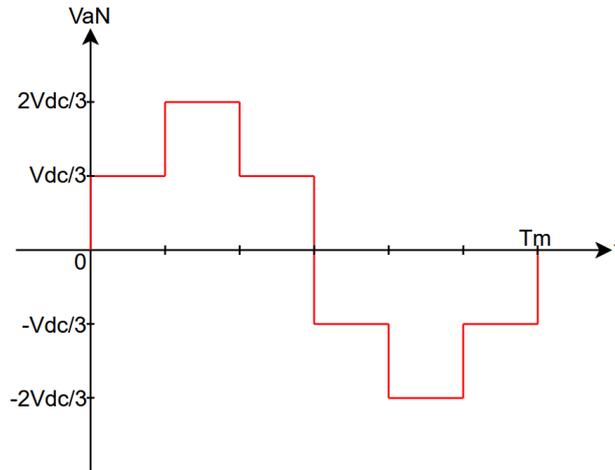


FIGURE 3.7 – Modulation pleine onde

Ce signal n'est pas une sinusoïde pure et possède donc des harmoniques.

b) Indice de modulation

$V_{aN}(t)$ est une fonction impaire, les termes en a_k sont donc nuls. Calculons le fondamental b_1

$$b_k = \frac{2}{T_m} \int_0^{T_m} V_{aN}(t) \sin\left(\frac{2k\pi t}{T_m}\right) dt \quad (3.27)$$

$$b_1 = \frac{2}{T_m} \int_0^{T_m} V_{aN}(t) \sin\left(\frac{2\pi t}{T_m}\right) dt$$

Posons :

$$\theta = \frac{2\pi t}{T_m} \implies d\theta = \frac{2\pi}{T_m} dt \quad (3.28)$$

$$dt = \frac{T_m}{2\pi} d\theta$$

Changement de variable :

$$b_1 = \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} V_{aN}(t) \sin(\theta) \frac{T_m}{2\pi} d\theta \quad (3.29)$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_{aN}(t) \sin(\theta) d\theta$$

Il existe une symétrie axiale, on peut donc écrire :

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} V_{aN}(t) \sin(\theta) d\theta \\
 b_1 &= \frac{4}{\pi} \left[\int_0^{\pi/3} \frac{V_{DC}}{3} \sin(\theta) d\theta + \int_{\pi/3}^{\pi/2} \frac{2V_{DC}}{3} \sin(\theta) d\theta \right] \\
 b_1 &= \frac{4V_{DC}}{3\pi} \left[\int_0^{\pi/3} \sin(\theta) d\theta + 2 \int_{\pi/3}^{\pi/2} \sin(\theta) d\theta \right] \\
 b_1 &= \frac{4V_{DC}}{3\pi} \left[-\cos(\theta) \Big|_0^{\pi/3} + 2[-\cos(\theta)]_{\pi/3}^{\pi/2} \right] \\
 b_1 &= \frac{4V_{DC}}{3\pi} [-\cos(\pi/3) + \cos(0) + 2(-\cos(\pi/2) + \cos(\pi/3))] \\
 b_1 &= \frac{4V_{DC}}{3\pi} \left[-\frac{1}{2} + 1 + 2\left(0 + \frac{1}{2}\right) \right] \\
 b_1 &= \frac{4V_{DC}}{3\pi} \left[\frac{1}{2} + 1 \right] \\
 b_1 &= \frac{4V_{DC}}{3\pi} \left[\frac{3}{2} \right] \\
 b_1 &= \frac{2V_{DC}}{\pi} = \hat{V}_1
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

L'amplitude du fondamental est de $2/\pi = 0.637$. Cela correspond à l'indice de modulation. La modulation pleine onde possède le meilleur indice de modulation possible.

On peut montrer par la décomposition en série de fourriers que seules les composantes impaires non multiples de 3 existent. La modulation pleine onde possède alors une limite. Seule la fréquence du signal est ajustable. Des harmoniques de rang faible existent et sont potentiellement gênantes suivant la machine alimentée.

5.2 MLI Sinus (SPWM)

La MLI (modulation de largeur d'impulsion) sinus est une des techniques les plus simples à mettre en œuvre. Elle consiste à utiliser comme référence **trois signaux sinusoïdaux déphasés de 120°**, et à les comparer avec un **signal porteur triangulaire** pour produire les impulsions de commande des interrupteurs de l'onduleur.

a) Indice de modulation

Définissons le lien entre le rapport cyclique α_x et la variable d'état C_x de l'onduleur. Soit T_d la période de découpage.

$$\begin{aligned} \langle C_x \rangle &= \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} C_x(t) dt = \alpha_x \\ \alpha_x(t) &= \langle C_x \rangle_{T_d} (t) \in [0; 1] \end{aligned} \quad (3.31)$$

Pour une MLI sinus, on a :

$$\begin{aligned} \alpha_a(t) &= M \cos\left(\frac{2\pi t}{T_m}\right) \\ \alpha_b(t) &= M \cos\left(\frac{2\pi t}{T_m} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \alpha_c(t) &= M \cos\left(\frac{2\pi t}{T_m} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Avec $M \in [0; \frac{1}{2}]$ afin d'avoir un rapport cyclique compris entre 0 et 1. On pose $M = m \cdot \frac{1}{2}$ avec $m \in [0; 1]$ qu'on appelle indice de modulation. Grâce aux matrices de Clarke on peut écrire :

$$\begin{aligned} (\alpha_3) &= \begin{bmatrix} \alpha_a \\ \alpha_b \\ \alpha_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left(m \cdot C_{32} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} + C_{31} \right) \\ (\alpha_3) &= \begin{bmatrix} \langle C_a \rangle \\ \langle C_b \rangle \\ \langle C_c \rangle \end{bmatrix} = \langle \begin{bmatrix} \langle C_a \rangle \\ \langle C_b \rangle \\ \langle C_c \rangle \end{bmatrix} \rangle \end{aligned} \quad (3.33)$$

Pour $T_d \ll T_m$

$$V_{XN} = V_{XN \text{ basse fréquence}}(t) \quad (3.34)$$

Alors

$$\begin{aligned} \langle V_{3N} \rangle &= \langle \frac{2V_{DC}}{3} C_{32} C_{32}^t (C_3) \rangle \\ (V_{3N}) &= \frac{2V_{DC}}{3} C_{32} C_{32}^t (\alpha_3) \end{aligned} \quad (3.35)$$

Finalement

$$\begin{aligned} (V_{3NBF}) &= \frac{2V_{DC}}{3} C_{32} C_{32}^t \frac{1}{2} \left(m \cdot C_{32} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} + C_{31} \right) \\ (V_{3NBF}) &= \frac{mV_{DC}}{3} C_{32} C_{32}^t C_{32} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} + \frac{V_{DC}}{3} C_{32} C_{32}^t C_{31} \\ (V_{3NBF}) &= \frac{mV_{DC}}{2} C_{32} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.36)$$

On obtient un système triphasé équilibré de trois sinusoïdes de fréquences F_m et d'amplitudes $m \frac{V_{DC}}{2}$ qui sont ajustables en 0 et $\frac{V_{DC}}{2}$.

Remarque :

En pratique, on essaie de conserver un ratio $\frac{F_d}{F_m} > 20$

Au maximum, une MLI sinus peut produire des tensions simples d'amplitude $0.5V_{DC}$ ce qui est inférieur à l'amplitude de $0.637V_{DC}$ fournie par la modulation pleine onde.

b) Formes d'ondes

La comparaison entre chaque signal de référence et la porteuse triangulaire permet de générer une modulation d'impulsions. La forme d'onde suivante permet d'observer cette modulation sur une phase :

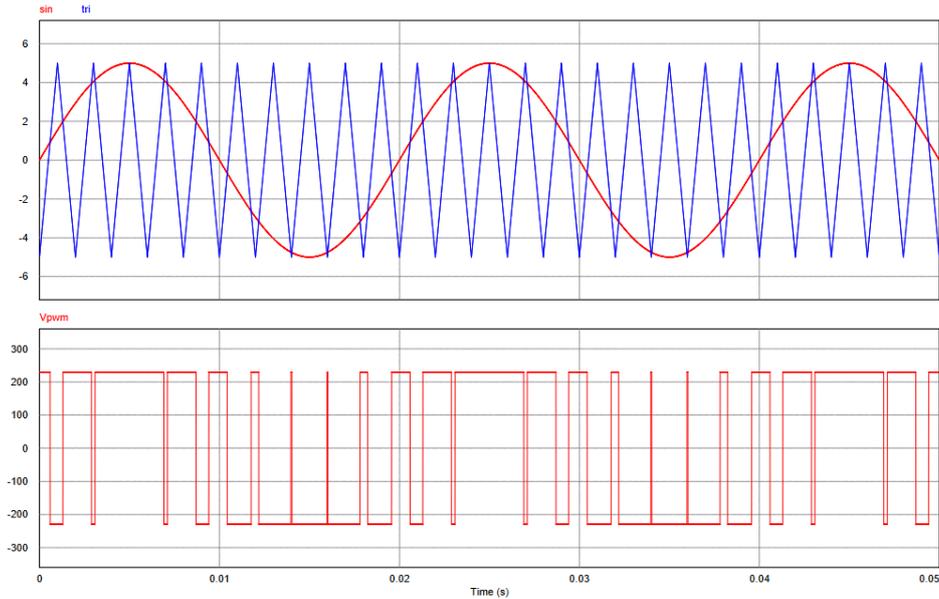


FIGURE 3.8 – Formes d'ondes MLI sinus

Cette tension de sortie comporte un contenu harmonique haute fréquence suivant la fréquence de modulation F_d . Plus la fréquence est haute, plus il sera facile de filtrer ces harmoniques. Nous serons néanmoins limités par la fréquence maximale de commutation des composants.

5.3 MLI vectorielle (SVPWM)

a) Principe

La MLI vectorielle est basée sur la représentation vectorielle des états de l'onduleur. Elle consiste à utiliser la totalité des vecteurs disponibles afin de fabriquer le vecteur de référence voulu dans le repère de Clarke. Sans composante homopolaire, on obtient :

$$\begin{aligned}
 (V_{3N}) &= C_{32}(V_{\alpha\beta}) \\
 \frac{2V_{DC}}{3}C_{32}C_{32}^t(C_3) &= C_{32}(V_{\alpha\beta}) \\
 \frac{2V_{DC}}{3}C_{32}^tC_{32}C_{32}^t(C_3) &= C_{32}^tC_{32}(V_{\alpha\beta}) \\
 \frac{2V_{DC}}{3}C_{32}^t(C_3) &= (V_{\alpha\beta})
 \end{aligned} \tag{3.37}$$

Déterminons les vecteurs dans le repère de Clarke :

Vecteur	c_a	c_b	c_c	$V_{\alpha N}$	$V_{\beta N}$	$\ V_{\alpha\beta}\ $	Type
V_0	0	0	0	0	0	0	Vecteur de roue libre
V_1	1	0	0	$\frac{2V_{DC}}{3}$	0	$\frac{2V_{DC}}{3}$	Vecteur actif
V_2	1	1	0	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{2V_{DC}}{3}$	Vecteur actif
V_3	0	1	0	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{2V_{DC}}{3}$	Vecteur actif
V_4	0	1	1	$-\frac{2V_{DC}}{3}$	0	$\frac{2V_{DC}}{3}$	Vecteur actif
V_5	0	0	1	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{2V_{DC}}{3}$	Vecteur actif
V_6	1	0	1	$\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{2V_{DC}}{3}$	Vecteur actif
V_7	1	1	1	0	0	0	Vecteur de roue libre

TABLE 3.3 – Tableau des tensions dans le repère de Clarke en fonction des variables d'état de l'onduleur

À un instant donné, le vecteur tension à produire (sur une période de découpage T_d) se trouve dans une position particulière d'une trajectoire circulaire comme ici.

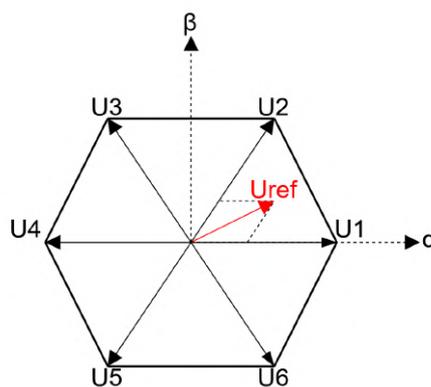


FIGURE 3.9 – Principe de la SVPWM

Il faut alors recréer ce vecteur moyen avec les huit vecteurs disponibles de l'onduleur. c'est le principe de la MLI vectorielle.

b) Modulation :

On projette la référence U_{ref} à fabriquer sur les deux vecteurs de base (non orthogonaux). Prenons ici l'exemple du secteur 1 avec U_1 et U_2 . On effectue une projection colinéaire. On obtient alors deux coordonnées notées λ_1 et λ_2 :

$$U_{ref} = \lambda_1 \cdot U_1 + \lambda_2 \cdot U_2 \tag{3.38}$$

Les coefficients λ_1 et λ_2 **correspondent aux fractions de la période de découpage pendant lesquelles U_1 et U_2 vont être appliquées.** Il faut donc qu'ils respectent l'inégalité suivante :

$$\lambda_1 + \lambda_2 \leq 1 \tag{3.39}$$

Si la somme est strictement inférieure à 1, le reste de la période est complété avec l'application des vecteurs de roue libre U_0 et U_7 . Leur taux d'application global λ_{07} se calcule comme suit :

$$\lambda_{07} = 1 - \lambda_1 - \lambda_2 \tag{3.40}$$

La MLI barycentrique (MLI vectorielle classique appelée SVPWM en anglais) consiste à appliquer autant de temps U_0 que U_7 . Pour des raisons de qualité de spectre, on utilise des motifs symétriques sur une période T_d :

Vecteur	U_0	U_1	U_2	U_7	U_2	U_1	U_0
Durée	$\lambda_{07} \frac{T_d}{4}$	$\lambda_1 \frac{T_d}{2}$	$\lambda_2 \frac{T_d}{2}$	$\lambda_{07} \frac{T_d}{2}$	$\lambda_2 \frac{T_d}{2}$	$\lambda_1 \frac{T_d}{2}$	$\lambda_{07} \frac{T_d}{4}$

Le motif obtenu est le suivant :

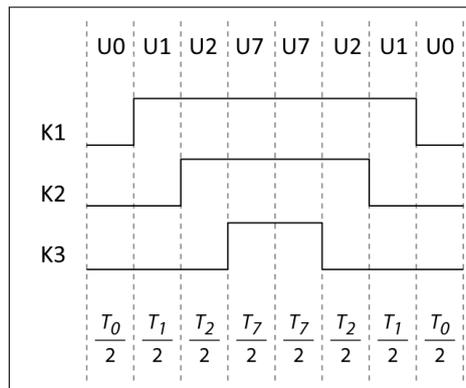


FIGURE 3.10 – Motif MLI barycentrique

L'alternance des vecteurs U_1 et U_2 permet de créer en moyenne le vecteur U_{ref} dans le secteur 1. Le passage par les vecteurs de roue libre U_0 et U_7 permet de réduire l'amplitude.

c) Formes d'onde

La forme d'ondes du rapport cyclique produit par cette modulation est la suivante :

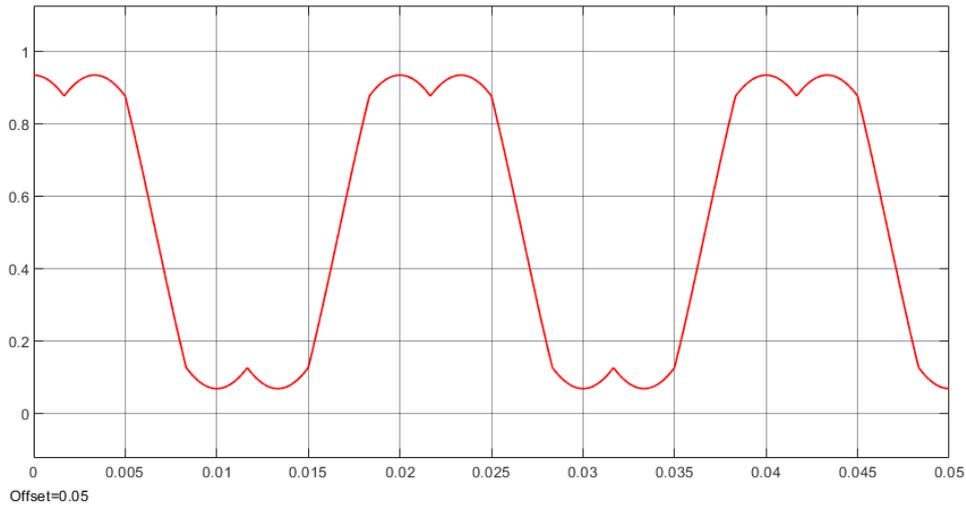


FIGURE 3.11 – Forme d'onde SVPWN

Comment peut-on expliquer que la forme d'onde ne soit pas sinusoïdale, mais que la tension le soit ? Nous avons fait précédemment l'hypothèse de ne pas avoir de composante homopolaire. La MLI vectorielle intègre cette composante homopolaire par construction. On la retrouve dans l'expression suivante :

$$(V_{3N}) = \frac{2V_{DC}}{3} C_{32} C_{32}^t \frac{1}{2} \left(m C_{32} \begin{bmatrix} \cos n\omega t \\ \sin n\omega t \end{bmatrix} + h(t) \right) \quad (3.41)$$

Cette composante homopolaire correspond aux "creux" présents dans l'intervalle de modulation des grandeurs triphasées. Au lieu de moduler dans l'intervalle complet des sinusoïdes, la MLI vectorielle module uniquement dans l'ensemble des valeurs hachurées sur la figure suivante.

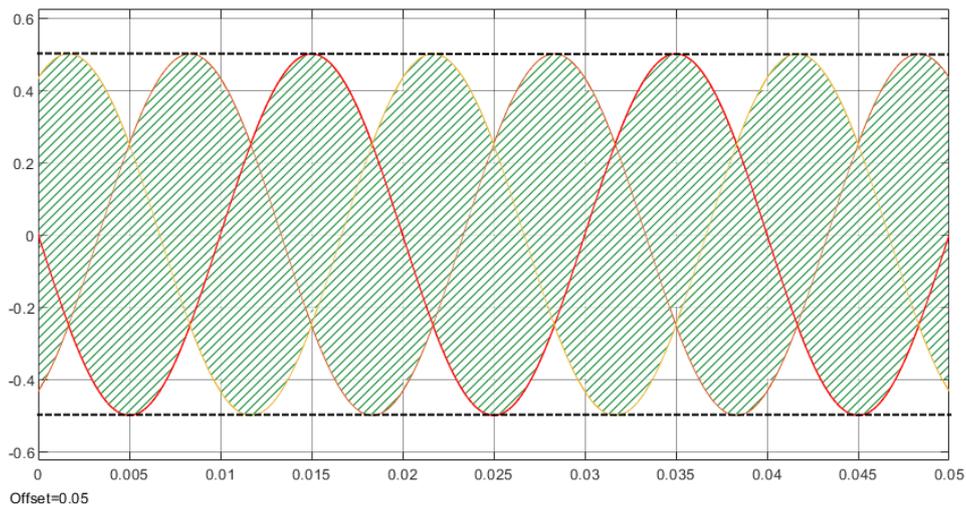


FIGURE 3.12 – Intervalle de modulation de la SVPWM

d) **Indice de modulation et modulation intersective**

Du fait de l'utilisation d'une composante homopolaire, la MLI vectorielle atteint un indice de modulation de $\frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577$. Cela est 15% supérieur à l'indice de modulation de la MLI sinus.

La MLI vectorielle est calculée de manière vectorielle, mais il est tout à fait possible d'obtenir les mêmes résultats en utilisant des méthodes de commande intersectives comme pour la MLI sinus. La différence se fait alors dans les sinusoides de références dans lesquelles on vient injecter les creux vus précédemment. Ces creux correspondent à la somme des valeurs maximales et minimales des trois sinusoides. La forme d'onde de ce signal est la suivante :

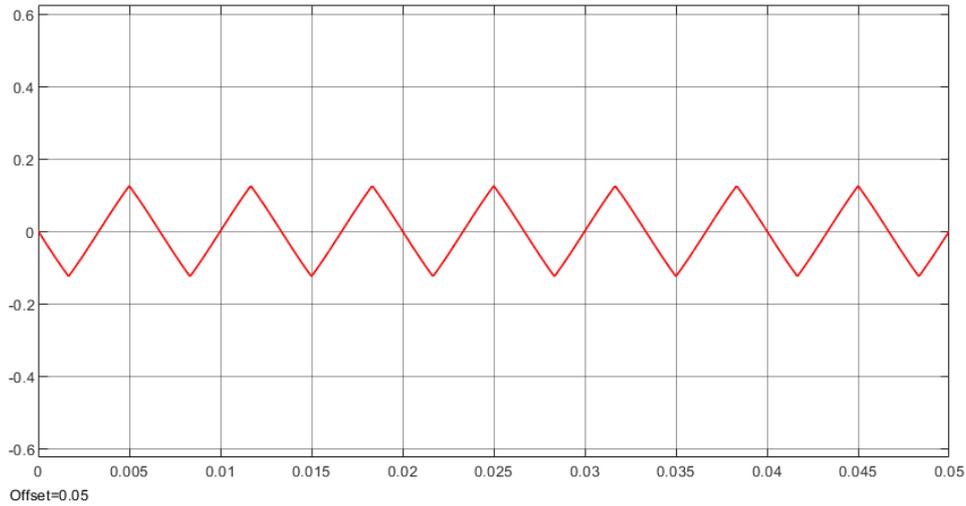


FIGURE 3.13 – Signal à injecter pour obtenir une composante homopolaire

Du fait de cette astuce, la MLI vectorielle est quasiment uniquement calculée de manière intersective.

5.4 Synthèse et comparaison des stratégies de modulation

Critère	Modulation Pleine Onde	MLI Sinusoïdale (SPWM)	MLI Vectorielle (SVPWM)
Principe	Commutation simple des vecteurs de tensions sans vecteur de roue libre.	Variation du rapport cyclique de manière sinusoïdale.	Utilisation de la représentation vectorielle dans le repère de Clarke pour optimiser les tensions.
Indice de modulation	$M = 0.637$ (fixe)	$0 < M < 0.5$	$0 < M < 0.577$
Contenu harmonique	BF, non modifiable	HF, modifiable par F_d	HF, modifiable par F_d

TABLE 3.4 – Comparaison des différentes techniques de modulation

5.5 Convertisseur AC/AC indirect (ou AC-DC-AC)

a) Principe

Un convertisseur AC/AC indirect consiste en un redresseur et un onduleur, partageant le même BUS continu. Les variateurs Unidrive M700 utilisés pour ce projet suivent cette architecture. L'énergie est alors **transmise par le BUS continu**.

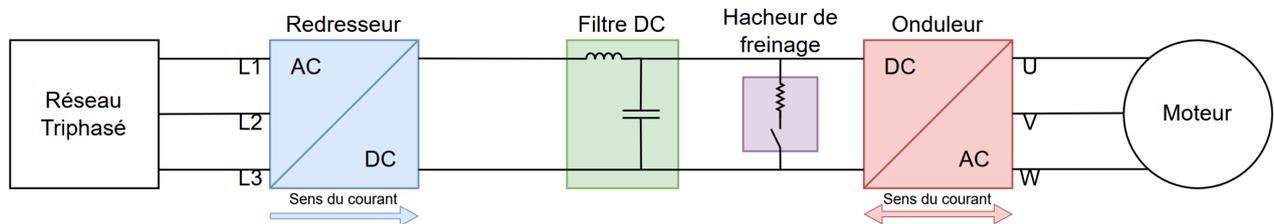


FIGURE 3.14 – Schéma d'un convertisseur AC/AC

Cette structure est utilisée sur les variateurs de vitesse électroniques du fait de sa simplicité. Cependant, dans le cas du freinage d'une charge, le convertisseur doit pouvoir dissiper l'énergie. Pour un simple variateur de vitesse, une résistance de freinage est alors utilisée pour **dissiper l'énergie de freinage**.

b) Réversibilité et réinjection au réseau

Le pont à diodes est monodirectionnel et ne permet pas une réinjection au réseau. Si nous souhaitons renvoyer l'énergie de freinage au réseau, il est nécessaire d'utiliser une structure de deux convertisseurs montés en tête-bêche. Le premier gère la conversion réseau de manière bidirectionnelle (REGEN) et le deuxième gère la conversion au niveau du moteur.

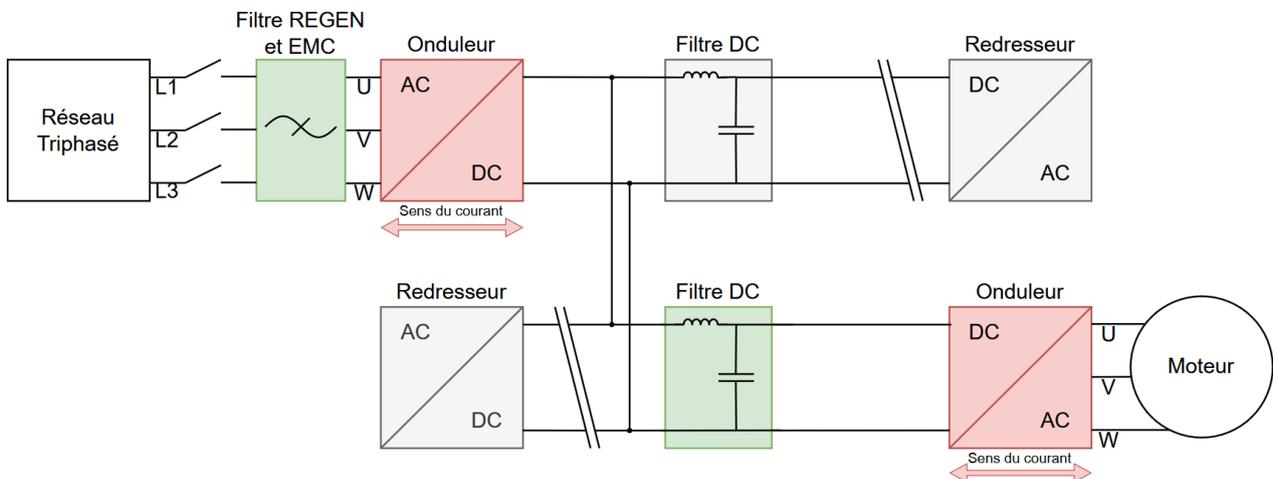


FIGURE 3.15 – Schéma de deux convertisseurs AC/AC en tête-bêche

Grâce à cette structure, il est possible de **renvoyer l'énergie de freinage sur le réseau**. Du fait de sa structure, l'onduleur peut faire une conversion bidirectionnelle. En utilisant deux onduleurs il est possible d'avoir un montage permettant un freinage régénératif. Le hacheur de freinage est donc inutile.

