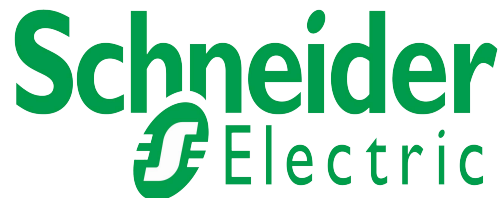


RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département d'Électrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études

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

Puissance Mécanique à la Demande : Une Alternative Économique
pour des Systèmes de Pompage Efficaces

MILIANI Khayreddine & SIDHOUM Mohamed Anis

Sous la direction de **Dr. BENACHOUAR Ali** ENSTA & **Ing. YOUNSI Abdelghani** Schneider Electric, présenté et soutenu
publiquement le (25 /06/2025)

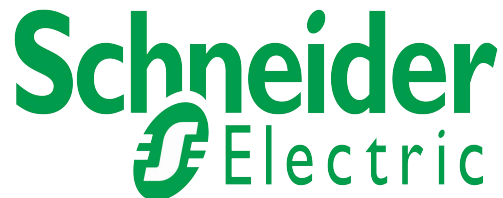
Composition du jury :

Président :	Pr. Lazhari NEZLI	ENP
Promoteur :	Dr. Ali BENACHOUR	ENSTA
Promoteur :	M. Abdelghani YOUNSI	Schneider Electric
Examineur :	Pr. Mohand-Oulhadj MAHMOUDI	ENP
Examineur :	Dr. Rabie BELKACEMI	ENP

ENP 2025

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département d'Électrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études

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

Puissance Mécanique à la Demande : Une Alternative Économique
pour des Systèmes de Pompage Efficaces

MILIANI Khayreddine & SIDHOUM Mohamed Anis

Sous la direction de **Dr. BENACHOUAR Ali** ENSTA & **Ing. YOUNSI Abdelghani** Schneider Electric, présenté et soutenu
publiquement le (25 /06/2025)

Composition du jury :

Président :	Pr. Lazhari NEZLI	ENP
Promoteur :	Dr. Ali BENACHOUR	ENSTA
Promoteur :	M. Abdelghani YOUNSI	Schneider Electric
Examineur :	Pr. Mohand-Oulhadj MAHMOUDI	ENP
Examineur :	Dr. Rabie BELKACEMI	ENP

ENP 2025

ملخص:

في أنظمة ضخّ السوائل، غالبًا ما تكون المضخات أكبر من الحاجة الفعلية؛ إذ تشير الدراسات إلى أن 80% من المضخات الصناعية في أوروبا تعمل بعيدًا عن كفاءتها المثلى. ومن الناحية النظرية، يمكن أن يؤدي خفض سرعة الدوران بنسبة 20% فقط إلى تقليل استهلاك الطاقة الهيدروليكية بنسبة تصل إلى 49%. وبدلاً من طريقة التحكم التقليدية باستخدام الصمامات، غير الفعّالة، يهدف هذا العمل إلى إثبات تفوّق نظام التحكم بالسرعة المتغيرة، من خلال محاكاة باستخدام برنامج MATLAB/Simulink. ويعتمد هذا النهج، الذي يُطلق عليه "الطاقة الميكانيكية حسب الطلب"، على ضبط أداء المضخة بدقة وفقًا للاحتياج الفعلي، مما يقلّل من استهلاك الكهرباء ويوفّر ما يصل إلى 40% من تكاليف التشغيل مقارنةً بالأنظمة التقليدية. بعد مرحلة المحاكاة، سيتم تطوير نموذج أولي واختباره على دائرة هيدروليكية حقيقية ضمن مشروع تصميم نظام ضخ شمسي متكامل، مخصّص للمناطق المعزولة، بهدف تقليل تكلفة تركيب الألواح الكهروضوئية للمزارعين في المناطق الصحراوية. وإذا تكأّل المشروع بالنجاح، فقد يُسهم في تقليل عدد الألواح المطلوبة بنسبة تصل إلى 40%، مما يجعل الطاقة الشمسية أكثر تيسيرًا وكفاءة. إضافةً إلى ذلك، يمكن للنموذج المقترح أن يُشكّل أداة تعليمية قيّمة للتطبيقات العملية في أقسام الهندسة الكهربائية أو الهيدروليكية في الجامعات.

الكلمات المفتاحية: المردودية – اقتصاد الطاقة – مغير السرعة – المضخة – الصمام – الطاقة الشمسية – الألواح الشمسية – التوتر المستمر

Abstract

Our final year project addresses the widespread issue of oversized pumps in fluid systems, which leads to significant energy waste due to inefficient "throttling control." We aim to demonstrate the superiority of "VSD control" (Variable Speed Drive), or "Mechanical Power on Demand," through Matlab/Simulink simulations. This approach precisely matches pump performance to demand, optimizing electricity use and potentially cutting operating costs by up to 40%. We'll also build and test a physical prototype. This work is vital for creating a comprehensive solar pumping system for isolated areas in Algeria, with the goal of reducing photovoltaic panel costs for Saharan farmers by potentially decreasing required panels by around 40%. Our developed model will also serve as a valuable teaching tool for universities.

Keywords : Efficiency – Energy savings – Variable speed drive – Pump – Valve – Solar energy – Solar panels – DC Voltage.

Résumé

Notre projet de fin d'études aborde le problème courant des pompes surdimensionnées dans les systèmes hydrauliques, qui fonctionnent souvent loin de leur efficacité optimale. Face à la méthode inefficace de régulation par vanne, notre travail vise à prouver, par simulation sous Matlab/Simulink, la supériorité du contrôle par variateur de vitesse. Cette approche adapte précisément les performances de la pompe aux besoins réels, optimisant la consommation électrique et permettant des économies allant jusqu'à 40%. Après simulation, nous construirons et testerons un prototype réel. Ce projet s'inscrit dans la création d'un système de pompage solaire complet pour les zones isolées, avec l'objectif de réduire le coût des panneaux photovoltaïques d'environ 40% pour les agriculteurs. De plus, notre maquette servira de support didactique pour les universités.

Mots clés : Rendement – Économie d'énergie – Variateur de vitesse – Pompe – Vanne – Énergie solaire – Panneaux solaires – Tension continue.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon binôme MILIANI Khayreddine pour son sérieux, sa rigueur et son engagement tout au long de ce projet. Ce fut un réel plaisir de collaborer avec lui, et son implication a largement contribué à la réussite de notre travail.

J'exprime toute ma reconnaissance à Dr BENACHOUR Ali et M. YOUNSI Abdelghani, nos encadreurs, pour leur accompagnement constant, leurs conseils avisés et leur disponibilité. Leur encadrement a été un soutien précieux, tant sur le plan scientifique qu'humain.

Mes remerciements vont également à l'ensemble de mes enseignants de l'École Nationale Polytechnique, pour la qualité de leur enseignement, leur exigence et leur dévouement, qui ont façonné mon parcours académique et personnel.

Je remercie l'équipe de Schneider Electric pour leur accueil chaleureux et leurs précieux conseils tout au long de notre stage.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers ma famille, en particulier mon père, ma mère, ma sœur, ma grand-mère et mon frère Kamel, pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements et leur amour constants, qui m'ont accompagné dans les moments difficiles comme dans les moments de joie.

Je souhaite également remercier une personne très chère à mon cœur, pour son soutien constant, sa patience et ses encouragements précieux tout au long de ce projet. Sa présence m'a apporté force et sérénité dans les moments les plus intenses de ce parcours.

Enfin, je remercie mes amis les plus proches pour leur présence, leur écoute et leur soutien tout au long de ce parcours.

SIDHOUM Mohamed Anis.

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à mon binôme Anis pour son sérieux, sa rigueur et son engagement exemplaire tout au long de ce projet. Travailler à ses côtés a été un véritable plaisir, et son implication a grandement contribué à la réussite de notre travail commun.

Je tiens également à remercier sincèrement Dr. Ali Benachour et M. Abdelghani Younsi, nos encadreurs, pour leur accompagnement constant, leurs conseils avisés et leur grande disponibilité. Leur encadrement attentif et bienveillant a été un appui essentiel, tant sur le plan scientifique que personnel.

Ma reconnaissance s'étend à l'ensemble de mes enseignants de l'**École Nationale Polytechnique**, pour la qualité de leur enseignement, leur exigence, et leur dévouement, qui ont profondément marqué mon parcours académique. Je remercie tout particulièrement M. Salim Benziada, chef du département d'hydraulique, pour son aide précieuse et sa collaboration bienveillante.

Mes remerciements vont également à l'équipe de **Schneider Electric**, notamment M. kamel BEDRANE et Mme Ghizlene Affane, ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont accompagnés de près ou de loin à travers leurs conseils techniques, leurs orientations et leur accueil chaleureux tout au long de notre stage.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma famille, en particulier à mon père, ma mère, ma tante maternelle, mes sœurs et mes frères, pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements constants et leur amour indéfectible, présents à chaque étape, dans les épreuves comme dans les réussites.

Enfin, une pensée particulière à mes amis les plus proches, et notamment ZiXx, pour leur présence fidèle, leur écoute et leur soutien continu. Leur amitié a été un pilier précieux tout au long de ce parcours.

MILIANI Khayreddine.

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des acronymes

Introduction générale	15
1 Etat de l'art des Varriateurs de vitesse et des Démarreurs Progressifs	17
1.1 Introduction	17
1.2 Les principales familles des convertisseurs AC-AC	18
1.2.1 Conversion d'amplitude	18
1.2.1.1 Gradateur	18
1.2.1.2 Auto-transformateur	19
1.2.2 Conversion d'amplitude et de fréquence	19
1.2.2.1 Convertisseurs Direct	19
1.2.2.2 Convertisseurs indirects	22
1.3 Etat de l'art des Variateurs de vitesse	24
1.3.1 Différentes méthodes de commande des MAS intégrées dans les varia- teurs de vitesse	25
1.3.1.1 Commande scalaire à flux constant de la MAS ($\frac{V_s}{f_s} = \text{Cte}$) .	25
1.3.1.2 Commande par flux orienté (FOC - Field Oriented Control)	27
1.3.1.3 Commande Directe du Couple (DTC - Direct Torque Control)	28
1.3.2 Modes de freinage par variateur de vitesse	29
1.3.2.1 Avantages du freinage par variateur de vitesse pour les mo- teurs asynchrones	30

1.3.2.2	Inconvénients du freinage par variateur de vitesse	30
1.3.3	Innovation dans le domaine des variateurs de vitesse	30
1.4	Présentation de l'entreprise Schneider Electric	32
1.5	La gamme Altivar Process ATV600/900 des variateurs de vitesse de Schneider Electric	33
1.6	État de l'art des démarreurs progressifs	35
1.6.1	Innovation dans le domaine des démarreurs progressifs	36
1.6.2	La gamme Altivar Soft Starter ATS480/48 des Démarreurs progressifs de Schneider Electric	38
1.7	Conclusion	38
2	Utilisation des variateurs de vitesse dans les applications de pompage	40
2.1	Introduction	40
2.2	Pompes centrifuges et lois d'affinité	41
2.3	Importance des VSDs dans le pompage	42
2.4	Modélisation dynamique d'une pompe centrifuge à vitesse variable et constante utilisant MATLAB / SIMULINK	44
2.4.1	Modèles mathématiques	45
2.4.1.1	Source de tension triphasée	45
2.4.1.2	Moteur Asynchrone triphasé	45
2.4.1.3	Variateur de vitesse	46
2.4.1.4	Circuit hydraulique :	48
2.5	Simulation et résultats obtenus	53
2.5.1	Interprétations et résultats	57
2.6	Conclusion	59
3	Conception des schémas électriques, réalisation de la maquette et du cir- cuit hydraulique	61
3.1	Introduction	61
3.2	Définition du logiciel EPLAN Electric P8	62
3.3	Elaboration des schémas électriques	62
3.3.1	Interface et étapes à suivre pour la réalisation des schémas électriques sur EPLAN Electric	62

3.4	Conception et réalisation de la maquette	70
3.4.1	Composants utilisés dans la maquette	70
3.4.1.1	Partie de puissance	70
3.4.1.2	Partie de commande	71
3.4.2	Démarche de conception et d'assemblage de la maquette	72
3.5	Réalisation du circuit hydraulique	76
3.6	Caractéristiques de la machine utilisée dans la partie pratique	79
3.7	Essais expérimentaux et validation des résultats	79
3.8	Conclusion	84

4 Analyse et Conception d'un Système de Pompage Solaire Photovoltaïque **85**

4.1	Introduction	85
4.2	Énergie Solaire	86
4.3	Les Panneaux Solaires	86
4.3.1	Principe de Fonctionnement	86
4.3.2	Montage des Panneaux Solaires	86
4.3.3	Types des Panneaux Solaires	86
4.4	Généralités sur les Hacheurs	87
4.4.1	Définition d'un hacheur	87
4.4.2	Principe de fonctionnement d'un hacheur	87
4.4.3	Types de hacheurs conventionnels	87
4.5	Topologie du Hacheur Adopté	88
4.6	Modélisation du Hacheur Boost sous MATLAB/Simulink	88
4.6.1	Simulation du convertisseur avec une source de tension continue et une charge résistive variable	90
4.6.1.1	Effet de l'Irradiation sur la Tension de Sortie du Hacheur	94
4.6.1.2	Effet de la Température sur la Tension de Sortie du Hacheur	94
4.7	Étapes de Réalisation du Hacheur Boost	95
4.7.1	Plaque de montage	95
4.7.2	Support de montage	96

4.7.3	Diodes Utilisées	96
4.7.4	IGBT avec Optocoupleur	97
4.7.5	Condensateurs Utilisés	99
4.7.6	Inductance Utilisé	99
4.8	Montage finale de notre hacheur	100
4.9	Test du hacheur Boost avec des panneaux photovoltaïques	101
4.10	Alimentation de la partie DC de variateur ATV71	102
4.11	Conclusion	107
Conclusion générale et Perspectives		108
Bibliographie		111
5 Annexes		114
5.1	Exemple de variateur de vitesse pour MAS : ATV18 de Schneider Electric . .	114
5.1.1	Présentation	114
5.1.2	Choix d'un variateur pour MAS : altivar 18 de Schneider	115
5.1.3	Schéma de câblage d'un altivar 18	115
5.2	Schéma MATLAB/Simulink utilisé pour la comparaison entre le contrôle du débit à vitesse variable et à vitesse constante	116
5.3	Les schémas de câblage électrique conçus avec le logiciel EPLAN Electric . .	120
5.4	Code téléversé vers Arduino UNO – Génération du signal PWM (2 kHz) . .	128

Liste des tableaux

1.1	La gamme Altivar Process ATV600/900 des variateurs de vitesse de Schneider Electric	34
1.2	La gamme Altivar Soft Starter ATS480/48 des Démarreurs progressifs de Schneider Electric	38
2.1	Paramètres du moteur asynchrone	53
2.2	Paramètres de la source de tension triphasée et du VSD	54
2.3	Paramètres des régulateurs de la commande vectorielle RFOC	54
2.4	Propriétés du fluide (dans ce cas, l'eau)	54

Table des figures

1.1	Vue d'ensemble des types de convertisseurs AC/AC	18
1.2	Gradateurs monophasé et Triphasé	19
1.3	Cyclo-convertisseur Triphasé	20
1.4	Convertisseur matriciel direct	21
1.5	Convertisseur matriciel direct à courant	21
1.6	Convertisseur matriciel à double étage	22
1.7	Principales topologies pour les topologies indirectes avec un lien DC	22
1.8	Schéma synoptique des variateurs de vitesse	24
1.9	Schéma de principe des variateurs de vitesse	25
1.10	Caractéristique couple-vitesse en fonction de la fréquence statorique	26
1.11	Schéma synoptique de commande scalaire avec la loi $\frac{V_s}{w_s} = \text{cte}$ de la machine asynchrone	27
1.12	Composantes du courant statorique dans le repère d-q	28
1.13	Évolution du vecteur de flux	29
1.14	Innovations dans les variateurs de vitesse	32
1.15	Schéma synoptique des démarreurs progressifs	35
1.16	Schéma de principe d'un démarreur progressif	36
1.17	Fonctionnalités des démarreurs progressifs modernes	37
2.1	Lois de similitude et économies d'énergie lors de l'utilisation d'un VSD par rapport au contrôle par étranglement	41
2.2	Deux systèmes de pompage à débit variable différents.	43
2.3	Configuration du système de pompage a vitesse variable	44
2.4	Circuit équivalent selon l'axe d	46
2.5	Circuit équivalent selon l'axe q	46

2.6	Schéma Synoptique d'un variateur de vitesse (VSD)	47
2.7	Schéma synoptique de la méthode RFOC	48
2.8	Circuit Hydraulique	49
2.9	PEDROLLO CP 220A, 4kW, 3Ph	50
2.10	Courbes caracteristiques PEDROLLO CP 220A de 4KW 3Ph à une vitesse de rotation de 2900 tr/min (la courbe A	51
2.11	HMT en m, Puissance mécanique P_2 en kW, Rendement η, C_r en N.m en fonction du débit en l/min	52
2.12	Débit actuel Q et débit de référence Q^*	55
2.13	Courant statorique phase a I_{sa}	55
2.14	Vitesse mécanique RPM	55
2.15	Couple électromagnétique T_e et couple résistant T_L	56
2.16	Puissance active moyenne consommée P_e et Puissance mécanique P_{mec}	56
2.17	La tension redressée-filtrée Vdc (vitesse variable)	57
2.18	Courant statorique phase a I_{sa} faible, moyen et fort débit	58
3.1	Icône de lancement du logiciel	63
3.2	Fenêtre principale du logiciel	63
3.3	Interface de création d'un nouveau projet	64
3.4	Interface de saisie des informations du projets	64
3.5	Exemple de page de garde créée	65
3.6	Exemple de page multipolaire créée	65
3.7	Insertion et positionnement des symboles	66
3.8	Insertion et positionnement des symboles	66
3.9	Page de garde de notre projet de fin d'études	67
3.10	La liste des Symboles de circuit de puissance	67
3.11	La liste des Symboles de circuit de commande	68
3.12	Schémas de puissance	68
3.13	Schémas de commande	69
3.14	Porte de la maquette en 2D	69
3.15	Intérieur de la maquette en 2D	70

3.16	Armoire électrique	73
3.17	Installation des rails DIN et des goulottes	74
3.18	Montage des composants de puissance	75
3.19	Câblage du circuit de puissance	76
3.20	Configuration du circuit hydraulique avant l'installation de la pompe	78
3.21	Aperçu frontal du circuit hydraulique finalisé	78
3.22	Circuit hydraulique complet – vue de gauche	78
3.23	Aperçu supérieur du circuit hydraulique finalisé	78
3.24	Vue d'ensemble de la machine utilisée avec plaques signalétiques	79
3.25	contrôle à vitesse constante	80
3.26	contrôle à vitesse variable	80
3.27	Montage du wattmetre	81
3.28	Capteur de courant utilisé	81
3.29	Formes d'onde du courant à différentes fréquences (VSD control)	82
3.30	Puissance active consommée totale par le système en fonction de l'ouverture de la vanne à fréquence nominale.	83
3.31	Puissance active consommée totale par le système en fonction de la fréquence (f/fn) en %.	83
4.1	Topologie du Hacheur Boost Adopté	88
4.2	Simulation du hacheur Boost en boocle ouverte	90
4.3	Simulation du hacheur Boost + stabilisateur de tension sous différentes résis- tances (Régulateur PI : $K_p = 2e - 4$, $K_I = 6e - 4$, saturation à 0.85)	91
4.4	Courbes caractéristiques I-V et P-V pour une irradiance de 1000 W/m ² à @25 °C, @45 °C	92
4.5	Simulation du hacheur Boost + stabilisateur de tension (Régulateur PI : $K_p = 2e - 4$, $K_I = 6e - 4$, saturation à 0.85) + modules PV (240W*4*3) @1000W/m ² , @25degC, charge resistive 136Ohm	93
4.6	V_{charge} , T - Simulation du hacheur Boost + stabilisateur de tension (Régu- lateur PI : $K_p = 2e - 4$, $K_I = 6e - 4$, saturation à 0.85) + modules PV (240W*4*4) a25degC, charge resistive 136Ohm	94
4.7	V_{charge} , T - Simulation du hacheur Boost + stabilisateur de tension (Régu- lateur PI : $K_p = 2e - 4$, $K_I = 6e - 4$, saturation à 0.85) + modules PV (240W*4*4) @1000W/m ² , charge resistive 136Ohm	95
4.8	Modèle de la carte utilisée	95

4.9	Fixation de la carte sur le support	96
4.10	Diodes Utilisées	97
4.11	Dissipateur thermique	97
4.12	IGBT avec Optocoupleur	98
4.13	Optocoupleur	98
4.14	La carte Arduino utilisée	98
4.15	Condensateur Utilisé	99
4.16	Inductance Utilisé	100
4.17	Montage finale de hacheur Boost	100
4.18	la tension d'entrée V_{source} en fonction de rapport cyclique α	101
4.19	la tension de sortie V_{charge} en fonction de rapport cyclique α	102
4.20	le courant d'entrée I_{source} en fonction de courant de sortie I_{charge}	102
4.21	Schéma de configuration de l'ATV71 alimenté directement par le bus DC	103
4.22	Autotransformateur utilisé	105
4.23	Redresseur utilisé du laboratoire d'électronique de puissance	105
4.24	Hacheur boost	106
4.25	Les bornes P0 et PC/– du bus DC du variateur	106
5.1	Choix du variateur Gamme ATV18 Schneider Electric	115
5.2	Schéma de câblage d'un ATV18 Schneider Electric	116
5.3	Bloc d'alimentation en tension et variateur de vitesse dans la simulation	118
5.4	Schema Simulink de commande RFOC	118
5.5	Machine Asynchrone à cage d'écureuil 4kW, Réducteur de vitesse, Circuit hydraulique	119
5.6	Circuit hydraulique	119
5.7	Circuit hydraulique utilisé dans la simulation	120

Liste des acronymes

- **VSD** : Variable Speed Drive
- **AC** : Alternating Current
- **DC** : Direct Current
- **VAR** : Volt-ampère réactif
- **MC** : Matrix Converter
- **IMC** : Indirect Matrix Converter
- **VSI** : Voltage Source Inverter
- **CSI** : Current Source Inverter
- **MLI** : Modulation de Largeur d'Impulsion
- **MAS** : Moteur Asynchrone
- **FOC** : Field Oriented Control
- **DTC** : Direct Torque Control
- **BRA** : Braking by Auto-Adaptation
- **IA** : Intelligence Artificielle
- **EMI** : Electromagnetic Interference
- **STO** : Safe Torque Off
- **HVAC** : Heating, Ventilation, and Air Conditioning
- **SCR** : Silicon Controlled Rectifier
- **ATV** : Altivar (variateurs Schneider)
- **ATS** : Altistart (démarreurs Schneider)
- **API** : Automates Programmables Industriels

Introduction générale

Dans de nombreux réseaux hydrauliques, les pompes installées sont souvent surdimensionnées, car il est difficile de trouver sur le marché une machine dont les courbes caractéristiques correspondent exactement aux besoins. Ce surdimensionnement entraîne une consommation énergétique excessive, notamment lorsque la régulation du débit se fait par étranglement.

Afin de remédier à cette inefficacité, ce projet de fin d'études a pour objectif de démontrer l'intérêt de l'utilisation des variateurs de vitesse pour optimiser la consommation énergétique des systèmes de pompage. À travers des simulations réalisées sous MATLAB/Simulink, nous comparons les performances énergétiques de deux méthodes de contrôle et montrons que la commande par variateur de vitesse (VSD) permet une économie d'énergie pouvant atteindre jusqu'à 40 % dans certains cas.

Pour valider ces résultats, une maquette expérimentale sera conçue et testée sur un circuit hydraulique réel. Ce système est particulièrement adapté aux zones isolées pour les applications de pompage solaire, car il permet de réduire la puissance nécessaire et donc le nombre de panneaux photovoltaïques à installer, allégeant ainsi les coûts pour les agriculteurs.

En outre, la maquette développée pourra également servir de support pédagogique dans les établissements universitaires. Le mémoire s'articule autour de quatre chapitres : un état de l'art sur les variateurs de vitesse et les démarreurs progressifs, l'étude de leur utilisation dans les systèmes de pompage, la conception et la réalisation du système expérimental, et enfin l'intégration d'une source photovoltaïque avec un hacheur Boost pour alimenter le variateur de vitesse à partir d'un champ solaire.

Le premier chapitre présente un état de l'art sur les variateurs de vitesse et les démarreurs progressifs. Il décrit les principales familles de convertisseurs AC-AC et souligne le rôle des variateurs dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des moteurs. Les démarreurs progressifs sont également abordés comme une solution permettant de réduire les chocs mécaniques et les appels de courant lors du démarrage.

Le deuxième chapitre traite de l'application des variateurs de vitesse dans les systèmes de pompage. Il met en évidence leur capacité à ajuster le débit selon les besoins, réduisant ainsi la consommation d'énergie. Une modélisation sous MATLAB/Simulink a été réalisée pour comparer le fonctionnement d'une pompe à vitesse fixe et à vitesse variable, démontrant l'avantage énergétique des VSD.

Dans le troisième chapitre, une maquette expérimentale a été conçue et réalisée. Les schémas électriques ont été développés avec le logiciel EPLAN Electric P8, puis les différents composants (moteur, variateur ATV71, interface HMI, capteurs...) ont été intégrés dans un circuit hydraulique complet. Des essais pratiques ont été effectués afin de valider les performances issues des simulations.

Le quatrième chapitre est consacré au pompage solaire. Une modélisation puis une réalisation d'un hacheur Boost ont été effectuées afin d'élever la tension fournie par les panneaux solaires entre 500V et 600V, valeur nécessaire pour alimenter le bus DC du variateur de vitesse. Un autotransformateur couplé à un redresseur triphasé a été utilisé pour simuler une source solaire stable. Le système a fonctionné avec succès après l'ajout de protections externes, compensant la désactivation de certaines sécurités internes du variateur.

Chapitre 1

Etat de l'art des Variateurs de vitesse et des Démarreurs Progressifs

1.1 Introduction

Les **variateurs de vitesse (VSD)** et les **démarreurs progressifs (soft starters)** représentent des solutions technologiques stratégiques pour la gestion et le contrôle des moteurs électriques dans l'industrie. [1]

Les VSD, en ajustant la fréquence et la tension d'alimentation, permettent une maîtrise fine de la vitesse des moteurs, ce qui se traduit par une réduction notable de la consommation énergétique, une optimisation des performances et une adaptation précise aux exigences des processus industriels. [1]

En parallèle, les démarreurs progressifs jouent un rôle essentiel dans la protection des moteurs et des équipements associés. En limitant les courants d'appel et les chocs mécaniques lors des phases de démarrage et d'arrêt, ils contribuent à prolonger la durée de vie des équipements tout en réduisant les risques de perturbations électriques sur le réseau. [1]

L'intégration de ces deux technologies dans un projet industriel vise non seulement à améliorer les performances et la fiabilité des systèmes, mais aussi à répondre aux exigences croissantes.[1]

Un tel projet d'étude pourrait s'articuler autour de l'analyse comparative de ces dispositifs, leur intégration dans des applications spécifiques et l'évaluation des gains techniques et économiques qu'ils génèrent.[1]

Les variateurs de vitesse (VSD) et les démarreurs progressifs sont largement utilisés dans divers domaines industriels. L'ajustement de la vitesse en fonction de la demande permet d'améliorer l'efficacité globale du système. Voici quelques exemples d'utilisation :

- **Les variateurs de vitesse** : Pompes, Compresseurs, Convoyeurs, Machines-outils, Ascenseurs et escaliers mécaniques, Ventilateurs.
- **Les démarreurs progressifs** : Pompes centrifuges, Convoyeurs lourds, Broyeurs et concasseurs, Machines industrielles (mélangeurs, agitateurs, centrifugeuses), Grues et systèmes de levage, Compresseurs à piston.

Dans ce chapitre, nous aborderons les principales familles de convertisseurs AC/AC, en mettant un accent particulier sur ceux utilisés dans les variateurs de vitesse (VSD) et les démarreurs progressifs. Nous commencerons par un état de l'art des VSD ainsi que les différentes méthodes de commande intégrées dans ces derniers. Ensuite, nous présenterons l'état de l'art des démarreurs progressifs. Enfin, nous traiterons des innovations dans les VSD et les démarreurs progressifs, avant de conclure par une étude technico-économique sur ces dispositifs.

1.2 Les principales familles des convertisseurs AC-AC

Dans le domaine de l'ingénierie électrique, un convertisseur AC/AC est un dispositif qui convertit une tension alternative (AC) d'entrée en une tension alternative de sortie avec des caractéristiques différentes, telles que **l'amplitude, la fréquence, la fréquence et l'amplitude** ou **le nombre de phases**. [2]

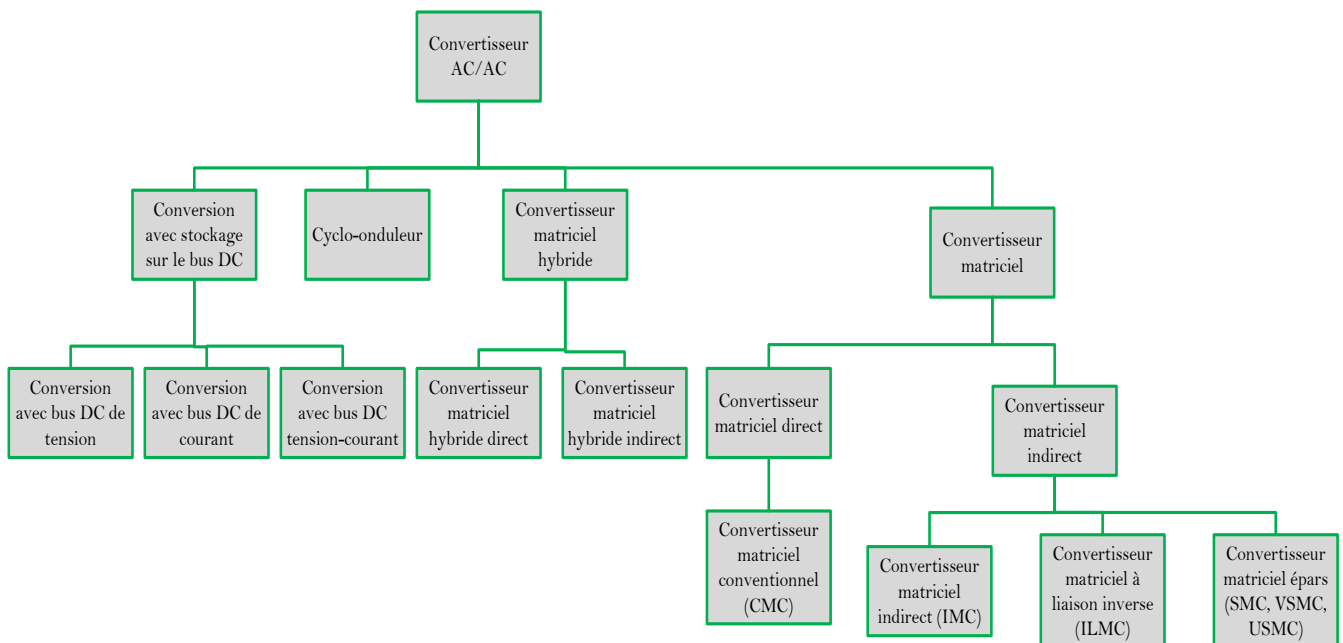


FIGURE 1.1 – Vue d'ensemble des types de convertisseurs AC/AC

1.2.1 Conversion d'amplitude

Ajustement du niveau de tension, en l'augmentant ou en le diminuant. On a deux types sont :

1.2.1.1 Gradateur

Un gradateur est un convertisseur alternatif-alternatif dont la valeur efficace de la tension de sortie est réglable. Permet le contrôle de la puissance absorbée par un récepteur en régime alternatif. [3]

Il découpe la tension sinusoïdale d'entrée, et la charge ne reçoit qu'une partie des deux alternances.[3]

Un interrupteur commandé, il établit ou interrompt la liaison entre la source et la charge.

Un gradateur utilise des triacs ou des thyristors montés en tête-bêche (partie puissance).[3]

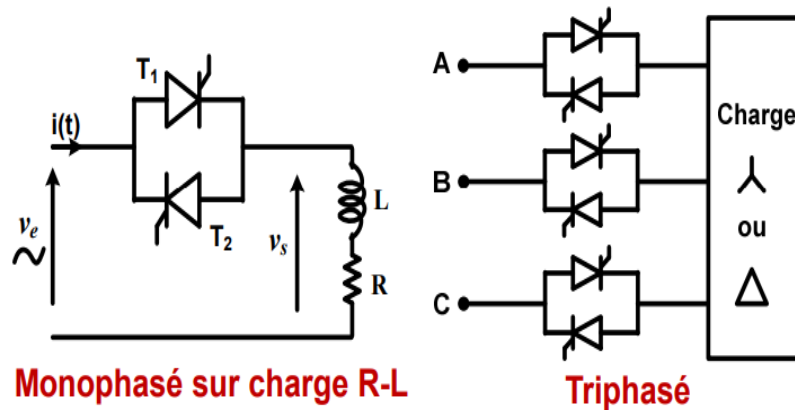


FIGURE 1.2 – Gradateurs monophasé et Triphasé

1.2.1.2 Auto-transformateur

En ajustant le point de prise sur l'enroulement, on peut obtenir une tension de sortie variable proportionnelle à la tension d'entrée.

1.2.2 Conversion d'amplitude et de fréquence

1.2.2.1 Convertisseurs Direct

Conversion directe du fréquence et d'amplitude AC à une autre sans utiliser de DC comme étape intermédiaire.

a) Cyclo-convertisseur

Le cyclo-convertisseur est un convertisseur de fréquence. La fréquence du signal de sortie obtenu est faible devant la fréquence du signal d'entrée (1/3 au maximum).

$$f_{s_{\max}} = \frac{1}{3}f_e$$

Cette caractéristique les rend adaptés aux applications des moteurs électriques AC à basse vitesse et haute puissance, avec une entrée à fréquence constante.

Les cycloconvertisseurs sont également utilisés dans les générateurs VAR contrôlables pour la correction du facteur de puissance et les interconnexions de systèmes AC reliant deux réseaux électriques indépendants. [4] :

Ce dispositif est de moins en moins utilisé tant les solutions de variation de fréquence se sont développées.

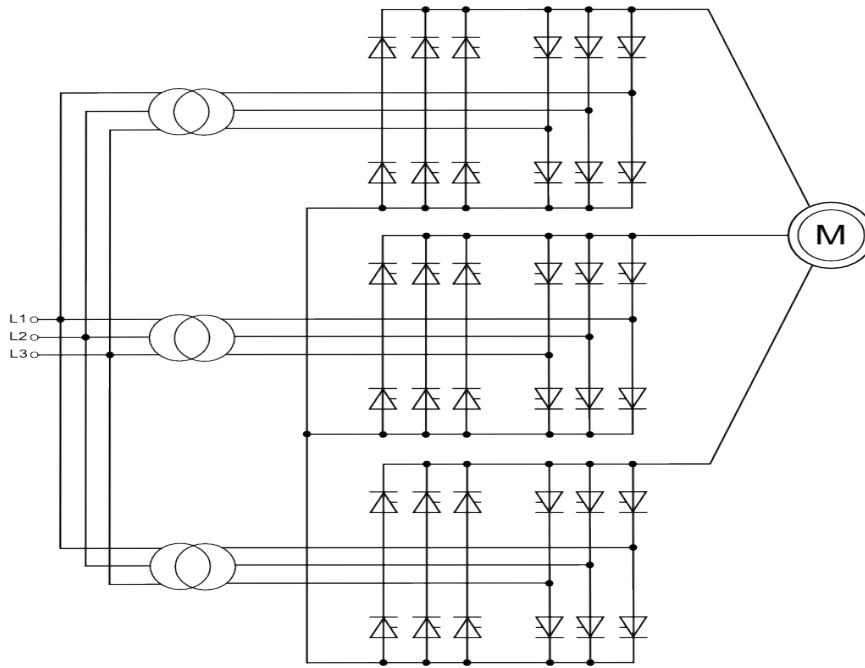


FIGURE 1.3 – Cyclo-convertisseur Triphasé

b) Convertisseur matriciel

Le convertisseur matriciel (MC) est un convertisseur direct AC-AC. Il a été proposé en 1976 par Gyugyi – Pelly [5], [6]. Il utilise une matrice ($n \times m$) de commutateurs bidirectionnels de puissance. Cette bidirectionnalité, à la fois en courant et en tension, permet au MC de générer m tensions de sortie avec une fréquence variable (théoriquement illimitée) à partir de n phases de tension [7].

Ce type de convertisseur a fait l'objet de recherches et de développements pendant environ trente ans, en raison de sa capacité à remplacer les convertisseurs indirects classiques (AC-DC-AC) avec un bus DC capacitif, notamment pour les systèmes embarqués [5], [6]. L'absence de liaison DC (condensateurs ou inductances) le rend moins encombrant par rapport aux topologies indirectes, ce qui permet son encapsulation dans un module semi-conducteur [5], [6].

La topologie suivante (figure 1.4) représente la première topologie directe de MC proposée par Venturini et Alesena en 1980. Ils l'ont décrite comme une matrice de commutateurs bidirectionnels et l'ont nommée « Convertisseur Matriciel » [8]. Cette structure alterne une source de tension avec une source de courant. Une autre topologie (figure I.5) alterne entre une source de courant et une source de tension. L'objectif principal de cette topologie est de contrôler l'amplitude et la fréquence de sortie afin d'obtenir des rapports de tension supérieurs à 1 [9].

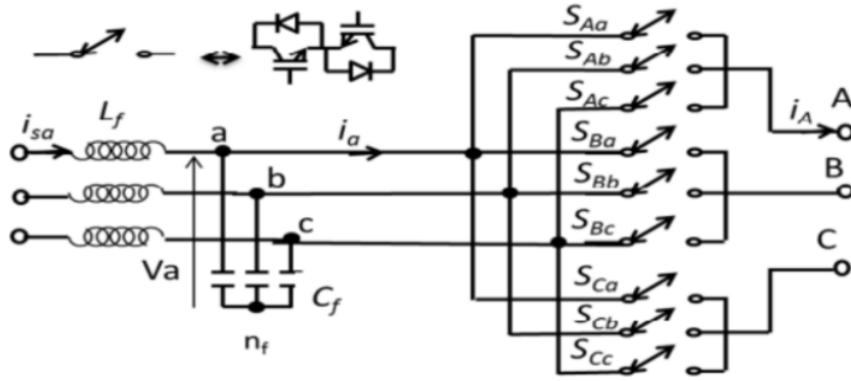


FIGURE 1.4 – Convertisseur matriciel direct

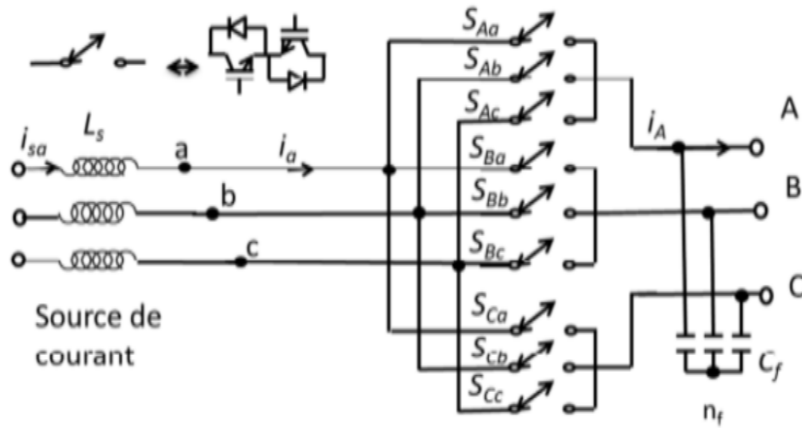
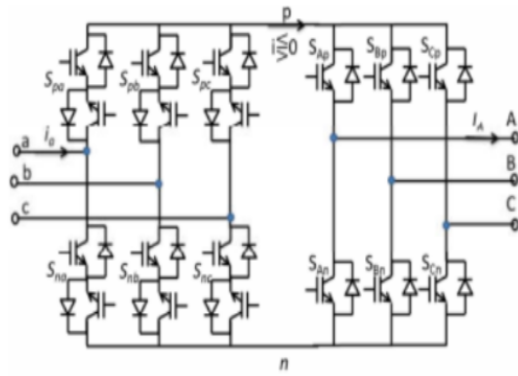


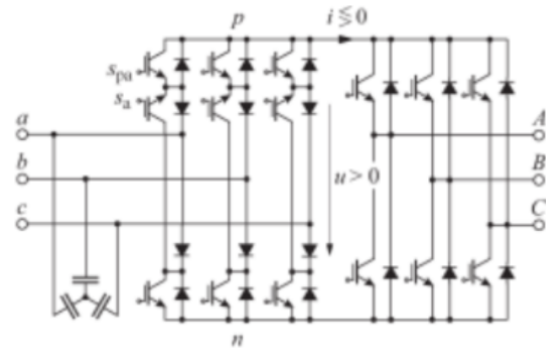
FIGURE 1.5 – Convertisseur matriciel direct à courant

c) Convertisseur matriciel à double étage

Le convertisseur matriciel à double étage est une nouvelle topologie du convertisseur matriciel. Comme son nom l'indique, ce type de convertisseur matriciel est composé de deux convertisseurs [10]. Ainsi, il comprend deux étages : un redresseur entièrement contrôlé directement connecté à un étage onduleur contrôlé.



(a) Convertisseur matriciel indirect (IMC).

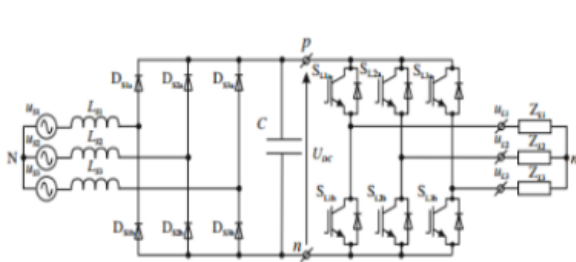


(b) Convertisseur matriciel indirect sparse IMC

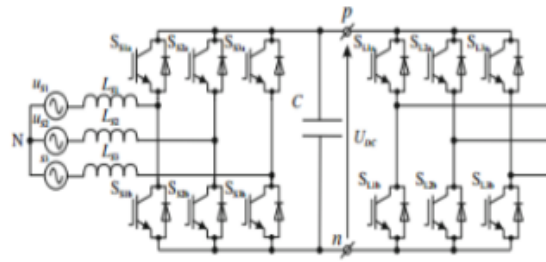
FIGURE 1.6 – Convertisseur matriciel à double étage

1.2.2.2 Convertisseurs indirects

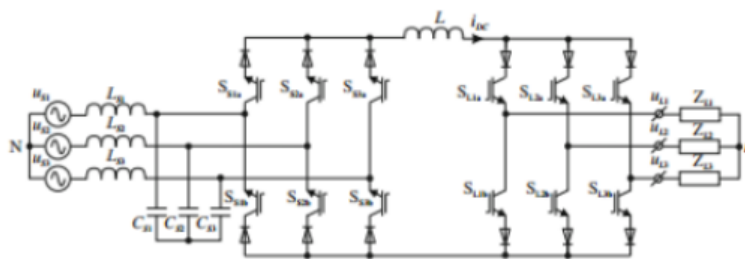
Cette famille est essentiellement celle des convertisseurs avec circuit de liaison DC. Elle comprend les onduleurs à source de tension (VSI) et les onduleurs à source de courant (CSI), qui sont les plus populaires et largement utilisés dans l'industrie et les foyers.[11]



(a) VSI utilisant un pont redresseur à diodes



(b) BBC-VSI



(c) BBC-CSI

FIGURE 1.7 – Principales topologies pour les topologies indirectes avec un lien DC

La Figure 4.5a représente la topologie la plus standard d'un convertisseur AC-AC, qui est un onduleur à source de tension (VSI) avec un redresseur à diodes en entrée et un condensateur de liaison DC [12]. On l'appelle également convertisseur indirect à deux niveaux à source de tension. Il est composé de deux étages de conversion et d'un élément de stockage d'énergie. Le premier étage (redresseur) convertit la tension alternative (AC) d'alimentation en une

tension continue (DC), puis l'étage onduleur la reconvertit en une tension alternative de sortie avec une amplitude et une fréquence variables. L'un des principaux inconvénients de cette topologie est la forte distorsion du courant d'entrée en raison de la présence d'un grand nombre d'harmoniques de bas ordre, comme les harmoniques de rang 5 et 7 [13].

La Figure 4.5b représente une autre topologie où le flux bidirectionnel de l'énergie est assuré par le couplage d'un pont redresseur entièrement contrôlé à base d'IGBTs avec l'onduleur VSI. Cette configuration est appelée "Back-to-Back VSI" (B2B-VSI) [14]. La quantité de la liaison DC est alors régulée par un élément de stockage d'énergie commun aux deux étages, ce qui permet de les commander séparément [15],[11]. Le principal inconvénient de cette topologie réside dans les convertisseurs de puissance moyenne, où les inductances de filtrage d'entrée nécessaires sont plus volumineuses et plus lourdes que le condensateur de liaison DC [11].

Une autre topologie, différente du B2B-VSI, est présentée dans la Figure 4.5c. Elle utilise un onduleur à source de courant (B2B-CSI) comme décrit dans [16]. Cette topologie génère une forme d'onde de courant d'entrée similaire à celle du B2B-VSI, tout en utilisant une inductance de liaison DC, qui est généralement plus grande que le condensateur de liaison DC dans le VSI. Le B2B-CSI nécessite également un filtre d'entrée, généralement plus petit que celui utilisé dans le VSI, souvent un filtre LC passe-bas [11].

Dans la topologie présentée en Figure 4.5a, en plus du problème des harmoniques et de la distorsion, un autre inconvénient réside dans la non-réversibilité du courant du redresseur en raison de la fonctionnalité des diodes. Cela peut poser un problème lors d'une inversion éventuelle du flux d'énergie, par exemple lors d'un freinage électromagnétique, ce qui pourrait entraîner une augmentation dangereuse de la tension du bus DC jusqu'à des niveaux destructeurs. Pour pallier ce problème, une charge de dissipation (résistance) est nécessaire, mais elle ne permet que la dissipation de l'énergie, ce qui la rend efficace uniquement pour des applications à faible dissipation d'énergie [12]. La solution à ce problème a été d'utiliser le B2B-VSI avec un pont redresseur à IGBTs (Figure 4.5b). Grâce à cette solution, l'énergie de freinage peut être réinjectée dans le réseau électrique [14].

1.3 Etat de l'art des Variateurs de vitesse

Un variateur de vitesse (VSD) agit comme une interface entre l'alimentation électrique et le moteur, permettant le contrôle de la fréquence et de la vitesse de rotation. Il joue un rôle essentiel dans les applications d'entraînement à vitesse variable en ajustant plusieurs paramètres pour garantir un fonctionnement optimal.[17]

Les variateurs de vitesse modernes reposent souvent sur la modulation de la largeur d'impulsion (MLI) via des convertisseurs indirects, notamment pour les moteurs asynchrones (MAS). Leur fonctionnement varie en fonction du type de moteur contrôlé, qu'il soit synchrone ou asynchrone. Contrairement aux systèmes à vitesse fixe, ils offrent la flexibilité de faire fonctionner un moteur à n'importe quelle vitesse commandée.

Pour assurer un fonctionnement efficace, un variateur de vitesse doit répondre à plusieurs exigences techniques [17] :

- **Ajustement de la fréquence** : Il doit modifier la fréquence afin de produire la vitesse requise du moteur.
- **Contrôle de la tension de sortie** : Il doit ajuster la tension de sortie pour maintenir un flux d'entrefer constant dans la zone de couple constant.
- **Fourniture du courant nominal** : Il doit être capable de fournir le courant nominal à une fréquence donnée pour garantir des performances optimales.

Une large gamme de variateurs de fréquence (VSD) est disponible pour répondre aux exigences croissantes du monde industriel. Grâce à leur capacité d'adaptation et à leur efficacité énergétique, ils constituent une solution clé pour l'amélioration des performances des systèmes électromécaniques.

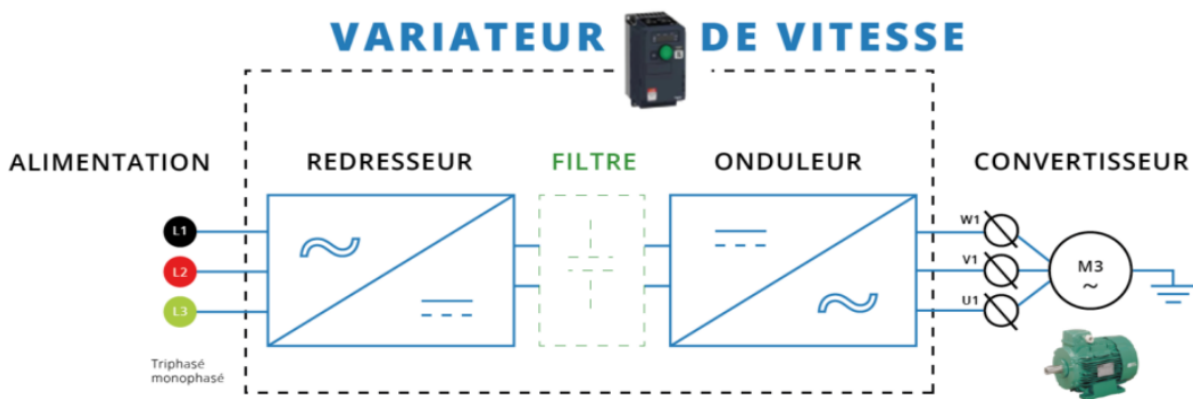


FIGURE 1.8 – Schéma synoptique des variateurs de vitesse

Dans un variateur de vitesse, le redresseur constitue l'étage d'entrée chargé de convertir la tension alternative triphasée du réseau en une tension continue. Il s'agit généralement d'un pont de diodes triphasé, aussi appelé pont de Graetz, composé de six diodes qui assurent le redressement de la tension sur les trois phases. Cette conversion produit une tension continue dite « ondulée », caractérisée par des pulsations à haute fréquence. Pour lisser cette tension et la rendre plus stable, un condensateur de filtrage est installé en parallèle à la sortie du redresseur ; il réduit les ondulations en stockant l'énergie pendant les crêtes et en la restituant lors des creux, assurant ainsi une alimentation plus stable du bus continu. Lors de la mise sous tension du variateur, une résistance de précharge est insérée en série avec les

condensateurs afin de limiter le courant d'appel élevé qui surviendrait si les condensateurs se chargeaient directement. Cette résistance permet une montée progressive de la tension aux bornes des condensateurs, évitant ainsi tout choc électrique ou détérioration prématurée des composants. Une fois la tension stabilisée, la résistance est généralement court-circuitée automatiquement par un contacteur de précharge. Dans certains cas, un filtre LC peut également être utilisé pour améliorer la qualité de la tension continue. Ensuite, cette tension continue est acheminée vers l'onduleur, qui est chargé de la retransformer en une tension alternative triphasée, adaptée aux besoins du moteur. L'onduleur fonctionne grâce à des composants électroniques de puissance (comme des IGBT), qui permettent de faire varier la fréquence et l'amplitude de la tension envoyée au moteur. C'est cette modulation qui permet de contrôler la vitesse de rotation du moteur de manière précise et efficace.

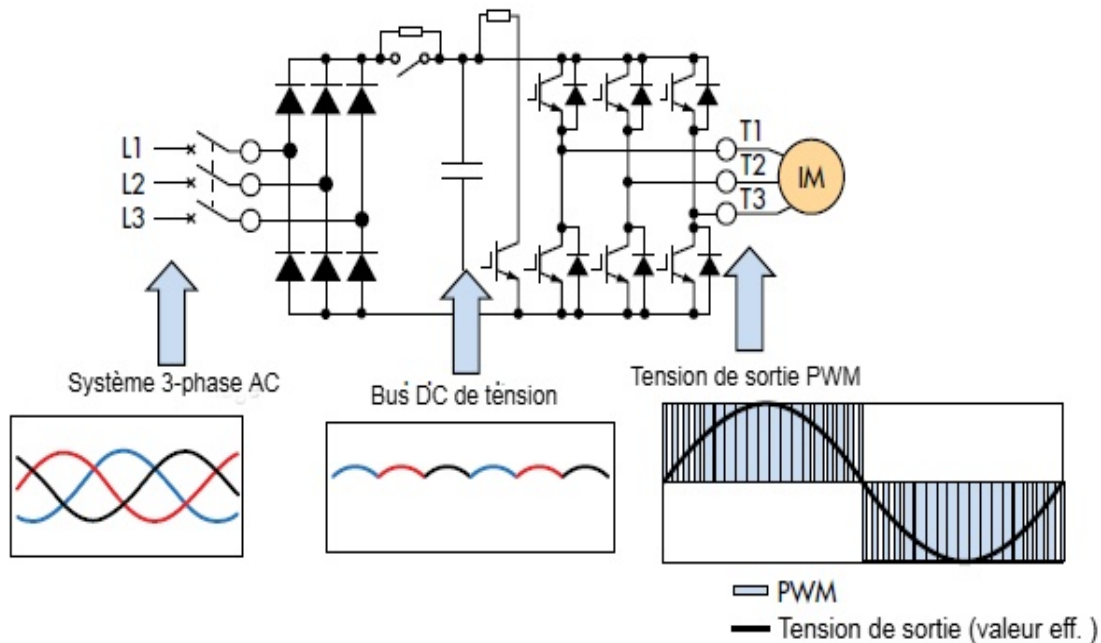


FIGURE 1.9 – Schéma de principe des variateurs de vitesse

1.3.1 Différentes méthodes de commande des MAS intégrées dans les variateurs de vitesse

1.3.1.1 Commande scalaire à flux constant de la MAS ($\frac{V_s}{f_s} = \text{Cte}$)

Le fonctionnement à flux constant de la machine asynchrone permet à son circuit magnétique d'être dans le même état magnétique quelle que soit la fréquence d'alimentation, c'est-à-dire que la forme du cycle d'hystérésis parcouru par le circuit magnétique reste identique quelle que soit la fréquence [18]

La machine asynchrone est alimentée par un onduleur de tension de fréquence f_s dont la valeur efficace du fondamental V_{s1} est telle que le rapport $\frac{V_{s1}}{f_s}$ est maintenu constant.

En partant des équations de la machine asynchrone écrites dans un repère lié au champ

tournant « d, q », on a :

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - w_s \phi_{qs} \quad (1.1)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + w_s \phi_{ds} \quad (1.2)$$

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (w_s - w_m) \phi_{qr} \quad (1.3)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (w_s - w_m) \phi_{dr} \quad (1.4)$$

En régime permanent, les équations statoriques d'axe d,q s'écrivent :

$$V_{ds} = R_s I_{ds} - w_s \phi_{qs} \quad (1.5)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + w_s \phi_{ds} \quad (1.6)$$

Sachant qu'un vecteur quelconque (tension, courant, flux) s'écrit :

$$X = X_d + jX_q, \quad (1.7)$$

on aboutit alors à :

$$\overline{V_s} = R_s \overline{I_s} + jw_s \overline{\phi_s} \quad (1.8)$$

Si on néglige les pertes joules statoriques, on a en modules :

$$V = w_s \phi_s \quad (1.9)$$

Donc, si on veut garder le flux constant, on doit maintenir le rapport

$$\frac{V_s}{w_s} = \text{cte} \quad (1.10)$$

et comme le couple de décrochage de la machine est proportionnel à $\left(\frac{V_s}{w_s}\right)^2$,

ce dernier restera constant pour toute variation de la fréquence, inférieure à la fréquence nominale donnée par le constructeur [18].

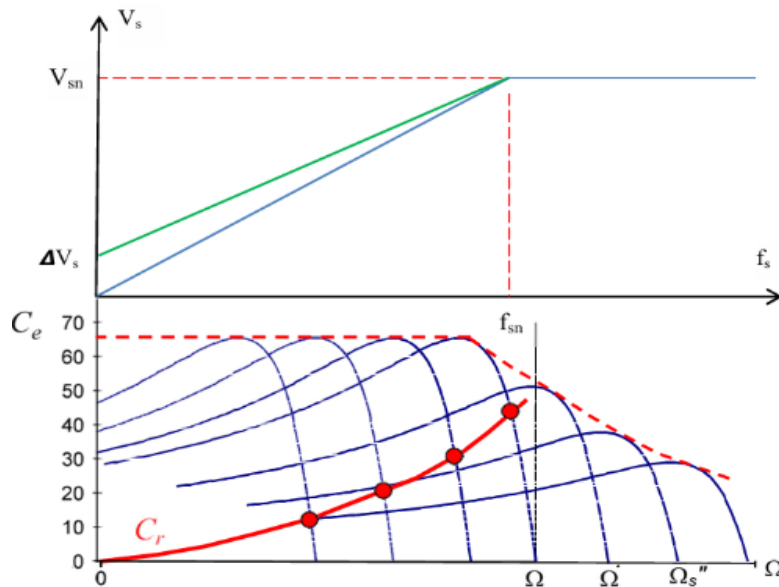


FIGURE 1.10 – Caractéristique couple-vitesse en fonction de la fréquence statorique

On constate qu'il y a deux zones de fonctionnement qui sont :

1. **1ère zone** $f_s < f_{sn}$: fonctionnement avec maintien de la loi $\frac{V_s}{w_s} = \text{cte}$. Ici, le couple de décrochage est gardé constant, c'est la zone à couple constant.
2. **2ème zone** $f_s > f_{sn}$: on ne peut plus continuer avec la même loi car la tension d'alimentation dépasserait sa valeur nominale. La tension d'alimentation sera maintenue à sa valeur nominale et la puissance sera constante. Le couple de décrochage varie en $1/x^2$ (hyperbole), c'est la zone à puissance constante.

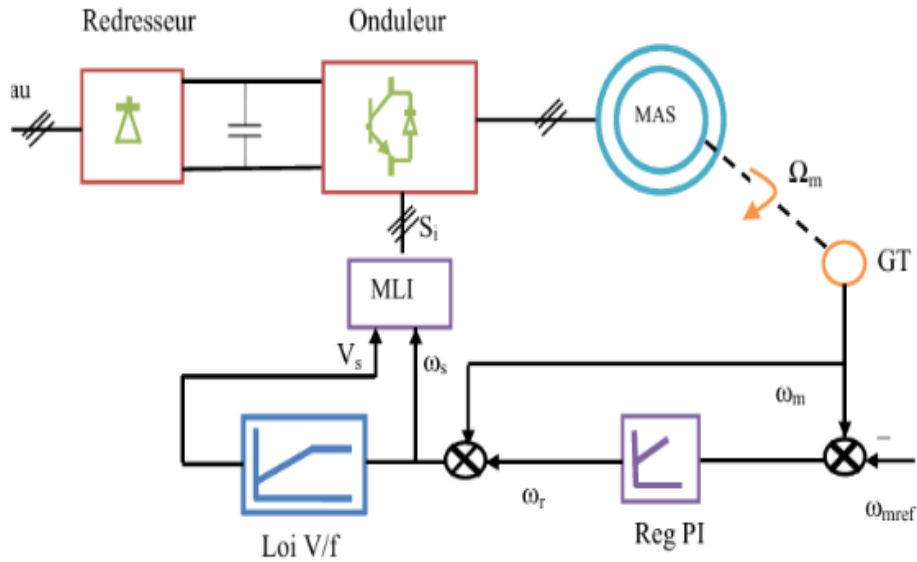


FIGURE 1.11 – Schéma synoptique de commande scalaire avec la loi $\frac{V_s}{w_s} = \text{cte}$ de la machine asynchrone

1.3.1.2 Commande par flux orienté (FOC - Field Oriented Control)

Le concept de la Commande Vectorielle (FOC) a été introduit par la société Siemens. Sa mise en œuvre repose sur le transfert du vecteur d'un référentiel tournant à un référentiel fixe. Cette méthode offre une bonne réponse dynamique [19].

La FOC permet de découpler la composante magnétique du courant (qui génère le flux) et la composante de couple (qui génère le couple) [19]. Ainsi, les deux composantes peuvent être contrôlées séparément. Généralement, la composante magnétique varie lentement ou reste constante pour une réponse rapide, tandis que le couple varie rapidement [19] (Figure 1.12). Cela permet donc un contrôle indépendant du couple et du flux, ce qui est similaire à un moteur à courant continu à excitation séparée [19].

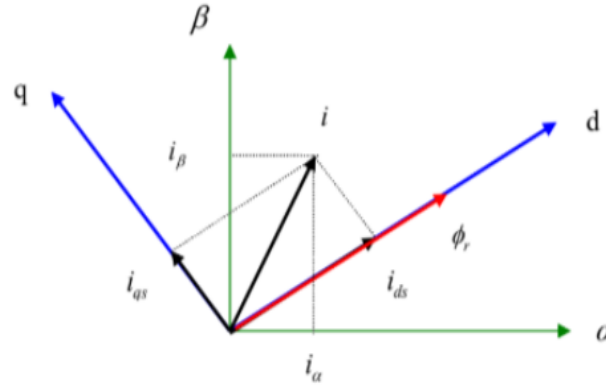


FIGURE 1.12 – Composantes du courant statorique dans le repère d-q

La commande vectorielle (FOC) est réalisée en alignant le vecteur du flux rotorique sur l'axe d du repère. Une fois cette condition remplie, le découplage est assuré et la commande de la machine asynchrone peut être assimilée à celle d'une machine à courant continu, où I_{sq} est analogue au courant d'induit et I_{sd} est analogue à l'excitation du champ.

1.3.1.3 Commande Directe du Couple (DTC - Direct Torque Control)

La commande directe du couple pour les machines asynchrones a été proposée au milieu des années 1980 par Takahashi [20] et Depenbrock [21]. Cette méthode assure une performance dynamique équivalente à celle obtenue avec une machine à courant continu.

Le principe de base de la DTC repose sur le choix direct des vecteurs de tension statorique en fonction des différences entre les références de couple et de flux statorique et leurs valeurs réelles. Les régulateurs de courant suivis d'un comparateur MLI ne sont pas utilisés dans les systèmes de commande DTC, ni les paramètres de la machine, à l'exception de la résistance statorique du moteur. Ainsi, la DTC présente l'avantage d'être moins dépendante des paramètres de la machine et d'avoir une configuration plus simple [22], [21]. Le flux statorique peut être exprimé dans un repère lié au stator de la machine par l'équation suivante :

$$\phi_s(t) = \int_0^t (V_s - R_s I_s) dt + \phi_{s0} \quad (1.11)$$

Dans le cas où un vecteur de tension non nul est appliqué, la chute de tension due à R_s est négligée par rapport à V_s . Ainsi, l'équation 1.16 qui suit :

$$\phi_s(t) = \phi_{s0} + V_s T_e \quad (1.12)$$

Où la tension non nulle est appliquée pendant un intervalle de $[0, T_e]$.

Ainsi, le flux peut être directement contrôlé et fixé en appliquant un vecteur de tension approprié. La figure suivante (figure 1.13) montre un exemple de l'évolution de l'extrémité du vecteur de flux statorique avec le vecteur de tension choisi.

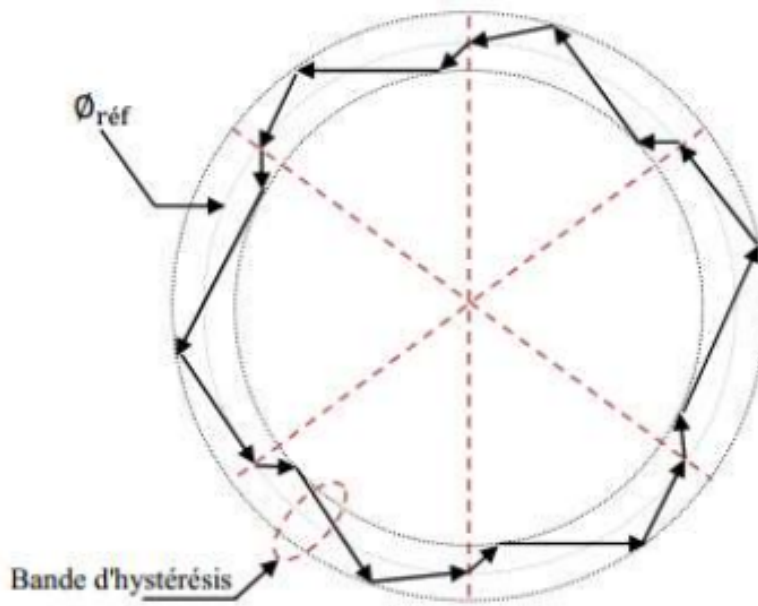


FIGURE 1.13 – Évolution du vecteur de flux

Le schéma de base de la DTC utilise une table de commutation afin de déterminer l'état de commutation et d'estimer correctement le vecteur de flux statorique ainsi que le couple [20].

Suivant le diagramme présenté par Takahashi dans son article, la DTC nécessite deux régulateurs d'hystérésis : le régulateur de flux statorique qui impose la période du vecteur de tension actif, et le régulateur de couple pour déterminer les vecteurs de tension nuls afin de créer une bande d'hystérésis et maintenir le couple du moteur dans cette bande [20].

1.3.2 Modes de freinage par variateur de vitesse

En fonction des besoins du système, plusieurs modes de freinage peuvent être sélectionnés.

a) Freinage roue libre Le variateur ne contrôle plus du tout le moteur, la machine s'arrête sur sa propre inertie => la durée de décélération peut être importante et varie suivant la charge,[23]

b) Freinage par résistance (ou freinage dynamique avec dissipation thermique) Dans ce mode, l'énergie générée par le moteur est convertie en chaleur par des résistances de freinage. Ces résistances sont connectées au variateur de fréquence, et l'énergie excédentaire est dissociée sous forme de chaleur. Ce mode est souvent utilisé dans des applications où la récupération d'énergie n'est pas nécessaire, ou lorsque l'injection dans le réseau est difficile ou coûteuse.[23]

c) Freinage par injection de courant continu Dans ce mode de freinage, le variateur envoie du courant continu dans les 3 phases du moteur => la durée de la décélération sera moins importante mais elle variera suivant la charge.[23]

d) Freinage par autoadaptation (BRA) Le variateur alterne le freinage en roue libre lorsque la tension relevée sur le bus continue est au dessus d'un certain seuil le freinage

contrôlé sur ses propres condensateurs lorsque la tension est en dessous de ce même seuil
=> la durée de décélération sera optimisée mais variera suivant la charge,[23]

e) Freinage mécanique (uniquement pour les moteurs équipés de frein mécanique) Certains moteurs sont équipés de frein mécanique (surtout pour les utilisations de palan, système de levée de charge...) pour éviter que la charge n'entraîne le moteur en rotation si celui-ci est arrêté.

1.3.2.1 Avantages du freinage par variateur de vitesse pour les moteurs asynchrones

- **Précision et contrôle du freinage** : Le variateur de vitesse permet un contrôle précis de la vitesse du moteur et une réduction progressive de la vitesse, ce qui évite les arrêts brusques et l'usure des composants mécaniques.
- **Économie d'énergie** : Dans le cas du freinage régénératif, l'énergie générée lors du freinage peut être récupérée et réutilisée, réduisant ainsi la consommation d'énergie du système.
- **Réduction de l'usure mécanique** : Le freinage contrôlé par variateur réduit les forces mécaniques et les chocs, ce qui prolonge la durée de vie des composants du moteur et du système dans son ensemble.
- **Amélioration de la sécurité** : Le freinage progressif permet une réduction contrôlée de la vitesse, ce qui améliore la sécurité, notamment dans les applications nécessitant des arrêts réguliers ou rapides (comme les ascenseurs ou les convoyeurs).
- **Réduction des coûts d'entretien** : Moins d'usure mécanique signifie moins de besoins de maintenance, ce qui permet de réduire les coûts d'entretien.

1.3.2.2 Inconvénients du freinage par variateur de vitesse

- **Chauffage des composants** : Le freinage dynamique génère de la chaleur, ce qui peut entraîner des problèmes de surchauffe si la dissipation thermique n'est pas bien gérée.
- **Coût du système** : Les variateurs de fréquence nécessaires au freinage par variateur de vitesse peuvent être coûteux, et leur installation demande des compétences techniques.
- **Complexité** : Le système de contrôle est plus complexe que dans les systèmes de freinage traditionnels, ce qui peut rendre le diagnostic et la maintenance plus difficiles.