Cette structure de puissance permet d'utiliser plusieurs fois le même modèle de convertisseur afin d'obtenir un circuit bidirectionnel. Il existe des convertisseurs indirects composés de deux onduleurs, en revanche, ceux-ci sont généralement plus chers et ne permettent pas l'ajout d'un autre variateur et donc d'un autre moteur.

6. Compatibilité Électromagnétique

6.1 Principe

La compatibilité électromagnétique désigne l'aptitude d'un appareil afin de protéger et de se protéger des dégradations de performances causées par les perturbations électromagnétiques. Chaque circuit électrique peut émettre des perturbations, la CEM est donc primordiale dans un environnement avec de nombreux appareils électriques. On appelle **source** l'appareil émetteur et **victime** l'appareil récepteur des perturbations. La source sera plus ou moins **émissive** tandis que la victime sera plus ou moins **susceptible** aux perturbations.

Il existe deux types de perturbations :

- Perturbations par **rayonnement** : Champs électriques, Champs magnétiques, Champs électromagnétiques
- Perturbations par **conduction** : Transmission par un conducteur

Quatre mécanismes de couplage des perturbations peuvent être identifiés :

- Couplage **galvanique** : il se produit lorsque deux circuits (la source de bruit et la victime) partagent une connexion électriquement conductrice commune.
- Couplage **capacitif** (ou couplage électrique) : il survient lorsque deux circuits électriques partagent une référence commune, et que le bruit se transmet entre deux conducteurs par des capacités parasites.
- Couplage **inductif** (ou couplage magnétique) : il se manifeste lorsqu'un champ magnétique généré autour d'un conducteur parcouru par un courant est induit dans un autre conducteur.
- Couplage **électromagnétique** : il intervient lorsque la source de bruit émet une énergie électromagnétique via un conducteur agissant comme une antenne émettrice. Le circuit victime capte cette perturbation à travers un conducteur jouant le rôle d'une antenne réceptrice.

Dans notre cas, les principales sources de pollution harmoniques proviennent des harmoniques de **tension** haute fréquence en sortie des onduleurs, ainsi que des harmoniques de **courant** en sortie de l'onduleur REGEN. Ces perturbations représentent un danger pour l'ensemble du système, ainsi que pour le réseau électrique puisque l'on y réinjecte la puissance. Ces perturbations se transmettent essentiellement par couplage galvanique, mais aussi capacitif et inductif.

6.2 Conséquences d'une pollution harmonique

Si elle n'est pas filtrée, la pollution harmonique peut avoir comme conséquence :

- **Dysfonctionnement des appareils et capteurs** : Un couplage capacitif ou inductif peut dégrader et ajouter un bruit haute fréquence sur un capteur, notamment le codeur de la machine asynchrone. Cela peut réduire considérablement les performances de la régulation. Les pics de tensions peuvent également changer l'état logique des composants électroniques, ayant un impact sur des équipements informatiques par exemple.
- **Dommages irréversibles des appareils** : Les pics de tensions et de courant peuvent instantanément détruire certains composants électroniques, ou les endommager petit à petit jusqu'à la panne.
- **Dégradation du facteur de puissance** : L'augmentation du taux de distorsion harmonique peut réduire le facteur de la puissance et augmenter la puissance apparente consommée.

6.3 Distorsion harmonique et puissance déformante

La puissance déformante et le THD sont des notions permettant de quantifier les perturbations harmoniques d'un système électrique. Cette puissance déformante ajoute une nouvelle dimension aux habituels graphiques de puissance active/réactive :

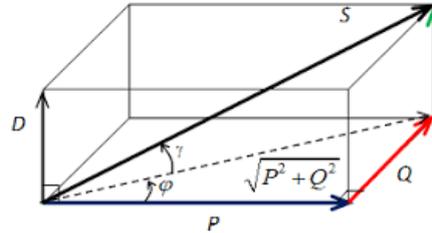


FIGURE 3.16 – Diagramme des puissances

Noté D , la puissance déformante s'ajoute au calcul de la puissance apparente :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.42)$$

L'expression la plus commune de la puissance déformante est la suivante :

$$\begin{aligned} D &= V_{\text{reseau}} \times I_1 \times THD_I \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \end{aligned} \quad (3.43)$$

I_1 est la valeur efficace du fondamental, et THD est le taux de distorsion harmonique. Au travers de la précédente équation, on observe que la puissance déformante et donc le THD influent sur le facteur de puissance. Celui-ci peut alors être exprimé de la sorte :

$$P_F = \cos(\varphi) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (3.44)$$

Contrairement au $\cos(\varphi)$ qui varie avec la part de puissance réactive, le THD n'a aucune utilité et détériore le facteur de puissance. Il est donc nécessaire de le filtrer. Le taux de distorsion harmonique diffère si l'on évalue la qualité d'énergie d'une source ou d'une consommation. Le THD d'une source sera exprimé **par la tension** (THD_v) et celui d'une consommation **par le courant** (THD_i). Dans les deux cas, il est exprimé de la manière suivante :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} X_n^2}}{X_1} \quad (3.45)$$

Nous pouvons en déduire que le fondamental porte la puissance active et les harmoniques portent la puissance déformante. Plus le THD est élevé, plus le facteur de puissance est dégradé et plus la machine consomme.

6.4 Simulation d'une MLI Sinus

À partir du logiciel MATLAB Simulink, il est possible de simuler le comportement d'un onduleur et ainsi de visualiser ses harmoniques. Les paramètres de simulation sont les suivants :

- **Tension du bus continu** : 460V
- **Charge** : RL série
- **Résistance** : 10Ω
- **Inductance** : 10mH
- **MLI** : Bipolaire

La FFT de la tension et du courant en sortie de l'onduleur est la suivante :

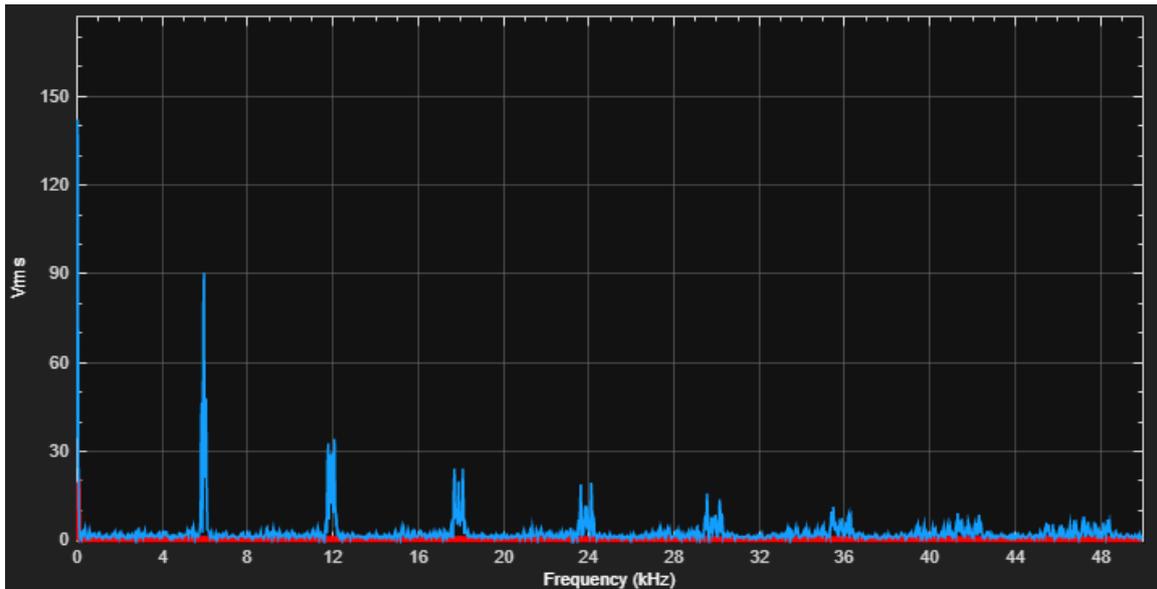


FIGURE 3.17 – FFT pour une MLI bipolaire à 5kHz

On observe ici la FFT de la tension en bleu et du courant en rouge. L'amplitude de la première harmonique est élevée, cependant elle est à 5kHz contre 50Hz pour le fondamental. Elle peut être facilement filtrée. On observe également que seul le fondamental subsiste coté courant (en rouge). Les harmoniques de courant ont été correctement filtrées par les bobinages du moteur.

6.5 Mesures de compatibilité électromagnétique

a) Mise à la terre des masses

La mise à la masse des terres est prescrite par la norme NF C 15-100 pour la sécurité des personnes. Elle possède également des avantages en termes de compatibilité électromagnétique. Plusieurs points sont à prendre en compte lors d'une mise à la terre des masses :

- **Réduction du couplage électromagnétique** : La mise à la terre permet de réduire considérablement les perturbations électromagnétiques en empêchant les masses des appareils d'agir comme antennes.
- **Réduction du couplage inductif/capacitif** : La mise à la terre permet de vider les capacités parasites (couplage capacitif) et de fournir un chemin direct aux courants parasites (couplage inductif). Néanmoins, cela comporte un risque de déclencher le disjoncteur différentiel, celui-ci doit donc être dimensionné pour ne pas se déclencher lors de ces courants.
- **Danger de couplage galvanique par impédance commune** : La mise à la terre offre une connexion commune aux différents appareils. Il y a un danger de couplage galvanique. Afin d'éviter cela, il est important que l'impédance de terre de la distribution électrique soit faible, et que chaque impédance de mises à la terre des appareils soit faible. Les mises à la terre doivent donc être correctement câblées et utiliser un fil de section suffisante.

b) Filtrage du variateur REGEN

L'objectif du filtre REGEN est d'atténuer les harmoniques de tension haute fréquence en sortie du variateur REGEN. En effet, le variateur du moteur n'a pas besoin de filtre puisque les bobines en constituent déjà un. Dans notre cas, ce filtre est composé de deux inductances et d'une batterie de condensateurs. L'inductance dite REGEN (L2 sur le schéma) a pour objectif de supporter la différence entre les commutations de l'onduleur et la tension du réseau. La seconde inductance et le condensateur (L1 et C1 sur le schéma) ont le rôle d'un filtre sinus.

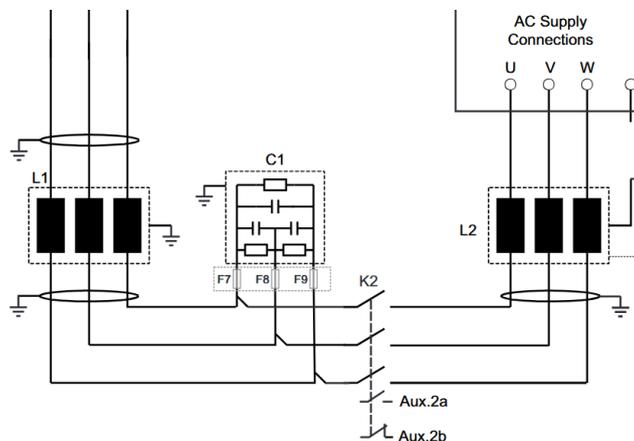


FIGURE 3.18 – Schéma de filtrage en sortie du variateur REGEN

Ce montage en T permet d'atténuer les premières harmoniques, et donc d'abaisser considérablement le THD. Cela permet de **redresser le facteur de puissance** et d'améliorer l'**efficacité énergétique** de la machine.

c) Filtre CEM/RFI : Perturbations électromagnétiques

Il existe de nombreux types de filtres CEM, mais l'objectif principal reste le même : filtrer les interférences électromagnétiques conduites causées par les commutations de l'onduleur. Ces perturbations sont de haute fréquence et peuvent perturber l'ensemble de la distribution électrique, voire le réseau à très haute puissance. Le filtre RFI se place en amont de l'onduleur REGEN et du filtre sinus. Il filtre toutes les interférences entrantes et sortantes de l'onduleur.

Attention :

Les fils d'entrée du filtre RFI ne doivent jamais passer à proximité des fils de sortie, de la même manière, chaque fil de puissance pollué (en sortie de l'onduleur et non filtré) **ne doit pas passer près** d'un fil de puissance du réseau. S'il n'y a aucune alternative possible, les fils doivent se croiser **perpendiculairement** afin d'éviter un couplage inductif ou capacitif.

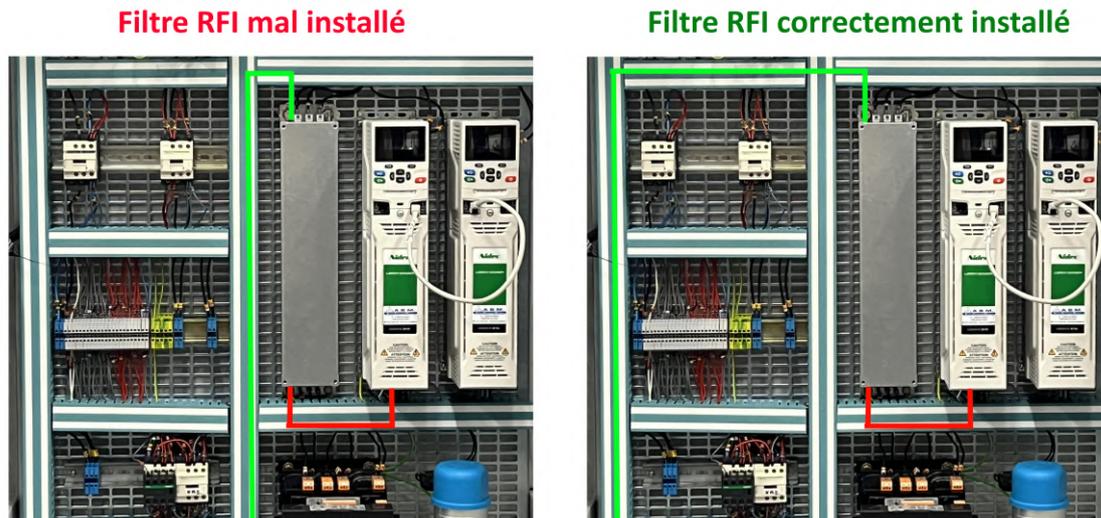


FIGURE 3.19 – Filtre RFI/CEM

d) Capteurs, câbles réseaux et blindage

Les capteurs ont une très grande sensibilité aux perturbations, c'est pourquoi il existe plusieurs mesures afin de les protéger. Premièrement, les fils et câbles des capteurs ne doivent pas passer à proximité de fils de puissance, surtout s'ils sont pollués. Ils doivent de la même manière croiser chaque fil de puissance **perpendiculairement** afin d'éviter un couplage inductif ou capacitif. De plus, les câbles des capteurs ainsi que le câble de puissance onduleur-moteur, doivent être équipés d'un **blindage**. Celui-ci doit être raccordé **des deux cotés** aux masses des appareils. Ce raccordement doit être fait sur la circonférence totale du blindage comme cela est montré sur l'image ci-dessous :

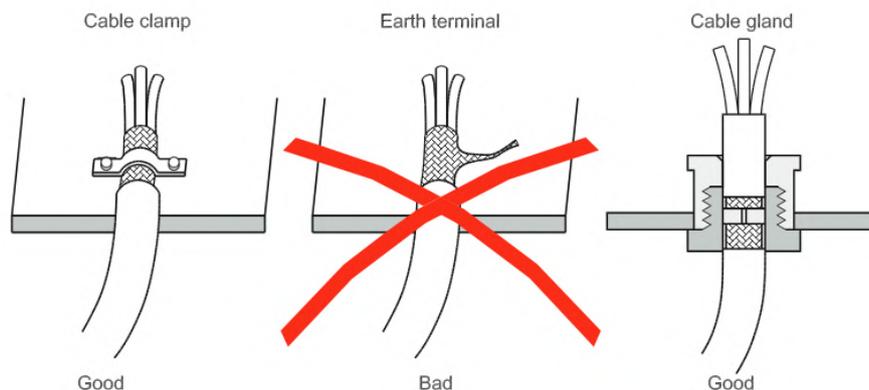


FIGURE 3.20 – Raccordement du blindage (DANFOSS 2019)

Cela est également valable pour les câbles réseau, ceux-ci étant très sensibles aux perturbations électromagnétiques. Ils devront emprunter des chemins et goulottes leur étant propres. Le non-respect de ces mesures pourrait entraîner la perte de paquets TCP, et donc un risque de dysfonctionnement de l'IHM.

7. Alimentation du kart électrique

7.1 Batteries obsolètes

Le kart électrique était livré avec une structure de 4 batteries au plomb 12V montées en série. Ces batteries avaient une capacité de 48Ah ce qui correspondait à une autonomie d'environ 45 minutes. Elles nécessitaient d'être constamment chargées et déchargées pour éviter leur dégradation.

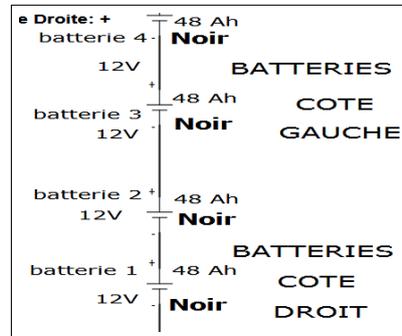


FIGURE 3.21 – Structure d'alimentation par batteries 12V

Dans le cas du banc de test, l'utilisation de batterie n'est pas utile puisque le Kart reste immobile. Il est donc évident de remplacer les batteries par une alimentation.

7.2 Alimentation réversible

L'appareil alimenté est l'onduleur du Kart électrique. Celui-ci fonctionne en 48V et jusqu'à 3kW. Cela représente un courant continu de 50A.

Il est donc primordial que l'énergie de freinage soit correctement dissipée. En effet, dans le cas d'un entraînement du kart par la charge active, la puissance doit être dissipée soit dans une résistance de freinage, soit dans le réseau. Nous avons choisi de dissiper cette puissance par les variateurs de la charge active. Cependant, en cas de défaut du variateur REGEN, l'alimentation doit pouvoir renvoyer la puissance sur le réseau et fonctionner de manière autonome.

7.3 Choix de l'alimentation

L'alimentation doit respecter les contraintes suivantes :

- Supporter une tension de **48V**
- Supporter une consommation de **3.0kW**
- Être **réversible en courant** jusqu'à **3.0kW**
- Posséder une interface **Ethernet**
- Être pilotable à partir de **LabVIEW**

Le choix retenu pour l'alimentation est la **EA-PSB 10000 2U 3.0KW**. Cette alimentation possède les caractéristiques suivantes :

- Alimentation monophasée 110V/**240V** 45Hz-66Hz
- Tension de 0 à 1500V
- Courant de 0 à 120A
- Puissance **jusqu'à 3.0kW**
- Bidirectionnelle **jusqu'à 3.0kW**
- Interface USB, **Ethernet** et analogique

— Pilotable en Profinet, Ethernet/IP et ModBus et fichiers **LabVIEW** fournis

En plus de répondre aux contraintes, l'alimentation fourni également tous les fichiers LabVIEW. Cela représente un gain de temps considérable et permet de programmer beaucoup plus facilement l'IHM.

8. Dimensionnement

8.1 Dimensionnement du moteur

La puissance maximale délivrée par l'alimentation du Kart est de 3kW bien que le moteur du kart ait une puissance supérieure. Il sera donc bridé à 3kW. Les variateurs de notre charge active sont dimensionnés pour 3kW, il nous faut donc un moteur d'une puissance nominale de 3kW ou plus. Le choix retenu est le **LSES100LR** de chez Leroy Somer. La plaque signalétique est la suivante :

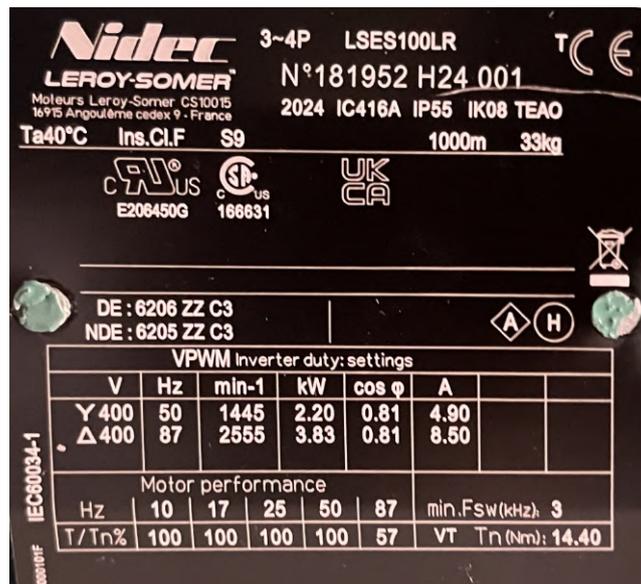


FIGURE 3.22 – Plaque signalétique

Le couplage utilisé sera le suivant :

- Couplage : **400V triangle**
- Fréquence nominale : **87Hz**
- Courant nominal : **8.50A**
- Puissance nominale : **3.83kW**
- Facteur de puissance nominal : **0.81**
- Vitesse nominale : **2555 tr/min (267 rad/s)**
- Couple nominal : **14.4 Nm**

Ce moteur est dit à contrôle vectoriel de flux. Il est composé d'un codeur lui permettant une commande en boucle fermée, et plus spécifiquement, une commande vectorielle. Le codeur possède les caractéristiques suivantes :

- Tension d'alimentation : **5V**
- Points par tour : **1024**
- Type : **Codeur en quadrature (AB)**

8.2 Dimensionnement des câbles

Le dimensionnement des câbles est effectué en conformité avec la norme **NF C 15-100**, en prenant en compte la puissance, la longueur du câble, le mode de pose, et les contraintes thermiques. Les sections sont choisies pour limiter les chutes de tension et garantir la sécurité.

a) Puissance 6kW (Moteur et alimentation combinés)

Pour une puissance de 6 kW en triphasé (400 V), le courant nominal est donné par :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \phi} \quad (3.46)$$

En supposant un facteur de puissance $\cos \phi = 0.8$, on obtient :

$$I = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.8} \approx 10.83 \text{ A} \quad (3.47)$$

D'après la norme NF C 15-100, pour un courant de 10.83 A, en pose encastrée, une section de 2,5 mm² peut être utilisée. Afin d'ajouter une marge de sécurité, nous utiliserons une section de **4 mm²**.

b) Puissance 3kW (Moteur et alimentation séparés)

Pour une puissance de 3 kW en triphasé (400 V), le courant nominal est donné par :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \phi} \quad (3.48)$$

Avec un facteur de puissance $\cos \phi = 0.8$, on obtient :

$$I = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.8} \approx 5.42 \text{ A} \quad (3.49)$$

D'après la norme NF C 15-100, pour un courant de 5.42 A, en pose encastrée, une section de 1,5 mm² peut être utilisée. Afin d'ajouter une marge de sécurité, nous utiliserons une section de **2,5 mm²**.

c) Commande 24V AC et DC

Pour les circuits de commande sous 24 V en courant alternatif ou continu, le courant est généralement faible. La chute de tension devient un critère clé pour déterminer la section du câble. En utilisant la relation :

$$\Delta U = R \cdot I \cdot L$$

où :

- ΔU est la chute de tension admissible (souvent limitée à 5% de la tension nominale, soit 1.2 V),
- R est la résistance du câble par unité de longueur,
- I est le courant du circuit,
- L est la longueur totale du câble (aller-retour).

En fonction de la longueur du câble et de la chute de tension, une section de **0,75 mm²** est suffisante pour de courtes distances (inférieures à 10 m au sein de l'armoire).