1.3.3 Innovation dans le domaine des variateurs de vitesse

L'innovation dans le domaine des variateurs de vitesse (ou convertisseurs de fréquence) a connu une forte évolution ces dernières années grâce aux avancées technologiques en électronique de puissance, intelligence artificielle, et connectivité. Voici un aperçu des principales innovations et tendances dans ce domaine :

a) Miniaturisation et efficacité énergétique

- **Composants avancés** : L'utilisation de semi-conducteurs comme le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN) a permis de concevoir des variateurs plus petits, plus légers et plus efficaces.

- **Réduction des pertes** : Les nouvelles architectures électroniques permettent de réduire les pertes énergétiques et d'améliorer le rendement global.
- **Efficacité énergétique** : Les variateurs modernes intègrent des fonctions permettant une gestion optimale de l'énergie, contribuant à une meilleure durabilité.

b) Intelligence artificielle et apprentissage automatique

- **Autocalibration** : Certains variateurs utilisent des algorithmes d'IA pour ajuster automatiquement leurs paramètres afin d'optimiser les performances du moteur.
- **Maintenance prédictive** : Grâce à des capteurs et à l'analyse des données, les variateurs peuvent anticiper les pannes ou l'usure des composants, réduisant ainsi les temps d'arrêt.
- **Personnalisation dynamique** : Les algorithmes adaptatifs ajustent les performances en temps réel pour répondre aux besoins spécifiques des applications industrielles.

c) Connectivité et intégration dans l'Industrie 4.0

- **IoT et cloud** : Les variateurs connectés permettent une supervision et un contrôle à distance via des plateformes cloud.
- **Communication avancée** : Intégration de protocoles comme Ethernet industriel, Profinet, Modbus, et OPC-UA pour une interopérabilité accrue avec d'autres systèmes.
- **Analytique des données** : Les variateurs collectent des données d'exploitation en continu, qui peuvent être utilisées pour l'optimisation des processus.

d) Applications spécifiques et personnalisation

- **Variateurs pour les énergies renouvelables** : Des modèles spécialisés pour gérer les systèmes éoliens, solaires ou hydrauliques.
- **Industries sensibles** : Des variateurs conçus pour des environnements exigeants (pétrochimie, agroalimentaire, pharmaceutique) avec des certifications spécifiques.
- **Conception modulaire** : Certains variateurs permettent une configuration sur mesure selon les besoins spécifiques des utilisateurs.

e) Réduction des nuisances électromagnétiques et sonores

- Les filtres intégrés et les innovations dans le contrôle des harmoniques permettent de limiter les perturbations électromagnétiques (EMI), rendant les variateurs conformes aux normes environnementales strictes.
- Réduction du bruit mécanique et électrique, augmentant le confort et la fiabilité des équipements.

f) Sécurité et fiabilité accrue

- **Sécurité fonctionnelle** : Intégration de fonctions de sécurité comme STO (Safe Torque Off) pour les applications critiques.
- **Protection contre les surcharges** : Des systèmes avancés de gestion thermique et électrique assurent une meilleure protection des moteurs et des variateurs.



FIGURE 1.14 – Innovations dans les variateurs de vitesse

Exemples concrets :

- ABB et Siemens proposent des variateurs connectés dotés d'IA pour l'analyse des performances.
- Danfoss mise sur les variateurs hautement efficaces pour les systèmes HVAC.
- Yaskawa intègre des fonctions avancées de maintenance prédictive dans ses produits.

1.4 Présentation de l'entreprise Schneider Electric

Schneider Electric est une entreprise française à dimension internationale, spécialisée dans la gestion de l'énergie et l'automatisation. Fondée en 1836, elle a connu une évolution progressive, passant d'une société métallurgique à un groupe technologique de premier plan, capable de proposer des solutions complètes en matière d'efficacité énergétique et de contrôle industriel.

Présente dans plus de 100 pays, Schneider Electric emploie environ 150 000 personnes. Elle conçoit, fabrique et distribue une large gamme de produits destinés à optimiser la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique, tout en améliorant la sécurité, la fiabilité et la

performance des installations. Parmi ses produits les plus courants, on retrouve les variateurs de vitesse, les automates programmables industriels (PLC), les interfaces homme-machine (HMI), les systèmes SCADA, ainsi que des solutions adaptées aux énergies renouvelables et à la gestion des bâtiments intelligents.

L'entreprise s'engage autour de sa vision « Life Is On », qui vise à rendre l'énergie accessible, efficace et durable, à travers des technologies connectées et intelligentes. Schneider Electric intervient dans divers secteurs, tels que l'industrie, le tertiaire, les infrastructures critiques, et contribue activement aux objectifs de transition énergétique grâce à ses solutions orientées vers l'efficacité énergétique et la numérisation des systèmes électriques.

1.5 La gamme Altivar Process ATV600/900 des variateurs de vitesse de Schneider Electric

Dans cette étude technico-économique, nous nous sommes basés sur les variateurs de vitesse de Schneider Electric, issus des gammes Altivar Process ATV600 (ATV630 et ATV650) et Altivar Process ATV900 (ATV930 et ATV950). Nous avons résumé cette étude sous forme de tableau [24]. Les prix des variateurs de vitesse sont exprimés en euros, avec deux montants distincts : le premier est le prix Hors Taxes (HT), qui correspond à la valeur nette d'un produit ou d'un service, et le second est le prix Toutes Taxes Comprises (TTC), qui inclut la valeur nette augmentée des taxes applicables.

Les prix des variateurs de vitesse dépendent de leur puissance : à mesure que la puissance augmente, le prix augmente également. Pour chaque référence, le catalogue fournit des informations détaillées, et il est possible de rechercher la référence sur Google pour obtenir des informations complètes sur le produit, telles que le montage, le câblage, et d'autres spécifications techniques.

Gamme de produit	Nom de l'appareil	Référence catalogue	Puissance (kW)	Tension (V)	Montage	Prix (€)
Altivar Process ATV600	ATV630	ATV630U15N4Z	1,5	380-480	Armoire	670,28 HT / 817,74 TCC
Altivar Process ATV600	ATV630	ATV630U22N4Z	2,2	380-480	Armoire	766,51 HT / 935,14 TCC
Altivar Process ATV600	ATV630	ATV630D75N4Z	75	380-480	Armoire	766,51 HT / 935,14 TCC
Altivar Process ATV600	ATV630	ATV630D75Y6	75	500-690	Mural	6 293,89 HT / 7 678,54 TCC
Altivar Process ATV600	ATV650	ATV650C13N4F	132	400-480	Sol	12 938,60 HT / 15 785,10 TCC
Altivar Process ATV600	ATV650	ATV650C20N4F	200	380-480	Sol	7 159,41 HT / 8 734,49 TCC
Altivar Process ATV900	ATV930	ATV930U55Y6	5,5	500-690	Mural	1 780,18 HT / 2 171,82 TCC
Altivar Process ATV900	ATV930	ATV930U75Y6	7,5	500-690	Mural	1 879,79 HT / 2 293,35 TCC
Altivar Process ATV900	ATV930	ATV930D55N4Z	55	380-480	Armoire	5 874,10 HT / 7 166,40 TCC
Altivar Process ATV900	ATV950	ATV950C13N4F	132	400-440	Sol	14 022,09 HT / 17 106,95 TCC
Altivar Process ATV900	ATV950	ATV950C25N4F	250	400-440	Sol	23 241,30 HT / 28 354,38 TCC

TABLE 1.1 – La gamme Altivar Process ATV600/900 des variateurs de vitesse de Schneider Electric

1.6 État de l'art des démarreurs progressifs

Les moteurs asynchrones nécessitent un courant de démarrage relativement élevé, compris entre 3 et 7 fois le courant nominal, ce qui peut, à long terme, endommager le moteur ainsi que le réseau d'alimentation.

Afin de limiter le courant de démarrage consommé par le moteur et de contrôler le couple généré, les démarreurs progressifs régulent la tension et l'augmentent progressivement jusqu'aux valeurs nominales de fonctionnement du moteur. Ainsi, le courant de démarrage ne provoque pas de pic.[25]

En limitant l'énergie appelée au réseau et en réduisant les contraintes mécaniques, les démarreurs progressifs améliorent l'efficacité des installations industrielles et prolongent la durée de vie des moteurs.[25]

Il est composé de deux thyristors (SCR) par phase, connectés en antiparallèle, soit un total de 6 SCR pour les trois phases. Dans chaque phase, un SCR conduit pendant la demi-période positive du courant alternatif, tandis que l'autre SCR conduit pendant la demi-période négative. Cette configuration permet un contrôle précis de la tension alternative sur l'ensemble du cycle de l'onde.[25]

La tension de sortie du démarreur progressif varie en fonction de l'angle d'amorçage des SCR. Lorsque le moteur démarre, l'angle d'amorçage est initialement élevé, limitant ainsi la tension appliquée. Au fur et à mesure que le moteur accélère, l'angle d'amorçage diminue progressivement, ce qui entraîne une augmentation de la tension de sortie jusqu'à atteindre sa valeur nominale.

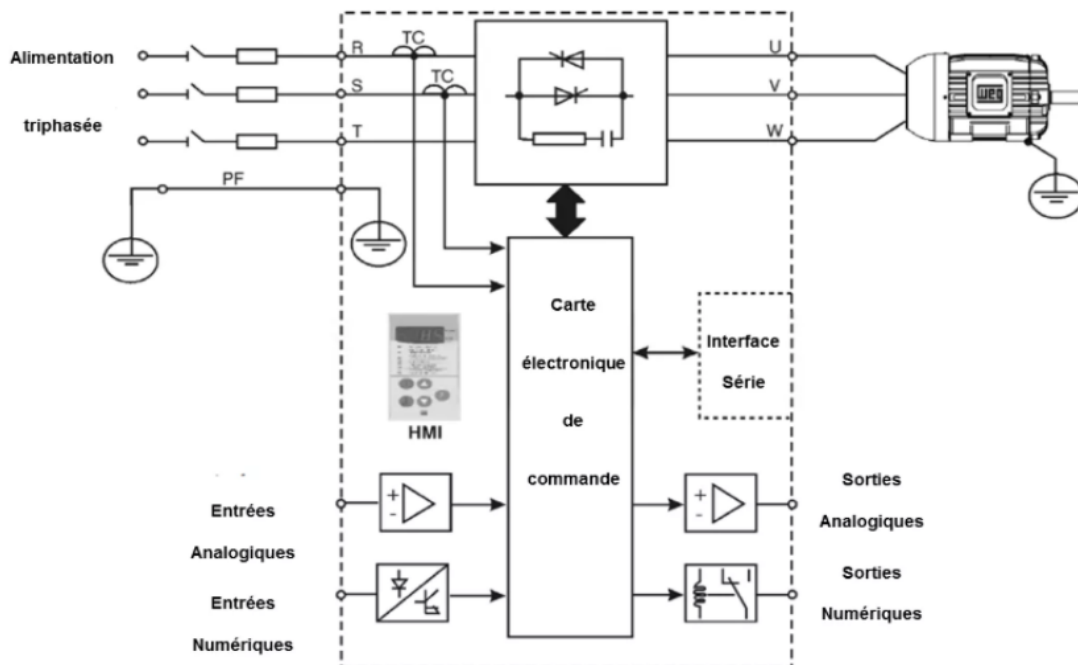


FIGURE 1.15 – Schéma synoptique des démarreurs progressifs

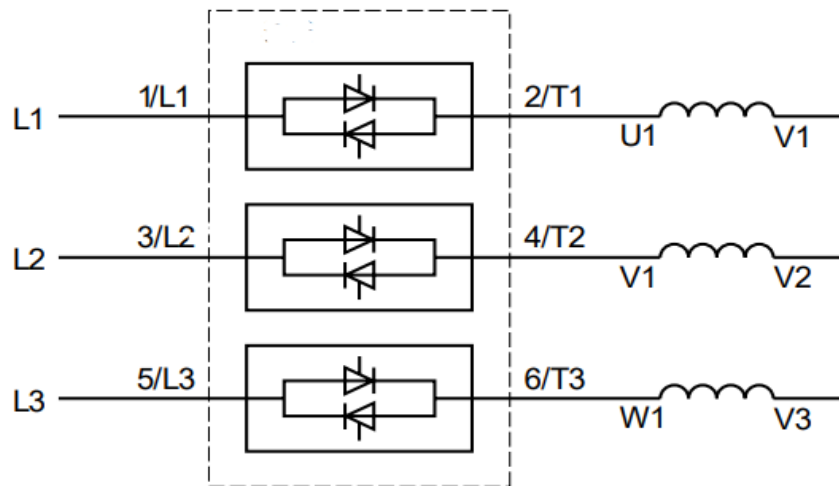


FIGURE 1.16 – Schéma de principe d'un démarreur progressif

1.6.1 Innovation dans le domaine des démarreurs progressifs

Les démarreurs progressifs (ou "soft starters") ont également bénéficié d'innovations significatives ces dernières années, grâce à l'intégration de nouvelles technologies et de fonctionnalités avancées. Voici un aperçu des principales innovations :

a) Meilleure gestion de l'énergie et optimisation des performances

- **Réduction des pics de courant** : Les démarreurs progressifs modernes intègrent des algorithmes avancés pour limiter les courants d'appel lors du démarrage, réduisant ainsi l'usure des moteurs et la consommation d'énergie.
- **Optimisation du couple** : Grâce à des technologies comme le contrôle adaptatif, ils offrent une gestion optimale du couple moteur en fonction des charges connectées.

b) Intégration de l'intelligence artificielle et des technologies connectées

- **Maintenance prédictive** : Les démarreurs progressifs sont équipés de capteurs et de modules connectés permettant une analyse des données en temps réel. Cela facilite la détection des anomalies et l'anticipation des pannes.
- **IoT et Industrie 4.0** : Les démarreurs modernes sont intégrés à des plateformes cloud pour le suivi à distance, l'analyse des performances et la maintenance proactive.
- **Auto-apprentissage** : Certains démarreurs sont capables d'auto-calibrer leurs paramètres pour optimiser leur fonctionnement en fonction de la charge spécifique.

c) Conception plus robuste et modulaire

- **Résistance accrue aux environnements exigeants** : Les démarreurs progressifs sont désormais conçus pour des environnements industriels sévères, avec des certifications pour les zones dangereuses, comme ATEX.
- **Modularité** : La conception modulaire des démarreurs permet une maintenance plus rapide et une adaptation facile à différentes applications.

d) Fonctions de sécurité avancées

- **Protection intégrée** : Des protections comme le contrôle de surcharge, la surveillance des déséquilibres de phases et la détection des sous-tensions sont intégrées dans les démarreurs modernes.

- **Sécurité fonctionnelle** : Les démarreurs progressifs peuvent inclure des fonctions comme STO (Safe Torque Off), garantissant la sécurité des opérateurs et des équipements.

e) Applications spécifiques et flexibilité

- **Solutions pour les énergies renouvelables** : Les démarreurs sont adaptés aux applications avec turbines ou pompes utilisées dans les systèmes d'énergie renouvelable.
- **Applications à charge élevée** : Ils sont optimisés pour des secteurs comme le traitement des eaux, les mines et la pétrochimie.



FIGURE 1.17 – Fonctionnalités des démarreurs progressifs modernes

Exemples d'innovations par fabricants

Schneider Electric Altivar ATS480 : Destiné à l'industrie lourde, ce démarreur progressif est conçu pour des environnements exigeants avec des solutions connectées et modulaires. (Schneider Electric) Avec l'accélération de la transition énergétique et l'adoption croissante de l'industrie 4.0, les démarreurs progressifs continueront d'évoluer pour offrir :

- Une intégration plus poussée avec les systèmes de gestion énergétique.
- Des solutions encore plus efficaces pour réduire les coûts de maintenance et prolonger la durée de vie des moteurs.
- Une automatisation accrue pour améliorer la productivité des processus industriels.

1.6.2 La gamme Altivar Soft Starter ATS480/48 des Démarreurs progressifs de Schneider Electric

Dans cette étude technico-économique, nous avons analysé les démarreurs progressifs de Schneider Electric, issus des gammes Altivar Soft Starter ATS480 et Altivar Soft Starter ATS48. Les résultats sont présentés sous forme de tableau [26].

Les prix des démarreurs progressifs sont exprimés en euros et se déclinent en deux montants distincts : Le prix Hors Taxes (HT), qui correspond à la valeur nette du produit ou du service. Le prix Toutes Taxes Comprises (TTC), qui inclut la valeur nette augmentée des taxes applicables. Le coût d'un démarreur progressif dépend de son courant nominal : plus celui-ci est élevé, plus le prix augmente. Chaque référence est accompagnée d'informations détaillées dans le catalogue, et il est possible de rechercher la référence sur Google pour accéder à des données complètes sur le produit, telles que le montage, le câblage et d'autres spécifications techniques.

Gamme de produit	Nom de l'appareil	Référence catalogue	Tension de réseau (V)	Alimentation de commande (V)	Courant nominal (A)	Prix (€)
Altivar Soft Starter ATS480	ATS480	ATS480D17Y	208-690	110-230	17	684,51 HT / 835,10 TTC
Altivar Soft Starter ATS480	ATS480	ATS480D47Y	208-690	110-230	47	983,97 HT / 1 200,44 TTC
Altivar Soft Starter ATS480	ATS480	ATS480C11Y	208-690	110-230	110	1 582,91 HT / 1 931,15 TTC
Altivar Soft Starter ATS480	ATS480	ATS480C59Y	208-690	110-230	590	6 246,07 HT / 7 620,21 TTC
Altivar Soft Starter ATS480	ATS480	ATS480M12Y	208-690	110-230	1200	11 251,46 HT / 13 726,79 TTC
Soft Starter ATS48	ATS48	ATS48D17Y	208-690	/	14	872,87 HT / 1 064,90 TTC
Soft Starter ATS48	ATS48	ATS48C25Q	208-690	/	233	3 363,96 HT / 4 104,03 TTC
Soft Starter ATS48	ATS48	ATS48M12Y	208-690	/	1170	14 220,82 HT / 17 349,40 TTC

TABLE 1.2 – La gamme Altivar Soft Starter ATS480/48 des Démarreurs progressifs de Schneider Electric

1.7 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis d'examiner en profondeur les fondements technologiques et fonctionnels des principales familles de convertisseurs AC/AC, en mettant particulièrement l'accent sur les composants utilisés dans les variateurs de vitesse et les démarreurs progressifs. L'étude des variateurs de vitesse a mis en évidence leur capacité à ajuster précisément la vitesse de rotation des moteurs asynchrones, grâce aux différentes méthodes de commande intégrées, telles que la commande scalaire, la commande vectorielle ou encore la commande directe du couple. De plus, les modes de freinage disponibles confèrent une flexibilité supplémentaire dans les applications nécessitant un contrôle dynamique de la décélération.

L'état de l'art sur les démarreurs progressifs a, quant à lui, mis en lumière leur rôle essentiel dans la protection électrique et mécanique des installations. En limitant les courants d'appel et les chocs mécaniques lors des phases de démarrage et d'arrêt, ces dispositifs contribuent significativement à la longévité des équipements et à la stabilité du réseau.

Ainsi, l'analyse conjointe de ces deux solutions – les variateurs de vitesse et les démarreurs progressifs – offre une vision globale des technologies modernes dédiées au contrôle efficace des moteurs asynchrones. L'ensemble des connaissances abordées dans ce chapitre constitue une base technique solide pour orienter les choix d'intégration dans des systèmes industriels soucieux de performance, de fiabilité et d'efficacité énergétique.

Chapitre 2

Utilisation des variateurs de vitesse dans les applications de pompage

2.1 Introduction

Les pompes représentent le plus grand consommateur d'électricité dans l'industrie au sein de l'Union européenne, avec une consommation annuelle de 160 TWh et des émissions de 79 millions de tonnes de dioxyde de carbone (CO_2) [27].

L'utilisation des variateurs de vitesse (VSDs) pour ajuster la vitesse des pompes s'est avérée être une méthode écoénergétique efficace pour réduire les pertes d'ajustement dans les processus de pompage[27].

L'utilisation des VSD est une excellente solution pour les systèmes à vitesse non fixe. Ils permettent d'importantes économies d'énergie rentables et offrent un contrôle précis de la vitesse du moteur électrique. En plus des économies d'énergie, les VSD présentent des avantages techniques notables tels que :

- Réduction de l'usure des équipements grâce aux démarrages et arrêts progressifs.
- Opération à vitesse réduite, limitant ainsi les contraintes mécaniques.

Les systèmes avec uniquement des pertes par frottement offrent le scénario le plus propice aux économies d'énergie, tandis que ceux avec une forte charge statique sont les moins favorables. Le choix entre un VSD et un étranglement de vanne peut sembler évident, mais la plupart des applications se situent entre ces deux extrêmes, rendant l'analyse économique plus complexe[27].

L'utilisation de variateurs de vitesse dans les systèmes de pompage permet des économies d'électricité allant de 20% à 50%, notamment lorsque :

- Le cycle de charge est variable.
- Les heures de fonctionnement annuelles dépassent 2 000 heures/ans.
- La puissance du moteur est supérieure à 25 kW.
- Le coefficient de charge est élevé.
- L'efficacité de la pompe est optimisée.
- Un moteur à haut rendement est utilisé à la place d'un moteur standard.

2.2 Pompes centrifuges et lois d'affinité

Les pompes font toujours partie d'un système de pompage. Un système de pompage est généralement constitué d'un réseau de tuyaux, de réservoirs, de vannes et d'autres composants. Ces systèmes nécessitent presque toujours une variation du débit. Alors que la plupart des pompes centrifuges fonctionnent à un débit fixe déterminé par les besoins d'un « système libre » rigide, de nombreux systèmes requièrent un débit variable pour s'adapter aux évolutions des exigences du processus[27].

Les méthodes de contrôle du débit d'un système de pompage variable incluent l'utilisation d'une vanne de régulation (contrôle par étranglement), le bypass, le fonctionnement en marche/arrêt et le fonctionnement par variateur de vitesse.

Dans un système à vitesse constante, la vitesse de la pompe est fixe et une vanne de régulation ajoute une résistance au système, modifiant ainsi la courbe du système et limitant le débit du système de pompage, tout en consommant presque la même quantité d'énergie. En revanche, avec un contrôle à vitesse variable, au lieu de modifier la résistance du système pour réguler le débit, la vitesse de la pompe est ajustée. Cela déplace la courbe hauteur-capacité (H-Q) de la pompe, modifiant ainsi le point d'intersection avec la courbe du système. Le contrôle à vitesse variable ajuste directement l'apport d'énergie, plutôt que de s'appuyer sur une vanne pour dissiper l'énergie du système. Le résultat est souvent une économie d'énergie significative (voir fig. 1.1)[27].

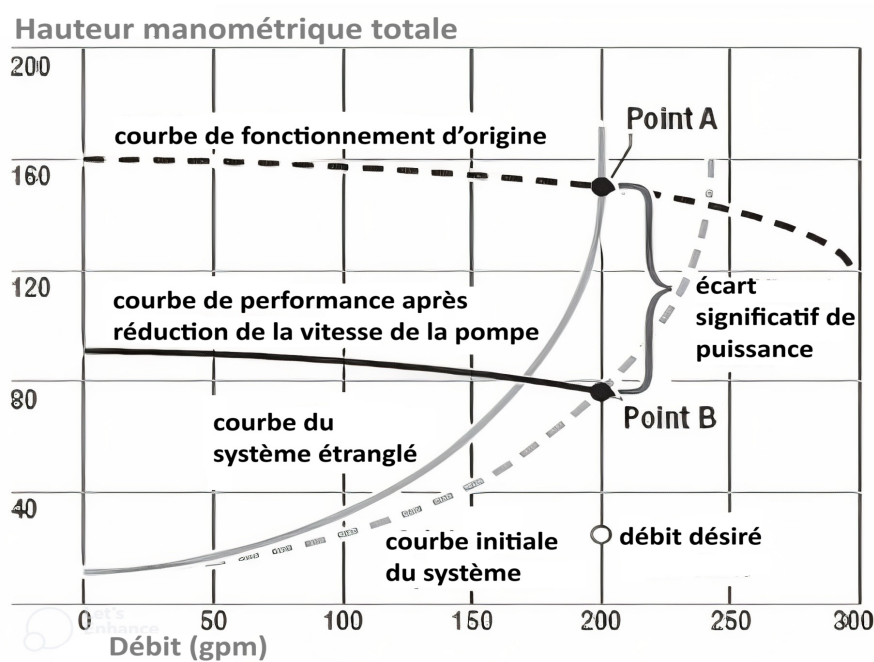


FIGURE 2.1 – Lois de similitude et économies d'énergie lors de l'utilisation d'un VSD par rapport au contrôle par étranglement

Bien qu'une pompe étranglée consomme légèrement moins d'énergie qu'en fonctionnement libre, elle continue de tourner à la même vitesse, maintenant ainsi une vitesse élevée au niveau du joint mécanique et des roulements. Or, la vitesse influe directement sur la durée de vie des roulements et du joint mécanique.

La consommation d'énergie diminue avec l'étranglement, comme l'indique la courbe de régu-

lation par vanne dans la Fig. 4. Cependant, la réduction de vitesse entraîne une diminution d'énergie beaucoup plus significative. Plus la réduction de débit par rapport au point de fonctionnement libre est importante, plus les économies d'énergie sont élevées. L'avantage réside dans le fait que les performances des pompes centrifuges suivent les lois de similitude. Ces lois décrivent la relation entre la vitesse de rotation de la pompe (n), le débit (Q), la hauteur manométrique générée (H) et la puissance absorbée (P) [27].

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (2.2)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (2.3)$$

Le débit est directement proportionnel à la vitesse de la pompe. La pression différentielle est directement proportionnelle au carré de la vitesse de la pompe. La consommation d'énergie est directement proportionnelle au cube de la vitesse de la pompe.

Selon les lois de similitude, une pompe centrifuge fonctionnant à 80 % de sa vitesse consomme seulement la moitié de l'énergie d'une unité fonctionnant à pleine vitesse. Cela s'explique par le fait que la puissance nécessaire pour faire fonctionner une pompe ou un ventilateur varie avec le cube de la vitesse.

$$\text{Puissance réduite} = (1 - (0.8)^3) 100 = 49\% \quad (2.4)$$

Les pertes d'énergie dans les processus de pompage peuvent être classées en pertes d'ajustement et pertes de dimensionnement. Des économies d'énergie peuvent être réalisées si l'une de ces pertes peut être réduite. Dans de nombreux cas, l'ajustement de la vitesse de la pompe s'est révélé être une bonne solution pour réduire les pertes d'ajustement dans le pompage. De même, l'utilisation de l'ajustement de la vitesse avec un variateur de vitesse (VSD) peut être une solution possible pour diminuer les pertes de dimensionnement dans les systèmes de pompage. Étant donné que de nombreux systèmes de pompage fonctionnent à une capacité inférieure à la pleine charge la plupart du temps, les VSD peuvent générer d'énormes économies. Cela sera démontré à travers l'étude de cas ci-dessous [27].

2.3 Importance des VSDs dans le pompage

Les VSD peuvent être installés sur n'importe quel moteur électrique, mais ils génèrent les plus grandes économies d'énergie lorsqu'ils sont appliqués aux moteurs des systèmes de ventilation et de pompage [27]. L'efficacité énergétique de presque tous les systèmes de pompage ou de ventilation peut être considérablement améliorée par l'ajout d'un contrôleur de moteur VSD, car ces systèmes sont souvent surdimensionnés ou doivent répondre à des conditions de charge très variables. Dans de nombreux systèmes, l'excédent de capacité est encore géré en étranglant mécaniquement le débit à l'aide de registres ou de vannes. Cela est extrêmement inefficace car le moteur continue de travailler dur pour fournir sa pleine capacité. En modifiant la vitesse des moteurs électriques alimentant ces systèmes de pompage, les VSD leur permettent de suivre les charges du système tout en capturant les avantages d'efficacité énergétique offerts par les soi-disant « lois de similitude ».

Les vannes de régulation et les accouplements hydrauliques sont des exemples de dispositifs ayant une efficacité relativement faible à débit ou vitesse réduits. Les économies réelles de coûts énergétiques varieront en fonction des caractéristiques mécaniques et de l'efficacité des moteurs.

Les VSD sur les systèmes de pompage offrent plusieurs avantages, dont certains sont relativement faciles à quantifier, tandis que d'autres sont moins tangibles.

- **Économies d'énergie :** Les systèmes de contrôle électronique de la vitesse avec des variateurs de vitesse peuvent être utilisés dans les pompes pour réduire la consommation d'électricité de 30% à 50%. Les systèmes de pompage sont utilisés partout, des applications domestiques aux applications industrielles. Les systèmes de pompage représentent ainsi environ 22 à 25% de l'électricité consommée par les systèmes moteurs, ce qui équivaut à environ 4% de la consommation mondiale d'électricité.
- **Contrôle amélioré du processus :** En adaptant directement le débit ou la pression de sortie de la pompe aux exigences du processus, de petites variations peuvent être corrigées plus rapidement par un VSD que par d'autres formes de contrôle, ce qui améliore les performances du processus.
- **Amélioration de la fiabilité du système :** Toute réduction de la vitesse obtenue en utilisant un VSD présente des avantages majeurs pour réduire l'usure de la pompe, en particulier au niveau des roulements et des joints.
- **Économies sur les coûts d'investissement :** Pour un nouveau système de pompage, le coût d'investissement d'un VSD peut souvent être compensé par l'élimination des vannes de contrôle, des lignes de dérivation et des démarreurs conventionnels.[?]

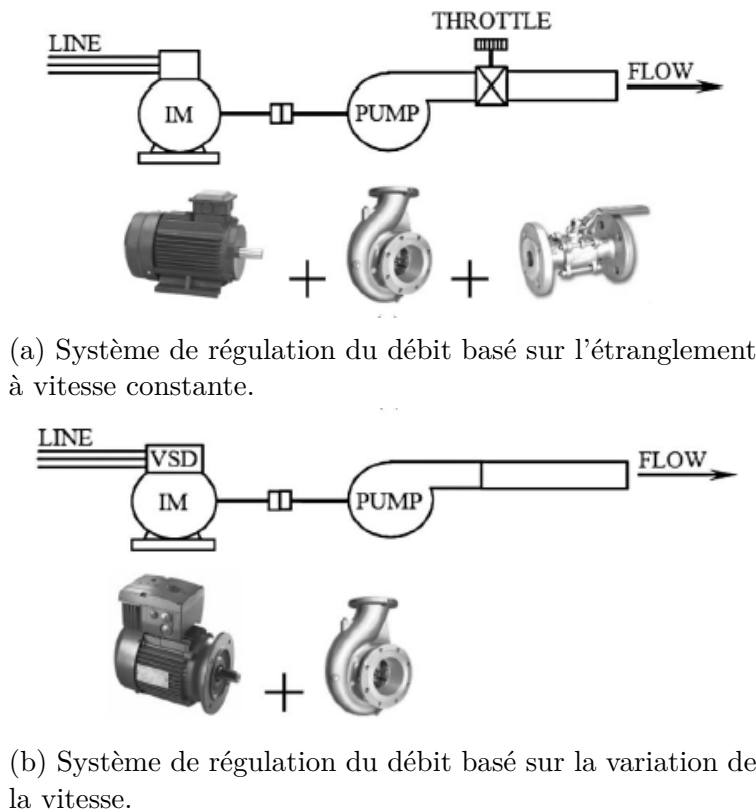


FIGURE 2.2 – Deux systèmes de pompage à débit variable différents.

2.4 Modélisation dynamique d'une pompe centrifuge à vitesse variable et constante utilisant MATLAB / SIMULINK

Étant donné l'utilisation généralisée des pompes centrifuges triphasées dans les processus industriels sous charges variables, il est essentiel de disposer d'un modèle réaliste du processus de pompage afin d'améliorer son efficacité. De nombreux modèles ont été développés par les chercheurs à ce jour. En 2005, Carsten Skovmose Kallesoe a proposé un modèle dynamique de pompe centrifuge à vitesse constante dans le cadre de son travail intitulé "Fault Detection and Isolation in Centrifugal Pumps" [28].

Dans ce chapitre, deux stratégies de contrôle ont été mises en œuvre dans le sous-modèle de régulation : la commande à vitesse constante et la commande à vitesse variable basée sur un régulateur PID. Le système de pompage a été configuré conformément à la figure 2.3 [29].