8.3 Dimensionnement des protections

a) Régime de neutre et différentiel

Le régime de neutre au plateau technique de l'IUT est en **TT**. C'est-à-dire que chaque défaut de fuite à la masse d'un appareil va vers la terre, et doit déclencher le disjoncteur différentiel (DDR) pour la protection des personnes, comme le montre le schéma suivant :

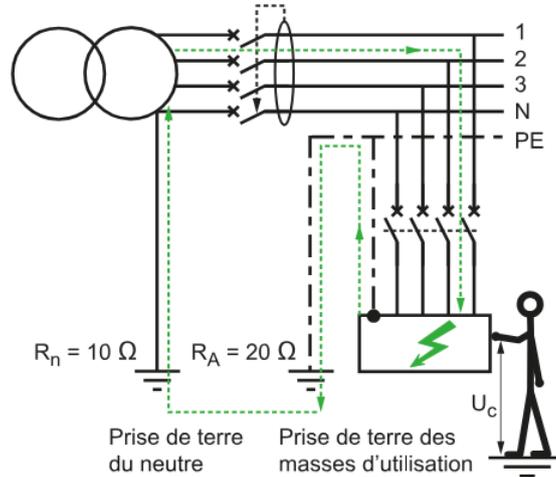


FIGURE 3.23 – Régime de neutre TT

Cependant, il ne faut pas qu'une utilisation normale déclenche le disjoncteur. Ce risque est présent dû aux perturbations harmoniques causées par l'onduleur REGEN. Les **DDR de type SI** sont protégés contre les déclenchements intempestifs. Ceux de la marque Schneider Electric sont immunisés aux courants suivants :

Type de perturbation	Ondes d'essais normalisées	Niveau d'essai Acti 9 : iID, iDT40 Vigi, Vigi iC60, Vigi C120, Vigi NG125 type SI
Perturbations permanentes		
Harmoniques	1 kHz	Courant de défaut = $8 \times I_{\Delta n}$
Perturbations transitoires		
Surtension foudre induite	impulsion 1,2/50 μ s (CEI/EN 61000-4-5)	4,5 kV entre conducteurs 5,5 kV/terre
Courant foudre induit	impulsion 8/20 μ s (CEI/EN 61008)	5 kA crête
Courant transitoire de manœuvre, foudre indirect	0,5 μ s/100 kHz "onde circulaire" (CEI/EN 61008)	400 A crête
Fonctionnement du parafoudre en aval, charge de capacité	impulsion 10 ms	500 A
Compatibilité électromagnétique		
Commutation de charges inductives, éclairages fluorescents, moteurs, etc.	Salves répétées (CEI 61000-4-4)	5 kV / 2,5 kHz 4 kV / 400 kHz
Éclairage fluorescent, circuits commandés par thyristors	Ondes RF conduites (niveau 4 CEI 61000-4-6) (niveau 4 CEI 61000-4-16)	30 V (150 kHz à 230 MHz) 250 mA (15 kHz à 150 kHz)
Ondes RF (TV et radios, émetteurs, télécommunication, etc.)	Ondes RF émises 80 MHz à 1 GHz (CEI 61000-4-3)	30 V/m

FIGURE 3.24 – Tableau d'immunité des disjoncteurs de type SI - Schneider Electric

Ces disjoncteurs sont immunisés contre la commutation de charges inductives, et les harmoniques de 1kHz. Cela correspond à notre application.

b) Sectionneur et fusibles

Le sectionneur est primordial dans n'importe quelle armoire. Lorsqu'il est ouvert, le sectionneur permet d'isoler l'installation électrique. Le sectionneur est aussi généralement un porte-fusible. Il présente la dernière protection contre les surintensités et courts-circuits. Pour une puissance nominale cumulée de 6kW, le calcul est le suivant :

Courant d'emploi :

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \phi} \quad (3.50)$$

$$I_n = \frac{6 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0.8} = 10.83 \text{ A}$$

Calibre du fusible :

$$I_f = I_n \cdot k \quad (3.51)$$

où $k = 1.5$ est le facteur de sécurité.

$$I_f = 10.83 \text{ A} \cdot 1.5 = 16.25 \text{ A} \quad (3.52)$$

Le calibre du fusible est choisi au-dessus du courant calculé, soit **20 A**. Ces fusibles seront des fusibles de **type gR** afin de protéger les variateurs en cas de surintensité ou de court-circuit.

c) Disjoncteur moteur magnétothermique - Variateurs/moteur

Le disjoncteur moteur protège le circuit des courts-circuits et surintensité. Il est de courbe D, il ne se déclenche pas au démarrage d'un moteur.

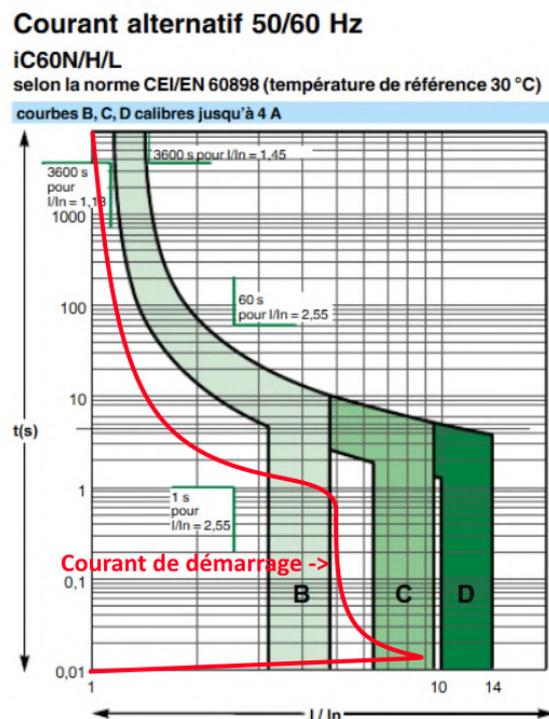


FIGURE 3.25 – Courbes des disjoncteurs type B, C et D

Le dimensionnement pour une puissance de 3kW est le suivant :

Courant d'emploi :

$$I_m = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \phi} \quad (3.53)$$

$$I_m = \frac{3 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0.8} = 5.41 \text{ A}$$

Le choix du calibre doit se situer entre le courant d'emploi et le courant maximal admissible dans les conducteurs.

$$I_m < I_N < I_Z \quad (3.54)$$

Le courant maximal admissible en 2.5mm² est de 20A. Le calibre utilisé sera de **10A**.

d) Disjoncteur - Alimentation kart

L'alimentation du kart est en monophasé. Elle est protégée par un disjoncteur courbe C. La puissance nominale est de 3kW. Le dimensionnement est le suivant :

Courant d'emploi :

$$I_m = \frac{P}{V} \quad (3.55)$$

$$I_m = \frac{3 \text{ kW}}{230 \text{ V}} = 13 \text{ A}$$

Le courant maximal admissible en 2.5mm² est de 20A. Le calibre utilisé sera de **16A**.

e) Disjoncteur - BUS continu

Le BUS continu doit être protégé pour ne pas dépasser une puissance de 3.0kW. La tension du BUS continu est de 700V. Le dimensionnement est le suivant :

Courant d'emploi :

$$I_m = \frac{P}{V} \quad (3.56)$$

$$I_m = \frac{3 \text{ kW}}{700 \text{ V}} = 4.2 \text{ A}$$

Le courant maximal admissible en 2.5mm² est de 20A. Le calibre utilisé sera de **10A**.

f) Disjoncteurs - Alimentation variateurs 24V DC

L'alimentation des variateurs est protégée en amont et en aval de l'alimentation. L'amont est en monophasé, l'aval est en continu 24V. Les deux variateurs ont une consommation nominale de 100W. Le dimensionnement est le suivant :

Courant d'emploi :

$$I_{m_amont} = \frac{P}{V}$$

$$I_{m_amont} = \frac{100 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 0.43 \text{ A} \quad (3.57)$$

$$I_{m_aval} = \frac{P}{V}$$

$$I_{m_aval} = \frac{100 \text{ W}}{24 \text{ V}} = 4.16 \text{ A}$$

Le courant maximal admissible en 2.5mm² est de 20A. Le calibre utilisé en amont sera de **2A**.

Le calibre utilisé en aval sera de **10A**.

g) Disjoncteurs - Transformateurs 24V AC commande

L'alimentation du transformateur de commande est protégé en amont et en aval. L'amont est en monophasé, l'aval est en alternatif 24V. 4 contacteurs LC1D09xx consomment 280W à l'appel (simultané) et 28W au maintien. La consommation des voyants est négligeable. Le dimensionnement est le suivant :

Courant d'emploi :

$$\begin{aligned}
 I_{m_amont} &= \frac{P}{V} \\
 I_{m_amont} &= \frac{280 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 1.2 \text{ A} \\
 I_{m_aval} &= \frac{P}{V} \\
 I_{m_aval} &= \frac{280 \text{ W}}{24 \text{ V}} = 11.6 \text{ A}
 \end{aligned}
 \tag{3.58}$$

Le courant maximal admissible en 2.5mm² est de 20A. Le calibre utilisé en amont sera de **2A**.

Le calibre utilisé en aval sera de **16A**.

h) Varistances

Les varistances permettent une protection contre les surtensions. Ils sont primordiaux en cas de montages bidirectionnels. Une varistance est une résistance de très haute impédance sur une plage de tension, mais d'impédance nulle au-delà de ces plages. Cela permet, par exemple, de mettre en court-circuit deux phases si la tension dépasse un certain seuil, et ainsi de mobiliser les protections telles que les fusibles ou disjoncteurs. La caractéristique d'une varistance est la suivante :

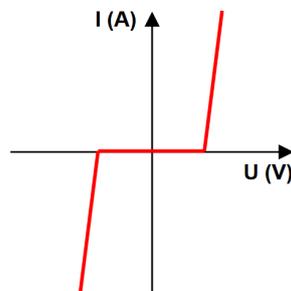


FIGURE 3.26 – Caractéristique d'une varistance

Le tableau donné par le constructeur des variateurs est le suivant :

Table 3-22 Varistor data

Drive rating	Voltage rating V _{RMS}	Energy rating J	Quantity per system	Configuration	Part number
200 V (200 V to 240 V ±10 %)	550	620	3	Line to line	2482-3291
	680	760		Line to ground	2482-3211
400 V (380 V to 480 V ±10 %)	550	620		Line to line	2482-3291
	680	760		Line to ground	2482-3211
500 V (500 V to 575 V ±10 %)	680	760		Line to line	2482-3218
	1000	1200		Line to ground	2482-3218
690 V (500 V to 690 V ±10 %)	385	550	6	2 in series line to line	2482-3262
	1000	1200	3	Line to ground	2482-3218

Suitable DIN rail mounted surge protectors are also available from CITELE (DS40 series)

FIGURE 3.27 – Tableau de dimensionnement des varistances

Les valeurs préconisées sont les suivantes :

- 3 varistances phase-phase : TVR32911 **550Vrms**
- 3 varistances phase-terre : TVR32112 **680Vrms**

8.4 Dimensionnement du filtrage

Le dimensionnement du filtrage est préconisé par le constructeur des variateurs afin d’obtenir des performances optimales. Pour un THD inférieur à 2%, le tableau donné est le suivant :

Table 3-19 400 V (380 V to 480 V ±10 %) Regen filter components to support up to 2 % THD_v on grid

Drive mode		Regen inductor			SFF inductor			SFF capacitor				
Heavy Duty	Normal Duty	mH	Arms	Part number	mH	Arms	Part number	Capacitor value	Rated voltage	Part number	Capacitor current per can	Fuse rating (A)
								µF	Vac		Arms	
03400078	03400078*	6.300	9.5	4401-0405	3.160	9.5	4401-0162-10	8	525	1610-7804	3.3	6
03400100*												6
	03400100*	5.000	12	4401-0406	2.500	12	4401-0163-10					6
04400150	04400150*	3.75	16	4401-0407	1.875	16	4401-0164-10					6
04400172*												6
05400270*	04400172	2.400	25	4401-0408	1.200	25	4401-0165-10					4.1
05400300	05400270	1.760	34	4401-0409	0.880	34	4401-0166-10	32	525	1665-8324	13	20
06400350*	05400300										20	
06400420*	06400350	1.500	40	4401-0410	0.750	40	4401-0167-10				13.1	20
06400470*	06400420*	1.300	46	4401-0411	0.650	46	4401-0168-10				13.3	25
	06400470*	1.000	60	4401-0412	0.500	60	4401-0169-10				13.9	25
07400660	07400660*	0.780	74	4401-0413	0.390	77	4401-0170-10				14.8	25
07400770*		0.780									25	
07401000*	07400770	0.630	96	4401-0414	0.315	96	4401-0171-10				18.1	32
08401340*	07401000	0.480	124	4401-0415	0.240	124	4401-0172-10				20.1	32
08401570*	08401340	0.380	156	4401-0416	0.190	156	4401-0173-10				22.7	40
	08401570*	0.330	180	4401-0417	0.165	180	4401-0174-10	24.8	40			
09402000*	09402000*	0.300	202	4401-0418	0.135	200	4401-0175-10	2 x 39	525	1665-8394	18.4	32
09402240*											32	
10402700	09402240	0.200	300	4401-0419	0.100	300	4401-0176-10				20.1	32
10403200*	10402700*	0.168	350	4401-0420	0.080	350	4401-1205-10				25.4	40
	10403200*							40				
11403770	11403770	0.135	437	4401-0292	0.067	437	4401-0301-10	3x 64	525	1665-8644	33.5	50
11404170												50
11404640												50
	11404170	0.121	487	4401-0293-11	0.060	487	4401-0302-10					50
	11404640											50

* Modify Rated Current (05.007) to match current rating of inductor.

FIGURE 3.28 – Tableau de dimensionnement du filtrage

Pour le modèle 03400078 (M700 3.0kW), les valeurs des filtres sont les suivantes :

- Inductance REGEN : **6.3mH**
- Inductance SFF (Switching Frequency Filter) : **3.16mH**
- Condensateur SFF (Switching Frequency Filter) : **8µF**

9. Schémas électriques

L'objectif de cette partie est d'expliquer les différents éléments des schémas et leur fonction. Les schémas électriques sont disponibles en annexe.

9.1 Puissance

a) Folio 3 : Kart électrique

Ce folio comporte l'arrivée de la tension, le sectionnement, l'alimentation du kart, le variateur du kart et le moteur du kart.

- **3Q1** : Sectionneur porte-fusible Triphasé, permet de sectionner et d'isoler l'armoire
- **3Q2** : Disjoncteur, permet la protection de l'alimentation 3T1 contre les surintensités
- **KM4** : Contacteur de sectionnement neutre monophasé (faute de matériel sectionneur tetra, voir **Chapitre 7 1.3.a**), permet le sectionnement du circuit d'alimentation et son arrêt d'urgence
- **3T1** : Alimentation 48V 3kW du kart électrique
- **Variateur Curtis** : Variateur du kart électrique, de la marque Curtis
- **Moteur** : Moteur du kart électrique

b) Folio 4 : Variateur REGEN

Ce folio comporte le variateur REGEN, son filtrage, sa commande et ses protections.

- **4Q1** : Disjoncteur moteur, protège circuit de variateurs contre les surintensités
- **KM1** : Contacteur de puissance, permet l'activation du circuit de puissance des variateurs
- **VDR** : Varistances, protège les variateurs contre les surtensions
- **CEM** : Filtre CEM, filtre les pollutions harmoniques haute fréquence
- **SELF FILTRE** : Inductances, filtrent le courant en sortie de l'onduleur
- **4C1** : Condensateurs, filtrent le courant en sortie de l'onduleur
- **SELF REGEN** : Inductances, permettent la transition entre la tension en sortie de l'onduleur et la tension réseau.
- **4Q2** : Disjoncteur, permet de protéger le BUS continu contre les surintensités
- **Variateur REGEN** : Permet l'injection de la puissance de la charge active dans le réseau. Pour la logique de commande de ce variateur, voir **Chapitre 4 2.1**

c) Folio 5 : Variateur RFC-A

Ce folio comporte le variateur de la charge active, la charge active, ainsi que son circuit de ventilation.

- **5M1** : Moteur de la charge active
- **Variateur RFC-A** : Permet la commande en couple du moteur. Pour la logique de commande de ce variateur, voir **Chapitre 4 2.2**
- **5Q1** : Disjoncteur, protège le ventilateur contre les surintensités
- **5M2** : Ventilateur, refroidit le moteur de la charge active

9.2 Commande

a) Folio 6 : Commande

Ce folio comporte la commande des contacteurs de l'armoire, ainsi que l'alimentation 24V des variateurs.

- **6Q1** : Disjoncteur, protège l'alimentation 24V DC en amont contre les surintensités
- **AL1** : Alimentation 24V DC, alimente les variateurs
- **6Q2** : Disjoncteur, protège l'alimentation 24V DC en aval contre les surintensités
- **6Q3** : Disjoncteur, protège le transformateur 24V AC en amont contre les surintensités
- **Transfo6** : Transformateur 24V AC, permet d'alimenter le circuit de commande
- **6Q4** : Disjoncteur, protège le transformateur 24V AC en aval contre les surintensités

Logique de commande :

- **Mise sous tension** : Le voyant TENSION permet l'affichage de la présence de tension du circuit de commande. Le contacteur KM4 est alimenté et ferme le circuit monophasé pour l'alimentation du kart, si l'on sectionne l'armoire, ce contacteur se ferme et sectionne le neutre.
- **Appui de MST REGEN** : Le contacteur KM1 se ferme et est auto-maintenu, le circuit des variateurs est alimenté jusqu'aux contacts de KM2 et de KM3. Le contacteur KM2 se ferme également, fermant le circuit de charge du variateur REGEN. Lorsque le variateur REGEN est prêt, celui-ci ferme son contact aux bornes 41 et 42 et alimente la bobine de KM3. KM3 est fermé et KM2 s'ouvre, le mode REGEN est prêt. Les voyants NOREGEN et REGEN permettent de voir le status du mode REGEN avec les contacteurs KM2 et KM3.
- **Appui de MHT REGEN** : Le contacteur KM1 s'ouvre, les variateurs ne sont plus alimentés en puissance et KM3 s'ouvre.
- **Appui de 6S1 Arrêt d'urgence** : Tous les contacteurs s'ouvrent, les variateurs et l'alimentation ne sont plus alimentés.

9.3 Implantation

a) Folio 7 : Boite à boutons

Deux boites à boutons sont utilisées. la première boite contient l'arrêt d'urgence 6S1, le voyant TENSION, les boutons MST REGEN et MHT REGEN, les voyants REGEN et NO REGEN. La seconde boite contient les boutons RESET pour les deux variateurs, les sélecteurs de Déverrouillage pour les deux variateurs et le potentiomètre de référence de couple.

b) Folio 8 : Armoire

Sur la partie haute de l'armoire sont fixés : Le sectionneur, tous les disjoncteurs, l'alimentation 24V AL1, le transformateur Transfo6. Les variateurs et le filtre CEM sont positionnés sur la partie droite de l'armoire. Les composants de filtrage du variateur REGEN sont positionnés sous les variateurs. Les contacteurs et les borniers sont positionnés sur la partie gauche restante.

Chapitre 4

Convertisseurs/Variateurs Unidrive M700

1. Modes de fonctionnement

Un variateur est un dispositif électronique utilisé pour contrôler la vitesse et le couple d'un moteur électrique à courant alternatif (AC), ils peuvent également gérer le flux de courant. Les variateurs sont souvent utilisés dans une gamme d'applications industrielles pour réguler la vitesse des moteurs électriques, ce qui permet d'économiser de l'énergie, d'améliorer la précision du contrôle et de prolonger la durée de vie du moteur. Dans notre configuration, nous utilisons deux variateurs de type M700 de la marque Leroy-Somer de chez Nidec.

Les variateurs M700 de la marque Leroy-Somer ne peuvent assurer qu'un mode de fonctionnement à la fois. Il existe quatre modes de fonctionnement différents :

— Mode **REGEN** (Régénération) :

Ce mode de fonctionnement permet de réacheminer le courant produit par la génératrice vers le réseau en recréant un signal sinusoïdal sans harmoniques et à la fréquence du réseau en se synchronisant avec celui-ci permettant de ne pas le polluer.

— Mode **RFC-A** (Boucle fermée Moteur asynchrone) :

Le mode Rotor Flux Control pour moteurs asynchrones (RFC-A) regroupe les contrôles vectoriels en boucle fermée avec un capteur de retour de position.

Ce mode est utilisé avec les moteurs asynchrones équipés d'un capteur de retour vitesse. Le variateur contrôle directement la vitesse du moteur en utilisant le capteur pour s'assurer que la vitesse du rotor correspond exactement à la vitesse demandée.

— Mode **RFC-S** (Boucle fermée Moteur synchrone) :

Le mode Rotor Flux Control pour moteurs synchrones (brushless à aimants permanents) (RFC-S) fournit un contrôle en boucle fermée avec un capteur de retour de position.

Le variateur contrôle directement la vitesse du moteur en utilisant le capteur pour s'assurer que la vitesse du rotor correspond exactement à la vitesse demandée.

— Mode **OL** (Boucle ouverte) :

Le variateur applique un courant au moteur aux fréquences spécifiées par l'utilisateur. La vitesse du moteur dépend de la fréquence de sortie du variateur et du glissement occasionné par la charge mécanique. Le variateur peut améliorer le contrôle de la vitesse du moteur en appliquant une compensation de glissement. Les performances obtenues à vitesse réduite varient selon que le mode U/F ou le mode vectoriel boucle ouverte est sélectionné.

Sur notre maquette, nous avons un variateur en mode **RFC-A** qui gère le moteur avec une commande en couple. Nous avons également un variateur en mode **REGEN** (Onduleur MLI) qui transforme le courant du Bus CC en alternatif afin d'être renvoyé dans le réseau.

2. Commande

2.1 Commande du variateur REGEN

La commande des variateurs avec une structure REGEN est préconisée par le constructeur dans la documentation (NIDEC 2023c). Certaines connexions sont optionnelles, les plus importantes sont les suivantes :

- La partie "**Charging Branch circuit**" est fermée dès l'alimentation du variateur par le contacteur K3. Dès que le variateur est chargé et prêt, la bobine K2 est activée par la borne 42 du variateur. Les contacts K2 de puissance sont fermés, fermant le circuit REGEN, et ouvrant en même temps le "**Charging branch circuit**". Le variateur récupère l'information de la fermeture de K2 avec la borne 25.
- Un bouton poussoir NF (normalement fermé) permet le **reset** du variateur avec la borne 27.
- Un sélecteur permettra de **déverrouiller** le variateur avec la borne 31.
- Les thermistances du filtre sinus et de l'inductance REGEN seront câblés en série entre la borne de commun et la borne 8 comme sécurité.

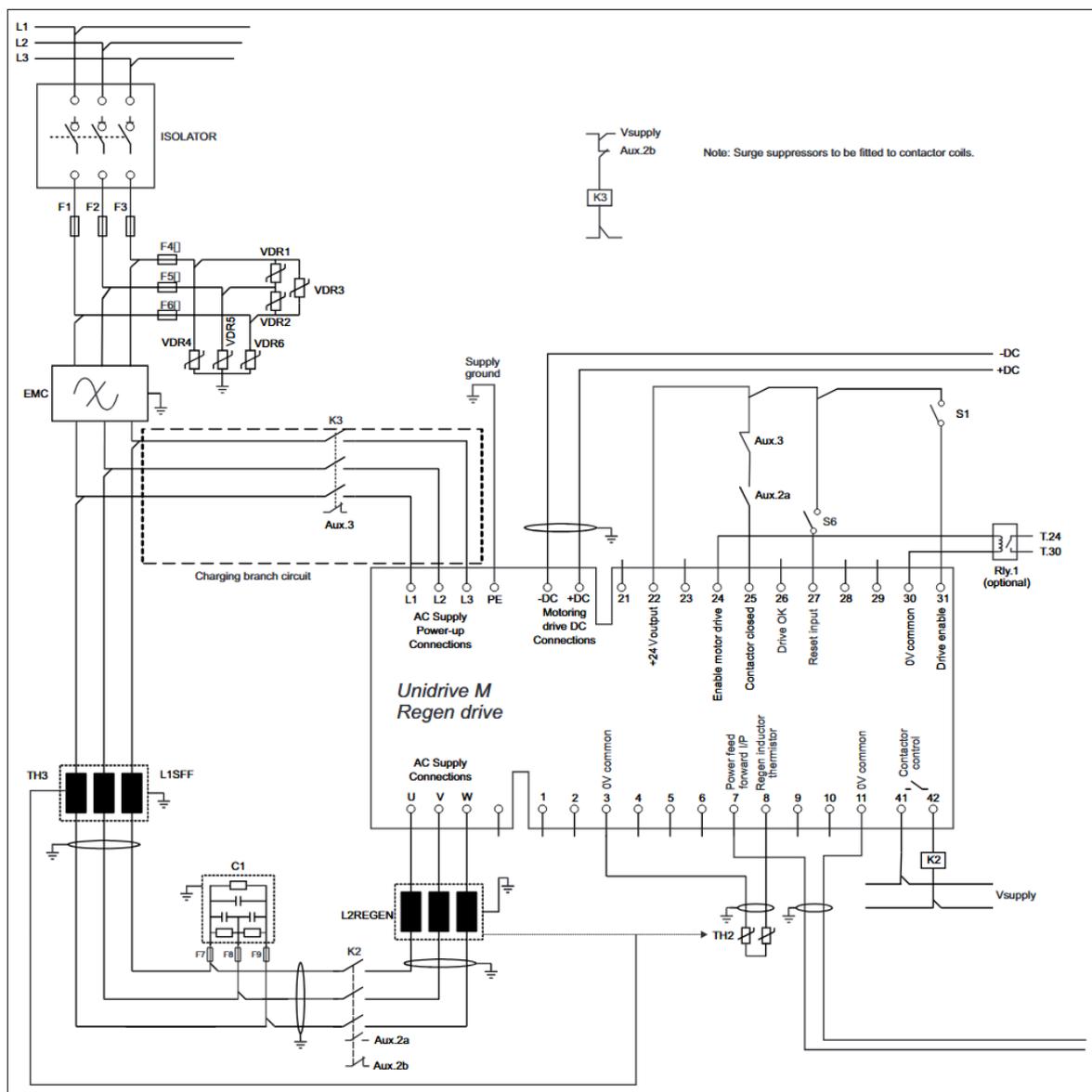


FIGURE 4.1 – Schéma commande REGEN

2.2 Commande du variateur RFC-A

Du côté du variateur du moteur, on retrouve les connexions de commande suivantes :

- Une connexion activera directement la **marche avant** (ou arrière) du variateur sur la borne 26.
- Un bouton poussoir NF (normalement fermé) permet le **reset** du variateur avec la borne 25. Au lieu de provenir d'une tension 24V+, le bouton sera connecté à la borne 24 du variateur REGEN, ce qui lui permettra d'être activé uniquement lorsque le variateur REGEN est prêt.
- Un sélecteur permettra de **déverrouiller** le variateur avec la borne 31.
- La thermistance du moteur sera câblée entre la borne de commun et la borne 8 comme sécurité.
- Le **potentiomètre** permettant la commande du couple sera câblé sur les bornes 4 (10V), 5 (V+) et 6 (V-) rebouclée sur la borne 3 (commun).