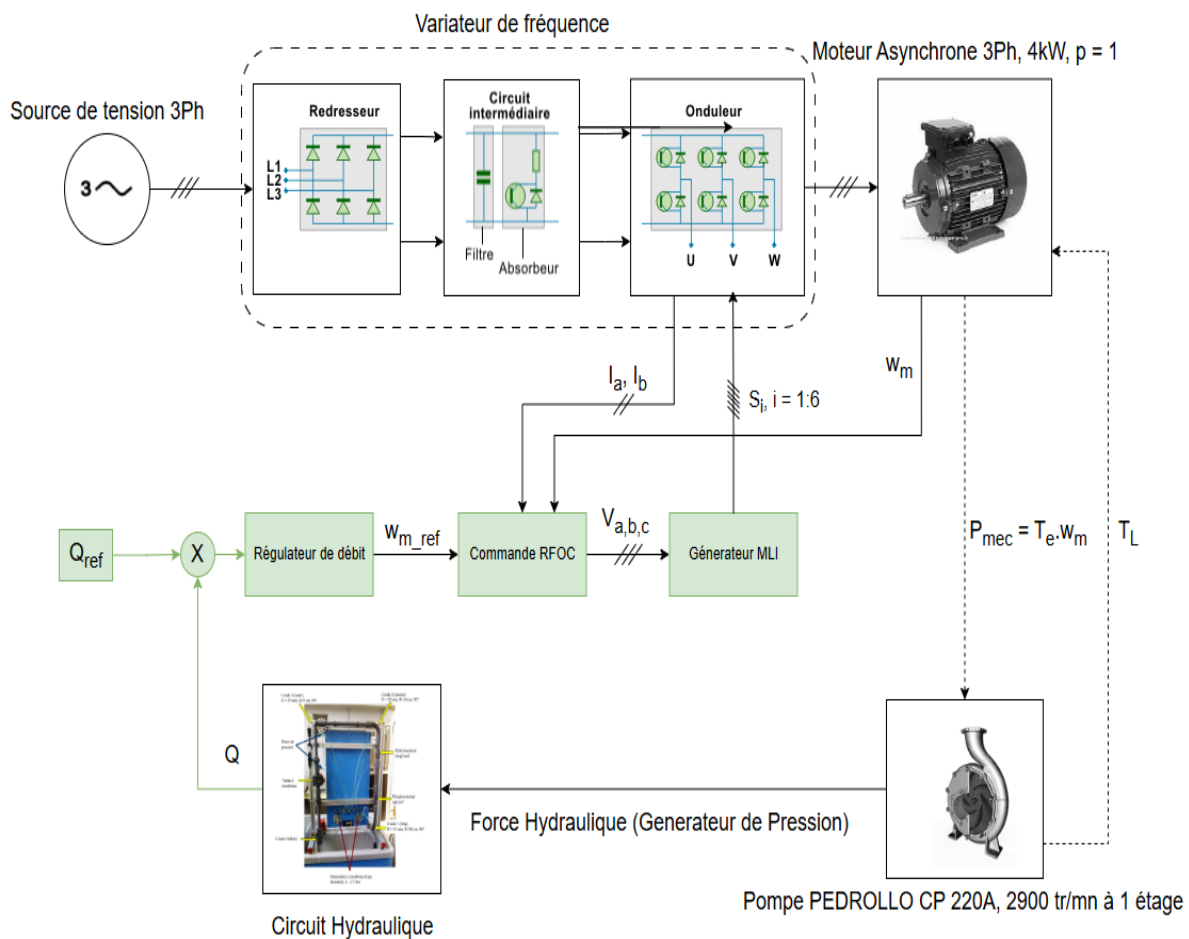


FIGURE 2.3 – Configuration du système de pompage a vitesse variable

2.4.1 Modèles mathématiques

2.4.1.1 Source de tension triphasée

On considère une source de tension triphasée équilibrée, sans impédance interne, avec une amplitude maximale de $\sqrt{2}V$ et une pulsation w_s , déphasée de $\frac{2\pi}{3}$ l'une par rapport à l'autre. Elle est modélisée par les équations suivantes :

$$V_{as} = \sqrt{2}V \sin(w_s t) \quad (2.5)$$

$$V_{bs} = \sqrt{2}V \sin(w_s t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2.6)$$

$$V_{cs} = \sqrt{2}V \sin(w_s t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.7)$$

2.4.1.2 Moteur Asynchrone triphasé

Le moteur asynchrone triphasé fonctionne comme un convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique, exerçant le couple électromagnétique sur la pompe centrifuge. Le moteur asynchrone est modélisé en utilisant la transformation des coordonnées fixes abc vers les coordonnées tournantes dqo. Le modèle du moteur asynchrone triphasé peut être formulé comme indiqué dans les équations suivantes [28] :

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (2.8)$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (2.9)$$

$$\psi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2.10)$$

$$\psi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2.11)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (2.12)$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (2.13)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + w \psi_{ds} \quad (2.14)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - w \psi_{qs} \quad (2.15)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \psi'_{qr} + (w - w_r) \psi'_{dr} \quad (2.16)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \psi'_{dr} - (w - w_r) \psi'_{qr} \quad (2.17)$$

Telle que :

ψ_{qs} : Flux du stator sur l'axe q

ψ_{ds} : Flux du stator sur l'axe d

ψ'_{qr} : Flux du rotor sur l'axe q

ψ'_{dr} : Flux du rotor sur l'axe d

L_s : Inductance statorique

L'_r : Inductance rotorique ramenée au stator

L_m : Inductance mutuelle

L_{ls} : Inductance de fuite statorique

L'_{lr} : Inductance de fuite rotorique ramenée

V_{qs} : Tension du stator sur l'axe q

V_{ds} : Tension du stator sur l'axe d

V'_{qr} : Tension du rotor sur l'axe q

V'_{dr} : Tension du rotor sur l'axe d

w, w_r : Vitesse angulaire du repère de référence, Vitesse angulaire électrique = $p.\Omega$ respectivement

Le schéma du circuit équivalent en coordonnées dqo est montré dans la fig :2.4 et fig :2.5

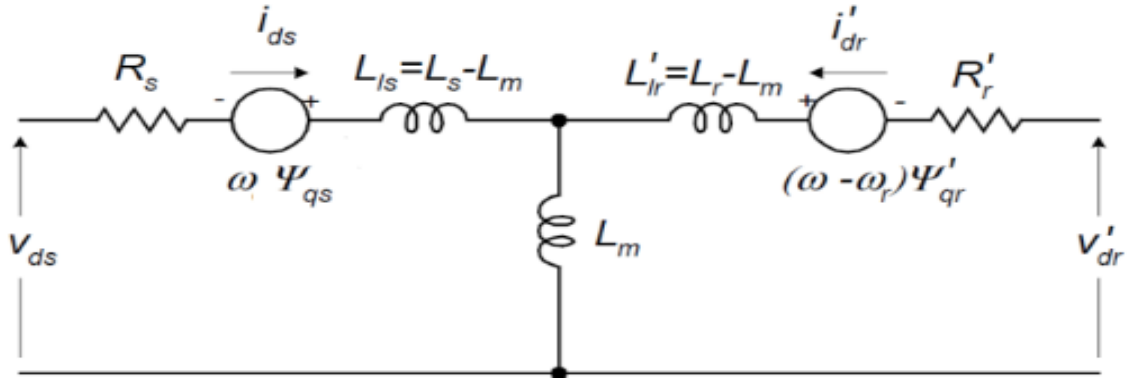


FIGURE 2.4 – Circuit équivalent selon l'axe d

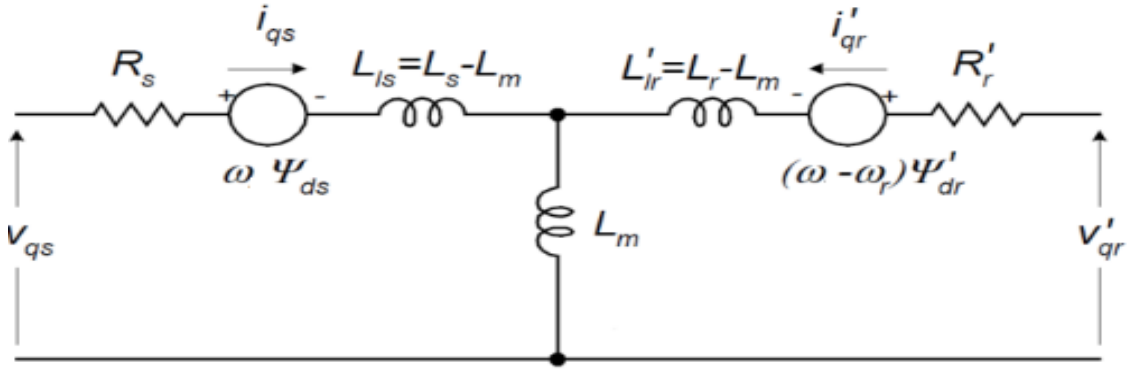


FIGURE 2.5 – Circuit équivalent selon l'axe q

Dans cette modélisation, v_{qr} et v_{dr} sont fixés à zéro pour une machine asynchrone à cage d'écureuil.

Le couple électromagnétique généré est modélisé par l'équation :

$$T_e = \frac{3}{2}p(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) \quad (2.18)$$

L'équation mécanique du système s'écrit comme suit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_e - B\Omega - T_L \quad (2.19)$$

2.4.1.3 Variateur de vitesse

Un variateur de vitesse est un dispositif destiné à régler la vitesse d'un moteur électrique à courant alternatif en faisant varier la fréquence et la tension, respectivement le courant délivré à celui-ci. Ils sont constitués principalement d'un convertisseur statique et d'une électronique de commande. Il contrôle donc la vitesse du moteur et du système qu'il entraîne. En répondant aux exigences du processus, un variateur de vitesse est capable de régler à la fois la vitesse et le couple d'un moteur à induction [28].

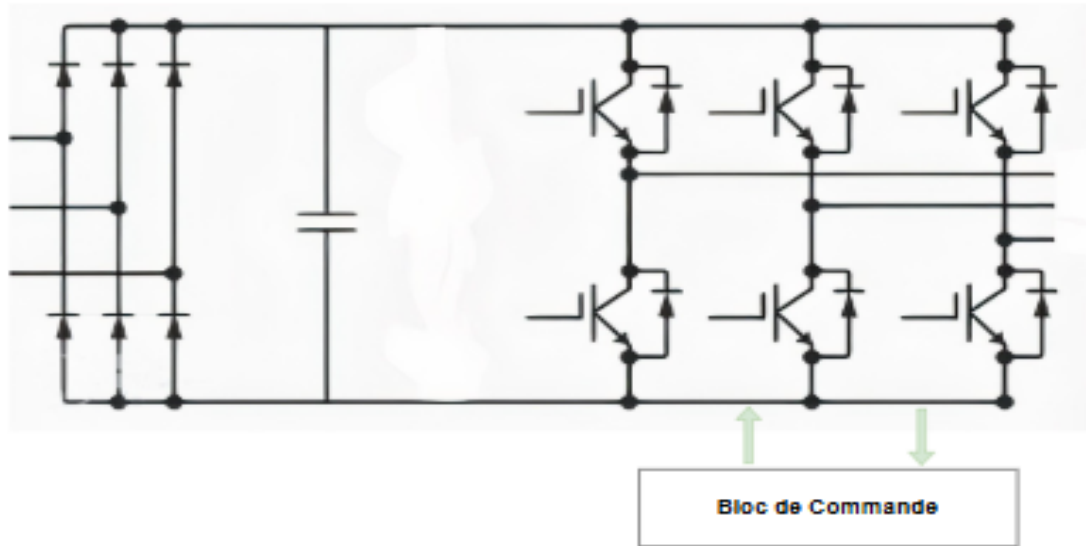


FIGURE 2.6 – Schéma Synoptique d'un variateur de vitesse (VSD)

Le convertisseur utilisé dans les variateurs de vitesse se compose de trois principaux sous-ensembles :

a) Redresseur triphasé à diodes

C'est un convertisseur alternatif-continu qui permet de convertir une tension alternative en une tension continue unidirectionnelle. En effet la tension continue obtenue n'est pas parfaite car elle comporte des ondulations résiduelles, et la valeur moyenne de la tension redressée s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 U_{dmoy} &= \frac{1}{T} \int_0^T U_d(t) dt \\
 U_{dmoy} &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} \sqrt{2}V \left[\sin(t) - \sin\left(t - \frac{2\pi}{3}\right) \right] d(t) \\
 U_{dmoy} &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

b) Filtre

Il remplit généralement plusieurs fonctions, il sert de stockage d'énergie, il réduit les ondulations résiduelles et filtre les parasites,

$$C = \frac{I_c \cdot dt}{dU_c} \tag{2.21}$$

$$C = \frac{I_c \cdot \Delta t}{\Delta U_c} \tag{2.22}$$

$$C = \frac{I_c}{6f\Delta U_c} \tag{2.23}$$

où :

- C est la capacité du condensateur (en Farads),
- I_c est le courant moyen du bus DC (en Ampères),
- ΔU_c est la variation admissible de la tension du bus DC (en Volts),
- f est la fréquence du réseau d'entrée (en Hertz).

c) Onduleur triphasé à modulation de largeur d'impulsions (MLI)

L'onduleur reçoit la tension continue filtrée et la convertit en une tension alternative triphasée à fréquence et amplitude variables pour réguler la vitesse et le couple du moteur.

Au début de la simulation, nous avons utilisé la méthode de commande scalaire ($V/f=\text{cst}$). Cependant, cette approche présente des limitations à basse fréquence (faible vitesse), en raison de la chute de tension ohmique, non négligeable devant la force électromotrice (FEM) dans la résistance statorique. Cela entraîne un dysfonctionnement du contrôle à basse vitesse. Pour pallier ce problème, nous avons adopté la méthode de commande vectorielle RFOC (Rotor Flux Oriented Control), qui a démontré d'excellents résultats en termes de régulation de vitesse, aussi bien à haute que à basse vitesse.

Le schéma synoptique de la méthode RFOC est présenté ci-dessous [30] :

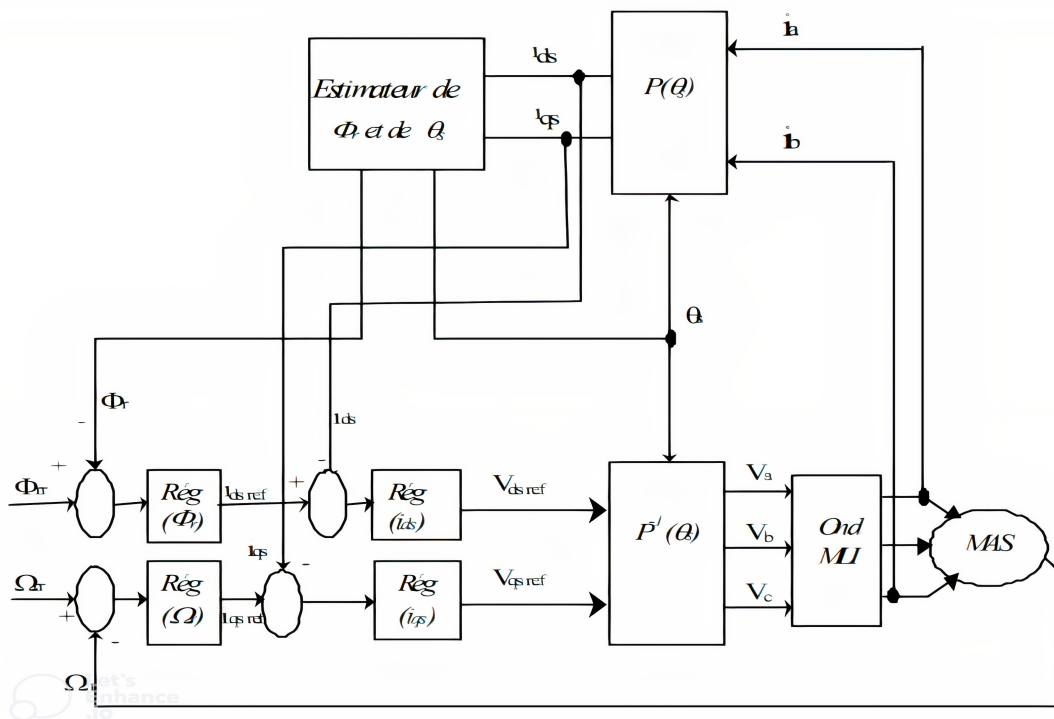


FIGURE 2.7 – Schéma synoptique de la méthode RFOC

2.4.1.4 Circuit hydraulique :

Pour une étude comparative entre le contrôle du débit à vitesse constante (par étranglement) et à vitesse variable, nous avons choisi de conserver un circuit hydraulique simple. Ce circuit est le même que celui utilisé lors des travaux pratiques du département de Génie Hydraulique à l'ENP. Il est composé d'une pompe centrifuge, d'une vanne, de tuyaux, ainsi que de

rétrécissements et élargissements progressifs et soudains, permettant l'étude des pertes de charge singulières et linéaires.

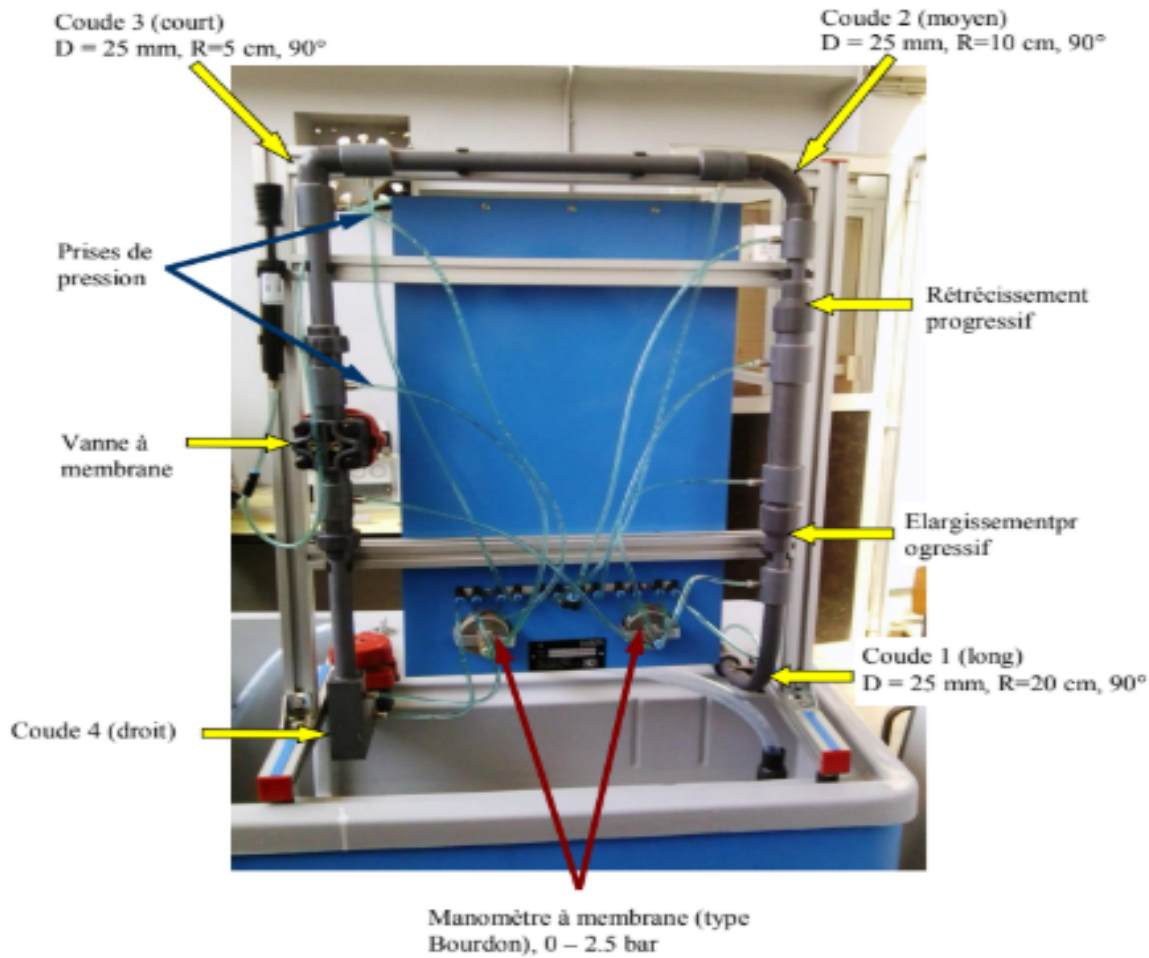


FIGURE 2.8 – Circuit Hydraulique

Dans ce modèle, nous avons négligé la compressibilité dynamique du fluide, qui induit une dépendance de la densité à la pression, ainsi que l'inertie du fluide, qui représente sa résistance aux variations du débit massique. De plus, nous avons considéré un liquide isotherme, c'est-à-dire que les paramètres du fluide sont supposés indépendants de la température, cette dernière étant maintenue constante à 25 °C.

1. **Modele des tuyaux** : Considérons un tuyau avec deux extrémités, notées A et B. En négligeant la compressibilité dynamique du liquide, le principe de conservation de la masse s'exprime par l'équation de continuité :

$$\dot{m}_A + \dot{m}_B = 0 \quad (2.24)$$

soit, en termes de débit volumique :

$$Q_A = Q_B \quad (2.25)$$

2. **La pompe centrifuge** utilisée en simulation est une PEDROLLO CP 220A de 4kW 3Ph à un seul étage, dont les courbes caractéristiques sont données pour une vitesse de rotation de $n = 2900$ tr/min.



FIGURE 2.9 – PEDROLLO CP 220A, 4kW, 3Ph

Remarque pour extraire la courbe caractéristique à différentes vitesses on utilise la loi d'affinité (affinity law) voir au dessus [31].

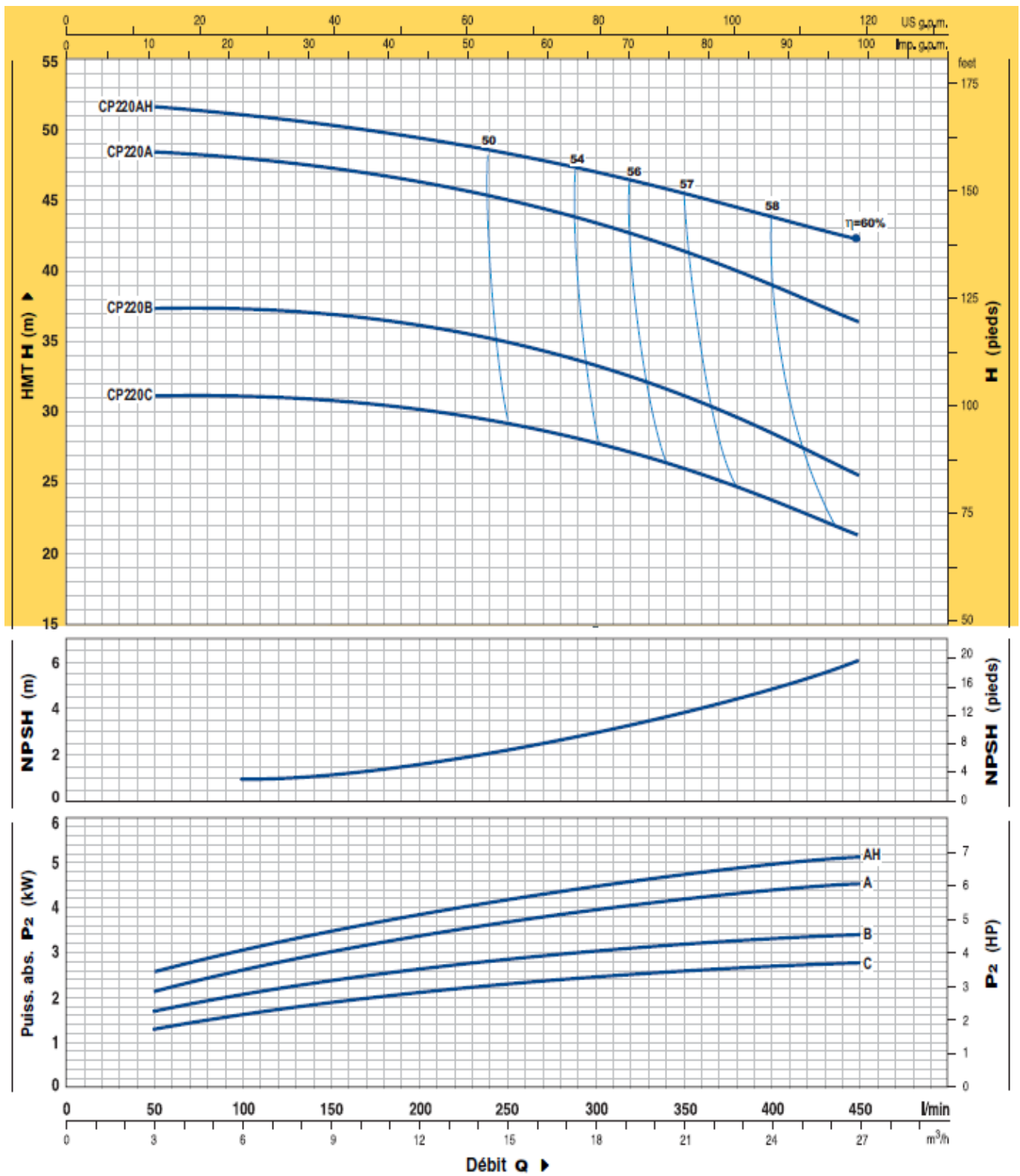


FIGURE 2.10 – Courbes caractéristiques PEDROLLO CP 220A de 4KW 3Ph à une vitesse de rotation de 2900 tr/min (la courbe A

Où P_2 est la puissance mécanique, et à partir de la puissance mécanique, on peut déterminer le couple résistant en fonction du débit, en divisant par la vitesse :

$$C_r(Q) = \frac{P_2(Q)}{n \cdot \frac{2\pi}{60}} \cdot 100 \quad (2.26)$$

où n est la vitesse de rotation de référence en tr/min.

Pour le rendement de la pompe :

$$\eta(\%) = \frac{P_{\text{hydr}} \cdot 100}{P_2} \quad (2.27)$$

donc :

$$\eta(Q)(\%) = \frac{\rho \cdot g \cdot HMT(Q) \cdot Q}{P_2(Q)} \cdot 100 \quad (2.28)$$

Ci-dessous les graphes trouvés pour la même pompe PEDROLLO CP 220A.

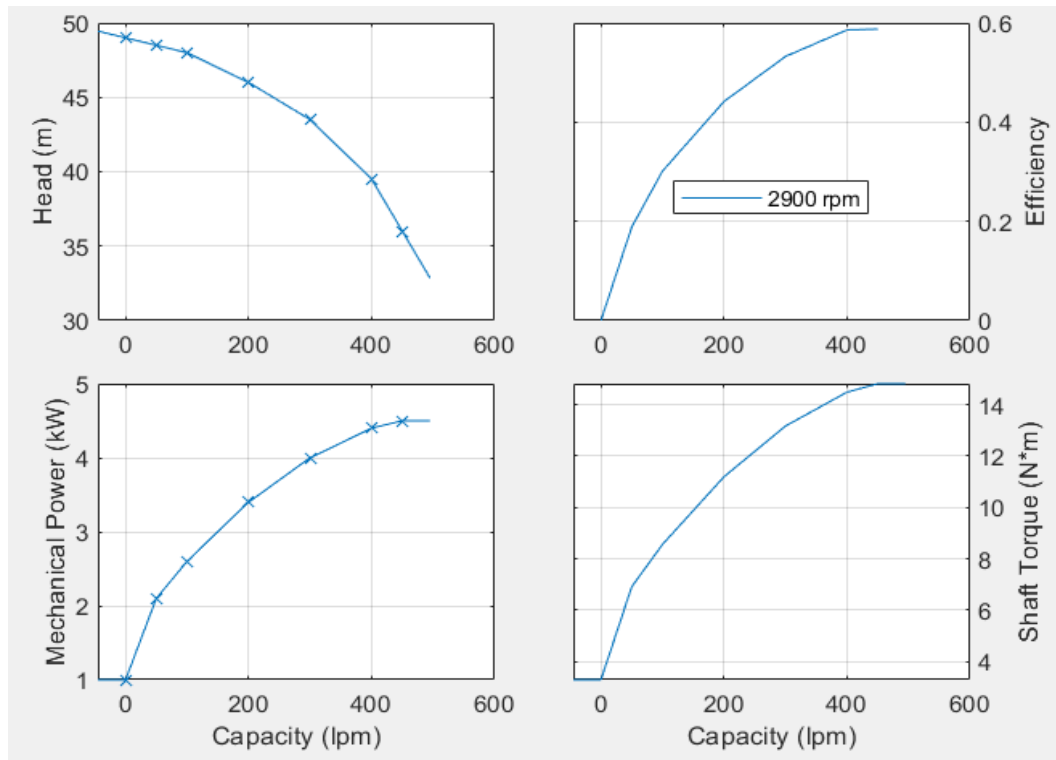


FIGURE 2.11 – HMT en m, Puissance mécanique P_2 en kW, Rendement η , C_r en N.m en fonction du débit en l/min

Pour la modélisation de la pompe centrifuge on a utilisé la Paramétrisation des données tabulées 1D : Hauteur manométrique et puissance mécanique en fonction du débit :

$$\Delta p = \rho g \Delta H_{\text{ref}} q_{\text{ref}} \left(\frac{w}{w_{\text{ref}}} \right)^2 \left(\frac{D}{D_{\text{ref}}} \right)^2 \quad (2.29)$$

où :

- Δp : Différence de pression générée par la pompe (Pa).
- ρ : Masse volumique du fluide (kg/m^3).
- g : Accélération gravitationnelle (m/s^2).
- $\Delta H_{ref}(q_{ref})$: Hauteur manométrique de référence correspondant au débit de référence q_{ref} (m).
- w : Vitesse angulaire réelle de la pompe (rad/s).
- w_{ref} : Vitesse angulaire de référence de la pompe (rad/s).
- D : Diamètre réel de la roue de la pompe (m).
- D_{ref} : Diamètre de référence de la roue de la pompe (m).

Cette équation traduit la pression générée par une pompe centrifuge en fonction de la hauteur manométrique, de la vitesse de rotation et du diamètre de la roue, en s'appuyant sur les lois de similitude des pompes.

2.5 Simulation et résultats obtenus

Pour valider les résultats discutés précédemment entre le contrôle de débit à vitesse constante et à vitesse variable, une simulation a été réalisée en utilisant les paramètres donnés dans les tableaux 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4.

Description	Valeur
Puissance, P	4 (kW)
Tension de ligne, U	380 (V)
Résistance statorique, R_s	1.405 (Ω)
Résistance rotorique ramenée au stator, R'_r	1.395 (Ω)
Inductance de fuite statorique, L_{ls}	0.005839 (H)
Inductance de fuite rotorique ramenée au stator, L'_{lr}	0.005839 (H)
Inductance magnétisante, L_m	0.1722 (H)
Nombre de paires de pôles,	1
Fréquence, f	50 (Hz)
Vitesse de rotation nominale, RPM	2900 (tr/min)
Coefficient de frottement, B	0.0041 ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$)
Moment d'inertie, J	0.093 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
Flux nominal, Φ_n	1 (Wb)

TABLE 2.1 – Paramètres du moteur asynchrone

Source de tension triphasée	
Tension de ligne, U	380 (V)
Fréquence, f	50 (Hz)
VSD	
Fréquence de commutation, f_c	5 (kHz)
Capacité de filtrage, C	800 (μ F)

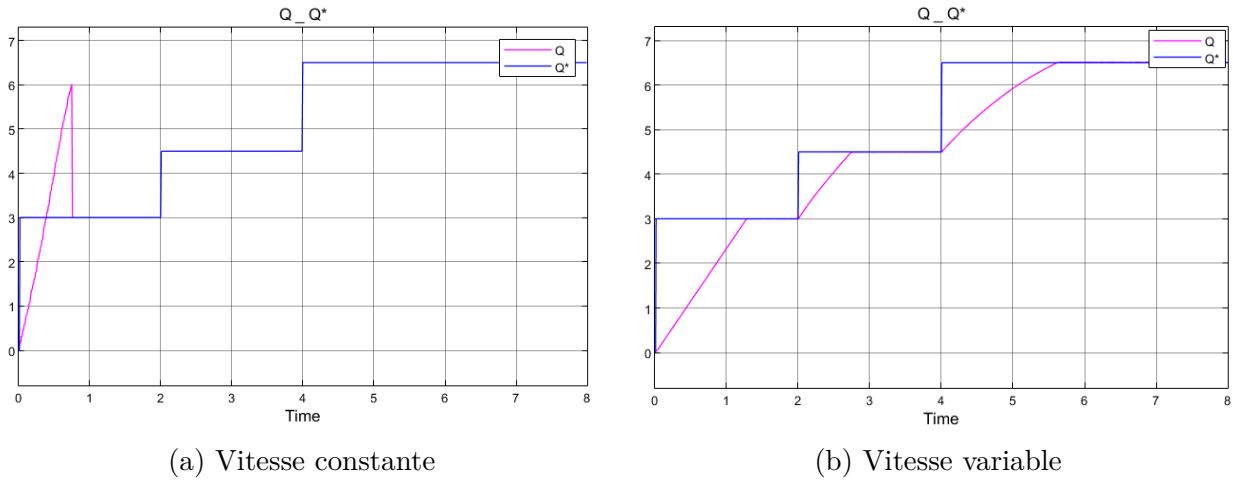
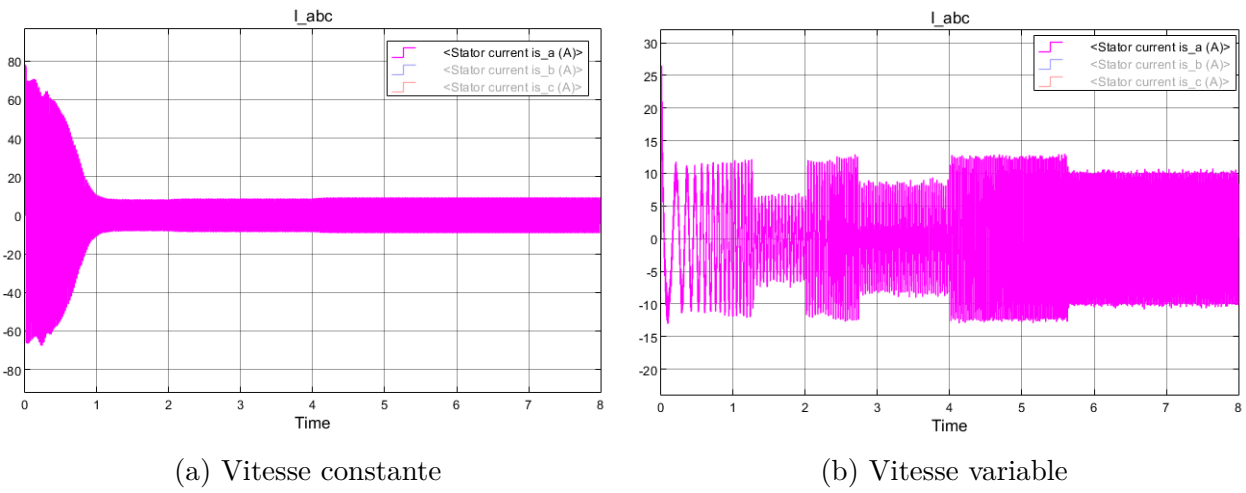
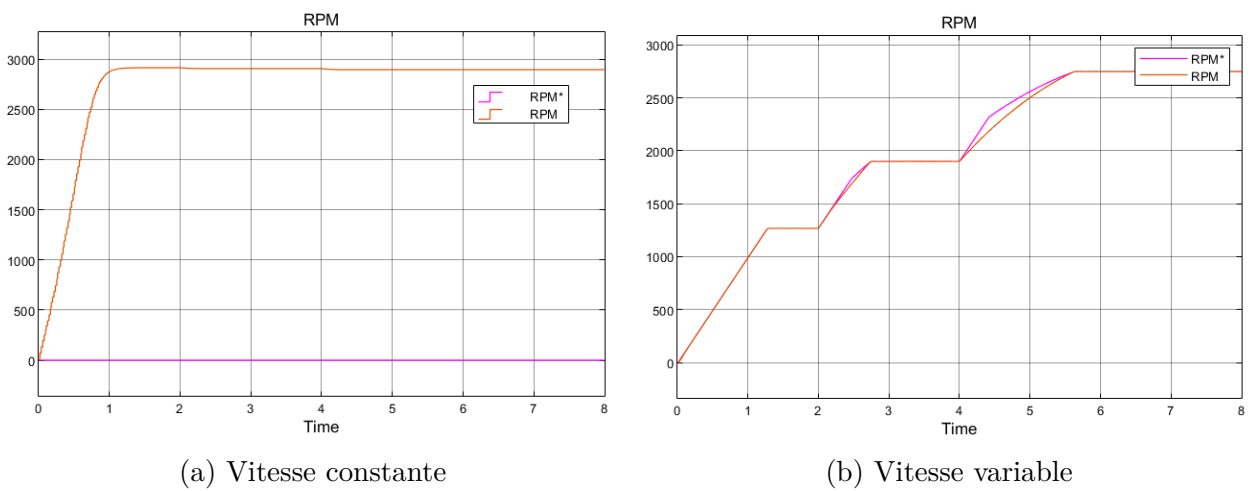
TABLE 2.2 – Paramètres de la source de tension triphasée et du VSD

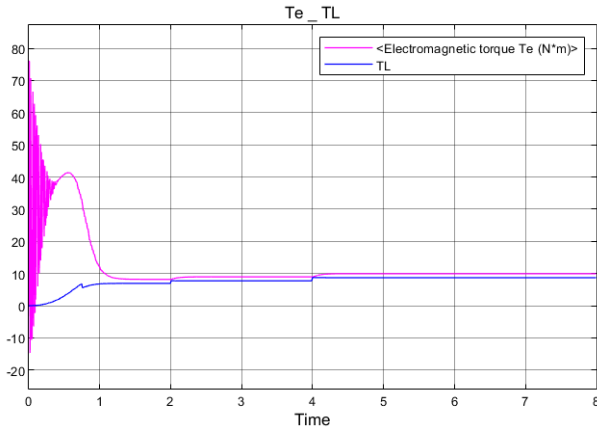
Description	Valeur
Régulateur du flux, K_{pf}	90
Régulateur du flux, K_{if}	2
Régulateur de vitesse, K_{ps}	4.5
Régulateur de vitesse, K_{is}	0.1
Régulateur de courant d'axe d, K_{pd}	20
Régulateur de courant d'axe d, K_{id}	2.5
Régulateur de courant d'axe q, K_{pq}	90
Régulateur de courant d'axe q, K_{iq}	800

TABLE 2.3 – Paramètres des régulateurs de la commande vectorielle RFOC

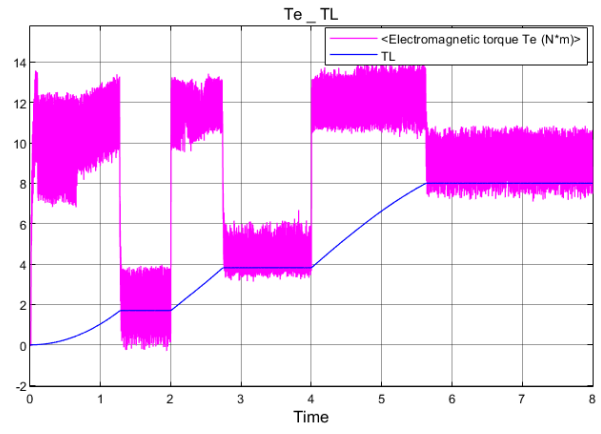
Description	Valeur
Densité, ρ	998.21 (kg/m^3)
Température, T	25 ($^{\circ}C$)
Viscosité dynamique, η	0.89 ($mPa \cdot s$)
Facteur de réduction lié à la viscosité	1

TABLE 2.4 – Propriétés du fluide (dans ce cas, l'eau)

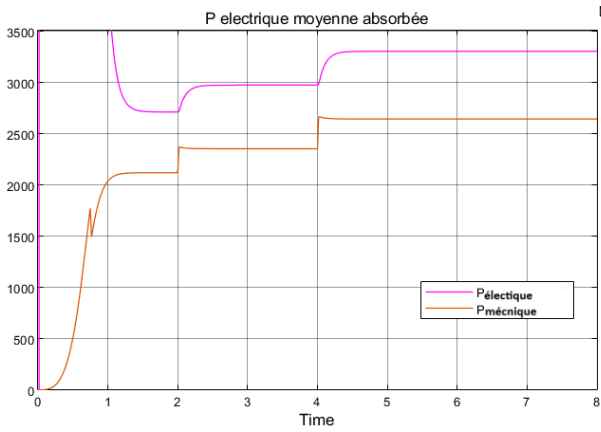

 FIGURE 2.12 – Débit actuel Q et débit de référence Q^*

 FIGURE 2.13 – Courant statorique phase a I_{sa}

 FIGURE 2.14 – Vitesse mécanique RPM



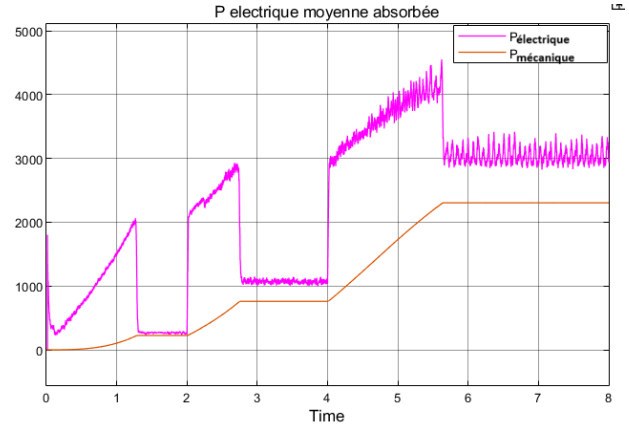
(a) Vitesse constante



(b) Vitesse variable

 FIGURE 2.15 – Couple électromagnétique T_e et couple résistant T_L


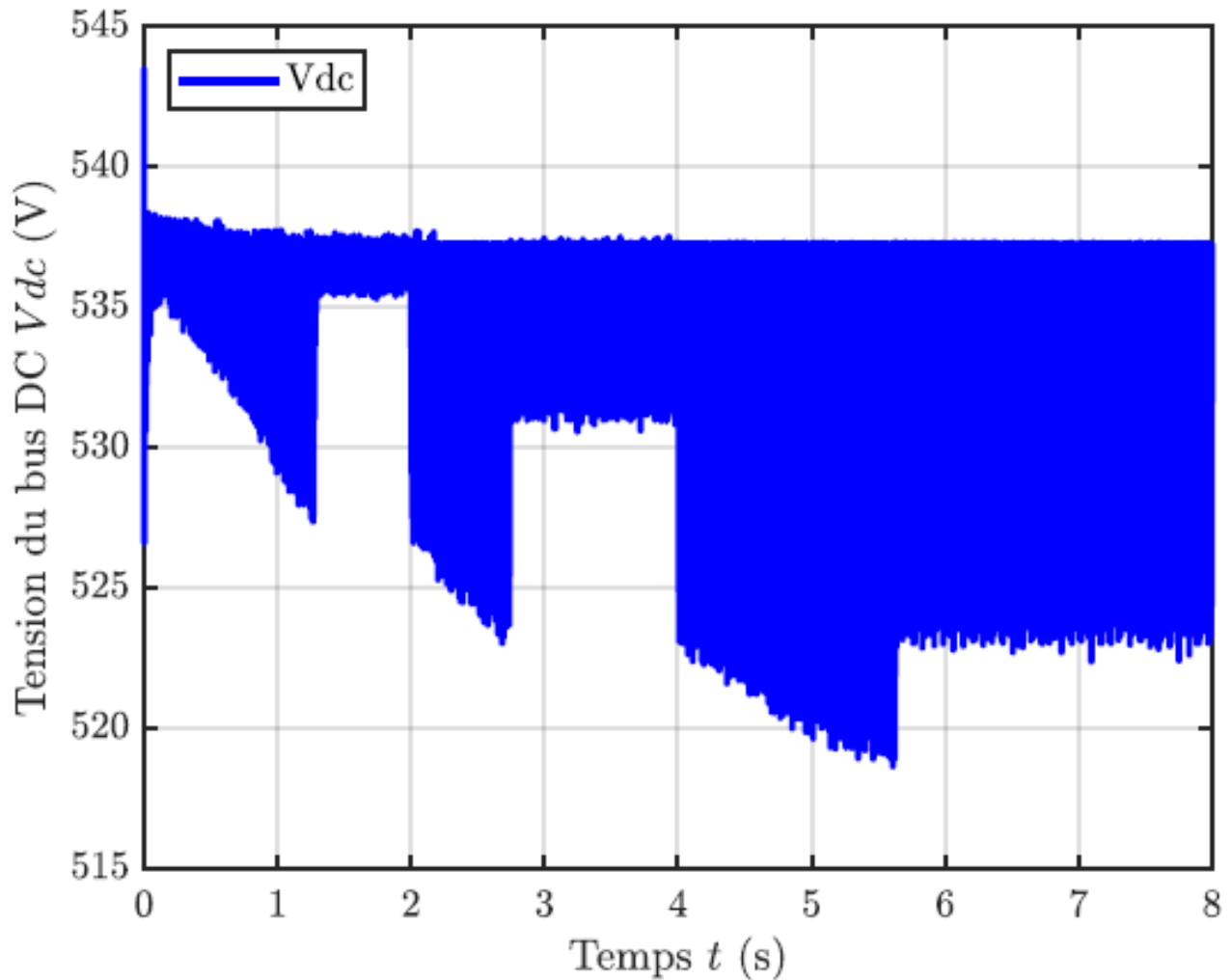
(a) Vitesse constante



(b) Vitesse variable

 FIGURE 2.16 – Puissance active moyenne consommée P_e et Puissance mécanique P_{mec}

§

FIGURE 2.17 – La tension redressée-filtrée V_{dc} (vitesse variable)

2.5.1 Interprétations et résultats

Dans la simulation, deux systèmes de régulation de débit ont été utilisés :

- un système à vitesse constante (avec vanne),
- un système à vitesse variable (avec variateur de vitesse, VSD).

Pour des raisons de comparaison sous différents scénarios, nous avons défini trois plages de consigne de débit faible, moyen et fort débit comme illustré dans la figure 2.12.

À noter que le circuit hydraulique utilisé présente un facteur de couple résistant élevé

$$T_L = k \cdot \omega^2 \quad (2.30)$$

Le démarrage s'effectue sans régulation ; lorsque le système atteint son régime permanent, la régulation est activée à 750 ms. La machine étant de forte inertie (donc avec une constante mécanique élevée), pendant la phase de régulation, l'électrovanne contrôle parfaitement et rapidement le débit. Dans l'autre système, la machine démarre progressivement en limitant l'accélération à 1000 tr/s^2 afin de limiter le courant de démarrage. Le seul inconvénient est que la machine met plus de temps à atteindre la consigne de débit, comme l'indique la figure 2.13.

Concernant les courants, pour le système à vitesse constante, comme mentionné précédemment, le courant de démarrage est élevé avec une fréquence constante. En revanche, dans l'autre système, on constate qu'à mesure que le débit augmente, la vitesse augmente proportionnellement, ce qui entraîne une augmentation progressive de la fréquence des courants comme l'indique la figure 2.13.

Ci-dessous, des zooms sur le courant d'une phase pour les trois plages de consigne de débit, comme illustré dans la figure 2.13.

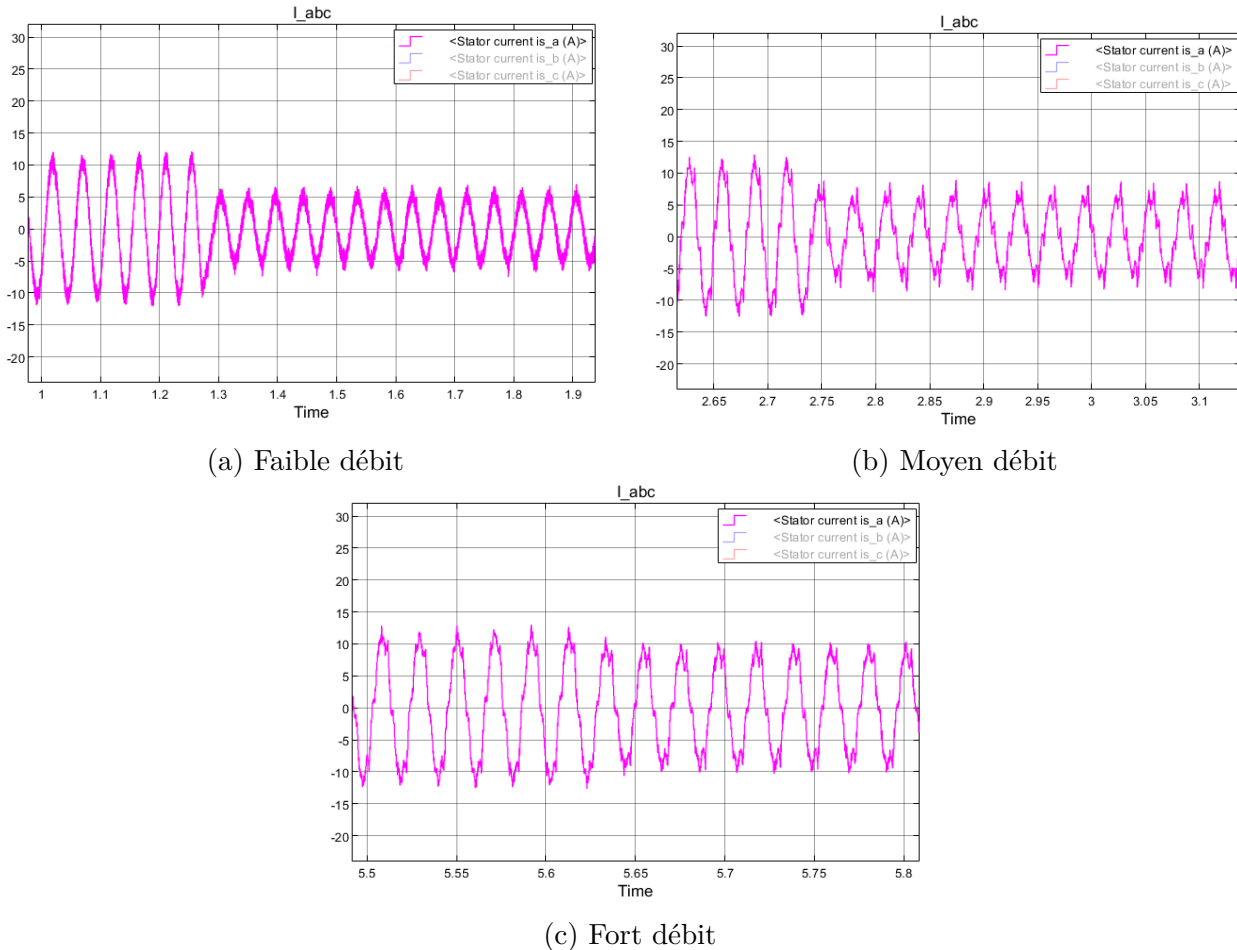


FIGURE 2.18 – Courant statorique phase a I_{sa} faible, moyen et fort débit

Concernant la vitesse, dans le premier système, la machine tourne à une vitesse presque constante (légèrement inférieure ou supérieure selon le couple résistant imposé par le circuit hydraulique sur la pompe). Dans le système de régulation avec variateur de vitesse (VSD), la vitesse augmente progressivement avec l'augmentation du débit (vitesse variable).

Le Couple électromagnétique : en régime permanent, la machine génère un couple électromagnétique légèrement supérieur au couple résistant, en raison des frottements. Cette relation est donnée par :

$$T_{em} = T_L + B\Omega \quad (2.31)$$

Pour le second système, le variateur de vitesse (VSD) augmente le courant I_{qs} afin de générer un couple élevé, nécessaire pour accélérer la machine pendant la phase

de montée en vitesse. Un limiteur de couple à 14 Nm a été utilisé. Lorsque le débit atteint la consigne, le VSD fixe la vitesse, et le couple décroît pour atteindre une valeur correspondant à la somme du couple résistant et des frottements.

Les perturbations observées sur le couple sont principalement dues aux régulateurs de courant, de flux et de vitesse utilisés dans la commande RFOC (Rotor Flux Oriented Control).

Concernant la puissance électrique moyenne consommée par les deux systèmes, pour le système à vitesse constante, la consommation est de 2,6 kW à faible débit, 2,98 kW à débit moyen et presque 3,35 kW à fort débit. Ces valeurs sont relativement élevées par rapport au second système, qui consomme 0,28 kW à faible débit, 1,08 kW à débit moyen et 3 kW à fort débit.

Récapitulation :

Pour un rapport de vitesse $\left(1 - \frac{N}{N_n}\right) \%$, dans la zone faible débit, le rapport est

$$\left(1 - \frac{1250}{2900}\right) \% = 57\% \quad (2.32)$$

avec une réduction de puissance par rapport au premier système de

$$\left(1 - \frac{P_{\text{elt1}}}{P_{\text{elt2}}}\right) \% = \left(1 - \frac{0.28}{2.7}\right) \% = 89,62\% \quad (2.33)$$

Dans la zone de débit moyen, on observe une réduction de vitesse de 34% et une réduction de puissance de 63%. Enfin, pour la zone à fort débit, le rapport de vitesse est de 5,1%, ce qui engendre une réduction de la puissance de 9,1%.

2.6 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de démontrer, à travers des simulations et des calculs, les économies d'électricité significatives qu'il est possible de réaliser grâce à l'utilisation de la régulation à vitesse variable dans les systèmes de pompage. Cette approche présente un impact notable sur la situation financière du secteur de l'eau en Algérie. L'intégration de variateurs de vitesse (VSD) pour ajuster la vitesse des pompes s'est révélée être une solution énergétiquement efficiente, permettant de réduire considérablement les pertes dues à l'ajustement du débit dans les processus de pompage.

Une étude comparative a été menée entre deux stratégies de régulation :

- un système à vitesse constante avec régulation par vanne,
- un système à vitesse variable avec variateur de vitesse.

Les simulations effectuées sur trois niveaux de consigne de débit (faible, moyen et fort) ont mis en évidence les performances dynamiques et énergétiques de chaque solution. Le système à vitesse variable s'est distingué par des gains importants en matière d'efficacité énergétique, avec des réductions de puissance consommée atteignant 89,6 % pour le faible débit et 63 % pour le débit moyen, comparativement au système à vanne. Ces résultats s'expliquent par la capacité du VSD à adapter en temps réel la vitesse de la pompe à la demande, contrairement au fonctionnement à vitesse constante qui engendre des pertes mécaniques importantes.

En contrepartie, le système à vitesse variable présente un temps de montée plus long au démarrage, lié à la limitation volontaire de l'accélération pour restreindre le courant d'appel. Toutefois, cette contrainte est largement compensée par une commande plus souple, un meilleur contrôle du couple électromagnétique et une réduction notable des pertes énergétiques.

D'une manière générale, l'utilisation de variateurs de vitesse dans les systèmes de pompage permet de réaliser des économies d'énergie pouvant atteindre 10 % à 40 %, en particulier lorsque le système fonctionne dans une plage de débit limitée avec un cycle de fonctionnement variable. Ces résultats confirment l'intérêt croissant pour les solutions à vitesse variable, dans une perspective d'optimisation énergétique et de performance technique.

Chapitre 3

Conception des schémas électriques, réalisation de la maquette et du circuit hydraulique

3.1 Introduction

Dans le secteur industriel, la conception d'une armoire électrique nécessite une préparation rigoureuse, notamment à travers la réalisation de schémas électriques détaillés. Ces schémas jouent un rôle essentiel, car ils permettent de faciliter le câblage, d'assurer la conformité aux normes en vigueur, et surtout de comprendre le fonctionnement global de l'armoire aussi bien pour les techniciens que pour les ingénieurs lors des opérations de maintenance ou de modification.

Pour créer ces schémas, plusieurs logiciels spécialisés sont utilisés dans l'industrie, parmi lesquels on peut citer EPLAN Electric P8, AutoCAD Electrical, SEE Electrical, ou encore SolidWorks Electrical. Ces outils permettent non seulement de dessiner les circuits électriques, mais aussi de générer automatiquement les listes de câbles, borniers, nomenclatures de composants, et même de simuler le fonctionnement de l'installation.

Dans le cadre de notre projet, nous avons choisi d'utiliser le logiciel EPLAN Electric P8, reconnu pour sa puissance, sa précision et sa capacité à s'intégrer dans des processus de conception industrielle complexes. Ce logiciel offre une large bibliothèque de symboles normalisés, des fonctionnalités d'automatisation avancées (comme les macros etc.) ainsi qu'un lien direct avec la gestion des stocks et la fabrication de l'armoire via des outils de tôlerie assistés.

Ce chapitre sera donc dédié à la présentation d'EPLAN Electric P8, en donnant une vue d'ensemble de ses fonctionnalités principales et de son rôle dans notre projet. Par la suite, nous détaillerons les différents matériels utilisés dans la maquette, notamment les composants électriques et électroniques (variateur de vitesse, protections, etc.), ainsi que les différentes étapes de montage de l'armoire, du câblage jusqu'aux tests finaux.

3.2 Définition du logiciel EPLAN Electric P8

EPLAN Electric P8 est un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) destiné à la réalisation de schémas électriques et à la conception d'armoires industrielles. Développé par la société allemande EPLAN, ce logiciel est devenu une référence dans le domaine de l'automatisation industrielle, grâce à ses outils puissants et sa capacité à structurer les projets de manière logique, rapide et fiable.

Il permet de concevoir des schémas multifilaires, unifilaires, de commande, de puissance et de câblage tout en assurant une documentation complète du projet (listes de composants, borniers, câbles, etc.). Il s'appuie sur une large bibliothèque de symboles et de composants standards provenant des fabricants les plus connus, ce qui facilite grandement la conception.

3.3 Elaboration des schémas électriques

La conception des schémas électriques dans EPLAN Electric P8 suit une série d'étapes méthodiques permettant d'assurer la clarté, la cohérence et la conformité du projet :

a) Création d'un nouveau projet : Un nouveau projet est initialisé à partir d'un modèle standard ou personnalisé, en définissant les paramètres de base (normes utilisées, langue, format des pages, etc.).

b) Définition de la structure du projet : L'organigramme du projet est structuré en pages ou folios, chacun correspondant à un type de schéma (puissance, commande, bornier, etc.). Une codification est mise en place pour identifier clairement chaque page et composant.

c) Insertion des composants : À l'aide des bibliothèques intégrées, les composants nécessaires (automate, variateur de vitesse, démarreur progressif, relais, alimentation, borniers, etc.) sont insérés sur les schémas. Chaque composant est référencé et associé à ses caractéristiques techniques.

d) Connexions entre les composants : Les connexions électriques (lignes de câblage) sont tracées entre les bornes des composants pour représenter les liaisons fonctionnelles et électriques. EPLAN effectue automatiquement les références croisées, la numérotation des fils et la mise à jour des connexions.

Ces étapes garantissent une conception claire, automatisée et conforme aux standards industriels, facilitant le câblage réel et la maintenance future de l'armoire.

3.3.1 Interface et étapes à suivre pour la réalisation des schémas électriques sur EPLAN Electric

Nous allons vous présenter une vue d'ensemble de l'interface du logiciel, ainsi que la méthode utilisée pour élaborer nos schémas. Les images ci-dessous illustrent les différentes étapes à suivre.

a) Interface de démarrage : Nous vous présentons une vue d'ensemble de l'interface du logiciel, accompagnée de la méthode adoptée pour l'élaboration de nos schémas. Les étapes suivantes décrivent le processus de réalisation d'un projet.



FIGURE 3.1 – Icône de lancement du logiciel

b) Interface de logiciel : Une fois l'icône de lancement du logiciel cliquée, la fenêtre principale s'affiche. Depuis cette interface, il est possible d'accéder au menu Fichier afin de procéder à la création d'un nouveau projet.

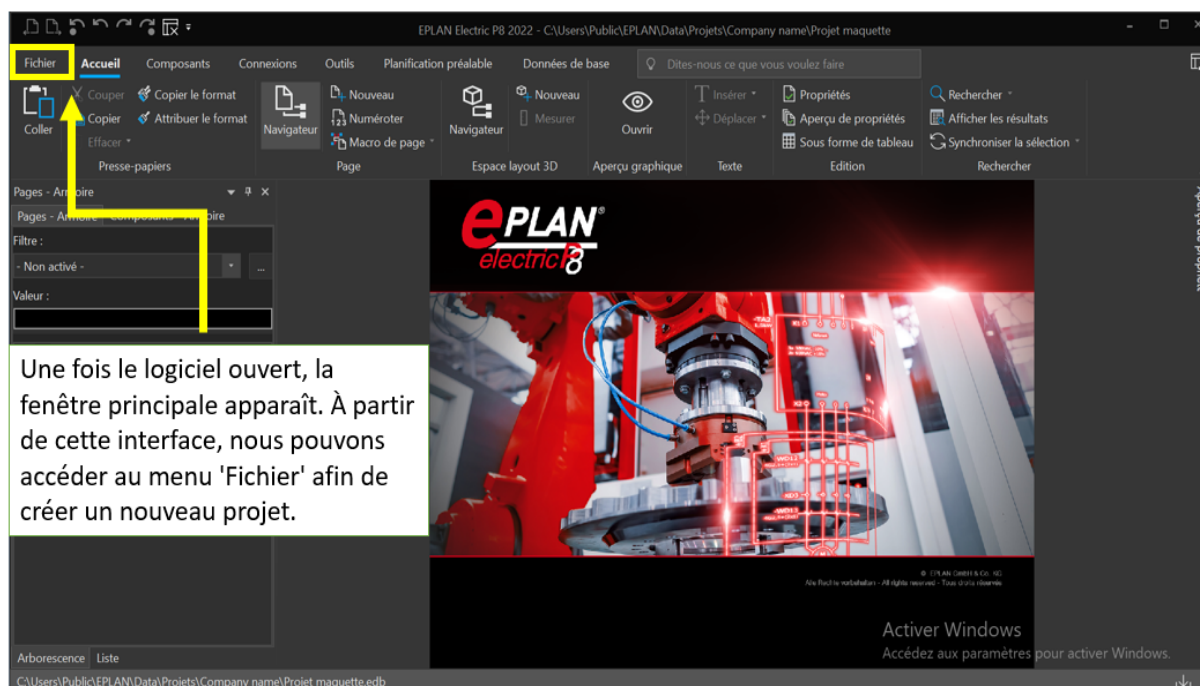


FIGURE 3.2 – Fenêtre principale du logiciel

c) Creation de projet : « Après avoir cliqué sur le menu Fichier, un sous-menu apparaît, permettant soit de créer un nouveau projet, soit d'ouvrir un projet existant, comme illustré dans la figure ci-dessous.

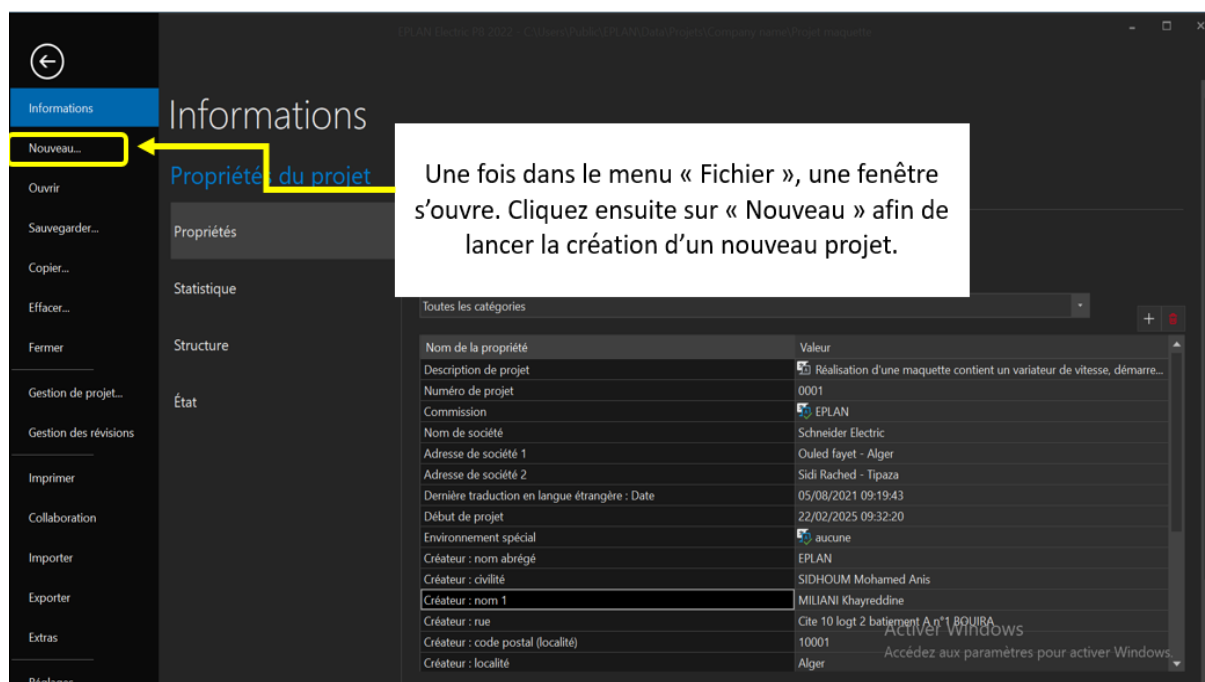


FIGURE 3.3 – Interface de création d'un nouveau projet

d) **Saisie des informations du projet** : En cliquant sur Nouveau, un onglet s'ouvre permettant de renseigner le nom du projet, la norme utilisée et l'emplacement de stockage.

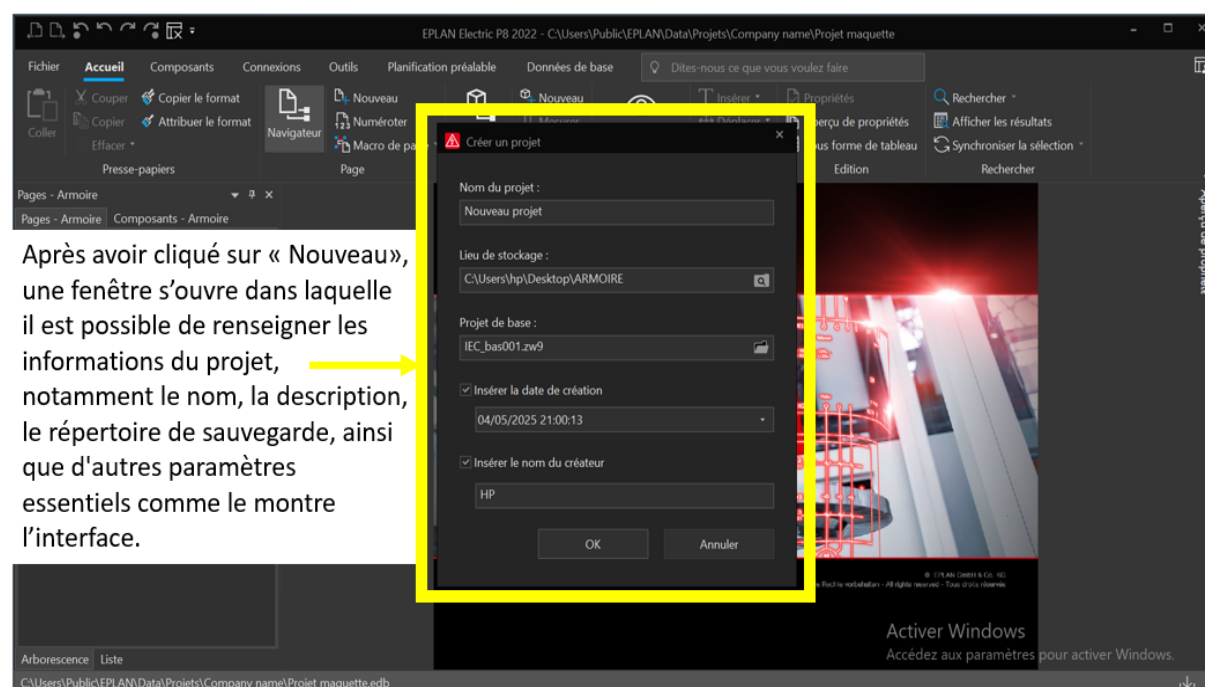


FIGURE 3.4 – Interface de saisie des informations du projets

e) **création des pages de projet** : Une fois les informations du projet saisies et la validation effectuée en cliquant sur OK, un nouvel onglet s'affiche. Celui-ci permet de créer plusieurs types de pages, telles qu'une page de garde ou une page multipolaire. Dans le cadre de notre projet, nous utiliserons ces deux formats afin d'y insérer les symboles nécessaires.