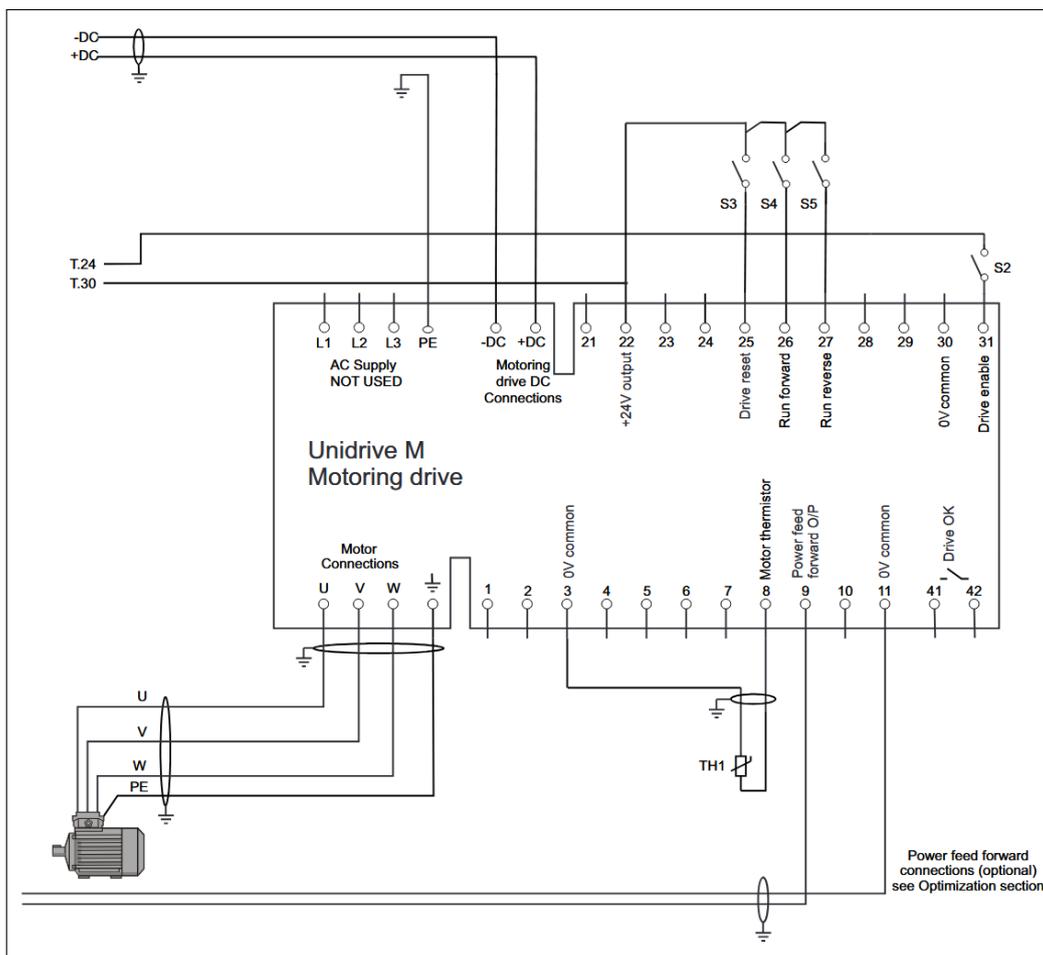


FIGURE 4.2 – Schéma commande RFC-A

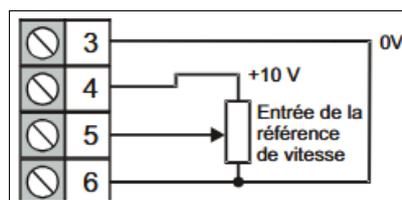


FIGURE 4.3 – Schéma entrée analogique 1

2.3 Codeur

Le capteur de retour de position utilise un connecteur codeur type D à 15 broches. Ces broches sont numérotées et un tableau permet d'associer à chaque broche une connexion de notre codeur.

4.4.1 Emplacement du connecteur de retour de position de position

Figure 4-9 Emplacement du retour de position

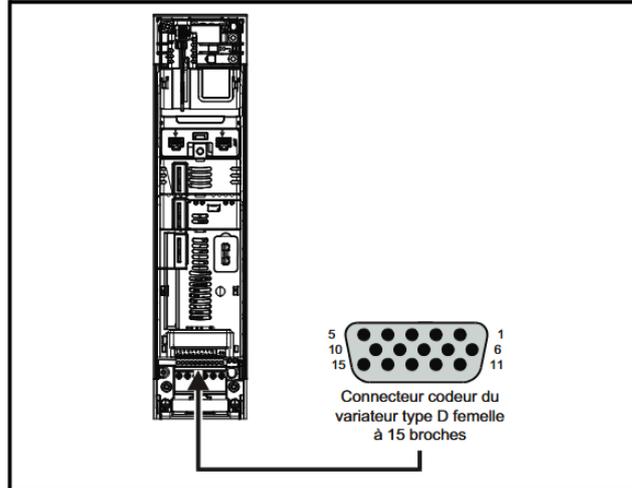


FIGURE 4.4 – Connecteur du codeur

4.4.3 Détails de la connexion du retour de position

Tableau 4-10 Détails des connexion du retour de position P1

Interface de retour de position P1 Pr 03.038	Connexions														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
AB (0)	A	A\	B	B\	Z	Z\									
FD (1)	F	F\	D	D\	Z	Z\									
FR (2)	F	F\	R	R\	Z	Z\									
AB Servo (3)	A	A\	B	B\	Z	Z\	U	U\	V	V\	W	W\			
FD Servo (4)	F	F\	D	D\	Z	Z\	U	U\	V	V\	W	W\			
FR Servo (5)	F	F\	R	R\	Z	Z\	U	U\	V	V\	W	W\			
SC (6)	A (Cos)	A\ (Cos\)	B (Sin)	B\ (Sin\)	Z	Z\									
SC Hiperface (7)	Cos	Cosref	Sin	Sinref	DATA	DATA\									
EnDat (8)	DATA	DATA\	CLK	CLK\	Freeze	Freeze\									
SC EnDat (9)	A	A\	B	B\	DATA	DATA\					CLK	CLK\	+V	0V	Th
SSI (10)	DATA	DATA\	CLK	CLK\	Freeze	Freeze\									
SC SSI (11)	A (Cos)	A\ (Cos\)	B (Sin)	B\ (Sin\)	DATA	DATA\					CLK	CLK\			
SC Servo (12)	A (Cos)	A\ (Cos\)	B (Sin)	B\ (Sin\)	Z	Z\	U	U\	V	V\	W	W\			
BISS (13)	DATA	DATA\	CLK	CLK\	Freeze	Freeze\									
Résolveur (14)	Cos H	Cos L	Sin H	Sin L	Ref H	Ref L									
SC SC (15)	A (Cos)	A\ (Cos\)	B (Sin)	B\ (Sin\)	Z	Z\	C ^{*1}	C\ ^{*1}	D ^{*2}	D\ ^{*2}	Freeze2	Freeze2\			
Commutation uniquement (16)							U	U\	V	V\	W	W\			
SC BISS (17)	A	A\	B	B\	DATA	DATA\					CLK	CLK\			

FIGURE 4.5 – Tableau des connexions pour le connecteur du codeur

3. Paramétrage prérequis des Variateurs

3.1 Paramétrage réseau

Afin de pouvoir communiquer avec nos variateurs, il est nécessaire d'avoir un paramétrage réseau de ceux-ci. Les registres de paramétrage sont les suivants :

Registre	Description	Valeur
4.02.005	Activation DHCP	OFF (0)
4.02.006	Adresse IP	192.168.1.(12 REGEN, 11 RFC-A)
4.02.007	Masque de sous-réseau	255.255.255.0
4.02.008	Passerelle par défaut	N/A
4.02.009	DNS Primaire	N/A
4.02.010	DNS Secondaire	N/A

TABLE 4.1 – Paramètres réseau

Une fois les paramètres réseau entrés, un reset doit être effectué via le paramètre "Reset" sur le registre "4.00.007"

3.2 Variateur REGEN

La majorité des paramètres du variateur REGEN sont préconfigurés avec des valeurs par défaut, ils ne nécessitent pas de modification. Les paramètres les plus importants à vérifier sont les suivants :

Registre	Description	Valeur
00.048 11.031	Mode du variateur	REGEN (4)
00.041 05.018	Fréquence de découpage max	3 kHz
00.001 03.005	Tension du bus DC	400V AC -> 700V DC

TABLE 4.2 – Paramètres généraux du variateur REGEN

3.3 Variateur RFC-A

Le variateur de la charge active utilisera le mode RFC-A (Rotor Flux Control - Asynchronous) avec un capteur qui sera le codeur de notre moteur asynchrone à contrôle vectoriel de flux. Les paramètres suivants doivent être modifiés :

a) Mode du variateur

Le mode du variateur doit être configuré en RFC-A ainsi qu'en mode de régulation de couple.

Registre	Description	Valeur
00.048 11.031	Mode du variateur	RFC-A (2)
00.014 04.011	Mode de régulation	Couple limitation vitesse (2)
00.014 04.011	Limite courant moteur	0%
00.014 04.011	Limite courant régénératif	100%
00.014 04.011	Limite courant symétrique	100%

TABLE 4.3 – Paramètres de mode du variateur RFC-A

Ce mode de régulation permet de bloquer la vitesse à zéro lorsque que le kart est à l'arrêt, même avec une consigne de couple. Les limites de courant permettent également à ce que la machine fonctionne que comme charge active et qu'elle n'ait aucun courant disponible en moteur. Cela permet à ce que la machine n'entraîne pas le kart à son arrêt. Il se comporte alors comme une charge mécanique résistive constante.

b) **Plaque signalétique**

La plaque signalétique du moteur doit être renseignée dans le variateur à l'aide des paramètres suivants :

Registre	Description	Valeur
00.042 05.011	Nombre de pôles moteur	4
00.043 05.010	Facteur de puissance nominal	0.81
00.044 05.009	Tension nominale	400 V
00.045 05.008	Vitesse nominale	2555.00 tr/min
00.046 05.007	Courant nominal	8.50 A
00.047 05.006	Fréquence nominale	87 Hz

TABLE 4.4 – Paramètres du moteur

c) **Codeur**

Le codeur doit être configuré pour le bon fonctionnement de l'asservissement. Une tension trop élevée pourrait l'endommager.

Registre	Description	Valeur
03.038	Type de codeur	Codeur en quadrature AB (0)
03.036	Alimentation du codeur	5V
03.034	Points par tour	1024

TABLE 4.5 – Paramètres du codeur

d) **Rampes**

Les rampes de vitesse doivent être spécifiées même en régulation de couple. Les valeurs par défaut seront gardées, sauf pour la vitesse qui sera la vitesse max du kart.

Registre	Description	Valeur
00.002	Vitesse max	7000 tr/min
00.003	Rampe accélération	2.0s/(1000 tr/min)
00.004	Rampe décélération	2.0s/(1000 tr/min)
00.015	Mode rampe	Standard (1)

TABLE 4.6 – Paramètres des rampes

e) **Potentiomètre**

Le potentiomètre est câblé sur une borne analogique en entrée du variateur. Cette entrée sert à commander la référence de vitesse. Il est nécessaire de changer la destination de cette entrée afin de commander la référence de couple.

07.007	Mode entrée analogique 1	Volt (6)
07.008	Mise à l'échelle entrée analogique 1	-1 (couple résistant)
07.009	Inversion entrée analogique 1	1 (potentiomètre inversé)
07.010	Destination entrée analogique	Offset Couple (04.009)

TABLE 4.7 – Paramètres du potentiomètre

4. Paramètres de supervision et de pilotage

4.1 Supervision : Lecture seule

Les paramètres suivants sont en lecture seule et permettent la supervision du variateur **RFC-A**.

Registre	Description	Valeur
05.001	Fréquence sortie	
05.002	Tension sortie	
03.002	Vitesse moteur tr/min	
04.001	Courant total I	
04.002	Courant actif Id	
04.003	Référence de couple finale	
04.017	Courant réactif Iq	
04.026	Couple utile	

TABLE 4.8 – Paramètres de supervision du variateur RFC-A

Les paramètres suivants sont en lecture seule et permettent la supervision du variateur **REGEN**.

Registre	Description	Valeur
05.001	Fréquence sortie	
05.002	Tension sortie	
05.003	Puissance active	
05.005	Tension BUS DC	
03.001	Puissance réactive (REGEN only)	
04.001	Courant total I	

TABLE 4.9 – Paramètres de supervision du variateur REGEN

4.2 Pilotage : Lecture écriture

Les paramètres suivants permettent de piloter la commande en couple du variateur **RFC-A**.

Registre	Description	Valeur
04.008	Référence de couple	Contrôle par LabVIEW
04.009	Offset de couple	Valeur du potentiomètre
04.010	Validation Offset couple	OFF (0) si LabVIEW ON
06.043	Validation du mot de commande	ON (1)

TABLE 4.10 – Paramètres de commande en écriture

La **validation du mot de commande** permet d'activer la commande du variateur par les protocoles réseau (IHM). Pour plus de simplicité, elle sera activée constamment et nous utiliserons la validation de l'offset de couple afin de désactiver le potentiomètre physique.

5. Synoptique de démarrage

La synoptique de démarrage (page suivante) permet de comprendre le fonctionnement et l'interaction des registres des variateurs. Deux fonctionnements sont possibles : un fonctionnement dit manuel avec le contrôle de couple par potentiomètre et un fonctionnement IHM avec le contrôle de couple par l'IHM et la supervision.

5.1 Fonctionnement mode manuel

Le mode manuel fonctionne de la manière suivante :

1. Les variateurs sont **sous tension**
2. Les variateurs sont **déverrouillés**
3. **Le mode REGEN est activé** si cela n'est pas déjà fait
4. **Le potentiomètre** indique une valeur dans l'entrée analogique 1
5. Cette entrée analogique est mise à l'échelle si besoin
6. L'entrée analogique 1 est redirigée vers l'**offset de couple**
7. L'offset de couple est validé tant que l'IHM n'est pas active et la référence de couple est nulle, donc **l'offset agit comme consigne de couple**
8. Le mode de régulation est en mode "couple avec limitation de vitesse" et la consigne est transmise

5.2 Fonctionnement mode IHM

Le mode IHM fonctionne de la manière suivante :

1. Les variateurs sont **sous tension**
2. Les variateurs sont **déverrouillés**
3. **Le mode REGEN est activé** si cela n'est pas déjà fait
4. L'IHM écrit dans la **validation du mot de commande** afin d'activer la commande
5. L'IHM écrit dans le registre référence de couple et ne valide pas l'offset de couple, **la référence de couple devient la consigne de couple**
6. Le mode de régulation est en mode "couple avec limitation de vitesse" et la consigne est transmise
7. Les informations de supervisions sont lues en continu par l'IHM

5.3 Synoptique (page suivante)

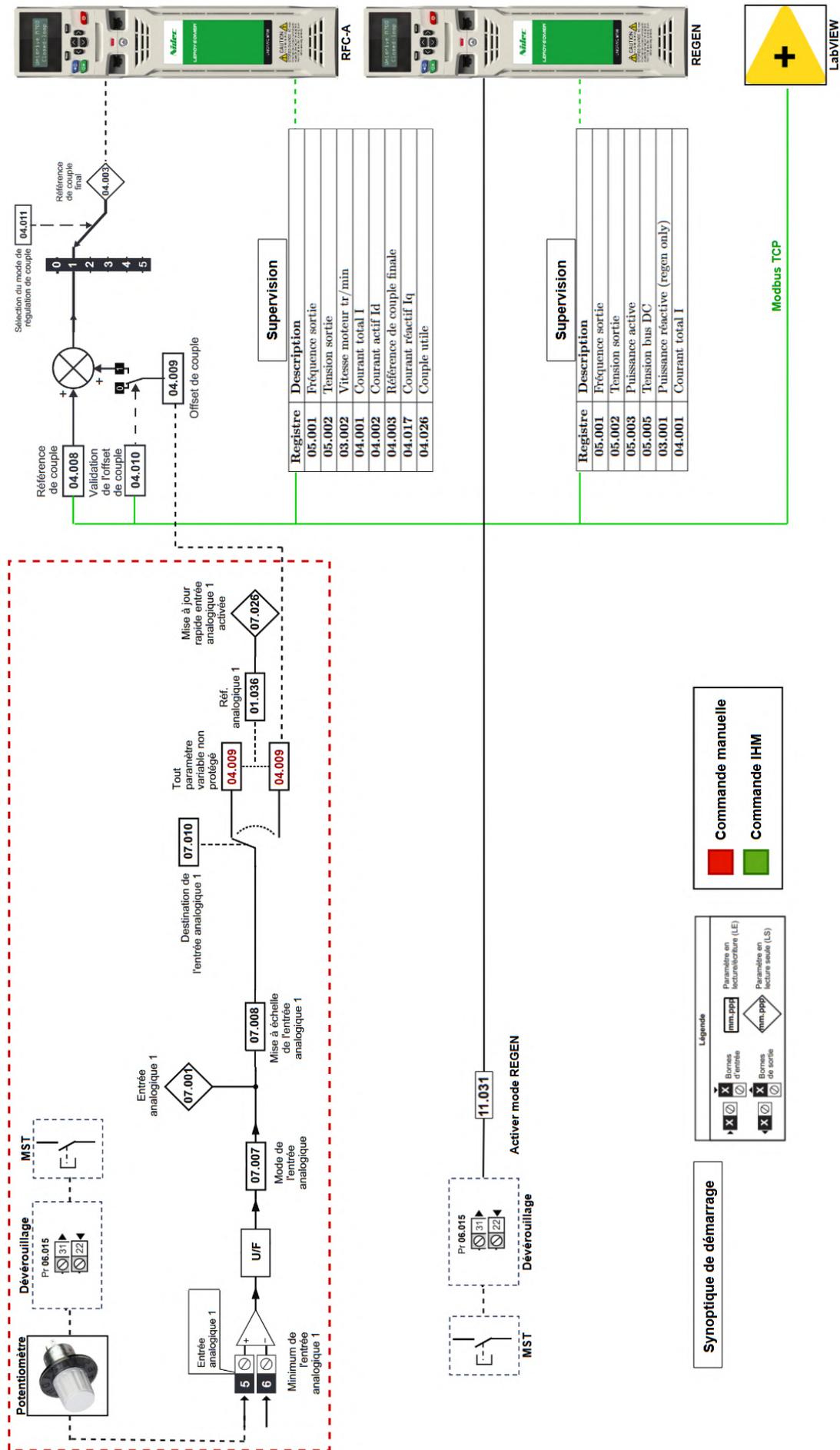


FIGURE 4.6 – Synoptique de démarrage des variateurs mode manuel et IHM

Chapitre 5

IHM LabVIEW

1. Communication avec les variateurs M700

1.1 Protocole Modbus TCP et réseau

Le protocole Modbus TCP est une variante du protocole Modbus, adaptée pour fonctionner sur des réseaux Ethernet en utilisant le protocole TCP/IP. Il est couramment utilisé dans l'automatisation industrielle pour la communication entre équipements comme les automates programmables, les variateurs de vitesse ou les capteurs. Modbus TCP repose sur une architecture master-slave : le master envoie des requêtes (par exemple, lire ou écrire des données), et le slave y répond. Les données échangées sont encapsulées dans des trames Modbus standard, intégrées dans des paquets TCP.

Dans LabVIEW, le protocole Modbus peut être implémenté à l'aide des blocs Modbus disponibles dans les bibliothèques spécifiques. Ces blocs permettent de configurer une communication Modbus en mode master ou slave, en fonction des besoins de l'application. En mode master les blocs sont :

- **Create TCP Master** : Initialisation de la connexion, l'adresse IP de l'équipement cible (serveur) et le port Modbus TCP (généralement 502) sont nécessaires.
- **Master Read Holding Registers** : Lecture d'un registre, l'adresse du registre est nécessaire.
- **Master Write Single Holding Register** : Écriture dans un registre, l'adresse du registre est nécessaire.
- **Master Shutdown** : Fermeture de la connexion

1.2 Conversion des paramètres

L'objectif est d'utiliser le protocole Modbus TCP afin de communiquer avec les registres sur LabVIEW. Cependant, les registres Modbus TCP sont différents des registres mm.ppp du variateur et doivent être convertis. La formule de conversion est la suivante :

$$p_{modbus} = mm \times 100 + ppp - 1 \quad (5.1)$$

Par exemple, le paramètre 01.006 devient 105 en registre Modbus TCP.

1.3 Registres 32 bits

Les registres Modbus standard ont une taille de 16 bits et font référence à un paramètre unique de variateur/module optionnel. Pour accéder à une valeur de données 32 bits, les services de lecture/écriture multiple doivent être utilisés pour transférer une série contiguë de registres 16 bits. Pour demander au client de sélectionner l'accès 16 bits ou 32 bits, le bit 14 de l'adresse du registre est utilisé. Si le bit 14 est égal à 0, l'information est sur 16 bits, mais s'il est égal à 1 l'information est sur 32 bits.

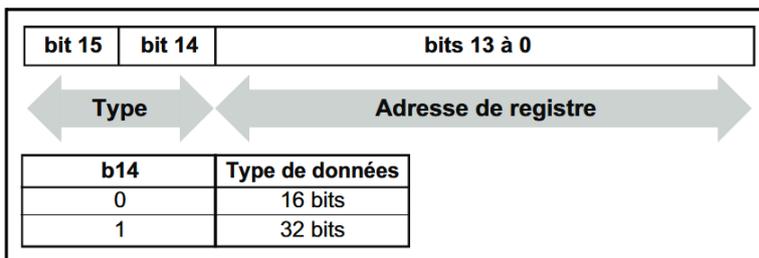


FIGURE 5.1 – Sélection du type de données en fonction du bit 14

Si l'information est codée sur 32 bits, 16384 (0x4000) est alors ajouté à l'adresse du registre Modbus. Par exemple, pour le paramètre du variateur Pr 01.021 en mode d'adressage standard, la valeur de registre de début est $16384 + 120 = 16504$ (0x4078)

Pour savoir si un paramètre doit être lu en 16 ou 32 bits, il est nécessaire de connaître la plage de valeurs voulue. Prenons l'exemple de la vitesse du moteur.

Parameter	03.002 Speed Feedback		
Short description	Displays the speed feedback from the selected feedback source		
Mode	RFC-A		
Minimum	-VM_SPEED	Maximum	VM_SPEED
Default		Units	
Type	32 Bit Volatile	Update Rate	4ms write
Display Format	Standard	Decimal Places	1
Coding	RO, FI, VM, ND, NC, PT		

FIGURE 5.2 – Paramètre de retour de vitesse du variateur

Cette vitesse est comprise entre la vitesse min (0.0 tr/min) et la vitesse max (7000.0 tr/min). Cependant, cette vitesse est limitée en lecture par le nombre de bits disponibles. Pour 16 bits en non signé, la lecture est limitée à 6553,5 tr/min ($2^{16} = 65536$). Pour 16 bits en signé, la lecture est limitée à 3276,8 tr/min ($2^{15} = 32768$). Toute vitesse supérieure nécessite une trame 16 bits supplémentaire. Une lecture 16 bits de certains paramètres sera donc suffisante, en fonction de la plage et du nombre de décimales. Néanmoins, il faudra parfois faire une lecture de deux trames 16 bits sur l'adresse convertie pour une lecture 32 bits.

1.4 Entiers signés et décimales

Les entiers signés 16 bits permettent de représenter à la fois des nombres positifs et des nombres négatifs. Ils utilisent le bit de poids fort pour le signe, ce qui signifie que la plage de valeurs s'étend de -32768 à 32767. En revanche, les entiers non signés 16 bits se limitent aux nombres positifs, utilisant tous leurs bits pour représenter la valeur. Leur plage de valeurs s'étend de 0 à 65535.

Les paramètres variateur sont codés en entiers signés. LabVIEW récupère les trames brutes et les considère comme des entiers non signés. Pour toutes valeurs positives, cela ne pose pas de problème, pour les valeurs négatives, l'interprétation sera fautive. Il est donc nécessaire de les convertir.

De plus, certains paramètres possèdent des décimales. Il sera donc judicieux de diviser par la puissance de 10 correspondante afin d'obtenir la correcte valeur.

2. Communication avec l'alimentation programmable

Le constructeur de l'alimentation fourni une librairie de blocs LabVIEW permettant la supervision et le pilotage sans paramétrage supplémentaire. Ces blocs sont :

- **Device scan** : Recherche les appareils sur une plage d'adresses IP
- **Device select** : Choix d'un appareil parmi les appareils trouvés et initialisation de la connexion
- **PSB10000** : Bloc spécifique à l'alimentation. Permet de lire ou d'écrire dans n'importe quel paramètre.
- **Device close** : Clôture de la connexion

Pour pouvoir piloter l'alimentation à distance, le paramètre **Remote Mode 402** doit être préalablement activé dès la connexion à l'appareil. Ce paramètre empêche de piloter l'alimentation manuellement, et est obligatoire pour piloter l'alimentation à distance. Il doit être désactivé en clôture de l'IHM pour permettre de piloter à nouveau l'alimentation manuellement.

3. Plan d'adressage réseau

Les deux variateurs, l'alimentation et le PC seront sur un réseau externe à celui de l'IUT. Du fait que chaque appareil soit uniquement esclave de l'IHM, aucune passerelle n'est nécessaire. Des adresses IPV4 statiques ont été prédéfinies :

Adresses IP

Les adresses IP retenues sont :

Alimentation : 192.168.1.10
Variateur RFC-A : 192.168.1.11
Variateur REGEN : 192.168.1.12
Réseau : 192.168.1.0/24

Les variateurs sont composés de deux ports Ethernet et reroutent les adresses dans chacun de leurs ports. La topologie réseau utilisée est donc **linéaire**.

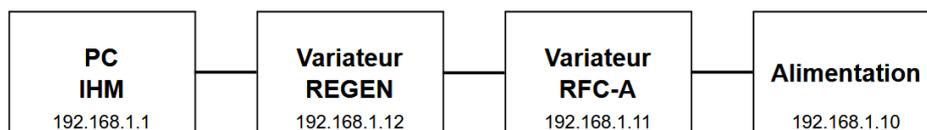


FIGURE 5.3 – Plan d'adressage réseau

Cela implique que tous les équipements doivent être allumés afin de pouvoir communiquer avec le PC. Si l'un des variateurs s'éteignait, il ne serait plus possible de piloter l'alimentation à partir de l'IHM. Afin de résoudre ce problème, il est possible d'utiliser une topologie en étoile à l'aide d'un "Switch" réseau. Cependant, avec un nombre réduit d'appareils, nous nous contenterons d'une topologie linéaire.

4. Développement de l'IHM LabVIEW

4.1 Variateurs

a) Connexion et déconnexion Modbus

Avant de pouvoir lire et écrire sur les registres du variateur, il est nécessaire de se connecter en créant un nouveau master Modbus. Le master est lié à l'adresse IP de l'appareil lors de la connexion. Le master Modbus doit être fermé en fermeture de l'IHM.

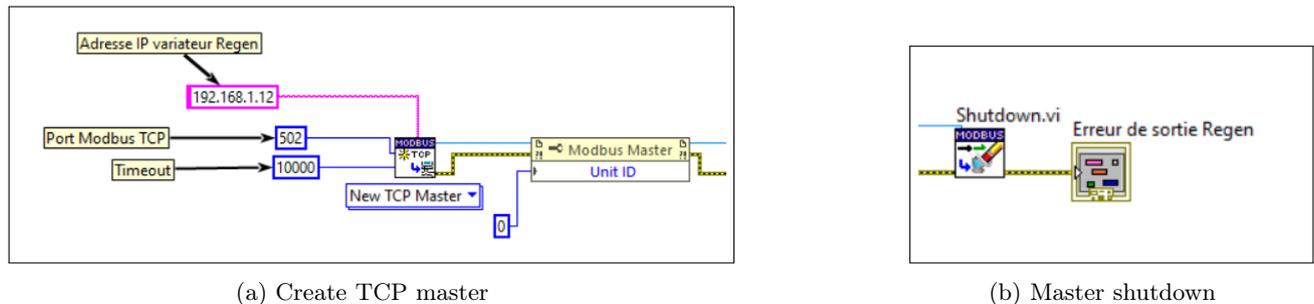


FIGURE 5.4 – Connexion et déconnexion d'un variateur en Modbus

Lors de la connexion, l'IP et le port par défaut (502) sont spécifiés au niveau du bloc "Create TCP master". Nous avons ensuite ajouté un bloc définissant l'Unit ID afin de sélectionner le nœud de destination du variateur (0 ou 255). Il existe plusieurs Unit ID pour chacune des extensions du variateur, notamment pour son interface réseau.

b) Lecture (16 et 32 bits)

La lecture de paramètres se situe dans une boucle afin de continuellement mettre à jour les grandeurs sur l'IHM. Un variateur supporte un total de **10 paramètres** lus toutes les **100ms** en Modbus TCP/IP. Nous avons donc choisi une fréquence de boucle de **100ms** pour un total de 10 lectures maximum. Les informations sont ensuite récupérées dans un indicateur pour l'IHM.



FIGURE 5.5 – Lecture de paramètres

Sur la figure de gauche, le registre est lu en 16 bits puis est converti en entier signé 16 bits (word) et est mis à l'échelle pour 3 décimales.

Sur la figure de droite, le registre est lu en 32 bits, deux trames 16 bits sont récupérées. La seconde trame est multipliée à 2^{16} puisqu'elle correspond aux bits 17 à 32. La somme des deux résultats est convertie en entier signé 32 bits (long) afin de correctement lire les valeurs négatives. Cela implique que le bit de poids fort (présent sur la deuxième trame) ne sera pas considéré comme $X + 2^{32}$ mais comme $X \times (-1)$.

c) Écriture (RFC-A uniquement)

L'écriture de paramètre est uniquement nécessaire sur le variateur RFC-A. Nous avons utilisé une structure de boucle vérifiant continuellement la validation de la consigne (bouton).

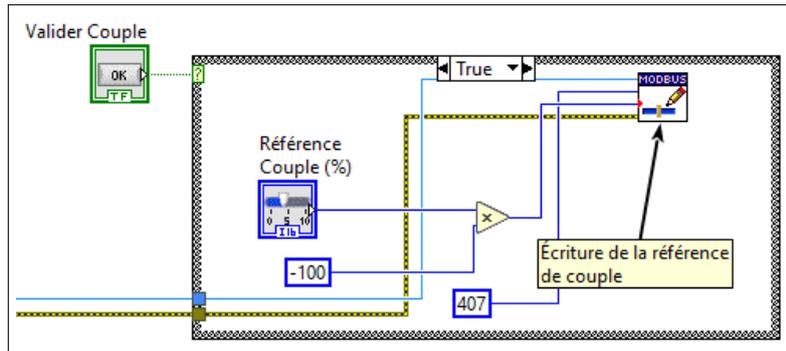


FIGURE 5.6 – Structure de continue - Écriture de la consigne de couple

Cette condition se situe à l'intérieur de la même boucle que les blocs de lecture. Le programme vérifie continuellement et déclenche la condition lorsque le bouton Valider couple est appuyé. Ainsi, la référence de couple est écrite dans le variateur uniquement lorsque le bouton "Valider" est appuyé.

d) Connexion et déconnexion du variateur RFC-A

Le variateur RFC-A nécessite deux écritures au démarrage et à la fin de l'IHM. Premièrement, le potentiomètre physique doit être inhibé en **désactivant l'offset de couple** au démarrage de l'IHM. Deuxièmement, la **référence de couple doit être remise à zéro** comme sécurité. En fermeture de l'IHM, l'offset de couple doit être réactivé et la référence doit être mise à zéro à nouveau. Ces écritures se font qu'une seule fois au lancement et à la fermeture de l'IHM.

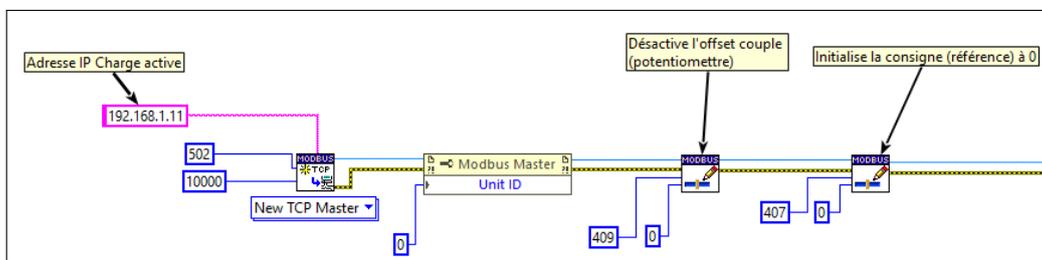


FIGURE 5.7 – Connexion et désactivation du potentiomètre physique

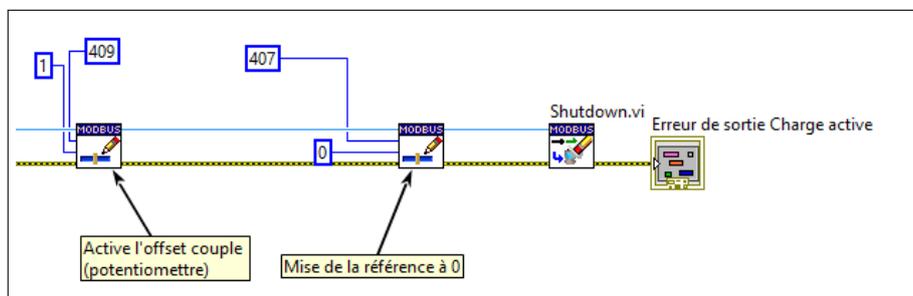


FIGURE 5.8 – Déconnexion et activation du potentiomètre physique

e) Sous-vi de lecture

Afin d'apporter plus de simplicité à notre programme, nous avons décidé de créer un **sous-vi pour les opérations de lecture**. L'objectif est à la fois de retirer les conversions de codes paramètres en registres Modbus, mais également d'alléger l'affichage du diagramme de blocs. Ce sous vi possède les entrées/sorties suivantes :

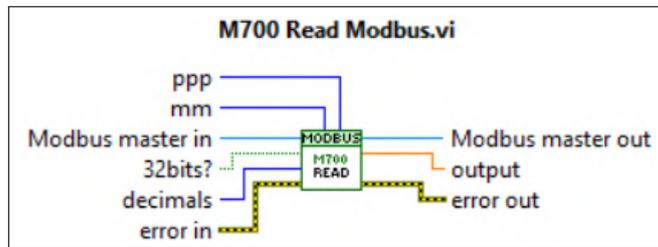


FIGURE 5.9 – Entrées/Sorties du sous-vi Modbus M700 Read

Les paramètres doivent être entrés **sans conversion** en registre Modbus. Le **nombre de décimales** est requis afin d'obtenir la bonne valeur. Un booléen permet de savoir si le registre doit être lu en **32 ou 16 bits**. S'il est vrai, le registre est lu en 32 bits, sinon il est lu en 16 bits. Cela correspond aux mêmes deux diagrammes de blocs que l'on retrouve à la figure 5.5, mais réduits à un seul et même sous-vi.

Ce sous-vi permet de considérablement alléger le diagramme de blocs et ainsi de faciliter le debug :

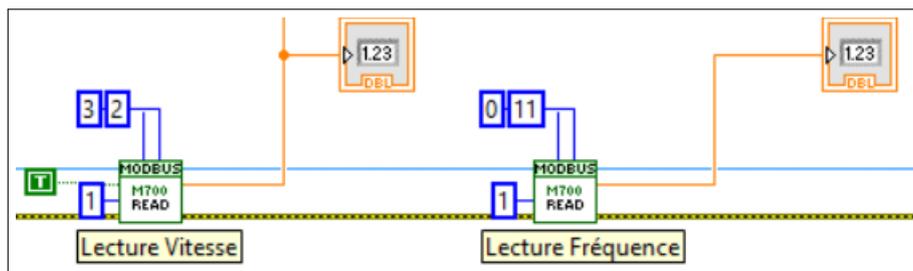


FIGURE 5.10 – Lecture des paramètres avec le sous-vi

f) IHM

L'IHM contient les informations lues de chaque variateur, ainsi qu'une interface de commande du couple en écriture sur le variateur RFC-A.

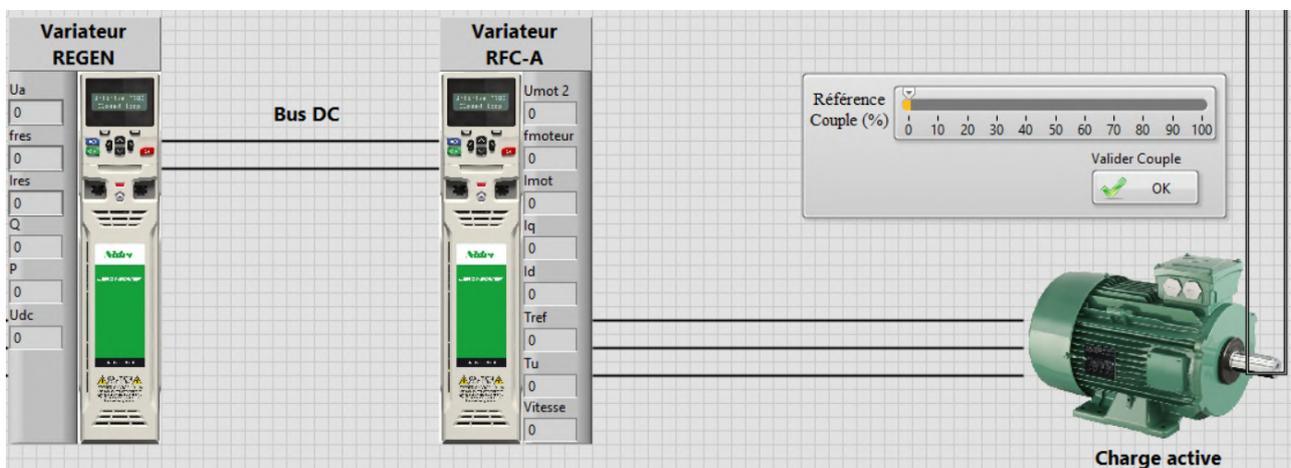


FIGURE 5.11 – IHM partie variateurs

4.2 Alimentation

a) Connexion et déconnexion

La commande de l'alimentation utilise des blocs propriétaires non modifiables. L'initialisation de la connexion à un appareil suit une logique très spécifique :

- **Device scan** : Recherche d'appareils sur une plage d'IP
- **Device select** : Sélection parmi les appareils trouvés
- **Remote mode ON** : Activation du mode de commande à distance, indispensable pour l'écriture de données

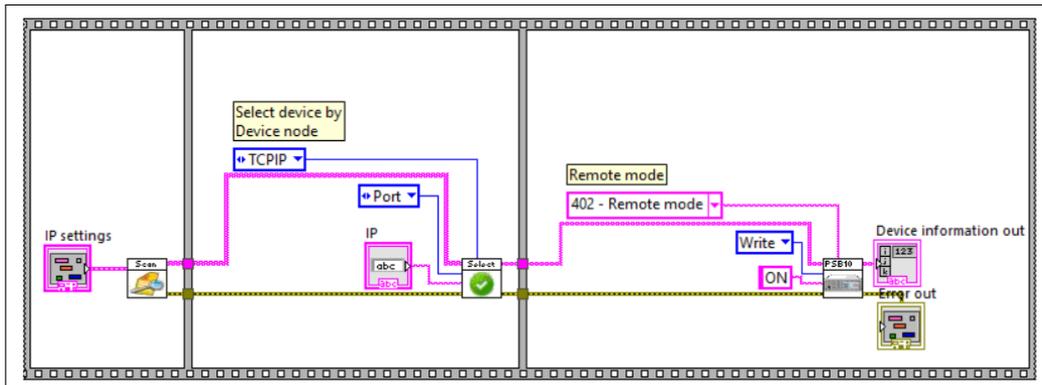


FIGURE 5.12 – Sous-vi d'initialisation de connexion

La déconnexion est plus simple :

- **Remote mode OFF** : Désactivation du mode de commande à distance pour pouvoir commander manuellement l'alimentation à nouveau
- **Device close** : Fermeture de la connexion avec l'appareil

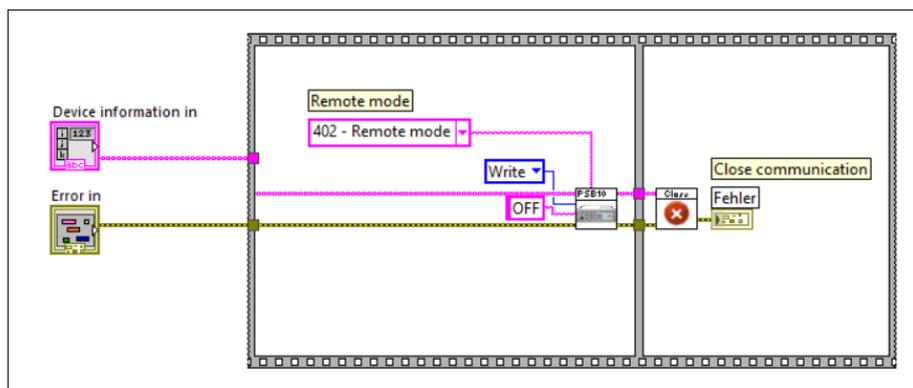


FIGURE 5.13 – Sous-vi d'initialisation de déconnexion

b) Lecture

La lecture des paramètres s'effectue simplement en spécifiant le paramètre à lire dans une liste au bloc "PSB10000". Nous avons utilisé une structure en boucle for afin de limiter la surcharge graphique du programme. La fréquence de rafraîchissement est de **500ms**. Les informations récupérées sont la **tension** actuelle, le **courant** actuel, la **puissance** actuelle et la **limite de courant**. Ces informations sont ensuite récupérées dans des indicateurs pour l'IHM.

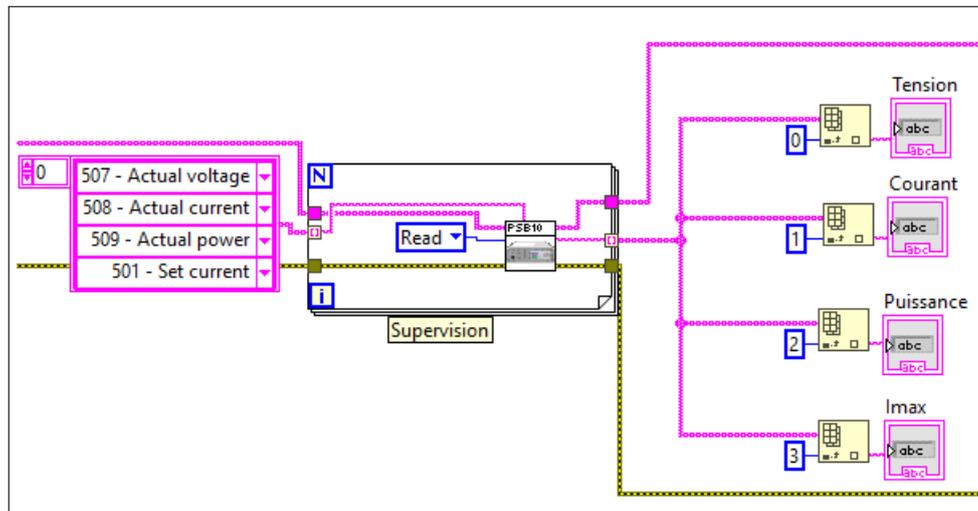


FIGURE 5.14 – Lecture de paramètres

c) Écriture

L'écriture pour l'alimentation reprend la même logique que l'écriture pour les variateurs : Une structure de condition dans une boucle, et un bouton de validation. Les deux paramètres à commander sont la **limite en courant** et la **sortie DC (ON/OFF)**.

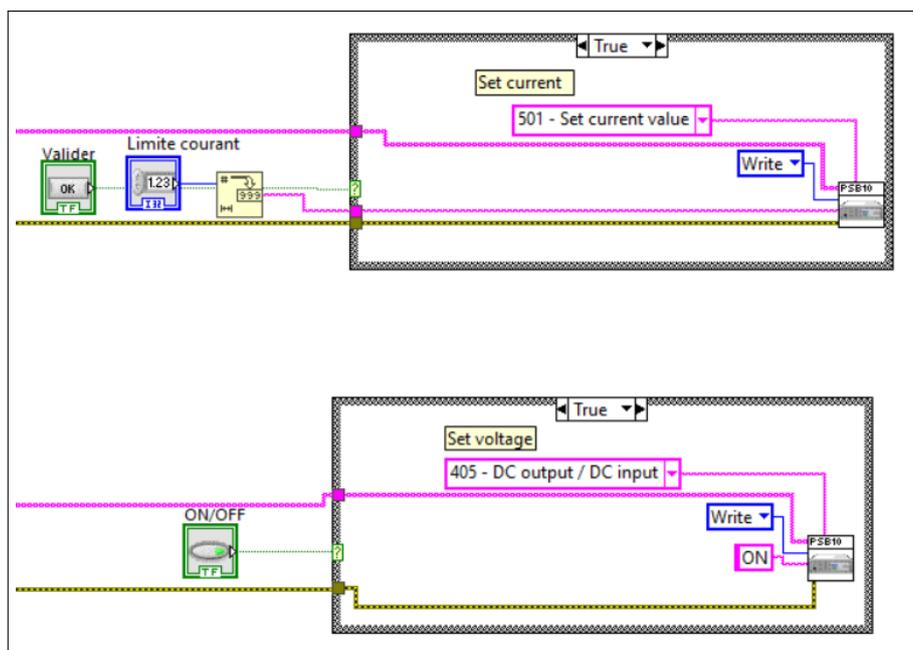


FIGURE 5.15 – Écriture de paramètres

d) IHM

L'IHM contient les informations lues ainsi que les commandes de limitation de couple et d'activation de la sortie DC.

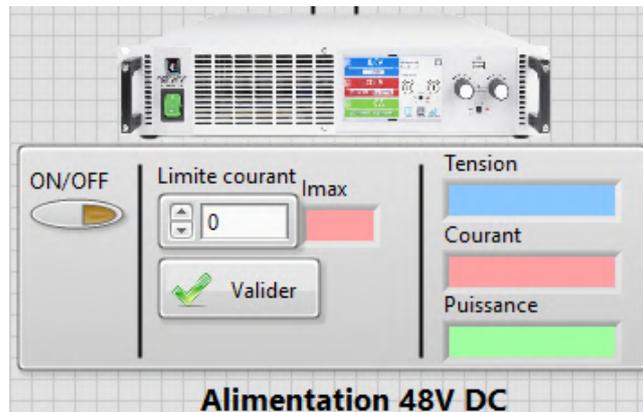


FIGURE 5.16 – IHM partie alimentation

5. IHM

L'interface homme-machine complète est la suivante :

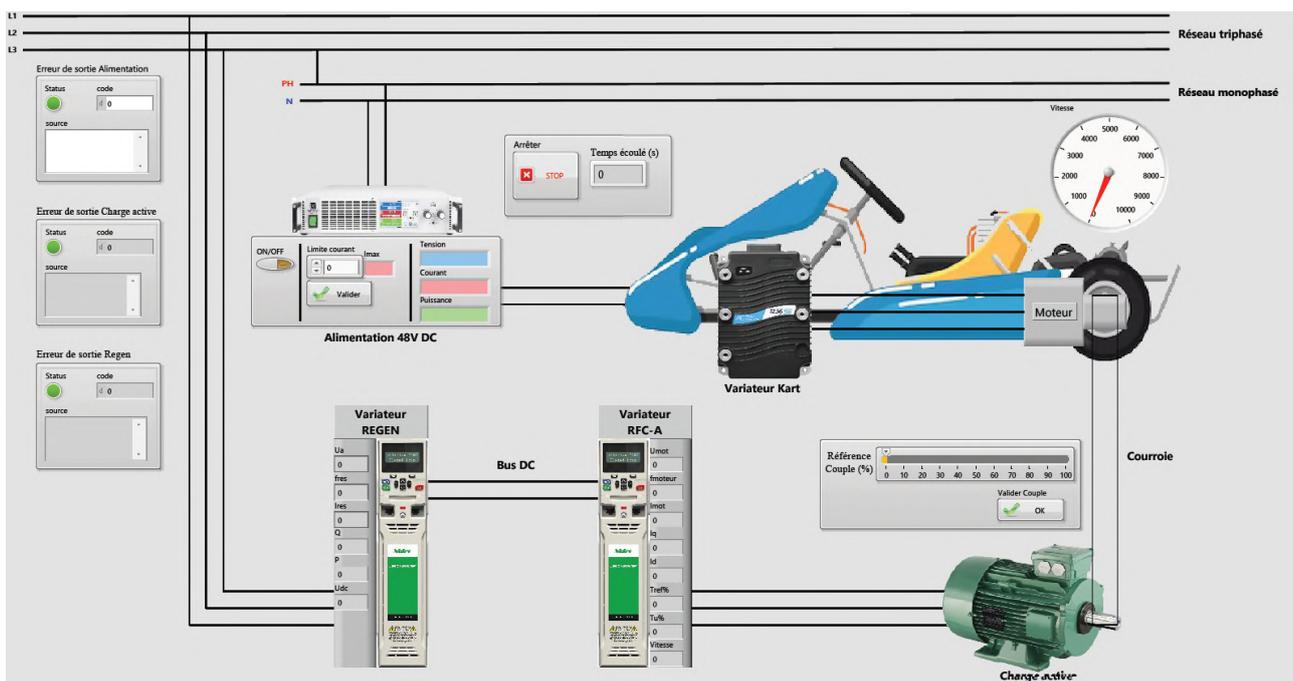


FIGURE 5.17 – Visuel complet de l'IHM

Chapitre 6

Installation et mise en route

L'installation s'est déroulée en deux étapes. Dans un premier temps, nous avons assemblé mécaniquement la structure ainsi que les différents éléments. Dans un second temps, nous nous sommes focalisés sur l'installation et le câblage de l'armoire électrique.

1. Câblage de l'armoire électrique

L'armoire électrique a été câblée en respectant les normes de dimensionnement des câbles. Un code couleur a également été instauré afin de ne pas mélanger les différentes sources, surtout au niveau de la commande. Les couleurs associées sont les suivantes :

Partie du montage	Section	Couleur
Phase de puissance	2.5mm ²	Noir
Neutre de puissance	2.5mm ²	Bleu
Terre	2.5mm ²	Jaune/Vert
Phase de commande	0.75mm ²	Rouge
Neutre de commande	0.75mm ²	Bleu clair
Commande du variateur	0.75mm ²	Gris
24V DC	0.75mm ²	Blanc
0V DC	0.75mm ²	Bleu foncé

TABLE 6.1 – Tableau des sections de fils et couleurs

Les cosses plates et rondes adaptées aux sections ont été utilisées pour chaque connexion. De plus, chacun des fils a été numéroté en correspondance avec les schémas électriques.

1.1 Partie Puissance

a) Sectionneur et disjoncteurs

Le câble en amont du sectionneur possède une fiche 32A afin de se brancher aux prises du plateau technique de l'IUT. Ce câble possède 5 fils d'une section de 4mm^2 afin de supporter 6kW. La terre est connectée à la grille grâce à un bornier situé à côté du sectionneur.



FIGURE 6.1 – Disjoncteurs de l'armoire

Le sectionneur mène ensuite aux différents disjoncteurs, dont celui du moteur, celui de l'alimentation, et les deux disjoncteurs de commande. Ceux-ci ont été placés au niveau le plus haut de l'armoire. Le transformateur 24V AC et l'alimentation 24V DC ont également été placés en haut de l'armoire.

b) Varistances

Les varistances ont été fixées et câblées dans une boîte Plexo. Cette boîte a été fixée à l'intérieur sur la partie gauche de l'armoire, au niveau du haut de la grille.



FIGURE 6.2 – Boîte Plexo contenant les varistances

c) Filtrage et CEM

En aval du disjoncteur moteur, on retrouve le filtre CEM. Celui-ci a été câblé en prenant soin de ne pas faire passer les fils en entrée devant les fils en sortie.

En aval du filtre CEM, on retrouve les deux inductances triphasées et le condensateur. Certains de ces composants ont dû être fixés sur l'armoire à cause de leur poids trop important. Il a donc fallu tirer un fil pour effectuer leur mise à la terre.



FIGURE 6.3 – Circuit de câblage du filtre CEM

d) Variateurs

On retrouve ensuite le variateur REGEN. Celui-ci a dû être câblé sur son entrée non réversible pour son circuit de charge, et sur son entrée réversible en aval de l'inductance REGEN. Ce variateur est câblé au second variateur dit RFC-A (MOTEUR) par le biais du BUS continu. Les deux variateurs ont dû être démontés afin d'accéder aux borniers du BUS continu. La liaison entre les deux variateurs est protégée par un disjoncteur (4Q2).