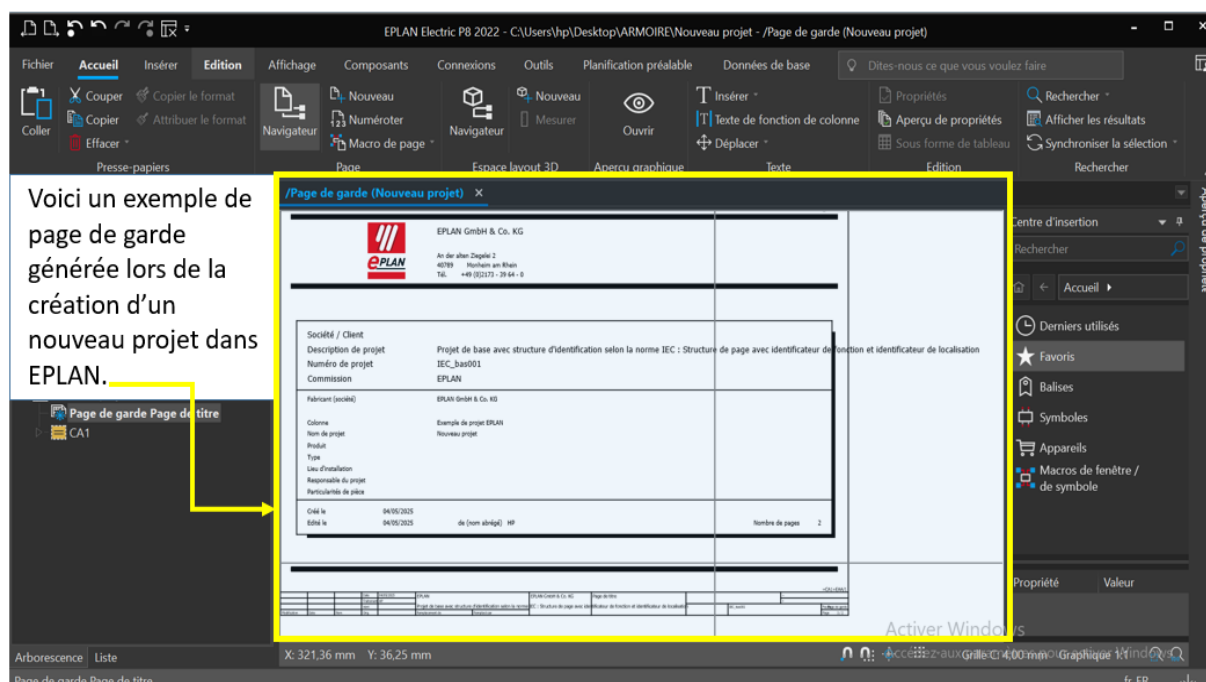


FIGURE 3.5 – Exemple de page de garde créée

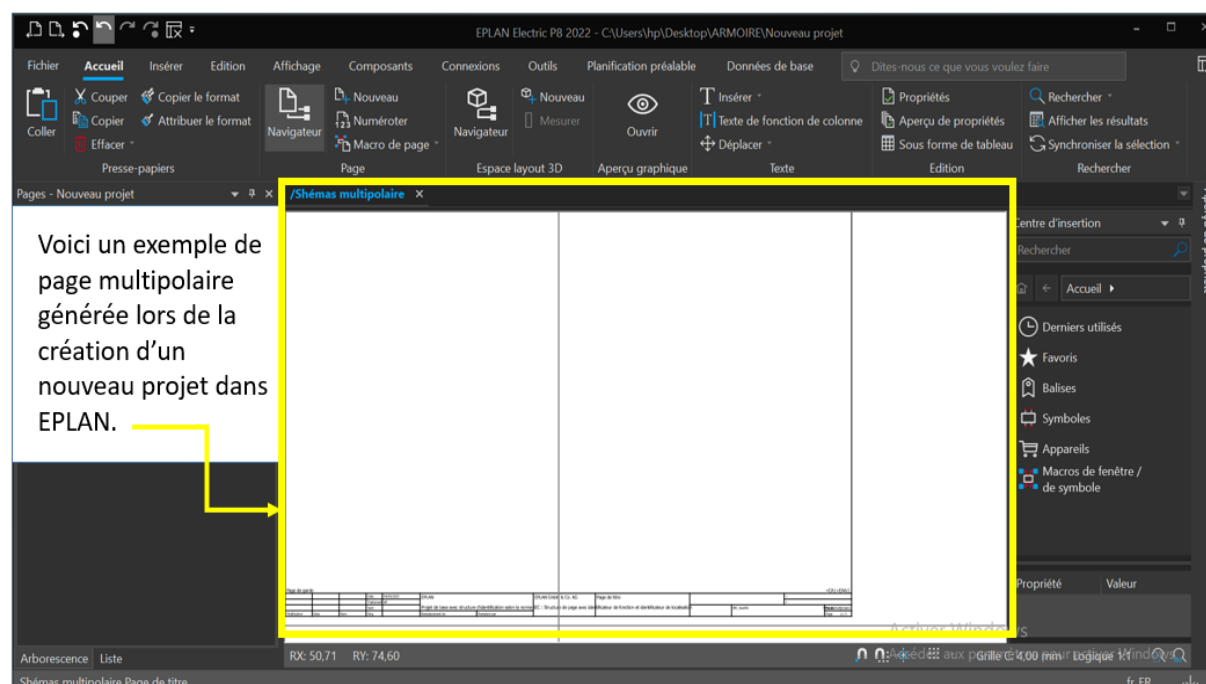


FIGURE 3.6 – Exemple de page multipolaire créée

f) Insertion des symboles : Une fois la page multipolaire créée, les symboles nécessaires sont insérés, puis interconnectés par le câblage. La figure suivante illustre cette étape plus en détail.

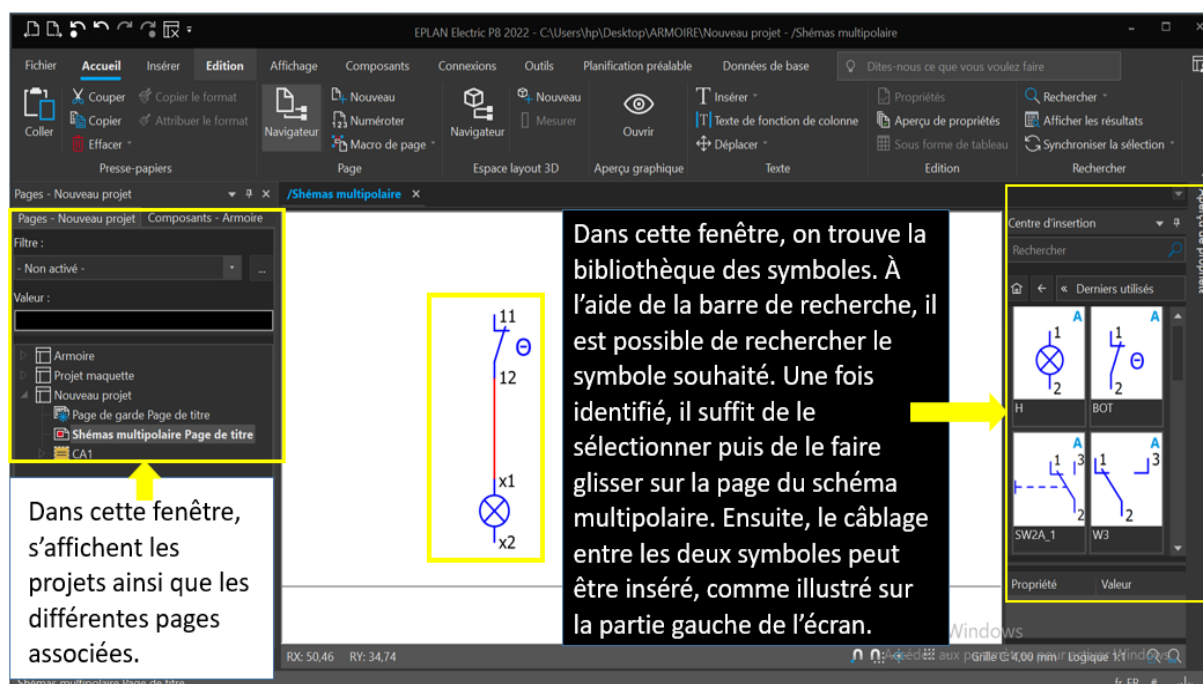


FIGURE 3.7 – Insertion et positionnement des symboles

g) Insertion d'une nouvelle page : Pour insérer une nouvelle page, un clic droit permet d'afficher l'option 'Nouvelle page'. Une fois sélectionnée, une fenêtre s'ouvre afin de définir le nom de la page et de choisir son type (page de garde, schéma multifilaire, etc.)

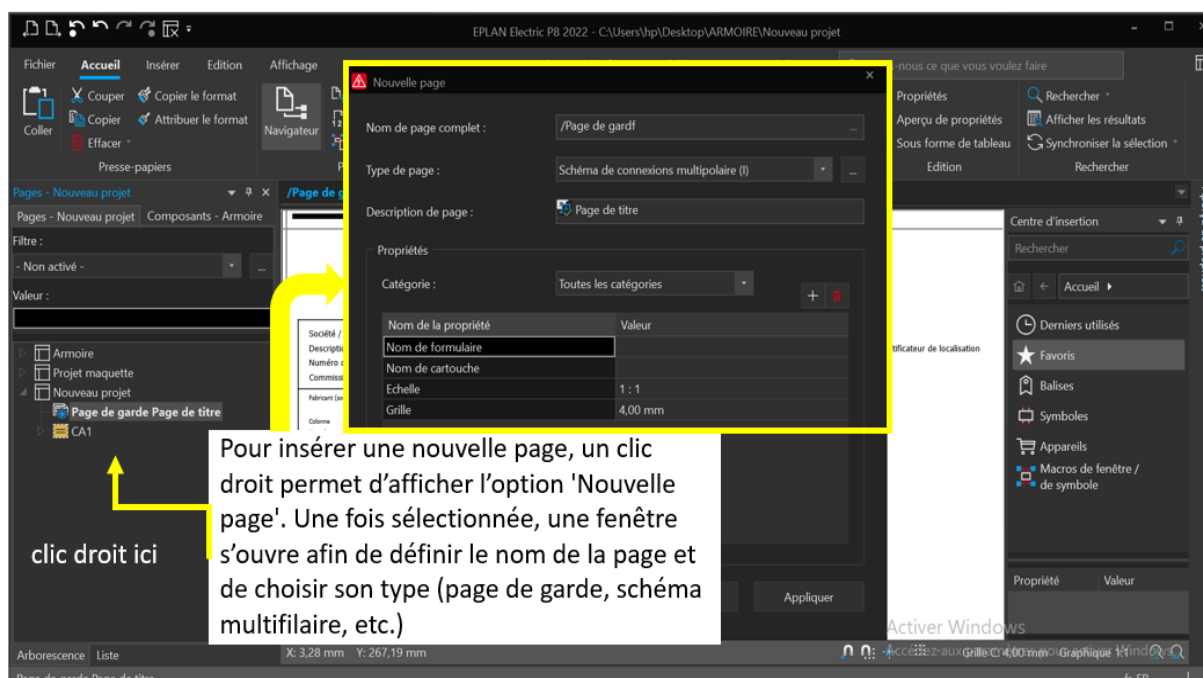


FIGURE 3.8 – Insertion et positionnement des symboles

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons créé plusieurs pages : une page de garde, une page répertoriant les symboles du circuit de puissance, une autre pour les symboles du circuit de commande, une page de schémas multifilaires de puissance, ainsi qu'une page de schémas multifilaires de commande.

Nous avons également réalisé le dessin en 2D de la porte et de l'intérieur de la maquette. Les schémas réalisés sont présentés ci-dessous. Pour les consulter en grand format, nous vous invitons à vous référer à l'annexe.

		Ecole nationale polytechnique Ecole nationale polytechnique 16200 Tél. +213 (0)6 75 59 47 09					
Société / Client Description de projet Variable Speed Drive Control Prototype Numéro de projet IEC_bas001 Commission EPLAN							
Fabricant (société) Ecole nationale polytechnique Colonne Nom de projet Exemple de projet EPLAN Produit Armoire Type Lieu d'installation Responsable du projet Particularités de pièce							
Créé le		29/04/2025		de (nom abrégé)		HP	
Edité le		30/04/2025				Nombre de pages 7	

Date: 30/04/2025		EPLAN		Ecole nationale polytechnique		- SIDHOUM Mohamed Anis		1- Liste des symboles	
Version: 01		Variable Speed Drive Control Prototype				- MILIANI Khayreddine			
Modifié: 01								Page: 1 / 7	

FIGURE 3.9 – Page de garde de notre projet de fin d'études

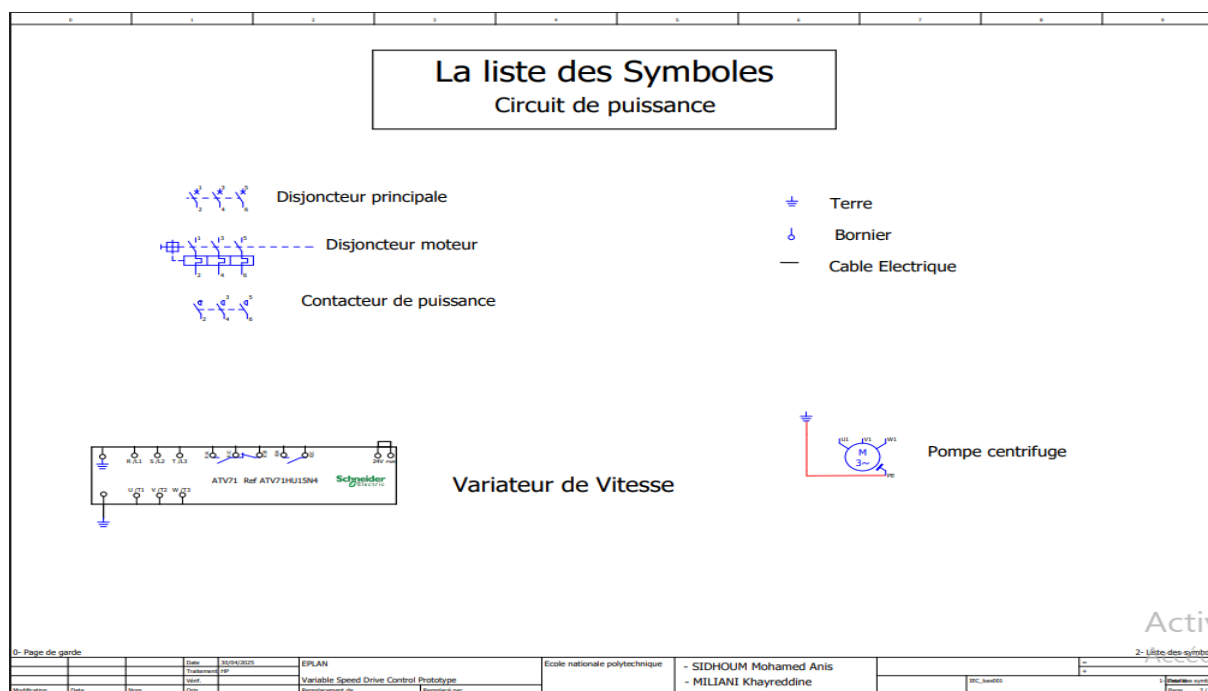


FIGURE 3.10 – La liste des Symboles de circuit de puissance

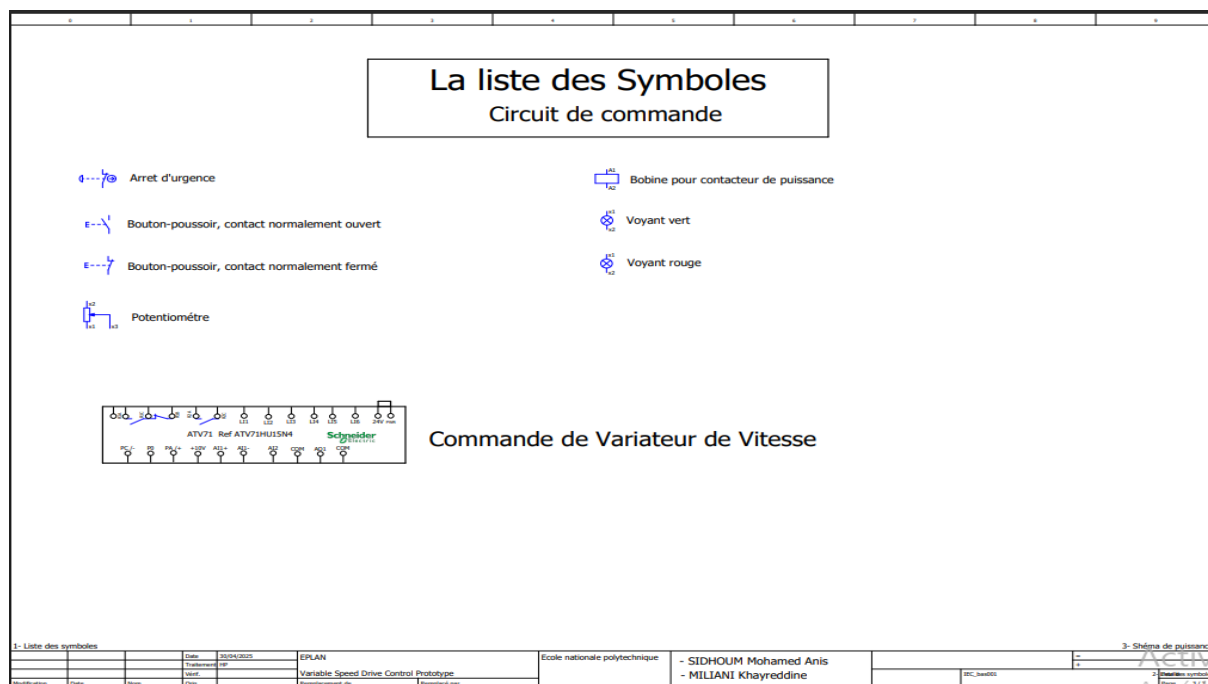


FIGURE 3.11 – La liste des Symboles de circuit de commande

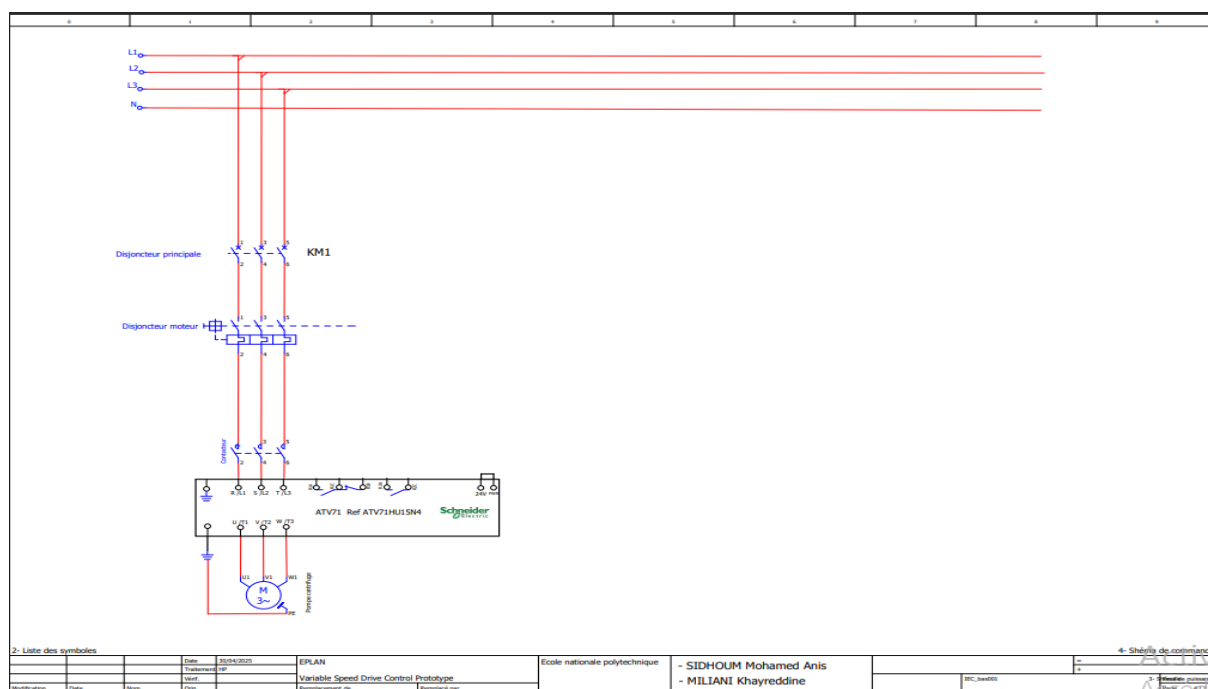


FIGURE 3.12 – Schémas de puissance

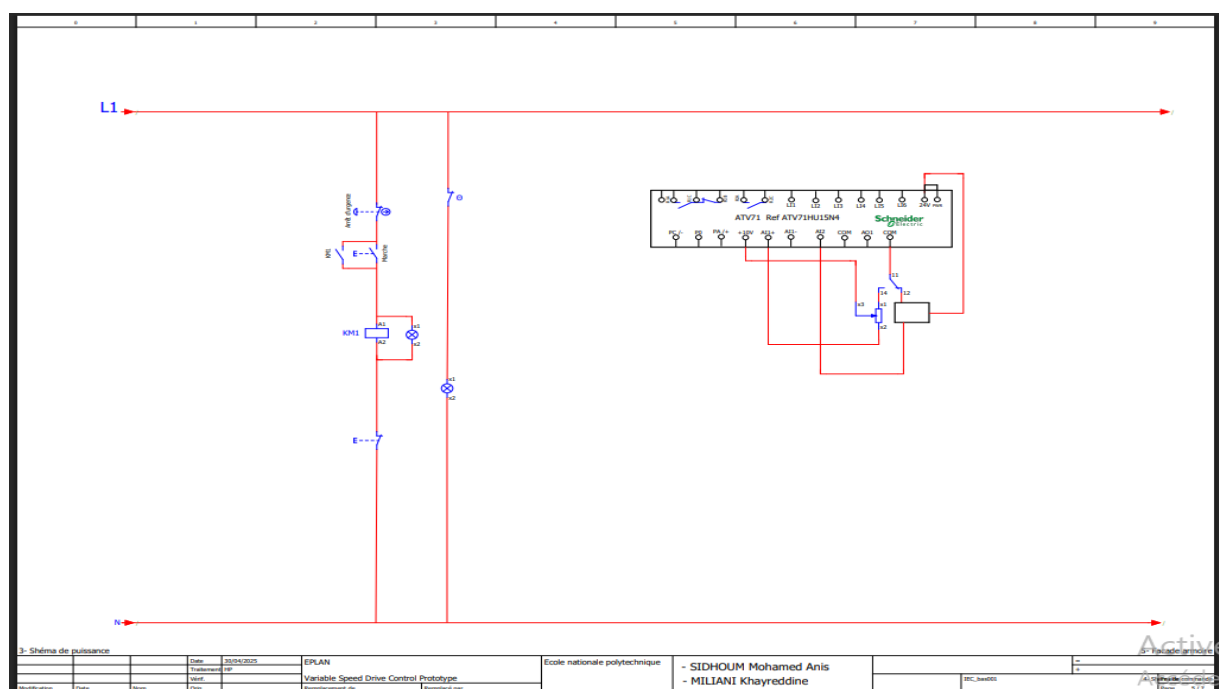


FIGURE 3.13 – Schémas de commande

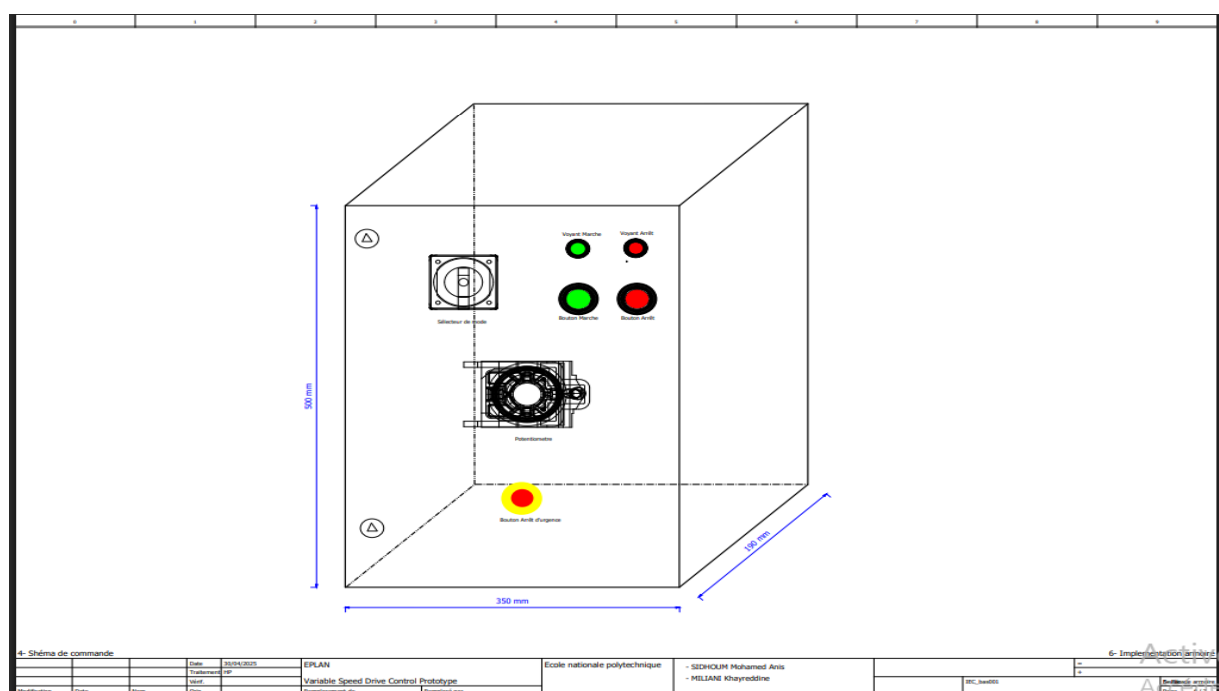


FIGURE 3.14 – Porte de la maquette en 2D

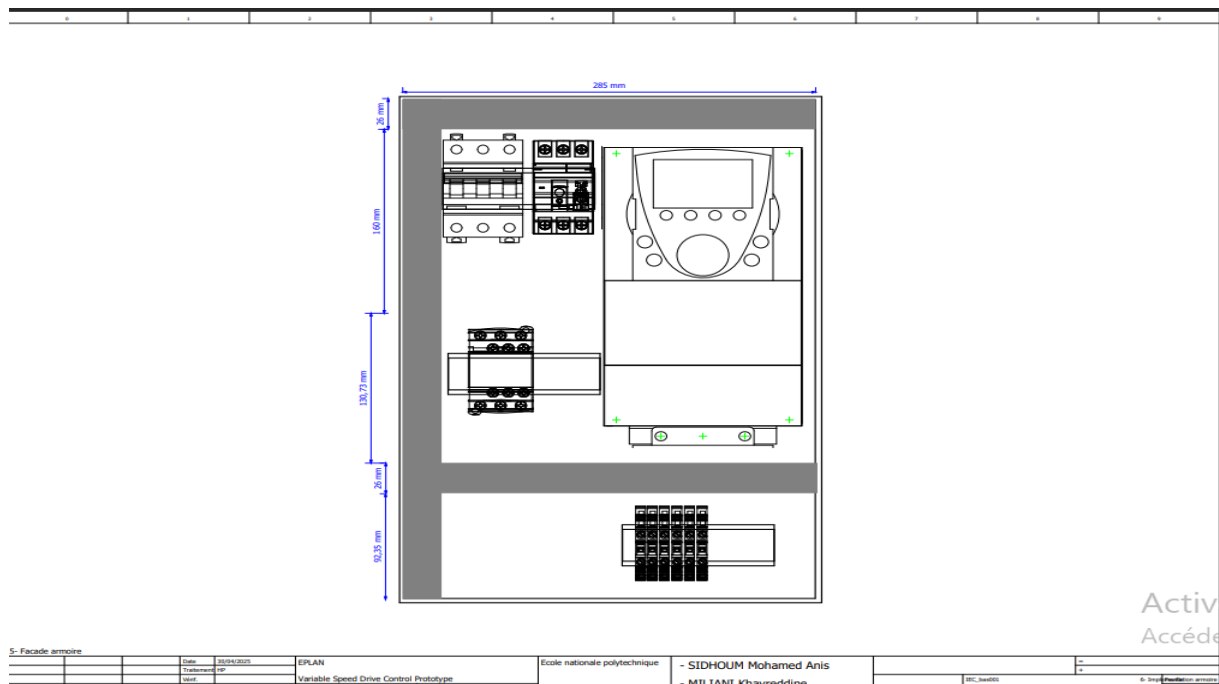


FIGURE 3.15 – Intérieur de la maquette en 2D

3.4 Conception et réalisation de la maquette

Dans cette partie, nous allons présenter les composants de notre maquette et décrire les différentes étapes de sa conception. La maquette se compose de deux parties distinctes :

- Une partie puissance, qui comprend des borniers d'entrée pour le système d'alimentation triphasée, un disjoncteur principal, un disjoncteur moteur, un contacteur, un variateur de vitesse, ainsi que des borniers de sortie reliés à une pompe.
- Une partie commande, qui intègre des boutons-poussoirs marche/arrêt, des voyants lumineux, un potentiomètre, un arrêt d'urgence et un débitmètre.

Nous commencerons par une présentation générale des composants utilisés et de leur rôle, avant de détailler les différentes étapes de montage de la maquette.

3.4.1 Composants utilisés dans la maquette

Comme mentionné précédemment, notre maquette se compose de deux parties : une partie puissance et une partie commande. Nous allons traiter ces deux sections séparément, en présentant le rôle de chaque composant.

3.4.1.1 Partie de puissance

Les composants de puissance utilisés sont les suivants :

a) Borniers d'entrée pour le système d'alimentation triphasée : Les borniers d'entrée sont des dispositifs permettant de connecter les conducteurs de l'alimentation

électrique au reste de l'installation. Ils assurent une liaison fiable et sécurisée entre le réseau triphasé et les équipements internes de la maquette. Leur rôle est de faciliter le raccordement, d'assurer une organisation propre du câblage et de garantir une bonne distribution de l'énergie dans la partie puissance.

b) Disjoncteur principal : Le disjoncteur principal est un appareil de protection électrique destiné à couper automatiquement le circuit en cas de surcharge ou de court-circuit. Il protège l'ensemble de l'installation contre les défauts électriques majeurs. En plus de sa fonction de sécurité, il permet également d'isoler complètement la maquette pour les opérations de maintenance ou en cas d'urgence.

C) Disjoncteur moteur : Le disjoncteur moteur est un type de disjoncteur spécifiquement conçu pour la protection des moteurs électriques. Il assure une coupure rapide en cas de surintensité due à une surcharge ou à un court-circuit. Son rôle est de protéger le moteur ainsi que les équipements en aval, tout en permettant le démarrage et l'arrêt manuel du moteur si nécessaire.

d) Contacteur : Le contacteur est un interrupteur commandé électriquement, utilisé pour établir ou interrompre un circuit de puissance. Il est activé à distance via la partie commande. Son rôle principal est de permettre la mise sous tension ou la coupure automatique du moteur ou du variateur, selon les conditions définies dans le système de commande.

e) Variateur de vitesse : Le variateur de vitesse est un équipement électronique qui contrôle la fréquence et la tension envoyées au moteur, ce qui permet de réguler sa vitesse de rotation. Il est essentiel pour optimiser les performances énergétiques de l'installation. Dans notre maquette, il permet d'adapter la vitesse de la pompe en fonction des besoins du système.

f) Borniers de sortie : Les borniers de sortie sont des blocs de connexion placés en aval de la partie puissance, servant à raccorder les charges, ici une pompe. Ils permettent une connexion propre et sécurisée entre le variateur de vitesse (ou le contacteur) et la pompe. Leur rôle est de finaliser le circuit de puissance tout en facilitant les interventions et les modifications éventuelles.

3.4.1.2 Partie de commande

Les composants de commande utilisés sont les suivants :

a) Boutons-poussoirs marche/arrêt : Les boutons-poussoirs sont des dispositifs de commande manuelle qui permettent de générer une action temporaire lorsqu'ils sont pressés. Dans notre maquette, le bouton-poussoir marche est utilisé pour démarrer le système, tandis que le bouton arrêt sert à l'arrêter. Ils permettent donc à l'opérateur de commander manuellement la mise en route ou l'arrêt du moteur.

b) Voyants lumineux : Les voyants lumineux sont des indicateurs visuels utilisés pour signaler l'état de fonctionnement d'un système. Ils s'allument en fonction de certaines conditions (par exemple : mise sous tension, fonctionnement, défaut). Dans notre maquette, ils permettent de visualiser rapidement l'état de la machine, ce qui facilite le diagnostic et améliore la sécurité d'utilisation.

c) Potentiomètre : Le potentiomètre est un composant électronique qui permet

de faire varier une résistance, et donc de générer un signal analogique variable. Il est souvent utilisé pour ajuster une valeur comme la vitesse. Dans notre projet, le potentiomètre permet de régler manuellement la vitesse du moteur via le variateur de vitesse, offrant ainsi un contrôle fin du débit de la pompe.

d) Arrêt d'urgence : L'arrêt d'urgence est un dispositif de sécurité conçu pour couper immédiatement l'alimentation d'un système en cas de danger ou de situation anormale. Il se présente généralement sous forme de bouton rouge à enclenchement mécanique. Dans notre maquette, il permet d'interrompre rapidement le fonctionnement de l'ensemble du système afin de protéger les personnes et les équipements.

e) Débitmètre : Le débitmètre est un capteur qui mesure le débit d'un fluide, généralement exprimé en litres par minute (L/min). Dans le cadre de notre projet, il est utilisé pour mesurer le débit d'eau circulant dans le système, permettant ainsi de surveiller les performances de la pompe. Il joue également un rôle dans l'analyse du comportement du système en fonction de la variation de la vitesse du moteur.

3.4.2 Démarche de conception et d'assemblage de la maquette

Dans cette section, nous allons détailler étape par étape le processus de conception et de montage de notre maquette, en nous appuyant sur les composants que nous avons déjà présentés.

a) Préparation de l'armoire électrique : La première étape a consisté à choisir une armoire électrique adaptée aux dimensions de notre projet. Nous avons procédé à des découpes précises sur la porte de l'armoire afin d'y intégrer les éléments de commande : boutons-poussoirs (marche/arrêt), voyants lumineux, potentiomètre et bouton d'arrêt d'urgence. Ces découpes ont été faites de manière à assurer à la fois une bonne accessibilité et une fixation solide des composants. Nous avons également percé des ouvertures pour le passage des câbles d'alimentation triphasée (en entrée) et pour la sortie vers la pompe. Ces ouvertures ont été placées de façon à respecter les normes de sécurité et à assurer une bonne organisation du câblage. Une figure illustrant cette étape est présentée ci-dessous.



FIGURE 3.16 – Armoire électrique

b) Installation des rails DIN et des goulottes : À l'intérieur de l'armoire, sur la plaque de montage, nous avons fixé les rails DIN destinés à supporter les équipements modulaires (disjoncteurs, contacteurs, variateur, etc.). Ensuite, nous avons installé des goulottes de câblage, qui permettent de guider et protéger les fils tout en assurant une présentation propre et un accès facile pour la maintenance. Une figure illustrant cette étape est présentée ci-dessous.



FIGURE 3.17 – Installation des rails DIN et des goulottes

c) Montage des composants de puissance : Une fois les supports installés, nous avons procédé au montage des composants de puissance sur les rails DIN. Cette étape a concerné l'installation des borniers d'entrée d'alimentation, du disjoncteur principal, du disjoncteur moteur, du contacteur, du variateur de vitesse, ainsi que des borniers de sortie vers la pompe. L'agencement de ces éléments a été réalisé de manière logique et ergonomique, afin de faciliter le câblage, la lisibilité du circuit, et d'assurer une maintenance efficace. Une figure illustrant cette étape est présentée ci-dessous.



FIGURE 3.18 – Montage des composants de puissance

d) Câblage du circuit de puissance : Après avoir installé les composants, nous avons réalisé le câblage du circuit de puissance en suivant le schéma préparé sur le logiciel EPLAN Electric. Cela consiste à connecter l'alimentation triphasée, relier les dispositifs de protection, les éléments de commande comme le contacteur et le variateur de vitesse, puis faire la connexion finale vers la pompe. Une figure illustrant cette étape est présentée ci-dessous.