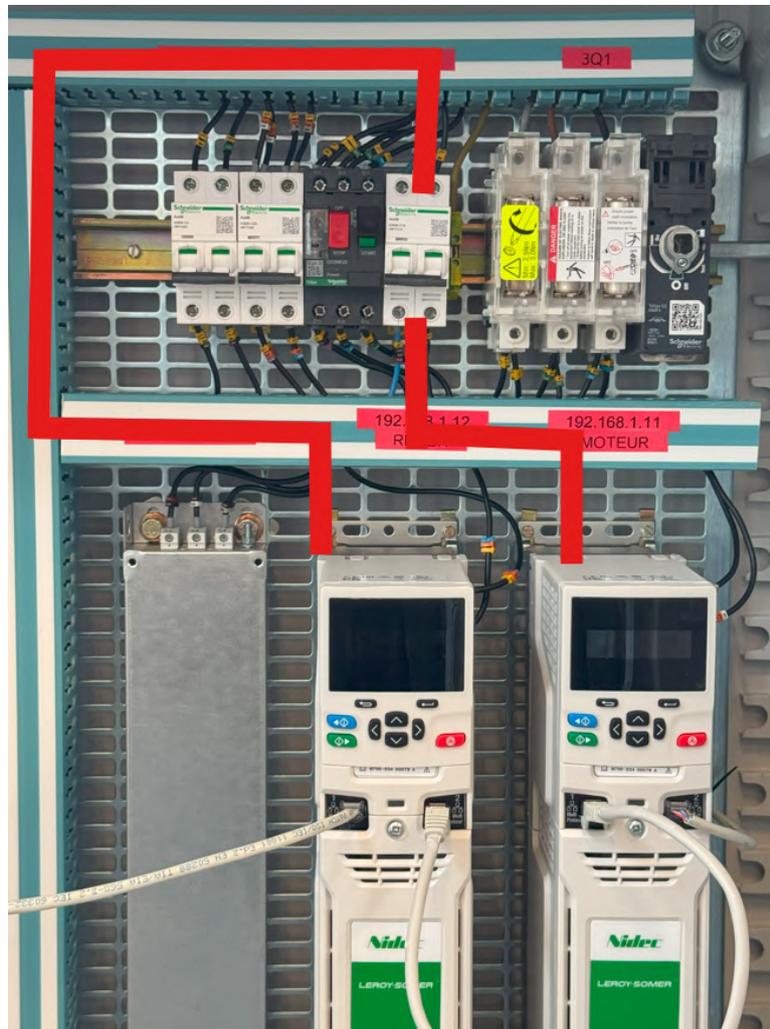


FIGURE 6.4 – Circuit de câblage du BUS continu

1.2 Partie Commande

a) Commande de puissance

La commande de la puissance a été câblée en 24V AC, contrairement à celle des variateurs qui est câblée en 24V DC. Il a donc fallu différencier les couleurs des câbles, rouge et bleu clair en AC et bleu foncé, blanc et gris en DC.

La commande de puissance est composée de 4 contacteurs. Pour des raisons de compatibilité électromagnétique, une certaine attention a été portée afin de ne pas mélanger les contacteurs en amont du filtre CEM avec ceux en aval du filtre. Nous obtenons donc deux rangées de contacteurs, une rangée non polluée (en vert) et une rangée polluée (en rouge). Un bloc additionnel permet l'ajout de contacts manquants sur KM3.

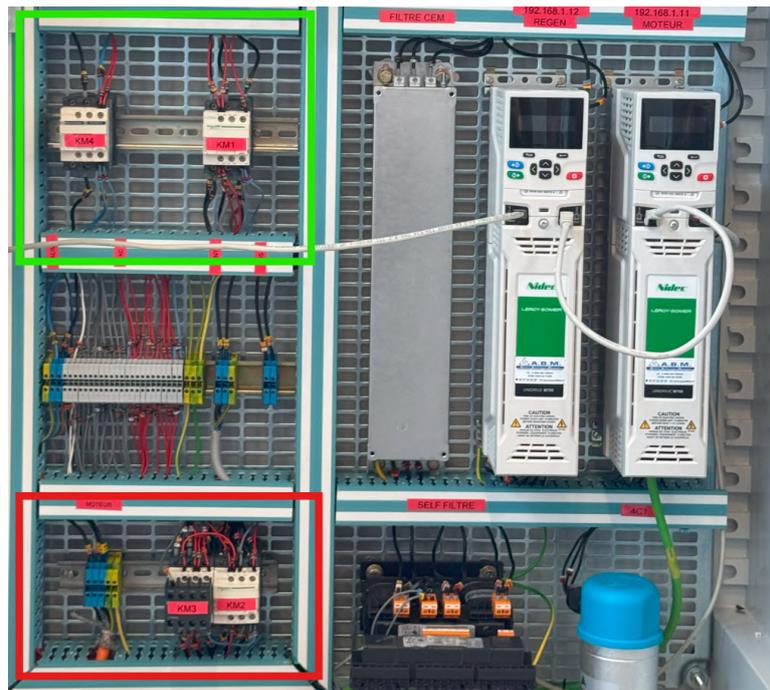


FIGURE 6.5 – Contacteurs

b) Commande des variateurs

L'alimentation des variateurs a été câblée en 24V DC, en bleu foncé et blanc. La commande, en revanche, a intégralement été câblée en gris. La commande des variateurs consiste aux fonctions de déverrouillage et de reset, ainsi que du potentiomètre de consigne de couple.

c) Boîte à boutons

Les deux boîtes à bouton ont été fixées sur le côté gauche de l'armoire. Elles comprennent 3 voyants, 4 boutons poussoirs, 2 sélecteurs, 1 potentiomètre et 1 bouton d'arrêt d'urgence. Des bouchons pour les trous restants ont été imprimés en 3D au FabLab de l'IUT.

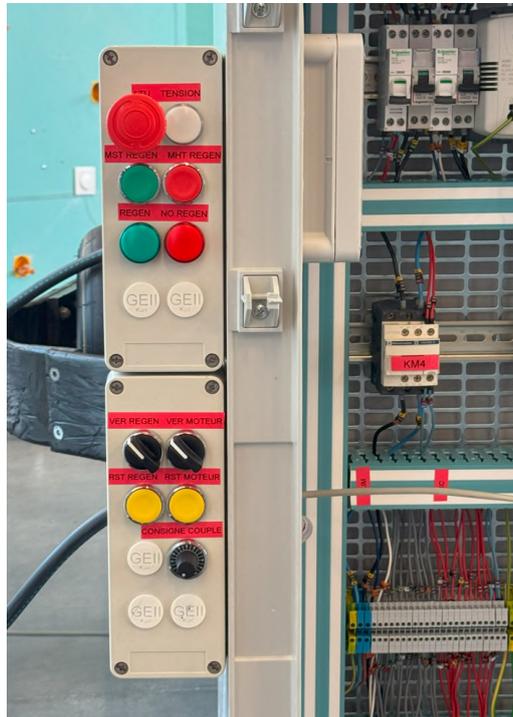


FIGURE 6.6 – Boîtes à boutons

1.3 Kart et moteur

a) Alimentation du kart

L'alimentation continue du kart est câblée par le dessous de l'armoire électrique. Elle arrive sur un bornier sur lequel elle récupère une alimentation monophasée ainsi que sa mise à la terre.

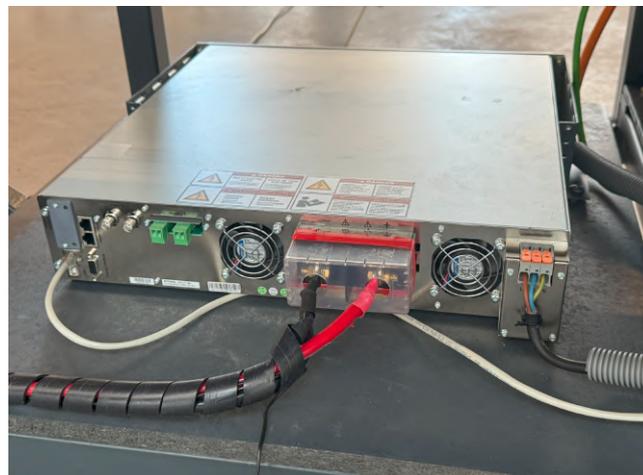


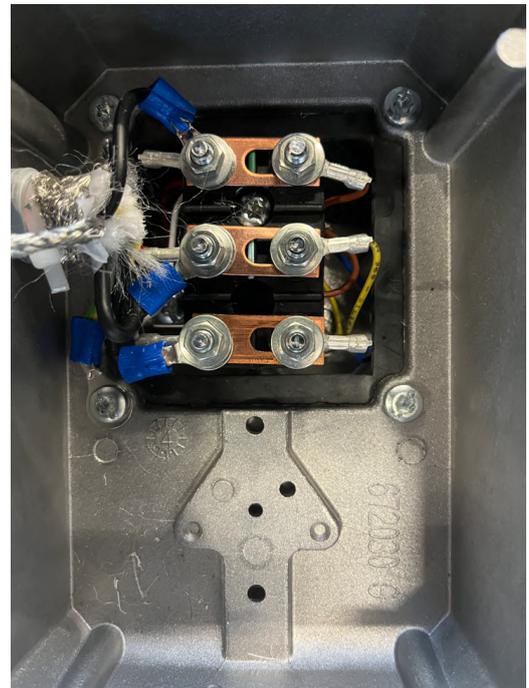
FIGURE 6.7 – Câblage de l'alimentation du Kart

b) Moteur et ventilateur

Le moteur et le ventilateur sont câblés par le dessous de l'armoire électrique, ils arrivent chacun sur leurs borniers respectifs. Un couplage biphasé 400V a été fait au niveau du ventilateur et un couplage triangle 400V a été fait sur le moteur.



(a) Couplage électrique du ventilateur



(b) Couplage électrique du moteur

FIGURE 6.8 – Couplages électriques

c) Codeur et câbles réseaux

Le câble du codeur et les câbles réseaux utilisent des chemins différents des câbles de puissances pour des raisons de compatibilité électromagnétique. Le câble du codeur rejoint le variateur RFC-A. Les appareils possédant des câbles Ethernet peuvent se brancher les uns avec les autres afin de réaliser un réseau en topologie linéaire. On ne nécessite donc pas de Switch.



FIGURE 6.9 – Câblage réseau

2. Assemblage de la structure

2.1 Composants électriques

a) Fixation de l'alimentation

L'alimentation a été fixée à son emplacement sur la planche en bois dédiée. Celle-ci a été peinte pour correspondre à la couleur de la structure (RAL 7016 AR).



FIGURE 6.10 – Alimentation du kart

b) Fixation de l'armoire

Avant le câblage, nous avons utilisé l'armoire comme guide afin de percer les trous des fixations. Son emplacement se situe à l'arrière de la structure. Nous avons également dû percer 6 trous en bas de l'armoire afin de pouvoir faire passer plus tard dans l'armoire : le câble du codeur, le câble de puissance de l'alimentation, le câble réseau de l'alimentation, le câble de puissance du moteur, le câble du ventilateur, et le fil de terre pour la carcasse du kart. Nous avons ensuite pu retirer l'armoire pour câbler les composants électriques. Puis, nous avons enfin fixé l'armoire à la structure.

2.2 Composants mécaniques

a) Fixation du kart

Avant de fixer le kart, nous avons placé les silent blocs aux emplacements prévus. Nous avons ensuite déposé le kart par-dessus et nous l'avons sécurisé à l'aide d'une vis de chaque côté aux deux emplacements prévus.



FIGURE 6.11 – Kart fixé à la structure

b) Fixation du moteur et couplage

Dans un premier temps, le moteur a été fixé à son support, par sa bride. Nous avons ensuite positionné le moteur de manière à aligner verticalement sa poulie à celle de l'arbre du kart. Une fois aligné, nous avons marqué les trous à percer. Nous avons ensuite ajusté la hauteur du moteur en fonction de la contrainte exercée sur la courroie, pour qu'elle soit ni trop ni pas assez tendue.

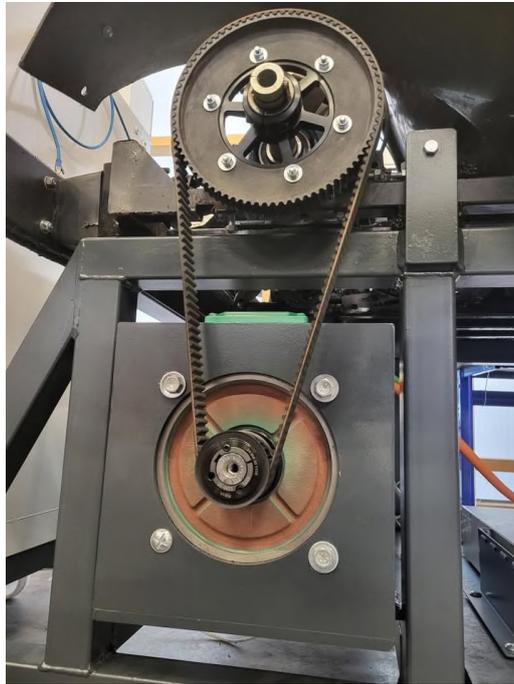


FIGURE 6.12 – Couplage mécanique du moteur et de l'arbre du kart

c) Ajout d'une enceinte de protection

Afin de protéger les personnes en cas de rupture de la courroie, nous avons protégé le couplage par une structure grillagée fixée du moteur à l'arbre.

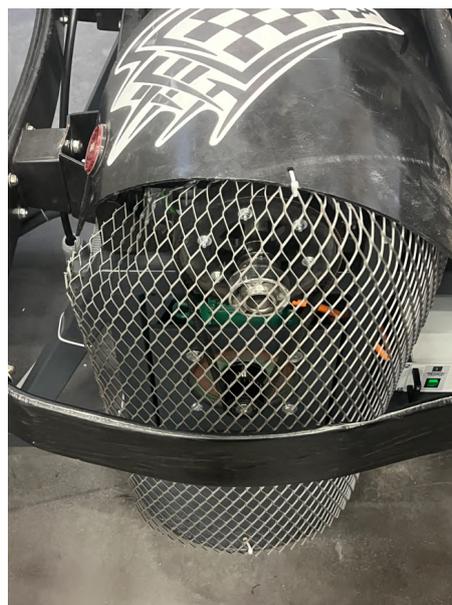
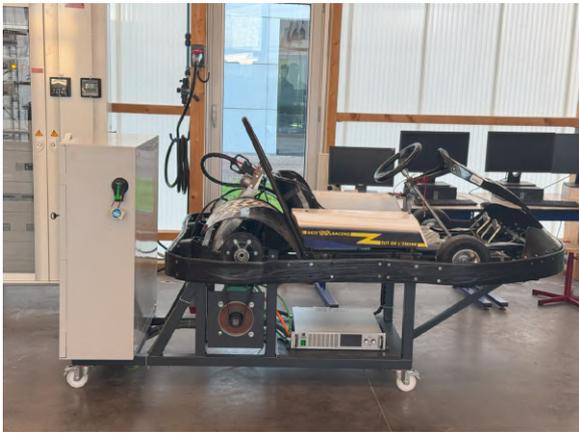


FIGURE 6.13 – Protection du moteur

2.3 Résultat final

Voici quelques photos du visuel final du banc de test :



(a) Vue de profil



(b) Vue 3/4 avant



(c) Vue de dos



(d) Vue de l'armoire

FIGURE 6.14 – Visuel final du banc de test

3. Paramétrage des variateurs avec Nidec Connect

Le logiciel Nidec Connect permet d'accéder en temps réel aux registres des variateurs, de les modifier et de les sauvegarder. Ce logiciel fonctionne par fichiers projets. Nous avons créé un fichier projet pour le banc de test et nous avons connecté nos deux variateurs, comme nous pouvons le voir ci-dessous à gauche :

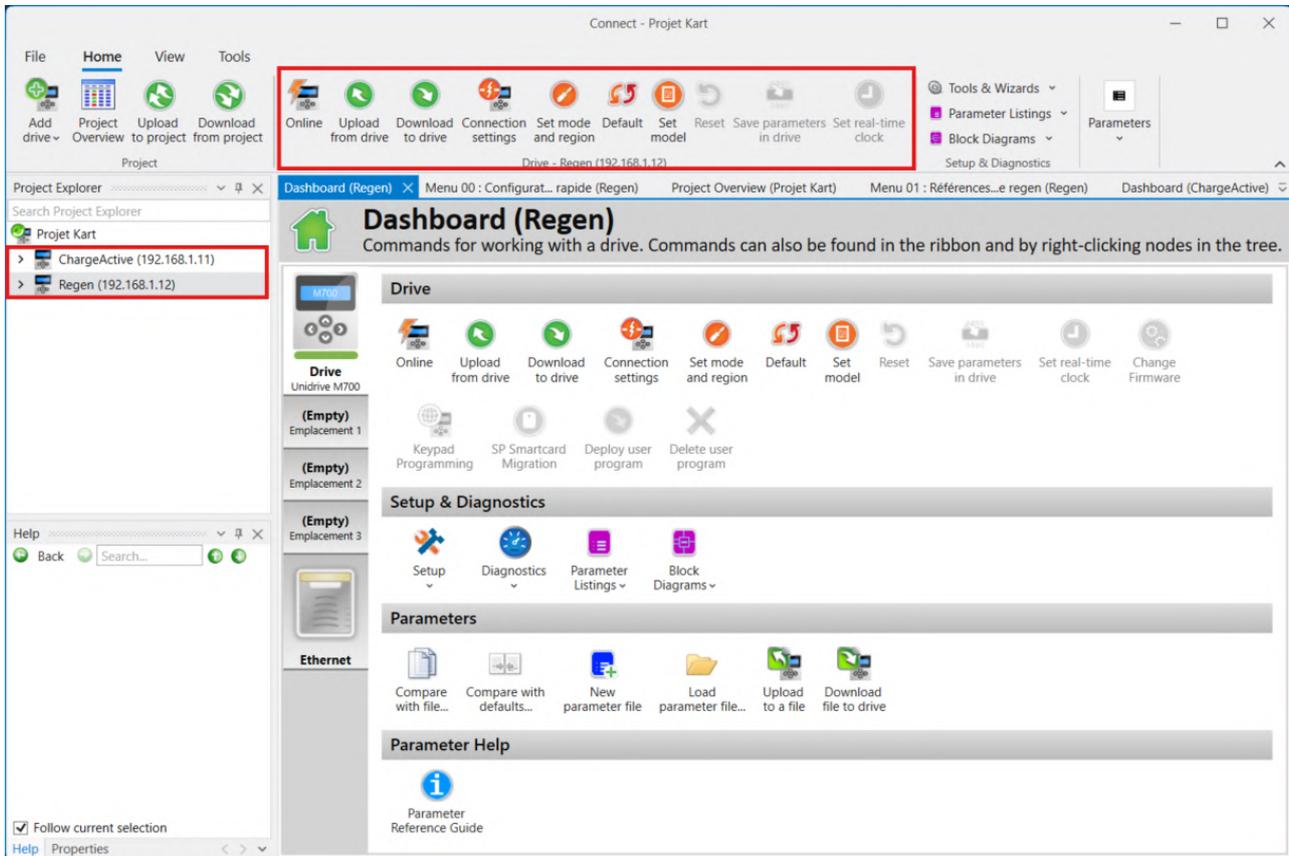


FIGURE 6.15 – Fenêtre de projet Nidec Connect

Le ruban supérieur permet de nombreuses fonctionnalités, les plus importantes sont les suivantes :

- **Online** : Se connecter au variateur et visualiser en direct les paramètres
- **Upload from drive** : Envoyer les paramètres du variateur dans le projet
- **Download from drive** : Envoyer les paramètres du projet dans le variateur
- **Set mode and region** : Choix du mode du variateur et de la fréquence réseau (Regen, RFC-A...)
- **Reset** : Redémarrage du variateur
- **Save parameters in drive** : Sauvegarde des paramètres dans la mémoire non volatile du variateur

3.1 Parameter Listings

La fonction **Parameter Listings** permet de visualiser et modifier n'importe quel paramètre du variateur. Cette fonctionnalité permet d'entrer rapidement les paramètres que nous avons préalablement étudiés.

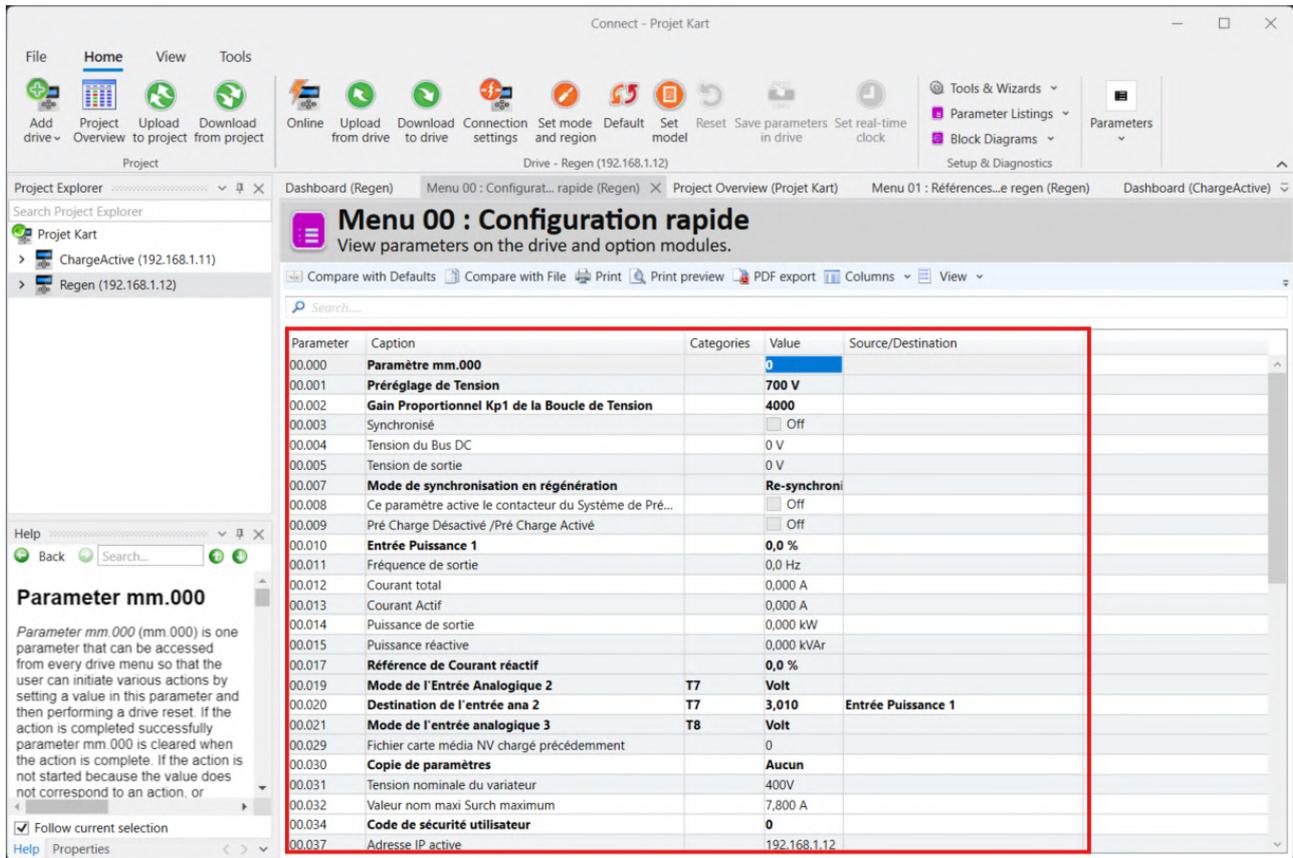


FIGURE 6.16 – Parameter Listings

3.2 Motor and Feedback Setup

La fonction **Motor and Feedback Setup** permet de directement renseigner les informations du moteur, et de pouvoir ajuster les valeurs de l'autocalibrage.

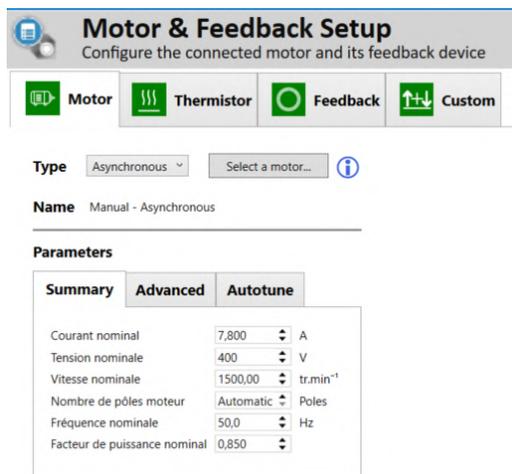


FIGURE 6.17 – Motor and Feedback Setup

3.3 Block Diagrams

Comme la fonction Parameter Listings, la fonction **Block Diagrams** permet de voir en temps réel les paramètres, mais à partir des synoptiques et schémas de fonctionnement. Cette visualisation est intéressante lors de dépannages pour avoir une vision globale du fonctionnement.

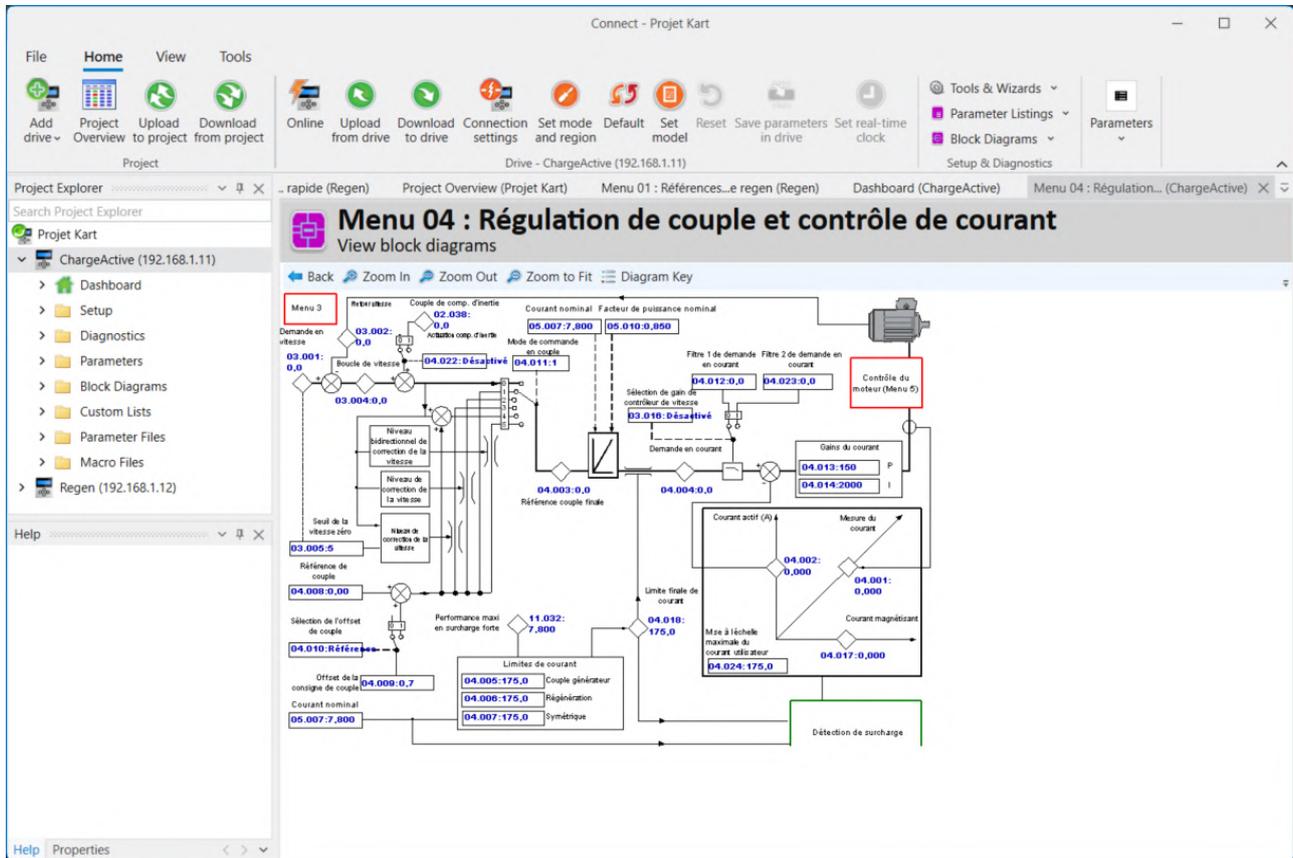


FIGURE 6.18 – Block Diagrams

3.4 Onboard Scope

La fonction **Onboard Scope** permet de visualiser des grandeurs en temps réel et de les afficher sous forme de graphique. Ces données peuvent être ensuite exportées. Cette fonctionnalité est différente du logiciel **CTScope**, celui-ci permet d'observer les courants en temps réel.

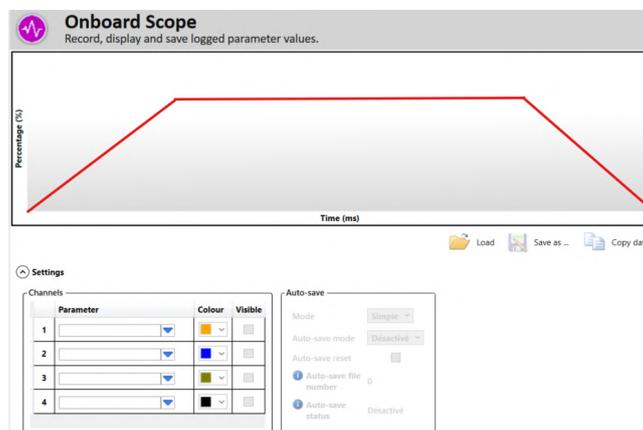


FIGURE 6.19 – Onboard Scope

4. Mise en route

4.1 Procédures

Plusieurs procédures ont été écrites pour la **Mise en route**, mais aussi pour le **Diagnostic de pannes** et l'**Utilisation du banc de test**. Chacunes de ces procédures sont disponibles en annexe.

4.2 Diagnostic de pannes

La mise en route s'accompagne souvent d'un diagnostic de pannes. Malgré une vérification constante du câblage, il est parfois possible qu'il y ait des erreurs. Nous en avons eu plusieurs pour lesquelles nous avons suivi la procédure de diagnostic de pannes.

a) Boite de varistances

Lors de la première mise sous tension du moteur, les fusibles et un disjoncteur ont été déclenchés instantanément lors de l'appui du bouton de mise sous tension variateur.

Les protections déclenchées étaient :

- **3Q1** : Sectionneur et porte-fusible
- **4Q1** : Disjoncteur moteur/varianteurs

Le déclenchement instantané après l'appui du bouton de mise sous tension (fermeture KM1) laisse penser que la panne s'est produite dans la zone en aval de KM1 :

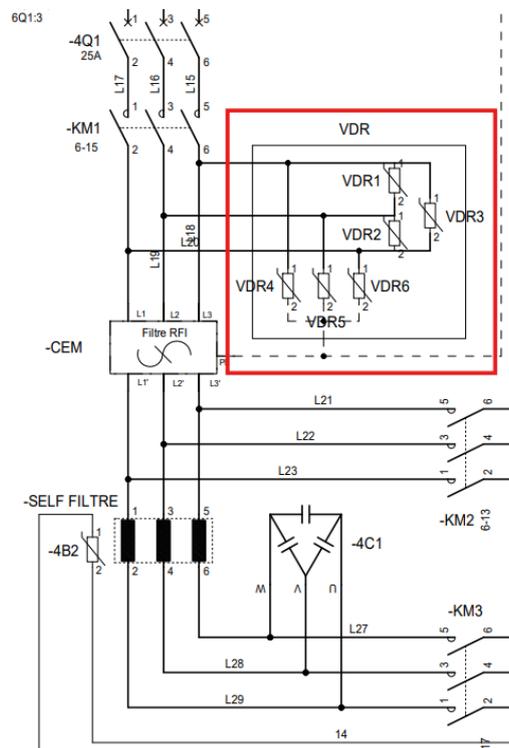


FIGURE 6.20 – Zone de suspicion de la panne 1

Compte tenu du câblage complexe des varistances, celles-ci ont été retirées en premier pour vérification. Après vérification, **le câblage possédait une erreur**. La boîte de varistances a été écartée pour l'instant. Elles présentent uniquement une protection du matériel en cas de surtension réseau et ne sont pas indispensables pour la mise en route.

b) Erreur de câblage du BUS continu

Notre seconde mise sous tension a conduit au déclenchement des fusibles et de deux disjoncteurs lors de l'appui du bouton de mise sous tension variateur.

Les protections déclenchées étaient :

- **3Q1** : Sectionneur et porte-fusible
- **4Q1** : Disjoncteur moteur/variateurs
- **4Q2** : Disjoncteur BUS continu

Compte tenu du fait que le variateur moteur soit verrouillé lors de la mise en route, la **zone de suspicion** de la panne se limite en amont du variateur moteur.

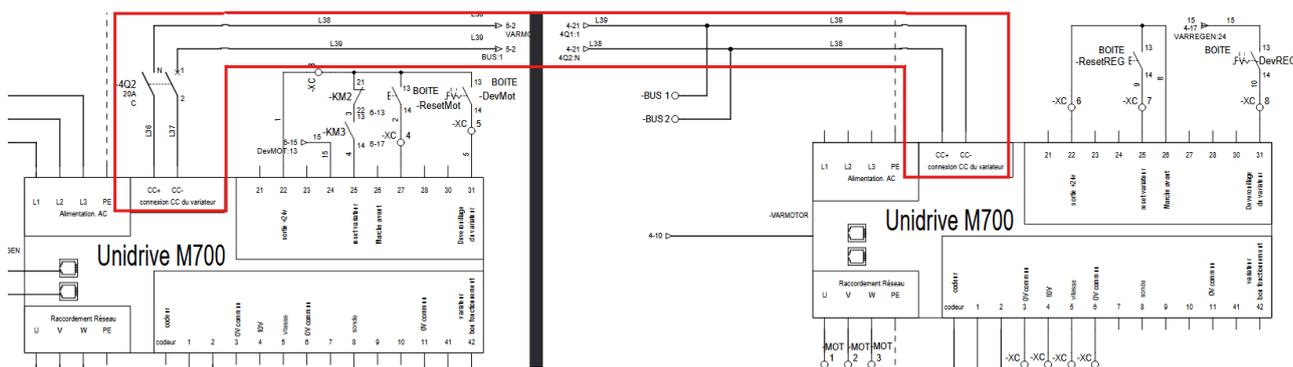


FIGURE 6.21 – Zone de suspicion de la panne 2

Après vérification, un des fils **n'était pas branché à la bonne borne**, mettant en court-circuit le BUS continu entre les deux variateurs. Les bornes ont été inversées

c) Câble du résolveur défectueux

Lors de la mise en route du variateur moteur, celui-ci indiquait "**Mise en sécurité : Codeur (12)**". Ce code indique le court-circuit entre deux bornes du codeur. Le premier réflexe a été de démonter et de vérifier le câble. Bien que le câble provenait d'un fournisseur, il présentait un défaut de court-circuit entre la borne 3 et sa masse. Après démontage, le défaut a été corrigé et le variateur ne donnait plus de code d'erreur.

d) Potentiomètre inversé

Nous avons remarqué que la valeur de référence du potentiomètre indiquait 0% sur le variateur lorsqu'il était à 100% physiquement, et inversement. Nous avons inversé à nouveau le potentiomètre dans le paramétrage des variateurs.

e) Câble Ethernet défectueux

Un des câbles Ethernet était défectueux et a causé l'impossibilité de se connecter aux variateurs. Celui-ci a été serti à nouveau puis fonctionnait correctement.

f) Borniers mal serrés 3Q1

La troisième mise sous tension avait l'air d'apparence correcte, cependant plusieurs problèmes sont apparus :

- Le courant de la phase 1 était nul
- L'allure des tensions était distordue
- Le variateur avait du mal à se synchroniser
- La tension entre les phases L1 et L2 aux bornes du variateur était de **180V**

L'objectif est alors de remonter à partir du variateur afin de trouver la cause de la chute de tension. La zone suspecte est la suivante :

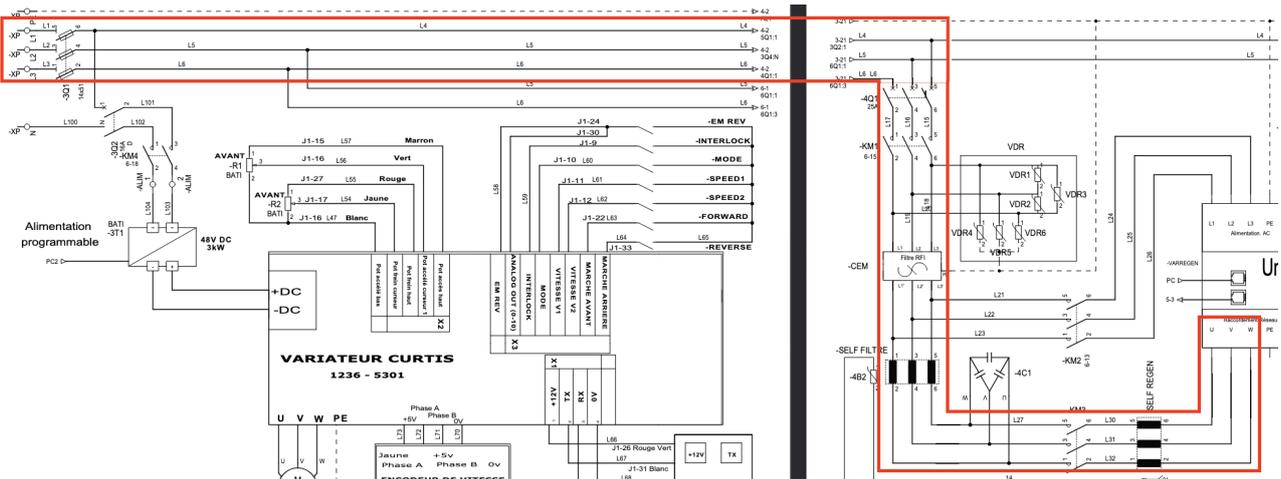


FIGURE 6.22 – Zone de suspicion de la panne 3

La tension en amont de 3Q1 était correcte, la tension en aval de 3Q1 était correcte. Les fusibles ont été retirés et vérifiés, aucun n'était défectueux. Les borniers ont été desserrés et serrés, la panne a alors été résolue. Le bornier où été branché L4 était **mal serré** et la mauvaise connexion causait une **chute de tension**.

4.3 Autocalibrage

Dans un premier temps, nous avons fait l'autocalibrage du moteur en suivant la procédure donnée par le constructeur (Guide de mise en service Unidrive M700 - NIDEC 2023a, page 86). Les paramètres obtenus sont les suivants :

Registre	Description	Valeur
05.010	Facteur de puissance nominal	0.81
05.017	Résistance statorique	0.92 Ω
05.024	Inductance transitoire	8.593 mH
04.013	Gain Kp de la boucle de courant	77
04.014	Gain Ki de la boucle de courant	355

TABLE 6.2 – Paramètres autocalibrés

4.4 Essais et visualisation

Pour les essais suivants, le kart est à son **réglage de vitesse "3"**, et sa puissance d'alimentation est limitée à **3.0kW**, en 48V DC.

a) Échelon de vitesse du kart

En effectuant un échelon de consigne de vitesse, on peut visualiser la réponse du kart :

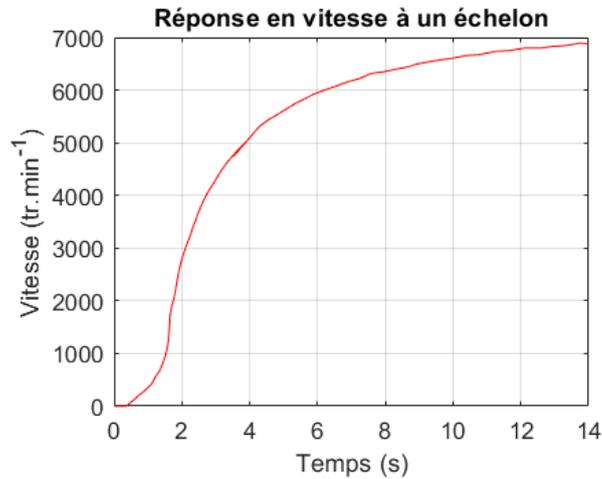


FIGURE 6.23 – Graphique de la vitesse : Échelon

b) Impacts de charge

Nous pouvons visualiser la réponse d'un impact de charge. Dans un premier temps, la consigne de couple est à 15% du couple nominal dans le sens inverse du sens de rotation, puis la consigne est à 100%.

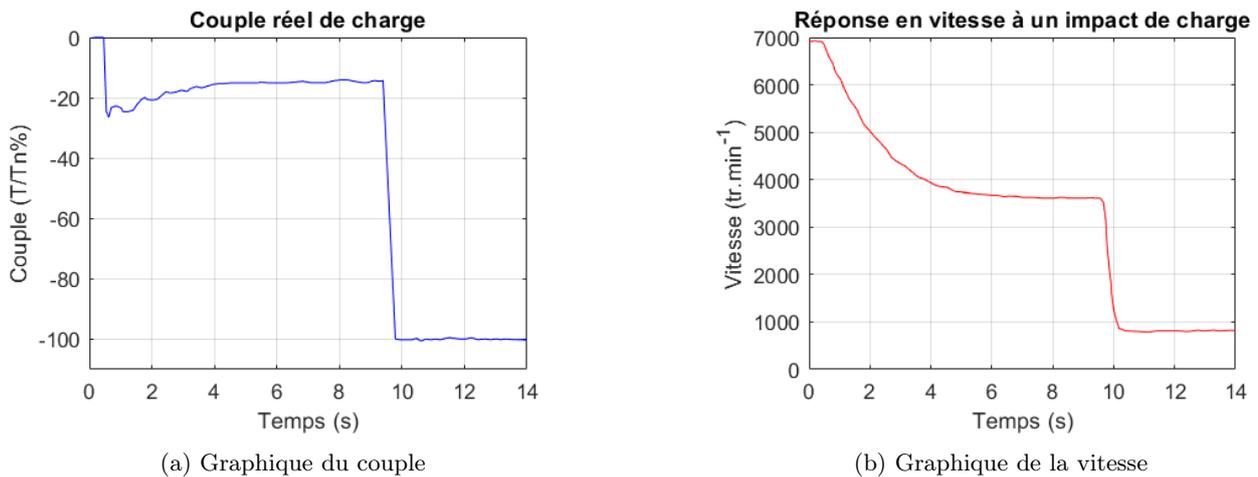


FIGURE 6.24 – Visualisation des impacts de charge

On observe que l'impact de charge influence directement sur la vitesse du kart. En effet, la puissance du kart est fixe. En ajustant le couple, la vitesse se réduit donc. En régime permanent, les vitesses sont les suivantes :

- Pour 0% : **6900 tr/min**
- Pour -15% : **3600 tr/min**
- Pour -100% : **850 tr/min**

Au couple maximal, on obtient une puissance de :

$$\begin{aligned}
 P_{meca} &= 100\% \cdot T_n \cdot \Omega \\
 P_{meca} &= 100\% \cdot 14.4 \cdot 850 \cdot 60 \cdot 2\pi \\
 P_{meca} &= 1282\text{W}
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

La puissance rejetée sur le réseau par le variateur REGEN est de 1,05 kW. Calculons le rendement.

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{P_{meca}}{P_{REGEN}} \\
 \eta &= \frac{1050\text{W}}{1282\text{W}} \\
 \eta &= 80\%
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

Cette valeur nous permet de valider le fonctionnement de la partie régénérative du banc de test.

4.5 Caractéristique Couple/Vitesse

En traçant la caractéristique de couple/vitesse, on obtient les courbes suivantes :

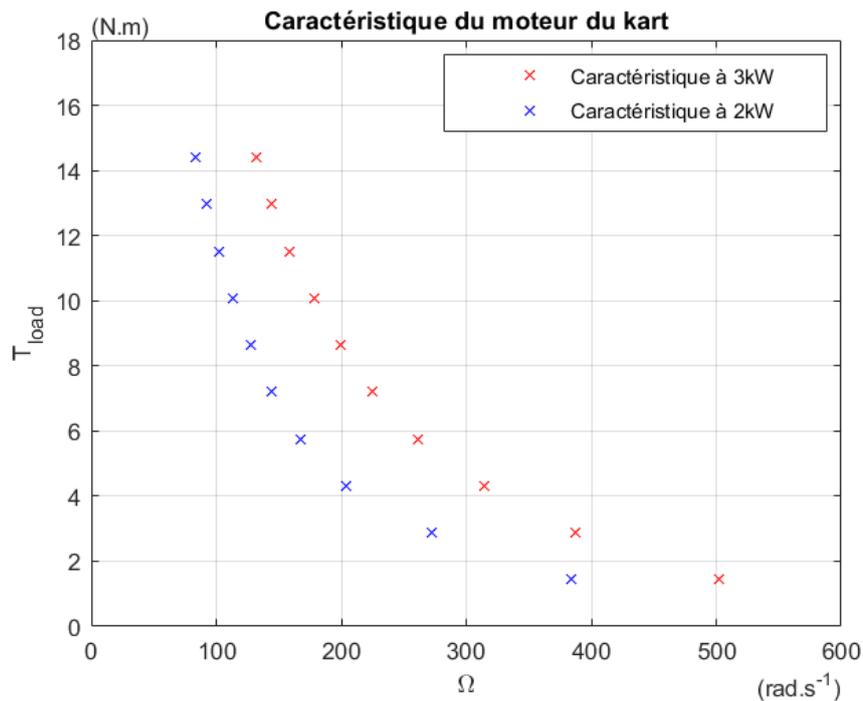


FIGURE 6.25 – Caractéristique couple/vitesse

On observe qu'en réduisant la limite de puissance de l'alimentation du kart, la caractéristique se translate vers la gauche.

Chapitre 7

Synthèse

1. Auto-évaluation

1.1 Objectifs atteints

Les objectifs atteints ont été les suivants :

- **CAO/DAO de la structure mécanique** : La structure a été conçue dans les temps pour sa commande et n'a pas présenté de problèmes majeurs lors de l'installation
- **Conception des schémas électriques** : Les schémas électriques ont été conçus dans les temps, et bien que révisés plusieurs fois, ils ont permis la commande complète du matériel
- **Assemblage de la structure** : L'assemblage de la structure s'est terminé dans les temps impartis et a permis la mise en route à la date du calendrier prévisionnel
- **Câblage de l'armoire** : Le câblage de l'armoire s'est terminé dans les temps impartis et a permis la mise en route à la date du calendrier prévisionnel
- **Paramétrage des variateurs** : Le paramétrage des variateurs s'est terminé dans les temps impartis et a permis la mise en route à la date du calendrier prévisionnel
- **Développement de l'IHM sur LabVIEW, pilotage et supervision** : Une première version de d'IHM a été développée avec une supervision des variateurs et de l'alimentation, et un simple pilotage du couple
- **Écriture des procédures de mise en route, de dépannage et d'utilisation** : Les procédures ont été livrées lors de la mise en route avec le client
- **Fonctionnement du kart électrique** : Le kart électrique fonctionne à une puissance de 3kW avec l'alimentation
- **Fonctionnement des variateurs et du moteur** : Le moteur fonctionne à une puissance de 3kW et la puissance est correctement injectée dans le réseau avec un THD < 2%

1.2 Objectifs non atteints et conséquences

Les objectifs non atteints ont été les suivants :

- **Étude du variateur du kart** : Par manque de temps, nous n'avons pas pu étudier le variateur du kart afin de le piloter à distance. Cela engendre que seule la pédale d'accélérateur permet de régler la vitesse du kart. Un opérateur doit s'en charger lors de l'utilisation du banc de test.
- **Simulation de scénarios par l'IHM** : Nous avons pu définir la loi de commande pour la simulation de scénarios de route, cependant, par manque de temps, nous avons seulement pu programmer une commande manuelle du couple avec l'IHM. Cette fonctionnalité n'empêche pas le fonctionnement de la maquette et pourra être ajoutée ultérieurement.

1.3 Difficultés et contraintes rencontrées

a) Erreurs de câblage

Trois erreurs de câblage ont eu lieu et ont déclenché trois pannes différentes lors de la mise en route. Malgré le fait que les pannes aient été réglées, cela nous a pris du temps et le déclenchement de deux jeux de fusibles. Nous avons perdu deux jours sur ces pannes, quatre ont été prévus pour les problèmes de mise en route.

b) Commande de matériel

La commande de matériel a été une difficulté majeure durant ce projet. Chaque étude de conception devait être réalisée pour une commande avant la clôture du budget 2024 de l'IUT, soit avant novembre. Cela a posé quelques problèmes, notamment lorsque du matériel imprévu devait être impérativement commandé lors de l'installation. Certaines entreprises ont accepté de nous faire crédit en attendant l'ouverture du budget 2025.

Une partie du matériel n'a pas pu être commandé, c'est le cas du sectionneur tetra. Nous pouvions seulement avoir un sectionneur triphasé, cela implique que nous ne sectionnons pas le neutre dans le circuit. Nous avons dû contourner le problème avec une solution temporaire, en ajoutant un contacteur pour sectionner le neutre. L'objectif de cette solution est de pouvoir faire la mise en route à la date du 7 janvier, en attendant l'ouverture des commandes pour 2025.

c) Contrainte de temps

Bien que les temps et ressources aient été constamment organisés, la contrainte de temps a été un des problèmes majeurs lors de ce projet. L'objectif était de respecter la date de mise en route de début janvier. Pour cela, nous avons dû réorienter nos ressources et nous n'avons pas pu réaliser certains des objectifs, notamment l'étude du variateur du kart. Le planning réel final est le suivant :

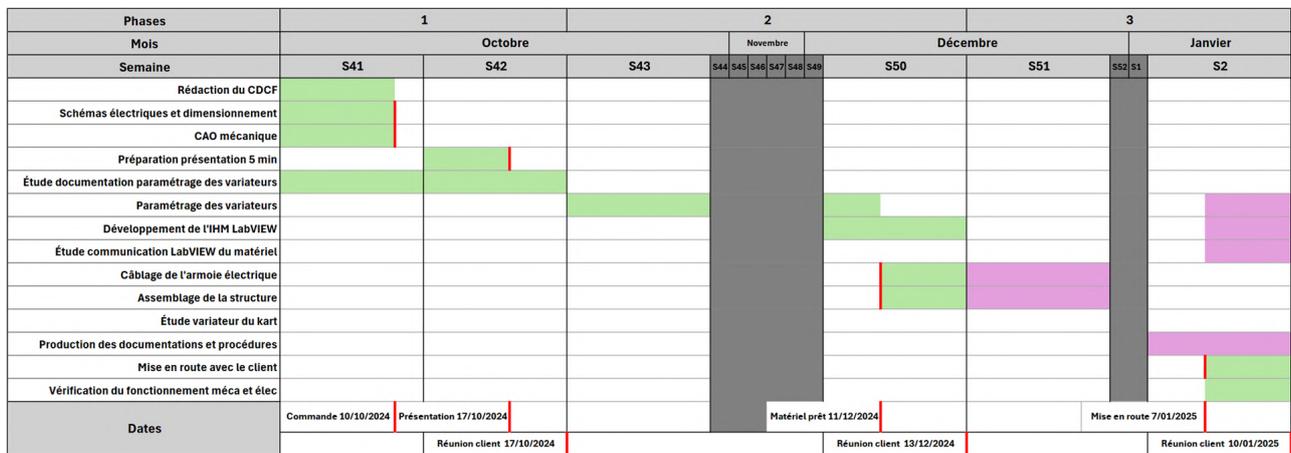


FIGURE 7.1 – Planning réel

On observe que l'installation et le câblage de l'armoire ont pris plus de temps que prévu. Les autres tâches ont été reportées ou supprimées (en violet). D'autres tâches comme la rédaction du rapport ou des procédures ont dû être faites sur nos temps personnels afin de respecter les délais universitaires.