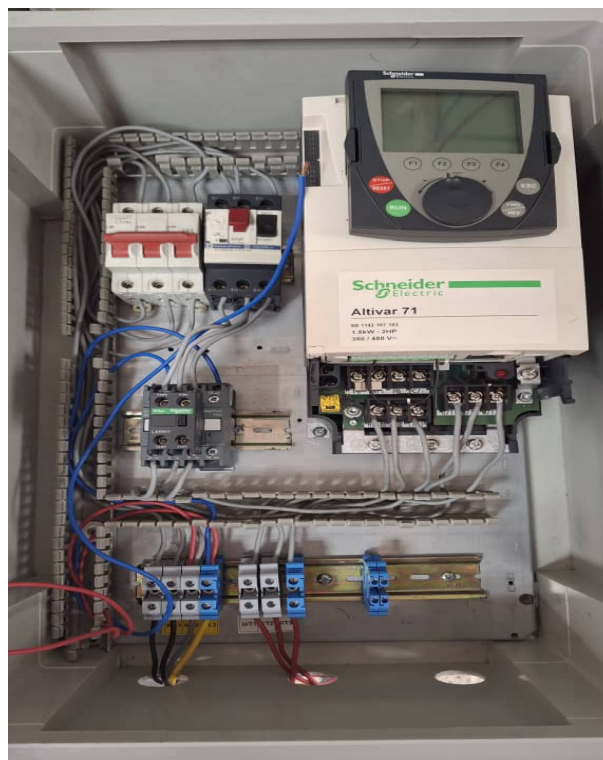


FIGURE 3.19 – Câblage du circuit de puissance

e) Mise en place et câblage de la partie commande : La partie commande a ensuite été installée. Nous avons fixé tous les éléments de commande sur la porte de l'armoire et les avons reliés à la partie puissance à l'aide de câbles de commande. Le câblage a également été réalisé selon le schéma multifilaire développé dans EPLAN Electric. Cette étape inclut le raccordement des boutons-poussoirs, des voyants, du potentiomètre, du bouton d'arrêt d'urgence et du débitmètre. Une figure illustrant cette étape est présentée ci-dessous.

f) Phase finale alimentation et test : Une fois tous les composants installés et câblés, nous avons effectué une vérification complète du câblage, puis procédé à l'alimentation du système. La pompe a été testée via les borniers de sortie, en contrôlant la vitesse à l'aide du variateur et du potentiomètre. Le bon fonctionnement des voyants et des commandes a également été vérifié pour s'assurer que l'ensemble du système était opérationnel et conforme au schéma.

3.5 Réalisation du circuit hydraulique

Le circuit hydraulique que nous avons conçu est un prototype représentant une station de pompage. Ce circuit est composé de deux réservoirs : un grand réservoir placé en bas (bâche d'eau) et un plus petit réservoir en hauteur (château d'eau). Ces deux réservoirs sont réalisés en plexiglas afin de faciliter l'observation du niveau d'eau et du fonctionnement général du système.

Le principe de fonctionnement est simple : la pompe aspire l'eau depuis la bâche inférieure et la refoule vers le réservoir supérieur. À la sortie de la pompe, un tuyau en acier est installé, équipé d'une vanne manuelle permettant de réguler le débit. Un

débitmètre est également intégré pour mesurer en temps réel le débit d'eau circulant dans le circuit.

L'eau est ensuite déversée dans le réservoir supérieur. Pour éviter tout débordement, ce réservoir est muni de deux tuyaux :

- Le premier permet de renvoyer l'eau excédentaire vers le réservoir inférieur, assurant ainsi un circuit en boucle fermée.
- Le second sert de trop-plein de sécurité, permettant d'évacuer l'eau si le débit devient trop important.

Ce système pédagogique permet de simuler le fonctionnement réel d'une station de pompage. Il offre la possibilité d'observer et de contrôler différents paramètres hydrauliques, notamment le débit et le niveau d'eau, tout en mettant en pratique les principes de régulation et de gestion des fluides.

Les figures suivantes illustrent les différentes étapes de la réalisation du circuit hydraulique.



FIGURE 3.20 – Configuration du circuit hydraulique avant l'installation de la pompe



FIGURE 3.21 – Aperçu frontal du circuit hydraulique finalisé



FIGURE 3.22 – Circuit hydraulique complet – vue de gauche



FIGURE 3.23 – Aperçu supérieur du circuit hydraulique finalisé

3.6 Caractéristiques de la machine utilisée dans la partie pratique

Dans la partie pratique, nous avons utilisé une machine composée de deux parties principales : un moteur asynchrone triphasé et une pompe. Ces deux parties sont reliées mécaniquement par un arbre de transmission. La pompe a été fabriquée par l'entreprise nationale des machines mécaniques SONACOME. La figure présentée ci-dessous illustre en détail l'ensemble de la machine utilisée, incluant les plaques signalétiques du moteur asynchrone ainsi que de la pompe.

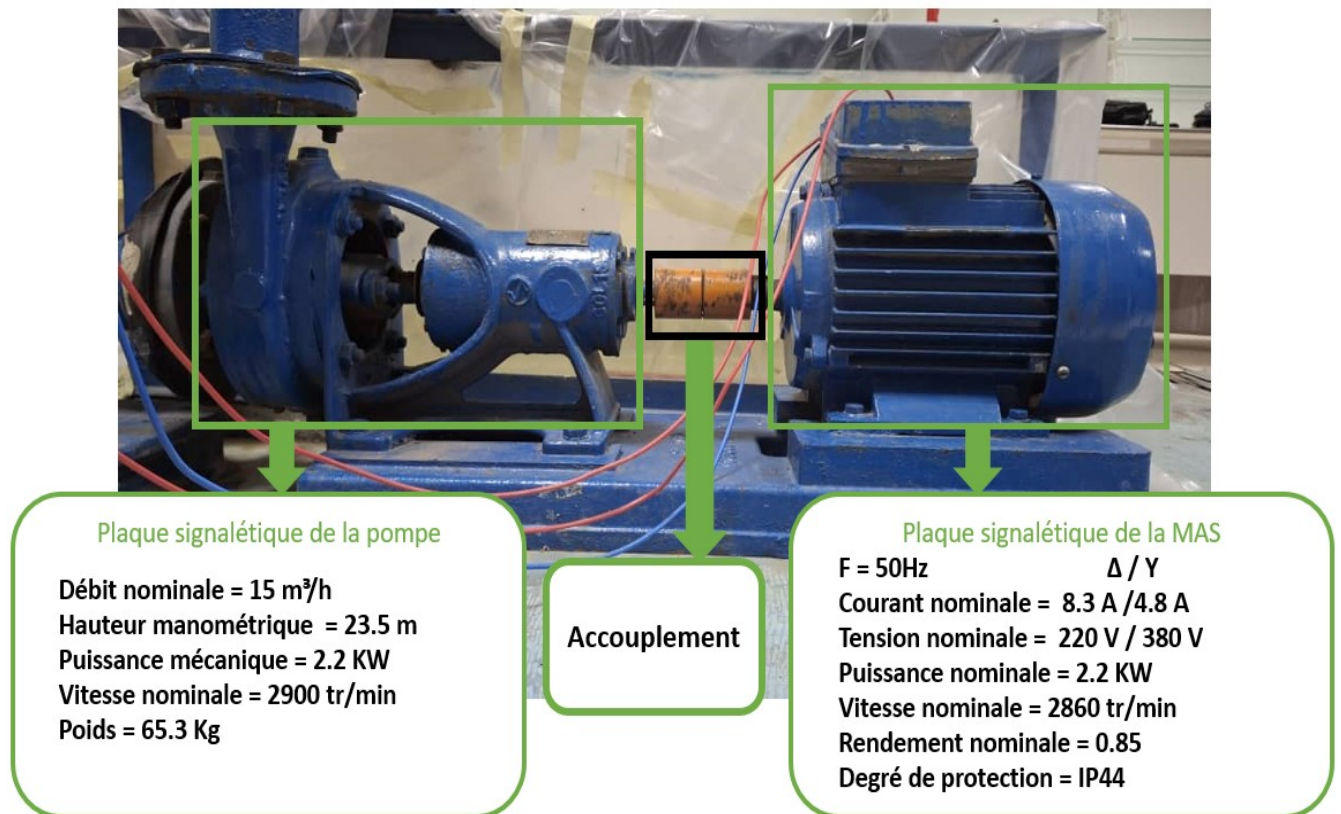


FIGURE 3.24 – Vue d'ensemble de la machine utilisée avec plaques signalétiques

3.7 Essais expérimentaux et validation des résultats

Pour la partie expérimentale, deux montages ont été réalisés : le premier correspond au contrôle du débit à vitesse constante, et le second à celui à vitesse variable.



FIGURE 3.25 – contrôle à vitesse constante

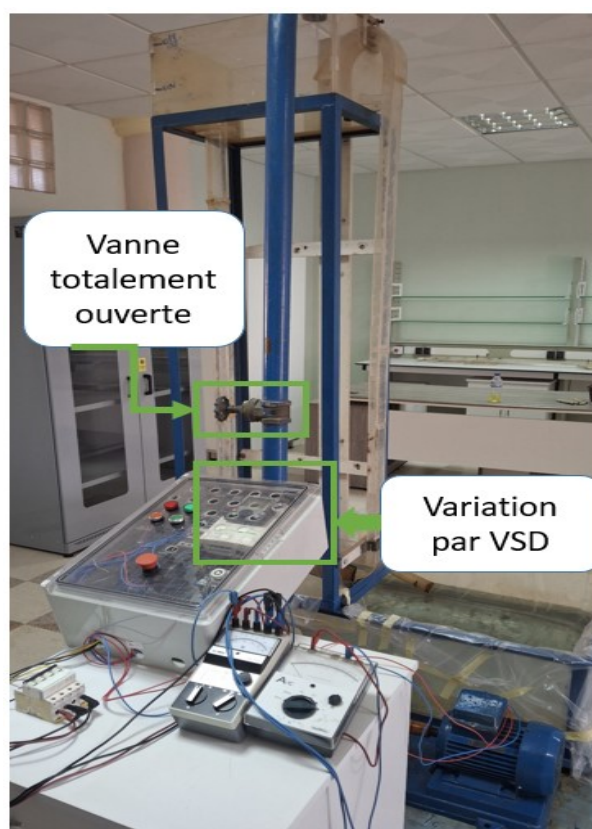


FIGURE 3.26 – contrôle à vitesse variable

Pour la mesure de la puissance électrique consommée dans le premier montage à vitesse constante, il n'y a pas de problème : il suffit simplement d'utiliser un wattmètre triphasé en amont de la machine asynchrone.

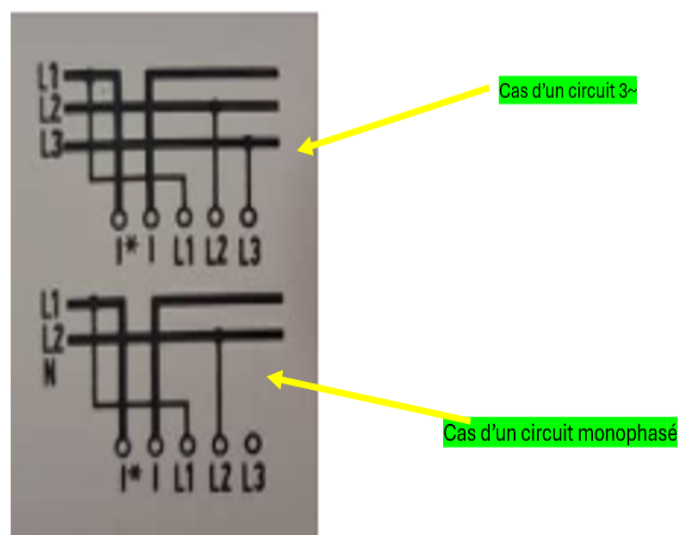


FIGURE 3.27 – Montage du wattmetre

En revanche, pour le second montage où un variateur de vitesse est utilisé, la précision de la mesure dépendra de la qualité du courant. En effet, le THD (%) sera élevé en raison de la présence d'harmoniques. Pour obtenir des mesures plus précises, on peut utiliser le kalimètre, qui permet une mesure fiable même en présence d'harmoniques.

Les figures ci-dessous présentent les formes d'onde du courant d'alimentation relevées à l'aide d'un capteur de courant installé en amont du VSD.

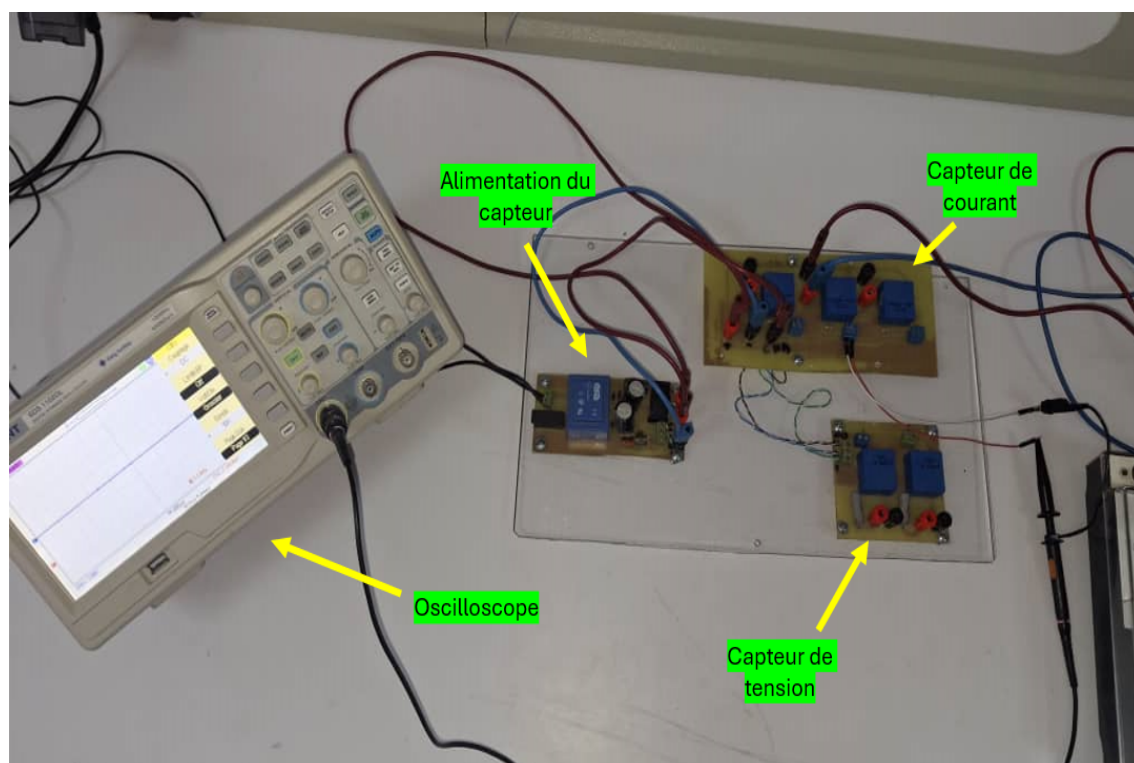
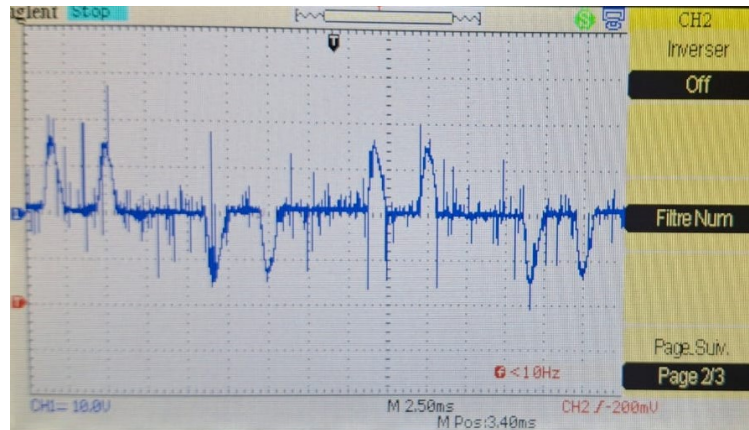
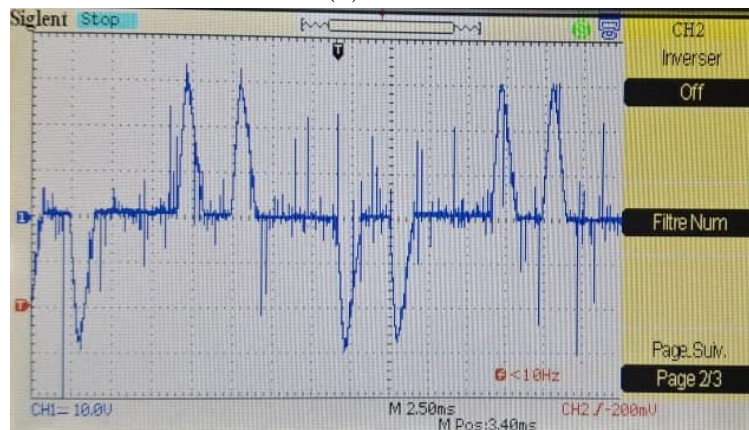


FIGURE 3.28 – Capteur de courant utilisé

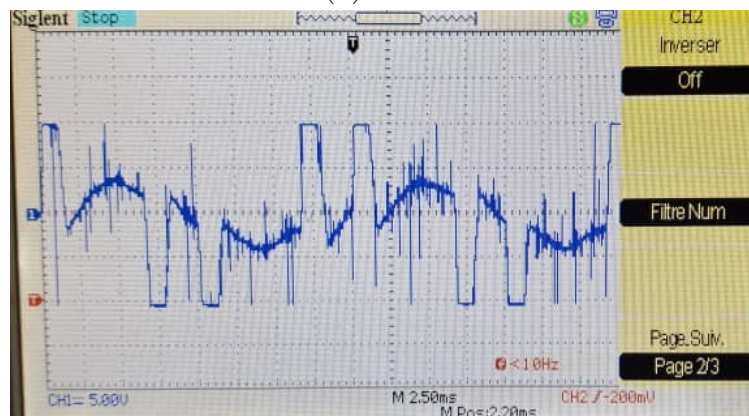
En utilisant un capteur de courant et un oscilloscope, nous avons pu enregistrer la forme d'onde du courant pour différentes fréquences de fonctionnement : 25Hz, 35Hz et 50Hz, dans le cadre du montage de contrôle de débit à vitesse variable. Il a été observé que le courant présente des perturbations significatives, principalement dues à la présence d'harmoniques de basse fréquence générées par le variateur de vitesse.



(a) 25 Hz



(b) 35 Hz



(c) 50 Hz

FIGURE 3.29 – Formes d'onde du courant à différentes fréquences (VSD control)

Ci-dessous, la puissance active totale consommée selon les deux méthodes :

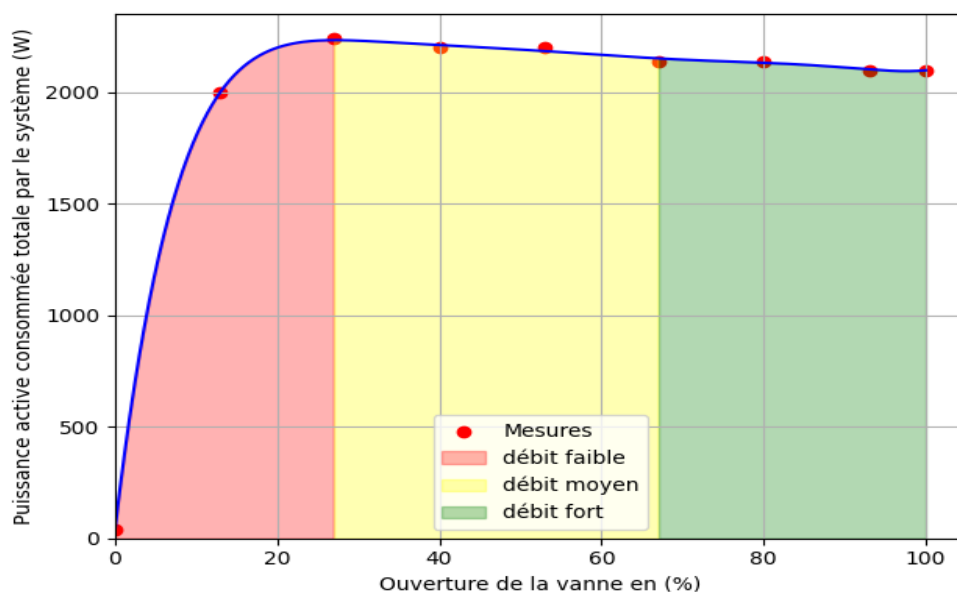


FIGURE 3.30 – Puissance active consommée totale par le système en fonction de l'ouverture de la vanne à fréquence nominale.

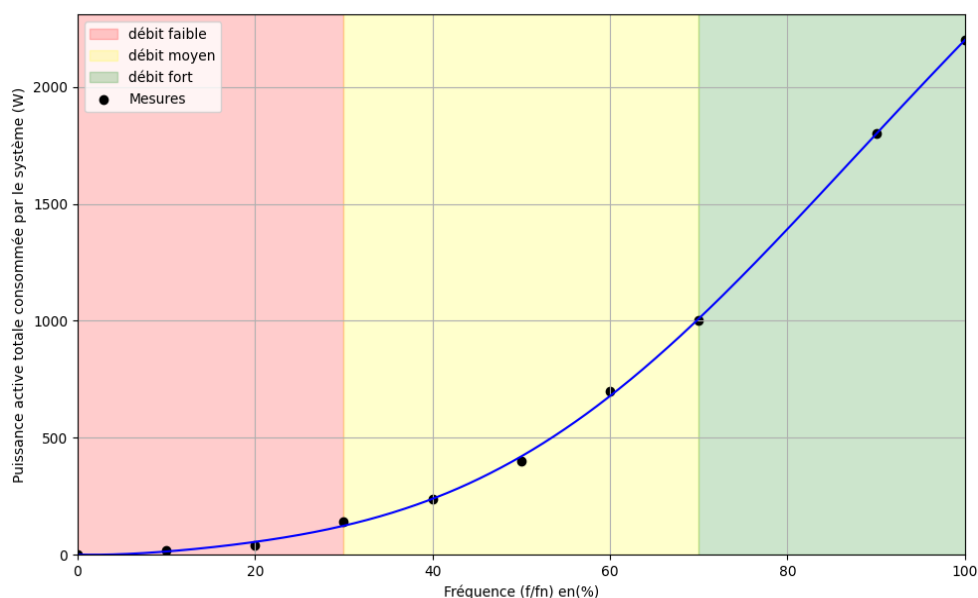


FIGURE 3.31 – Puissance active consommée totale par le système en fonction de la fréquence (f/f_n) en %.

On remarque clairement que la différence de puissance électrique consommée devient de plus en plus importante à mesure que l'on s'éloigne du point de fonctionnement nominale à fréquence fondamentale $f_n = 50\text{Hz}$, avec une vanne totalement ouverte.

Cette différence s'explique par une puissance hydraulique réduite, qui correspond néanmoins à une quantité importante de puissance mécanique requise, en raison de la baisse du rendement de la pompe (environ 30%).

À cela s'ajoute le fait que la réduction de la fréquence, liée à la baisse de la vitesse, permet également de réduire les pertes dans le circuit magnétique de la machine asynchrone.

Nous avons essayé de remplacer le VSD par un réducteur mécanique de vitesse dans la simulation. Cette solution a permis une certaine réduction de la puissance consommée, mais celle-ci reste nettement inférieure à celle obtenue avec le VSD.

Dans une installation hydraulique, lorsqu'on doit choisir une pompe, il arrive souvent que les ingénieurs ne trouvent pas un modèle dont la courbe caractéristique H-Q correspond exactement aux besoins de l'installation. Dans ce cas, ils surdimensionnent la pompe.

Ce surdimensionnement entraîne non seulement une augmentation significative de la consommation électrique, mais peut également provoquer un débit excessif, ce qui, à long terme, risque de réduire la durée de vie de l'installation hydraulique.

Les résultats expérimentaux confirment les observations issues des simulations présentées au chapitre 2, mettant en évidence l'intérêt des variateurs de vitesse (VSD) pour l'optimisation énergétique des systèmes de pompage. Toutefois, leur intégration peut engendrer une dégradation de la qualité de l'énergie, principalement en raison des harmoniques introduits.

3.8 Conclusion

En conclusion, Ce chapitre présente les principales étapes de la conception et de la mise en œuvre de la maquette expérimentale, depuis la création des schémas électriques sur EPLAN jusqu'à l'intégration des composants. En parallèle, un circuit hydraulique a été réalisé pour former un système de pompage alliant les deux parties électrique et l'hydraulique.

La conception physique de la maquette, incluant le choix judicieux des composants et la définition des caractéristiques de la machine utilisée, a permis de disposer d'une plateforme fonctionnelle pour les essais pratiques. Les expérimentations menées ont permis de valider les résultats de simulation, en comparant notamment les performances énergétiques du système selon deux stratégies de régulation de débit : par variation d'ouverture de la vanne et par variation de fréquence via le variateur de vitesse.

Les résultats obtenus ont mis en évidence la différence significative de puissance active consommée selon la méthode de régulation employée. Cela confirme l'intérêt technique et économique de l'utilisation des variateurs de vitesse dans les systèmes de pompage, en comparaison avec la régulation par vanne, souvent plus énergivore. Ces observations expérimentales renforcent la pertinence de l'approche adoptée et constituent une base solide pour des optimisations futures en milieu industriel.

Chapitre 4

Analyse et Conception d'un Système de Pompage Solaire Photovoltaïque

4.1 Introduction

L'avancement mondial des énergies renouvelables ouvre des perspectives inédites, et l'Algérie, forte de son potentiel solaire exceptionnel, s'inscrit résolument dans cette dynamique. L'immense désert algérien offre un gisement inépuisable pour la production d'électricité photovoltaïque, essentielle à l'autonomisation énergétique du pays. Dans ce contexte national d'encouragement aux initiatives renouvelables, notre projet s'inscrit en parfaite synergie avec les ambitions algériennes.

Ce dernier chapitre est dédié à la concrétisation de notre solution : l'application du pompage solaire pour soutenir et développer l'agriculture dans les vastes étendues désertiques. Nous démontrerons comment cette technologie, en exploitant directement l'énergie solaire, peut alimenter des systèmes de pompage d'eau, essentiels à l'irrigation sur de grandes surfaces. L'objectif est de proposer une solution technique viable et autonome, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire et au développement économique de l'Algérie.

Nous détaillerons les aspects techniques de notre approche. Basé sur la maquette expérimentale et le circuit hydraulique développés précédemment, ce chapitre présentera l'intégration des panneaux solaires destinés à alimenter le bus DC d'un variateur, lequel commande ensuite une pompe pour réaliser le pompage solaire.

Une attention particulière sera portée à la conception et à la réalisation de notre hacheur boost. Une simulation de ce hacheur a été effectuée en amont de sa réalisation physique, un élément clé pour optimiser la performance du système en adaptant la tension d'entrée à la valeur requise par le variateur. L'ensemble de ces éléments sera analysé en profondeur afin d'illustrer la robustesse et l'efficacité de notre solution de pompage solaire.

4.2 Énergie Solaire

L'énergie solaire est une ressource renouvelable, propre et inépuisable provenant du rayonnement solaire. Elle se manifeste principalement par l'énergie photovoltaïque, qui convertit la lumière en électricité à l'aide de panneaux solaires. Bien qu'avantageuse par son absence d'émissions polluantes et sa production décentralisée, elle présente des défis comme l'intermittence et le coût initial d'installation, en baisse constante.

4.3 Les Panneaux Solaires

Les panneaux photovoltaïques sont les éléments essentiels pour convertir la lumière du soleil en courant continu (CC). Composés de cellules en silicium, ils libèrent des électrons lorsqu'ils captent les photons. L'électricité produite est ensuite convertie en courant alternatif (CA) par un onduleur. Utilisés dans divers domaines (habitat, industrie, pompage, etc.), ils participent à l'indépendance énergétique et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

4.3.1 Principe de Fonctionnement

Le principe repose sur l'effet photovoltaïque : les photons excitent les électrons dans les cellules semi-conductrices formant une jonction P-N, générant un courant électrique continu. Ce courant est ensuite transformé en courant alternatif via un onduleur.

4.3.2 Montage des Panneaux Solaires

Il existe deux types de montage des panneaux :

- **Montage en Série** : Les panneaux sont connectés bout à bout (positif au négatif), ce qui additionne leurs tensions tandis que le courant reste constant. Ce montage augmente la tension mais est sensible à l'ombrage d'un seul panneau.
- **Montage en Parallèle** : Tous les pôles positifs et négatifs sont reliés ensemble. Le courant s'additionne, la tension reste constante. Ce montage est moins affecté par les ombrages et est adapté aux besoins en courant élevé.

4.3.3 Types des Panneaux Solaires

Il existe plusieurs types de panneaux :

- **Monocristallins** : Fabriqués à partir d'un cristal de silicium pur, ils offrent un rendement élevé (16–24%), sont efficaces en fort ensoleillement et idéaux pour les espaces restreints. Leur coût est cependant plus élevé.
- **Polycristallins** : Constitués de plusieurs cristaux de silicium, leur rendement est moindre (13–18%) mais leur fabrication est plus économique. Adaptés aux grandes surfaces et aux régions chaudes.

- **À Couche Mince** : Utilisent une fine couche de matériau semi-conducteur. Leur faible coût, flexibilité et performance en faible luminosité compensent un rendement faible (6–10%) et une durée de vie plus courte.
- **Bifaciaux** : Captent la lumière sur les deux faces (avant et arrière), augmentant la production de 5 à 15% selon l'environnement. Nécessitent une installation optimisée avec surfaces réfléchissantes.

4.4 Généralités sur les Hacheurs

4.4.1 Définition d'un hacheur

En électronique de puissance, un hacheur (ou convertisseur continu-continu) est un dispositif qui permet de modifier la valeur d'une tension continue. Autrement dit, il prend une tension continue fixe à son entrée et la transforme en une tension continue réglable à sa sortie.

4.4.2 Principe de fonctionnement d'un hacheur

Le principe de fonctionnement d'un hacheur repose sur l'utilisation d'un ou plusieurs interrupteurs électroniques (comme des transistors) qui sont ouverts et fermés très rapidement et de manière répétée. Ce découpage (ou hachage) de la tension d'entrée permet de contrôler la tension moyenne à la sortie.

Le rapport cyclique α est un paramètre clé dans un hacheur. Il représente la proportion du temps pendant laquelle l'interrupteur est fermé (passant) par rapport à la période totale de commutation. En faisant varier ce rapport cyclique, on peut ajuster la tension de sortie.

4.4.3 Types de hacheurs conventionnels

Il existe plusieurs types de hacheurs, chacun adapté à des besoins spécifiques :

- **Hacheur dévolteur (Buck)** : Sa tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée. Il est utilisé pour abaisser une tension continue.
- **Hacheur survolteur (Boost)** : Sa tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée. C'est celui que nous avons utilisé dans notre projet.
- **Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)** : Il peut soit abaisser, soit élever la tension, et peut même inverser la polarité de la tension de sortie.
- **Hacheurs réversibles** : Ils permettent un transfert d'énergie dans les deux sens (du générateur vers la charge, et de la charge vers le générateur).

4.5 Topologie du Hacheur Adopté

Dans notre cas, il y aura 8 panneaux solaires de 250 W chacun, avec une tension V_{mpp} de 70 V et un courant I_{mpp} de 8 A. Nous avons donc envisagé une configuration de 2 panneaux en série et 4 branches en parallèle, ce qui nous donne une tension de 140 V et un courant de 32 A. La charge à alimenter est une pompe de 2,2 kW (point de fonctionnement nominal).

Le bus DC de l'ATV71 doit être alimenté par une tension continue (V_{dc}) comprise entre 500 V et 600 V. Si cette tension est trop faible, le variateur s'éteint automatiquement avec une erreur de sous-tension. En revanche, si elle dépasse 600 V, le système de sécurité active le freinage par IGBT pour protéger contre la surtension. Ainsi, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur DC-DC pour élever la tension de 140 V à environ 560 V, soit un facteur d'élévation d'environ 4.

La structure la plus simple dans notre cas est le hacheur boost. Le seul problème réside dans le rapport cyclique α , qui serait élevé (environ 0,75, donc proche de 1), ce qui n'est pas idéal. Pour éviter ce problème de fonctionnement en régime extrême, nous avons envisagé d'utiliser un hacheur boost à deux étages. Le premier étage élève la tension de 140 V à 280 V, puis le second étage booste la tension de 280 V à 560 V. Cette solution permet de réduire le rapport cyclique à chaque étage et d'éviter les problèmes de divergence associés à un rapport trop proche de 1.

En raison de l'absence des composants nécessaires pour concevoir un hacheur boost à deux étages, nous avons réalisé une version à un seul étage. La figure ci-dessous illustre la topologie du hacheur Boost adoptée.

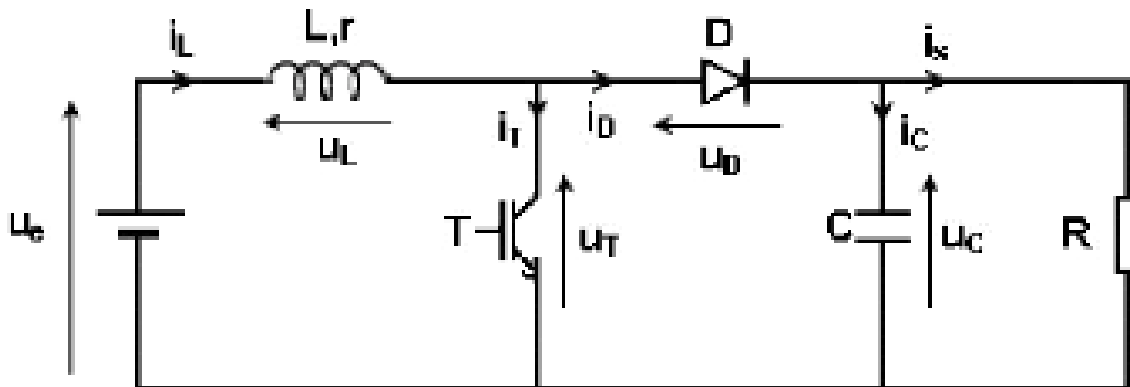


FIGURE 4.1 – Topologie du Hacheur Boost Adopté

4.6 Modélisation du Hacheur Boost sous MATLAB/-Simulink

Ce convertisseur survolteur conçu pour élever une tension d'entrée V_{source} de 140 V vers une tension de sortie V_{load} de 560 V, avec un rendement estimé à $\eta = 0,95$.