1.4 Axes d'amélioration

a) Commande du variateur du Kart

Le variateur du Kart communique en communication série. La commande de celui-ci est alors plus complexe et nécessite d'intégrer un système supplémentaire pour communiquer avec un PC. Cette commande pourrait permettre de donner des consignes de vitesse et de couple à partir de l'IHM. Il serait également possible de faire varier les paramètres de régulation du moteur, et donc de pouvoir expérimenter avec différents paramètres. Cela pourrait apporter une valeur supplémentaire à notre banc didactique dans la formation des étudiants.

b) Contrôle qualité

Une étude plus approfondie des performances et de la qualité du livrable aurait pu être faite. La contrainte de temps nous a obligé à s'orienter vers d'autres priorités. L'objectif serait de quantifier les performances du système, à savoir le rendement du circuit de charge active, le rendement du kart, le THD au réseau...

c) Simulation de scénarios mécaniques

La simulation de scénarios mécaniques permettrait d'appliquer un couple variant en fonction des forces choisies, comme la force résistante d'une pente fictive. Cela permettrait de mieux illustrer la mécanique des véhicules électriques et d'apporter une valeur supplémentaire à notre banc didactique dans la formation des étudiants.

d) IHM

Plusieurs solutions d'IHM sont possibles, notre objectif étant de simplement fournir une IHM fonctionnelle avec les commandes de base. L'IHM pourrait être améliorée afin de fournir par exemple les courbes des grandeurs sur un onglet différent, ainsi qu'une interface de commande pour le variateur du kart.

e) Sectionneur Tetra

Comme nous l'avons expliqué précédemment, nous ne disposons que d'un sectionneur triphasé. Celui-ci ne sectionne pas le neutre et met en danger les appareils et les personnes dans le cas d'un retour de courant par le neutre. Notre solution temporaire consistant à utiliser un contacteur de puissance fonctionne, mais n'est pas réglementaire. Un sectionneur tétra devra être utilisé afin de pouvoir sectionner le neutre.

f) Varistances

La boîte de varistance posait des problèmes lors de la mise en route, celle-ci a été écartée. En effet, notre montage manuel n'était pas parfait et pouvait comporter des erreurs de câblage. L'idéal serait d'utiliser le bornier spécifique pour les varistances. Celui-ci fait partie de la gamme **Emerson Varistor Unit**.



FIGURE 7.2 – Bornier de Varistances

g) Couplage du moteur

Après discussions avec des professionnels, ceux-ci nous ont recommandé d'utiliser une courroie en Poly V au lieu d'une courroie crantée. En effet, la courroie en Poly V permet d'appliquer un couple uniforme et elle est utilisée notamment sur les bancs d'essais. La courroie crantée apporte des variations de couple à chaque cran et diminue l'efficacité de la régulation de couple.

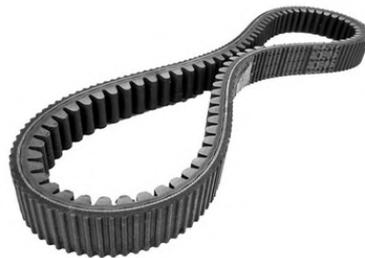


FIGURE 7.3 – Courroie en Poly V FIGURE 7.4 – Courroie crantée

FIGURE 7.5 – Différents types de courroie

2. Bilan financier du projet

Le bilan financier du projet permet de déterminer la possible rentabilité, et si elle existe, le temps de rentabilité du produit. Sur ce bilan, nous nous baserons sur des hypothèses de salaires et de charges d'une entreprise fictive produisant cette machine.

2.1 Coût de production matériel

Le coût matériel est calculé à partir de l'ensemble des factures de matériel acheté.

Matériel acheté	Total HT (€)	Total TTC (€)
Kart électrique	8333.33	10 000.00
Alimentation	5 658.00	6 789.00
Moteur, Variateurs, filtres et câbles	6 932.00	8 318.40
Composants électriques	2 318.33	2 782.00
Structure	1 325.75	1 590.90
Châssis	222.71	267.25
Poulie et courroie	59.81	71.77
Total	24 849.93	29 819.32

TABLE 7.1 – Tableau du bilan financier du matériel

2.2 Charges de production

Le coût des charges de production est estimé sur un coût salarial de trois techniciens et sur les charges d'exploitation, sur une durée d'une semaine, soit le temps de production d'une machine.

Catégorie	Détail	Coût (€)
Coût salarial (3 techniciens)		
Salaire hebdomadaire brut	$\frac{1734}{4.33} \approx 400.46$ €/technicien	1 201.38
Charges patronales (25%)	1201.38×0.25	300.35
Total coût salarial		1 501.73
Charges d'exploitation		
Loyer hebdomadaire	$\frac{500}{4.33}$ (loyer mensuel : 500 €)	115.45
Électricité hebdomadaire	$\frac{200}{4.33}$ (électricité mensuelle : 200 €)	46.17
Autres charges hebdomadaires	$\frac{100}{4.33}$ (autres charges mensuelles : 100 €)	23.09
Total charges fixes		184.71
Coût total des charges de production		1 686.44

TABLE 7.2 – Tableau des coûts hebdomadaires pour trois techniciens et charges fixes

2.3 Coût d'étude

Le coût d'étude est estimé sur un coût salarial de deux ingénieurs et sur les charges d'exploitation, sur une durée d'un mois, soit le temps de l'étude.

Catégorie	Détail	Coût (€)
Coût salarial (2 ingénieurs)		
Salaire mensuel brut (2 ingénieurs)	2500×2	5 000.00
Charges patronales (25%)	5000.00×0.25	1 250.00
Total coût salarial		6 250.00
Charges d'exploitation (1 mois)		
Loyer mensuel	500 €	500,00
Électricité mensuelle	200 €	200.00
Autres charges mensuelles	100 €	100.00
Total charges fixes		800.00
Coût total pour l'étude (1 mois)		7 050.00

TABLE 7.3 – Tableau des coûts pour une étude menée par deux ingénieurs sur un mois

2.4 Retour sur investissement

Coût unitaire HT :

$$C_u = 24849.93 + 1686.44 = 26\,536.37 \text{ €} \quad (7.1)$$

Coût unitaire TTC :

$$C_{uTTC} = C_u \times 1.20 \quad (7.2)$$

Prix de vente TTC :

$$P_{uTTC} = P_u \times 1.20 \quad (7.3)$$

Bénéfice unitaire HT :

$$B_u = P_u - C_u \quad (7.4)$$

Seuil de rentabilité (en unités) : Le nombre d'unités nécessaires pour couvrir le coût de l'étude :

$$N = \frac{\text{Coût de l'étude}}{B_u} \quad (7.5)$$

Prix HT (€)	Prix TTC (€)	Bénéfice unitaire HT (€)	Seuil de Rentabilité
28 000	33 600	$28000 - 26536.37 = 1463.63$	$\frac{7050}{1463.63} \approx 4.82$
30 000	36 000	$30000 - 26536.37 = 3463.63$	$\frac{7050}{3463.63} \approx 2.04$
32 000	38 400	$32000 - 26536.37 = 5463.63$	$\frac{7050}{5463.63} \approx 1.29$
34 000	40 800	$34000 - 26536.37 = 7463.63$	$\frac{7050}{7463.63} \approx 0.94$

TABLE 7.4 – Calcul du seuil de rentabilité pour différents prix de vente

On aperçoit que pour un prix HT de 28 000€(marge de 1 463.63€), environ 5 ventes sont nécessaires avant retour sur investissement. Pour un prix HT de 34 000€, moins d'une unité est nécessaire pour couvrir le coût de l'étude. Ces résultats montrent l'importance d'ajuster le prix de vente en fonction des études de marché.

3. Conclusion

Ce projet avait pour objectif de réaliser une maquette pédagogique de banc de test pour un kart électrique. Après 210 heures de travail en groupe de cinq personnes, les résultats obtenus montrent que l'essentiel des objectifs ont été atteints dans les délais attendus.

Dans l'ensemble, ce projet est un succès. L'étude mécanique et l'IHM ont été particulièrement réussies grâce à une collaboration efficace au sein de l'équipe. Toutefois, certaines difficultés nous ont ralenti, notamment des problèmes de câblage lors de la mise en route. Néanmoins, nous avons su appliquer efficacement les procédures de dépannage et résoudre ces problèmes.

Les objectifs principaux du projet ont été réalisés dans les délais impartis, c'est-à-dire avant le 10 janvier 2025. La gestion des ressources a été correctement estimée dans le calendrier prévisionnel, bien que certains ajustements aient dû être effectués pour respecter les délais de livraison. Des solutions ont également été mises en œuvre pour pallier le manque de certains éléments du matériel. En revanche, d'autres objectifs secondaires tels que l'étude du variateur du kart n'ont pas été réalisés afin de concentrer nos efforts sur les objectifs prioritaires.

L'absence de réalisation de certains objectifs secondaires, tels que l'étude du variateur du kart, ne représente pas un problème majeur. Du point de vue du client, cet aspect n'était pas une priorité. Par ailleurs, cette maquette offre une base solide pour que de futurs étudiants puissent approfondir ce sujet et y apporter des solutions. Enfin, de nombreux axes d'amélioration restent possibles pour perfectionner cette maquette et enrichir son potentiel pédagogique.

Ce projet a été d'une grande richesse en termes de compétences techniques. L'aspect pluridisciplinaire nous a permis de développer des compétences techniques dans les domaines suivants ; la mécanique, les variateurs Nidec Unidrive, les convertisseurs électriques, la machine asynchrone en génératrice, la régulation, la commande vectorielle de couple, la réinjection d'énergie, la distribution et les protections électriques, la compatibilité électromagnétique, la supervision et les réseaux, le protocole Modbus TCP, la création d'IHM sur LabVIEW. On y retrouve de nombreux apprentissages critiques et composantes essentielles permettant la validation des compétences du BUT GEII, c'est-à-dire "Concevoir", "Vérifier", "Installer" et "Maintenir". Ce projet nous servira évidemment comme base de ressource pour notre portfolio de fin de formation.

Ce projet nous a permis également de développer de nombreuses compétences transversales et professionnelles, telles que : Le travail d'équipe, la répartition du travail, la communication, l'étude du besoin, la gestion de projet, la prévision et la gestion du temps, l'étude financière et l'étude de rentabilité. Ces compétences sont nécessaires en milieu professionnel. Leur développement au cours de ce projet démontre l'aspect professionnalisant de notre formation.

En conclusion, ce projet a été une expérience enrichissante. Il a permis d'atteindre les objectifs principaux pour nos clients tout mobilisant et développant nos compétences techniques et transversales. Nous espérons que notre travail servira de base solide pour les étudiants à venir. Notre prochaine étape sera de participer au concours "Mon projet en 5 min" du club EEA.

Liste des abréviations

AC : Alternating Current
BUT : Bachelor Universitaire de Technologie
CAO : Conception Assistée par Ordinateur
CEM : Compatibilité Électromagnétique
CDCE : Cahier Des Charges Fonctionnel
DC : Direct Current
DAO : Dessin Assisté par Ordinateur
EEA : Électronique, Électrotechnique et Automatique
EME : Électricité et Maitrise de l'Énergie
FEM : Force Électromotrice
FOC : Field Oriented Control
FoS : Factor of Safety
GEII : Génie Électrique et Informatique Industrielle
IHM : Interface Homme-Machine
IUT : Institut Universitaire de Technologie
IP : Internet Protocol
ID : Identification
MAS : Machine/Moteur Asynchrone
MAS : Moteur ASynchrone
MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion
MST : Mise Sous Tension
MHT : Mise Hors Tension
NF : Norme Française
OL : Open Loop
REGEN : Régénératif
RFC-A : Rotor Flux Control - Asynchronous
RFC-S : Rotor Flux Control - Synchronous
SVPWM : Sinus Pulse Width Modulation
SPWM : Sinusoidal Pulse Width Modulation
TCP : Transmission Control Protocol
THD : Total Harmonic Distortion
TT : Terre-Terre

Table des figures

Chapitre 1 : Introduction et cahier des charges	13
1.1 Diagramme des moyens de communication	16
1.2 Synoptique du système	18
1.3 Planning prévisionnel	19
Chapitre 2 : Étude mécanique du banc de test	20
2.1 Prises des cotes du châssis du kart	20
2.2 Dessin de la structure vue de coté	21
2.3 Dessin de la structure vue du dessus	21
2.4 Vues de coupe des dessins des lamelles de support du kart	21
2.5 Représentation de la longueur d'une courroie entre deux poulies	22
2.6 Poulie de test	22
2.7 Illustration des marges permises par la conception mécanique du banc	23
2.8 Vue arrière de l'armoire électrique	24
2.9 Alimentation EA-PSB 10000 2U	24
2.10 Dessin industriel du banc en vue isométrique	25
2.11 Vue conceptuelle des supports pour les silentblochs du kart	25
2.12 Représentation 3D de la structure mécanique	26
2.13 Vue trois quarts avant de la modélisation 3D	26
2.14 Vue trois quarts arrière de la modélisation 3D	26
2.15 Tableau des tolérances d'ajustements (ISO 286-1)	27
2.16 Dessins et côtes du support pour la charge active	28
2.17 Aperçu du support moteur en dessin et dans la structure	28
2.18 Simulation mécanique logicielle des forces appliquées à la structure	30
2.19 Rendu de la simulation mécanique logicielle du support pour MAS	30
Chapitre 3 : Étude électrique du banc de test	33
3.1 Schéma électrique de principe	33
3.2 Exemple de caractéristique de couple pour $N_{stator} = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$	35
3.3 Exemple de caractéristique de couple pour $N_{rotor} = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$	35
3.4 Schéma de principe du pont à diodes	39
3.5 Formes d'ondes de tension d'un pont à diodes	40
3.6 Structure onduleur triphasé	41
3.7 Modulation pleine onde	43
3.8 Formes d'ondes MLI sinus	46
3.9 Principe de la SVPWM	47
3.10 Motif MLI barycentrique	48

3.11	Forme d'onde SVPWN	49
3.12	Intervalle de modulation de la SVPWM	49
3.13	Signal à injecter pour obtenir une composante homopolaire	50
3.14	Schéma d'un convertisseur AC/AC	51
3.15	Schéma de deux convertisseurs AC/AC en tête-bêche	51
3.16	Diagramme des puissances	53
3.17	FFT pour une MLI bipolaire à 5kHz	54
3.18	Schéma de filtrage en sortie du variateur REGEN	55
3.19	Filtre RFI/CEM	56
3.20	Raccordement du blindage (DANFOSS 2019)	56
3.21	Structure d'alimentation par batteries 12V	57
3.22	Plaque signalétique	58
3.23	Régime de neutre TT	60
3.24	Tableau d'immunité des disjoncteurs de type SI - Schneider Electric	60
3.25	Courbes des disjoncteurs type B, C et D	61
3.26	Caractéristique d'une varistance	63
3.27	Tableau de dimensionnement des varistances	63
3.28	Tableau de dimensionnement du filtrage	64
 Chapitre 4 : Convertisseurs/Variateurs Unidrive M700		67
4.1	Schéma commande REGEN	68
4.2	Schéma commande RFC-A	69
4.3	Schéma entrée analogique 1	69
4.4	Connecteur du codeur	70
4.5	Tableau des connexions pour le connecteur du codeur	70
4.6	Synoptique de démarrage des variateurs mode manuel et IHM	75
 Chapitre 5 : IHM LabVIEW		76
5.1	Sélection du type de données en fonction du bit 14	77
5.2	Paramètre de retour de vitesse du variateur	77
5.3	Plan d'adressage réseau	78
5.4	Connexion et déconnexion d'un variateur en Modbus	79
5.5	Lecture de paramètres	79
5.6	Structure de continue - Écriture de la consigne de couple	80
5.7	Connexion et désactivation du potentiomètre physique	80
5.8	Déconnexion et activation du potentiomètre physique	80
5.9	Entrées/Sorties du sous-vi Modbus M700 Read	81
5.10	Lecture des paramètres avec le sous-vi	81
5.11	IHM partie variateurs	81
5.12	Sous-vi d'initialisation de connexion	82
5.13	Sous-vi d'initialisation de déconnexion	82
5.14	Lecture de paramètres	83
5.15	Écriture de paramètres	83
5.16	IHM partie alimentation	84
5.17	Visuel complet de l'IHM	84
 Chapitre 6 : Installation et mise en route		85

6.1	Disjoncteurs de l'armoire	86
6.2	Boite Plexo contenant les varistances	86
6.3	Circuit de câblage du filtre CEM	87
6.4	Circuit de câblage du BUS continu	88
6.5	Contacteurs	89
6.6	Boites à boutons	90
6.7	Câblage de l'alimentation du Kart	90
6.8	Couplages électriques	91
6.9	Câblage réseau	91
6.10	Alimentation du kart	92
6.11	Kart fixé à la structure	92
6.12	Couplage mécanique du moteur et de l'arbre du kart	93
6.13	Protection du moteur	93
6.14	Visuel final du banc de test	94
6.15	Fenêtre de projet Nidec Connect	95
6.16	Parameter Listingss	96
6.17	Motor and Feedback Setup	96
6.18	Block Diagrams	97
6.19	Onboard Scope	97
6.20	Zone de suspicion de la panne 1	98
6.21	Zone de suspicion de la panne 2	99
6.22	Zone de suspicion de la panne 3	100
6.23	Graphique de la vitesse : Échelon	101
6.24	Visualisation des impacts de charge	101
6.25	Caractéristique couple/vitesse	102
Chapitre 7 : Synthèse		103
7.1	Planning réel	104
7.2	Bornier de Varistances	105
7.3	Courroie en Poly V	106
7.4	Courroie crantée	106
7.5	Différents types de courroie	106

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Introduction et cahier des charges	13
1.1 Tableau de la répartition des tâches	17
1.2 Calendrier des dates importantes	19
Chapitre 3 : Étude électrique du banc de test	33
3.1 États des diodes et tensions dans un pont triphasé	39
3.2 Tableau des tensions en fonction des variables d'état de l'onduleur	42
3.3 Tableau des tensions dans le repère de Clarke en fonction des variables d'état de l'onduleur	47
3.4 Comparaison des différentes techniques de modulation	50
Chapitre 4 : Convertisseurs/Variateurs Unidrive M700	67
4.1 Paramètres réseau	71
4.2 Paramètres généraux du variateur REGEN	71
4.3 Paramètres de mode du variateur RFC-A	71
4.4 Paramètres du moteur	72
4.5 Paramètres du codeur	72
4.6 Paramètres des rampes	72
4.7 Paramètres du potentiomètre	72
4.8 Paramètres de supervision du variateur RFC-A	73
4.9 Paramètres de supervision du variateur REGEN	73
4.10 Paramètres de commande en écriture	73
Chapitre 6 : Installation et mise en route	85
6.1 Tableau des sections de fils et couleurs	85
6.2 Paramètres autocalibrés	100
Chapitre 7 : Synthèse	103
7.1 Tableau du bilan financier du matériel	107
7.2 Tableau des coûts hebdomadaires pour trois techniciens et charges fixes	107
7.3 Tableau des coûts pour une étude menée par deux ingénieurs sur un mois	108
7.4 Calcul du seuil de rentabilité pour différents prix de vente	108

Liste des annexes

Annexe 1 : Schémas électriques au format PDF

Annexe 2 : Fichier de projet SEE Electrical

Annexe 3 : Procédures d'utilisation, de dépannage et de mise de route au format PDF

Annexe 4 : Dossier de configuration du variateur Nidec Connect

Annexe 5 : Dossier complet LABView de projet de l'IHM avec fichier exécutable compilé du projet

Bibliographie

- [Bou17] Moussa BOUSEHABA. *Space Vector PWM*. fr-FR. Juill. 2017. URL : <https://spacevectorpwm.wordpress.com/> (visité le 05/04/2024).
- [BSS88] H.W. van der BROECK, H.-C. SKUDELNY et G.V. STANKE. « Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors ». In : *IEEE Transactions on Industry Applications* 24.1 (jan. 1988), p. 142-150. ISSN : 1939-9367. DOI : 10.1109/28.87265. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/87265> (visité le 05/04/2024).
- [Col19] Danielle COLLINS. *What is Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) ?* 2019. URL : <https://www.motioncontroltips.com/what-is-space-vector-pulse-width-modulation-svpwm/> (visité le 05/04/2024).
- [Dan19] DANFOSS. *Facts Worth Knowing about AC Drives*. 2019. URL : <https://assets.danfoss.com/documents/latest/242341/AV446558536912en-000101.pdf>.
- [Del00] J. DELABALLE. *La CEM : la compatibilité électromagnétique*. Cahier technique. Schneider Electric, 2000. URL : <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/3398/3398-ct149.pdf>.
- [Ele25a] Schneider ELECTRIC. *Schéma TT - Principe*. 2025. URL : https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Sch%C3%A9ma_TT_-_Principe.
- [Ele25b] Schneider ELECTRIC. *Sensibilité des différentiels (DDR) aux perturbations*. 2025. URL : [https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Sensibilit%C3%A9_des_diff%C3%A9rentiels_\(DDR\)_aux_perturbations](https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Sensibilit%C3%A9_des_diff%C3%A9rentiels_(DDR)_aux_perturbations).
- [imp21a] IMPERIX. *Space Vector Modulation (SVM) - imperix power electronics*. en-US. Août 2021. URL : <https://imperix.com/doc/implementation/space-vector-modulation> (visité le 05/04/2024).
- [imp21b] IMPERIX. *SV-PWM - Space vector PWM - imperix software documentation*. en-US. Avr. 2021. URL : <https://imperix.com/doc/software/sv-pwm> (visité le 05/04/2024).
- [imp21c] IMPERIX. *SVPWM vs SPWM modulation techniques - imperix power electronics*. en-US. Août 2021. URL : <https://imperix.com/doc/implementation/svpwm-vs-spwm-modulation-techniques> (visité le 05/04/2024).
- [Lep02] François LEPLUS. *T.P. d'électrotechnique par simulation : préparation, manipulation et solution avec PSIMDEMO*. fre. Technosup. E'lectrotechnique. OCLC : 60171422. Paris : Ellipses, 2002. ISBN : 9782729813628.
- [MUR95] Ned MOHAN, Tore M. UNDELAND et William P. ROBBINS. *Power electronics : converters, applications, and design*. 2nd ed. New York : Wiley, 1995. ISBN : 9780471584087.
- [Mon19] Lycée Jean MONNET. *Wiki du BTS Electrotechnique - SA - Puissance déformante*. 2019. URL : <http://sa.ge.sts.free.fr/Wiki/pmwiki.php?n=SA.PerPuissanceDeformante> (visité le 23/10/2024).
- [Mor01] R. MOREL. *Techniques de coupure des disjoncteurs BT*. Cahier technique 154. Schneider Electric, 2001. URL : <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/3428/3428-ct154.pdf>.

- [Nid23a] NIDEC. *Guide Mise en service*. 2023. URL : [https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/notices_pdf/Unidrive%20M700-M701%20and%20M702%20Control%20UG%20French_\(0478-0534\).pdf](https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/notices_pdf/Unidrive%20M700-M701%20and%20M702%20Control%20UG%20French_(0478-0534).pdf).
- [Nid23b] NIDEC. *Parameter Reference Guide*. 2023. URL : [https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/notices_pdf/Unidrive%20M700%20PRG%20\(Regeneration\).pdf](https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/notices_pdf/Unidrive%20M700%20PRG%20(Regeneration).pdf).
- [Nid23c] NIDEC. *Regen Design Guide*. 2023. URL : <https://www.nidec-netherlands.nl/media/2104-frequentieregelaars-unid%20rive-m-regen-design-guide-en-iss3-0478-0366-03.pdf>.
- [Nid23d] NIDEC. *RFC-A Parameter Design Guide*. 2023. URL : [https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/notices_pdf/Unidrive%20M700%20PRG%20\(RFC-A\).pdf](https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/notices_pdf/Unidrive%20M700%20PRG%20(RFC-A).pdf).
- [PM14] Nicolas PATIN et Bernard MULTON. *Électronique de puissance pour l'industrie et les transports*. fre. Collection Génie électrique. London : ISTE éditions, 2014. ISBN : 9781784050610.
- [Rou24] Jean-Marc ROUSSEL. *Modélisation et commande vectorielle moteur asynchrone - YouTube*. 2024. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=DFlkCxgtzDA> (visité le 08/12/2024).
- [Ség06] Guy SÉGUIER. *Les convertisseurs de l'électronique de puissance*. fre. 3e éd. revue et augmentée. Paris : Éd. Tec et doc, 2006. ISBN : 9782743009120.
- [SN06] Guy SÉGUIER et Francis NOTELET. *Électrotechnique industrielle*. fre. 3e éd. Paris Londres New York : Éd. Tec & doc, 2006. ISBN : 9782743007911.
- [Swi17] SWITCHCRAFT. *Space Vector PWM Intro*. en-US. Mai 2017. URL : <https://www.switchcraft.org/learning/2017/3/15/space-vector-pwm-intro> (visité le 05/04/2024).
- [Uni03] Lille UNIV. *Onduleur de Tension*. 2003. URL : https://12ep.univ-lille.fr/pagesperso/francois/files/ITEEM%20%20equi2%2003%20onduleur_imp.pdf.
- [Vas98] Peter VAS. *Sensorless vector and direct torque control*. Monographs in electrical and electronic engineering 42. Oxford ; New York : Oxford University Press, 1998. ISBN : 9780198564652.
- [Wik22] WIKIPÉDIA. *Commande vectorielle*. fr. Page Version ID : 197509486. Oct. 2022. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Commande_vectorielle&oldid=197509486 (visité le 08/12/2024).
- [Wik23] WIKIPÉDIA. *Méthode du vecteur spatial*. fr. Page Version ID : 208976400. Oct. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%A9thode_du_vecteur_spatial&oldid=208976400 (visité le 05/04/2024).
- [ZQ19] Bo ZHANG et Dongyuan QIU. *m-Mode SVPWM Technique for Power Converters*. en. CPSS Power Electronics Series. Singapore : Springer Singapore, 2019. ISBN : 9789811313813. DOI : 10.1007/978-981-13-1382-0. URL : <http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-1382-0> (visité le 05/04/2024).