- Les paramètres utilisés sont :
- Tension d'entrée : $V_{source} = 140$ V

- Tension de sortie : $V_{\text{load}} = 560 \text{ V}$
- La puissance consommée par la charge : $P_{\text{load}} = 2.3 \text{ kW}$
- Résistance équivalente de charge : $R = 136.35 \Omega$
- Fréquence de découpage : $f_{\text{sw}} = 2 \text{ kHz}$
- Taux d'ondulation admissible du courant : $\Delta I/I = 3,5\%$
- Taux d'ondulation admissible de la tension : $\Delta V/V = 4\%$

Les taux d'ondulation du courant et de la tension sont généralement définis à partir d'un cahier des charges. Dans notre cas, plusieurs valeurs ont été testées jusqu'à atteindre la valeur optimale de tension et de courant souhaitée.

- **Le rapport cyclique D du hacheur boost est obtenu par :**

$$D = \frac{V_{\text{load}} - V_{\text{source}}}{V_{\text{load}}} \quad (4.1)$$

- **Dimensionnement de l'inductance L**

Le courant de la charge est :

$$I_{\text{load}} = \frac{P_{\text{load}}}{V_{\text{load}}} \quad (4.2)$$

Le courant d'entrée fourni par la source (en tenant compte du rendement) est :

$$I_{\text{source}} = \frac{P_{\text{load}}}{\eta \cdot V_{\text{source}}} \quad (4.3)$$

L'ondulation admissible du courant est fixée par :

$$\Delta I = \Delta I\% \cdot I_{\text{source}} \quad (4.4)$$

L'inductance est alors calculée par la formule classique du hacheur boost :

$$L = \frac{D \cdot V_{\text{source}}}{f_{\text{sw}} \cdot \Delta I} \quad (4.5)$$

La valeur de l'inductance dépend essentiellement de l'ondulation de courant admissible et de la fréquence de commutation. On agit sur ces deux paramètres pour diminuer la valeur de l'inductance.

- **Dimensionnement de la capacité de sortie C**

L'ondulation admissible de la tension de sortie est :

$$\Delta V = \Delta V\% \cdot V_{\text{load}} \quad (4.6)$$

La capacité de sortie est alors :

$$C = \frac{D \cdot I_{\text{load}}}{f_{\text{sw}} \cdot \Delta V} \quad (4.7)$$

Les valeurs calculées sont :

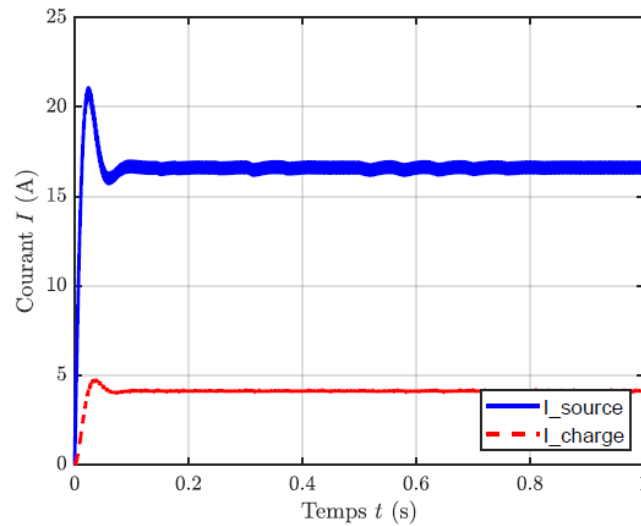
$$L = 86 \text{ mH} \text{ et } C = 68 \mu\text{F}$$

- **Remarque :**

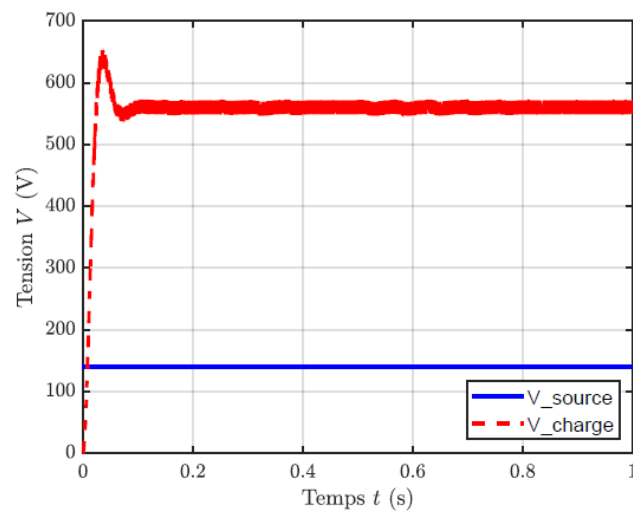
Ce dimensionnement assure une ondulation raisonnable du courant d'entrée et de la tension de sortie, tout en garantissant une réponse stable du convertisseur en régime permanent. Les valeurs de L et C calculées sont ensuite utilisées pour la simulation sous Simulink et la mise en œuvre du contrôle par régulateur PI.

4.6.1 Simulation du convertisseur avec une source de tension continue et une charge résistive variable

Pour cette simulation, nous avons utilisé le solveur ODE3 avec un pas de simulation fixe de $1e-6$ et un temps de simulation total de 8 secondes. Ci-dessous, les résultats obtenus sans et avec un stabilisateur de tension (régulateur PI).



(a) I_{source}, I_{charge}



(b) V_{source}, V_{charge}

FIGURE 4.2 – Simulation du hacheur Boost en boocle ouverte

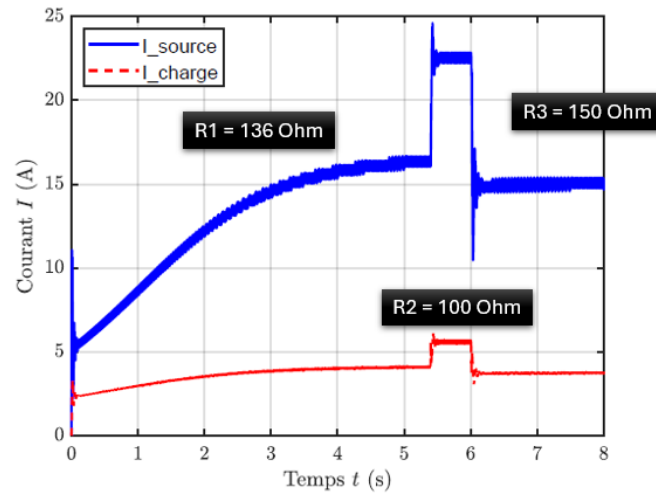
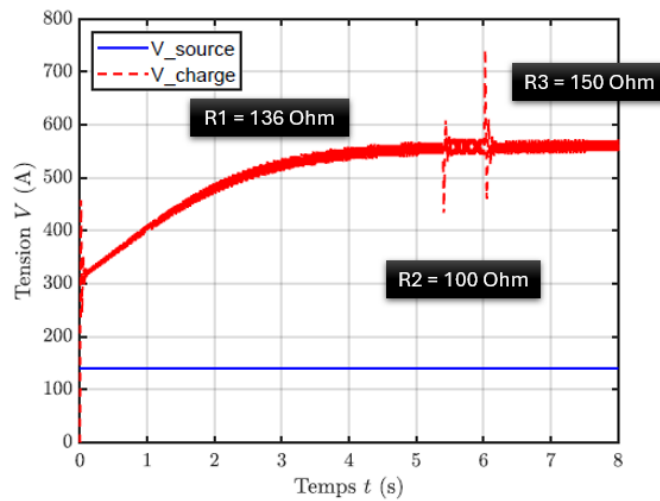
(a) I_{source}, I_{charge} (b) V_{source}, V_{charge}

FIGURE 4.3 – Simulation du hacheur Boost + stabilisateur de tension sous différentes résistances (Régulateur PI : $K_p = 2e - 4$, $K_I = 6e - 4$, saturation à 0.85)

Après ce test, la source de tension continue a été remplacée par des modules photovoltaïques (PV), configurés en **4 modules en série et 3 branches en parallèle**.

Caractéristiques du module : *A10Green Technology A10J-M60-240*

Puissance au point de MPP $P_{mpp} = 240.54 \text{ W}$

Nombre de cellules par module = 60 cellules

Tension en circuit ouvert $V_{oc} = 36.84 \text{ V}$

Courant de court-circuit $I_{sc} = 8.32 \text{ A}$

Tension au point de MPP $V_{mpp} = 30.72 \text{ V}$

Courant au point de MPP $I_{mpp} = 7.83 \text{ A}$

La figure ci-dessous présente les courbes caractéristiques I-V et P-V des modules photovoltaïques.

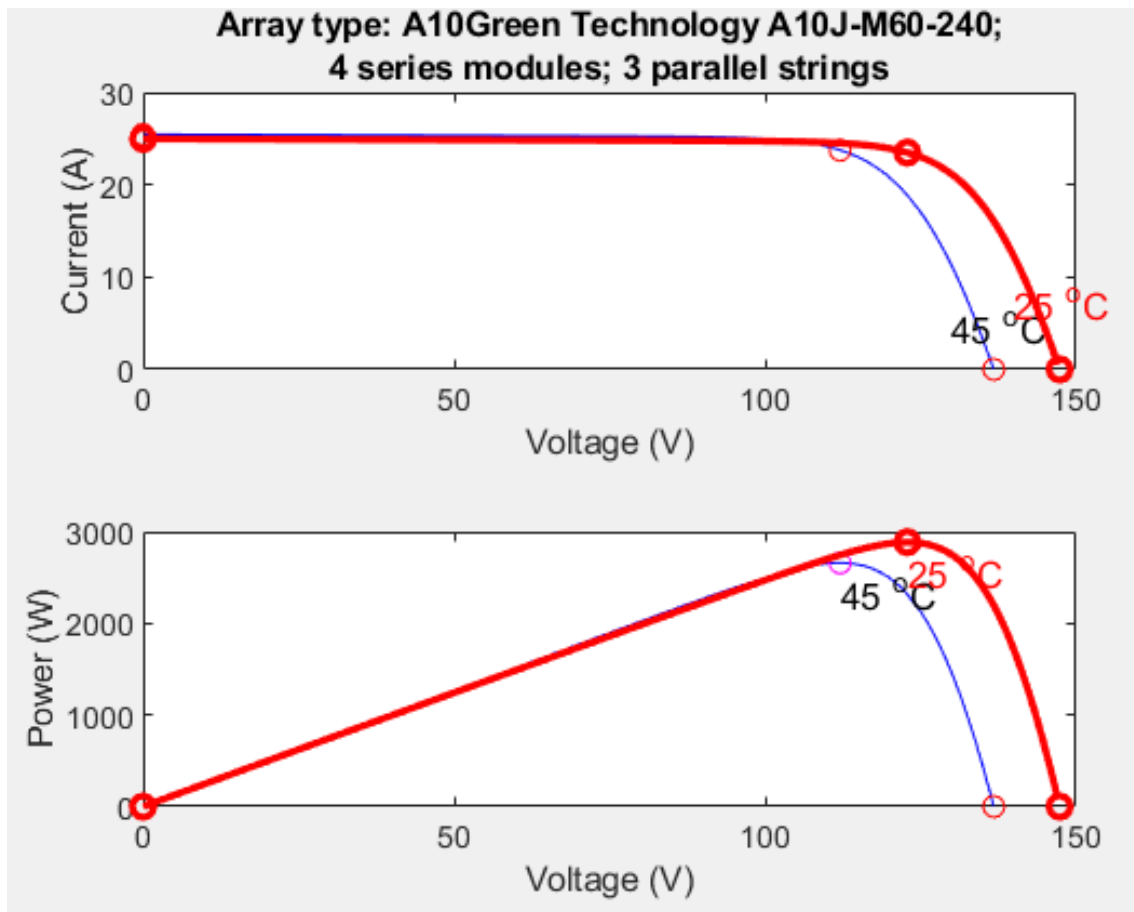


FIGURE 4.4 – Courbes caractéristiques I-V et P-V pour une irradiancé de 1000 W/m^2 à 25°C , 45°C

Une capacité d'entrée de valeur suffisante ($2200\mu\text{F}$) a été placée aux bornes des modules photovoltaïques afin de stabiliser la tension d'entrée.

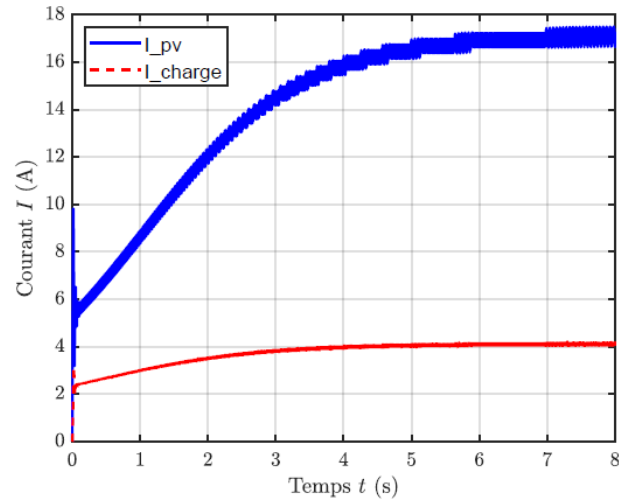
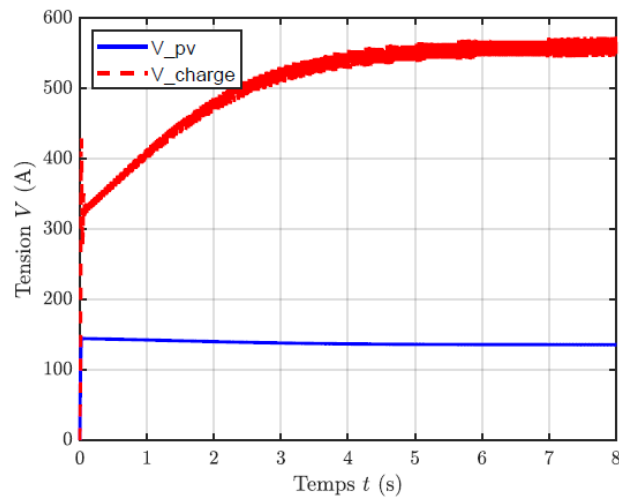
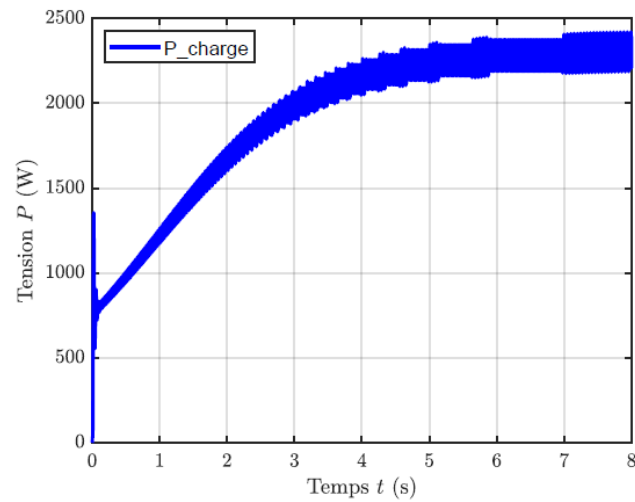
(a) I_{pv}, I_{charge} (b) V_{pv}, V_{charge} (c) P_{charge}

FIGURE 4.5 – Simulation du hacheur Boost + stabilisateur de tension (Régulateur PI : $K_p = 2e - 4$, $K_I = 6e - 4$, saturation à 0.85) + modules PV ($240W \times 4 \times 3$) @ $1000W/m^2$, @ $25degC$, charge resistive $136Ohm$

4.6.1.1 Effet de l'Irradiation sur la Tension de Sortie du Hacheur

Dans ce test, la température a été fixée à 25°C tandis que l'irradiation a été variée. On observe que lorsque l'irradiation diminue, la tension de sortie du hacheur chute également. Toutefois, après un certain temps, le régulateur PI entre en action pour rétablir la tension de sortie à la valeur désirée de 560V. Ce comportement met en évidence le rôle du condensateur ajouté aux bornes des panneaux photovoltaïques, qui permet de stabiliser la tension en sortie malgré les variations d'irradiation, assurant ainsi un fonctionnement plus régulier du système.

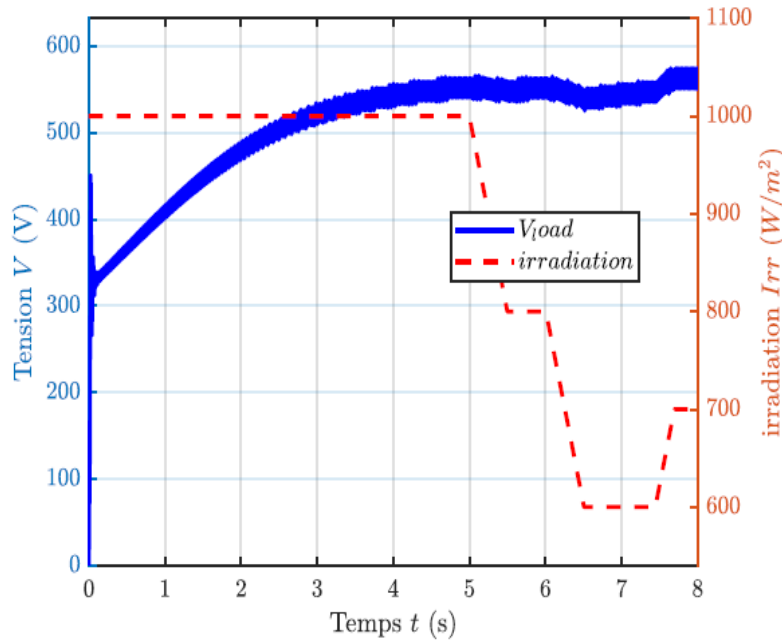


FIGURE 4.6 – V_{charge} , T - Simulation du hacheur Boost + stabilisateur de tension (Régulateur PI : $K_p = 2e - 4$, $K_I = 6e - 4$, saturation à 0.85) + modules PV (240W*4*4) a25degC, charge resistive 136Ohm

4.6.1.2 Effet de la Température sur la Tension de Sortie du Hacheur

Dans ce test, l'irradiation a été fixée à 1000W/m² et c'est la température qui a été variée. On constate que lorsque la température diminue, la tension de sortie du hacheur augmente, tandis qu'une augmentation de la température entraîne une diminution de cette tension. Après un certain temps, le régulateur PI intervient pour corriger la tension et la ramener à la valeur de consigne de 560V. Ce comportement met en évidence le rôle du condensateur placé aux bornes des panneaux photovoltaïques, qui contribue à stabiliser la tension de sortie en amortissant les variations rapides dues aux changements de température.

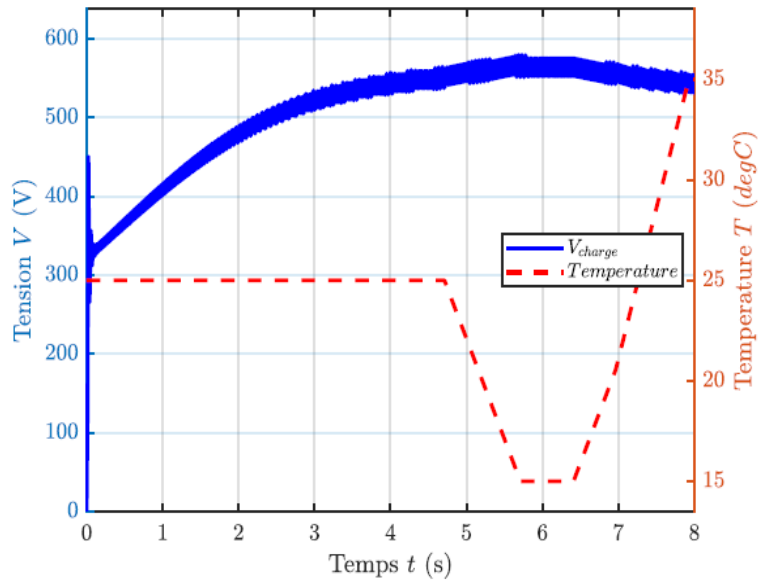


FIGURE 4.7 – V_{charge} , T - Simulation du hacheur Boost + stabilisateur de tension (Régulateur PI : $K_p = 2e - 4$, $K_I = 6e - 4$, saturation à 0.85) + modules PV ($240W \times 4 \times 4$) @ $1000W/m^2$, charge resistive 136Ω

4.7 Etapes de Réalisation du Hacheur Boost

Dans cette section, nous allons détailler les étapes de réalisation de notre hacheur, depuis la conception initiale jusqu'au montage final.

4.7.1 Plaque de montage

La plaque de montage est la carte électronique sur laquelle tous les composants du hacheur ont été assemblés. La figure ci-dessous représente cette plaque de montage.

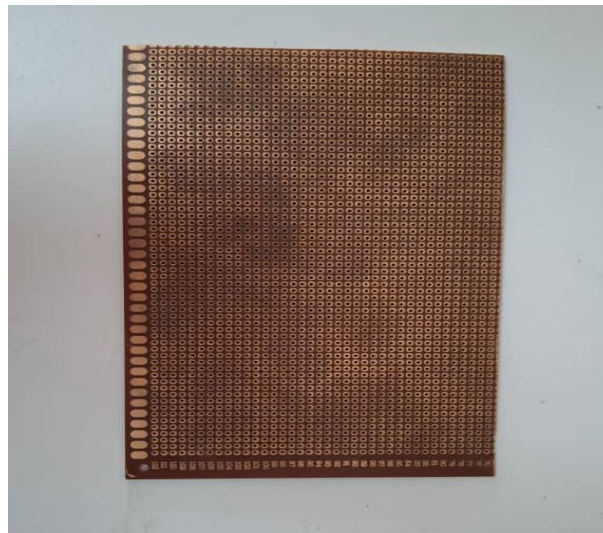


FIGURE 4.8 – Modèle de la carte utilisée

4.7.2 Support de montage

Pour la conception du support de notre carte de montage des composants, nous avons utilisé le logiciel SolidWorks. Ce support a ensuite été fabriqué par impression 3D. La figure ci-dessous présente le support imprimé, prêt à être utilisé.



FIGURE 4.9 – Fixation de la carte sur le support

4.7.3 Diodes Utilisées

D'après les résultats de la simulation, nous avons observé que la tension de sortie pouvait atteindre jusqu'à 650V. Par conséquent, nous avons intégré deux diodes en série ($V_{1inv} = 600V$, $V_{2inv} = 300V$), afin de supporter cette tension élevée et d'assurer une protection adéquate du circuit. Un dissipateur thermique a été intégré pour dégager la chaleur générée par la commutation. La figure ci-dessous présente la diode et le dissipateur thermique utilisés.



FIGURE 4.10 – Diodes Utilisées



FIGURE 4.11 – Dissipateur thermique

4.7.4 IGBT avec Optocoupleur

Pour le pilotage de l'IGBT (Transistor Bipolaire à Grille Isolée) dans notre système, nous avons intégré un optocoupleur. Cet optocoupleur assure une isolation électrique entre la partie de commande basse tension Arduino et la partie de puissance haute tension IGBT. Le microcontrôleur utilisé est une carte Arduino. Un dissipateur thermique a été intégré sur l'IGBT pour dégager la chaleur générée par la commutation. Les figures ci-dessous illustrent l'IGBT associé à son optocoupleur, ainsi que la carte Arduino utilisée pour l'implémentation du code (voir le code de l'arduino dans l'annexe).

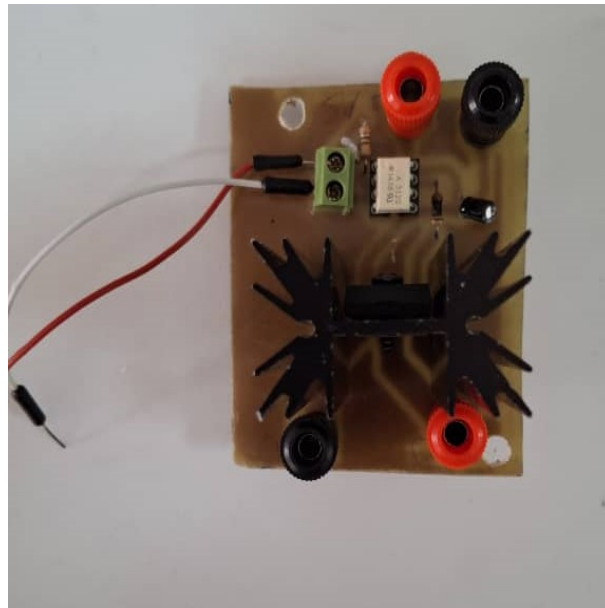


FIGURE 4.12 – IGBT avec Optocoupleur



FIGURE 4.13 – Optocoupleur

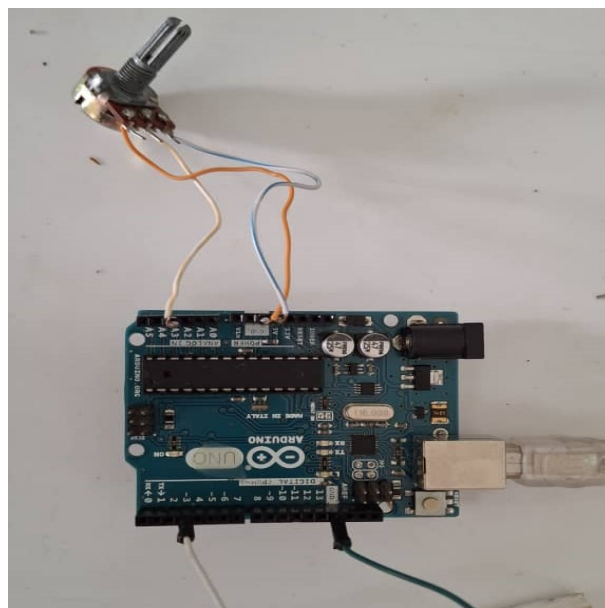


FIGURE 4.14 – La carte Arduino utilisée

4.7.5 Condensateurs Utilisés

D'après les résultats de la simulation, une capacité de 68 μF était nécessaire. Pour répondre à cette exigence, nous avons opté pour l'utilisation de deux capacités (Nous avons besoin de 3, mais il n'y en a que 2) de 500V, 220 μF montées en série, ce qui a permis d'obtenir une capacité équivalente de 110 μF et une tension supportable de 1000V, ce qui est largement suffisant. La figure ci-dessous présente le modèle de la capacité utilisée.



FIGURE 4.15 – Condensateur Utilisé

4.7.6 Inductance Utilisé

D'après les résultats de la simulation, un courant de 17 A a été obtenu, ce qui représente une intensité relativement élevée. Pour répondre aux exigences de fonctionnement du hacheur Boost, une inductance de 86 mH capable de supporter ce courant s'est révélée nécessaire, bien qu'il s'agisse d'une valeur relativement importante. Nous avons donc opté pour l'utilisation de cette inductance de 86 mH, malgré sa grande valeur. La figure ci-dessous présente le modèle de l'inductance utilisée.

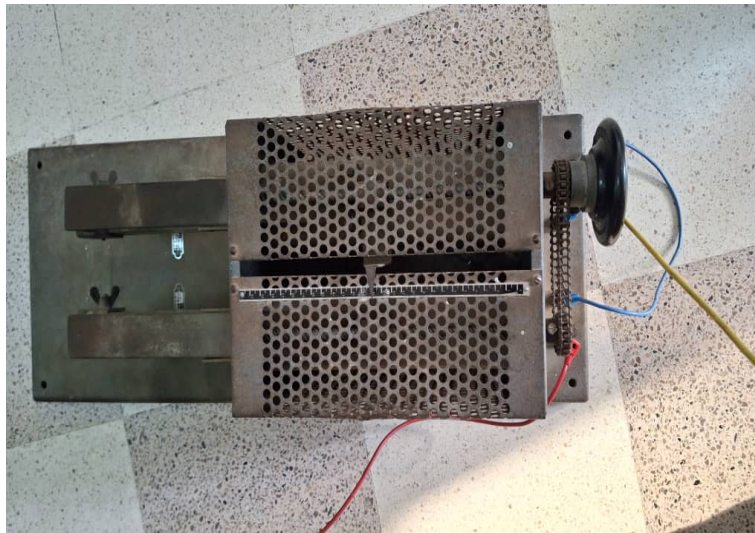


FIGURE 4.16 – Inductance Utilisé

4.8 Montage finale de notre hacheur

Après l'assemblage de tout le matériel utilisé et sa fixation sur la plaque électronique de montage, nous avons obtenu notre hacheur Boost. Ce dernier est désormais capable de délivrer la tension de sortie souhaitée. Concernant l'inductance, des bornes spécifiques ont été créées sur la plaque de montage, permettant ainsi son insertion directe et facilitant d'éventuels remplacements. La figure ci-dessous représente l'état final de notre hacheur.



FIGURE 4.17 – Montage finale de hacheur Boost

Pour tester le hacheur Boost que nous avons réalisé, nous avons utilisé une charge résistive R et une alimentation stabilisée délivrant une tension d'entrée variable. Après avoir téléversé le programme sur la carte Arduino, nous avons pu agir sur le rapport cyclique α . Nous avons alors observé que notre hacheur Boost était capable de multiplier

la tension d'entrée jusqu'à quatre fois. Cette performance confirme que notre hacheur fonctionne dans de très bonnes conditions. La figure ci-dessous illustre le montage général mis en place pour le test du hacheur Boost.

4.9 Test du hacheur Boost avec des panneaux photovoltaïques

Pour tester le hacheur Boost que nous avons réalisé, nous avons mis en place un montage composé de deux panneaux solaires connectés en série, montés en parallèle avec un autre ensemble de deux panneaux également connectés en série. Ce branchement permet d'obtenir une tension de sortie d'environ 69 V.

Les panneaux photovoltaïques sont reliés à notre hacheur Boost (voir la section consacrée à sa réalisation). Une résistance de charge de $117\ \Omega$ a été utilisée dans le circuit. Cependant, un inconvénient majeur du montage est la résistance interne de l'inductance du hacheur, estimée à $2,4\ \Omega$. Cette résistance engendre une chute de tension importante aux bornes de l'inductance.

Lors de ce test, nous avons fait varier le rapport cyclique α et relevé sa valeur à l'aide d'un PC connecté à une carte Arduino. Nous avons mesuré les grandeurs suivantes : le courant d'entrée I_{source} , le courant de sortie I_{charge} , la tension d'entrée V_{source} ainsi que la tension de sortie V_{charge} .

Plusieurs jeux de données ont été recueillis, et les résultats ont montré que nous avons pu multiplier la tension d'entrée par un facteur proche de 3. Les graphes suivants présentent les résultats obtenus lors de ces essais expérimentaux.

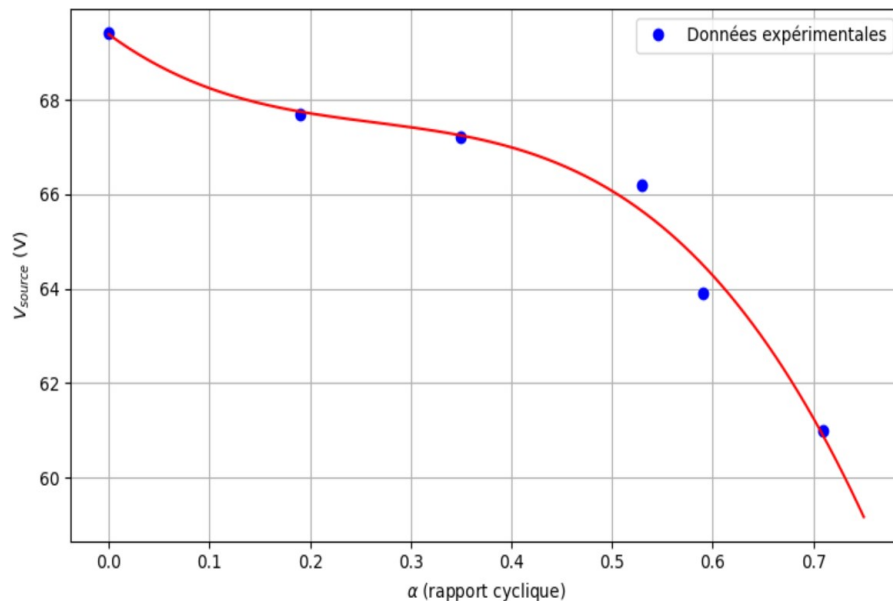
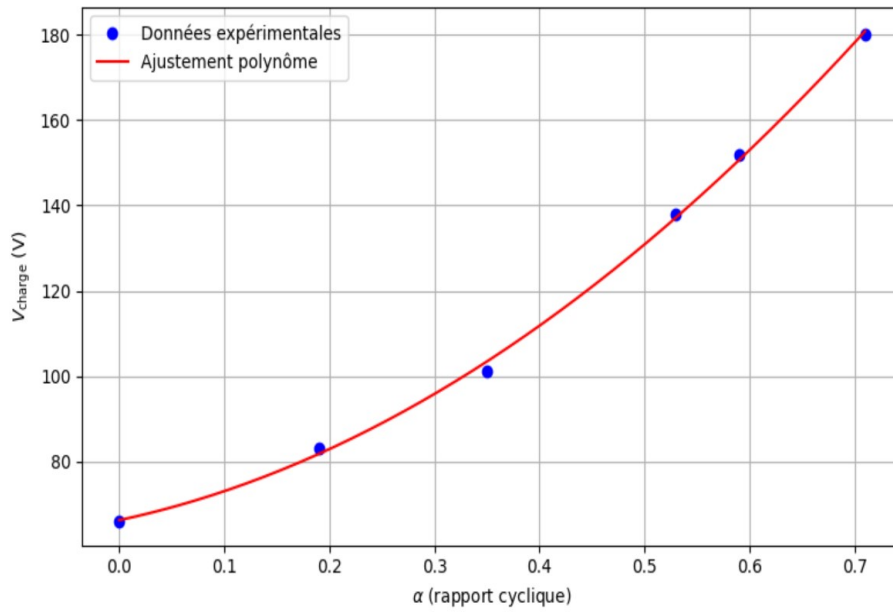
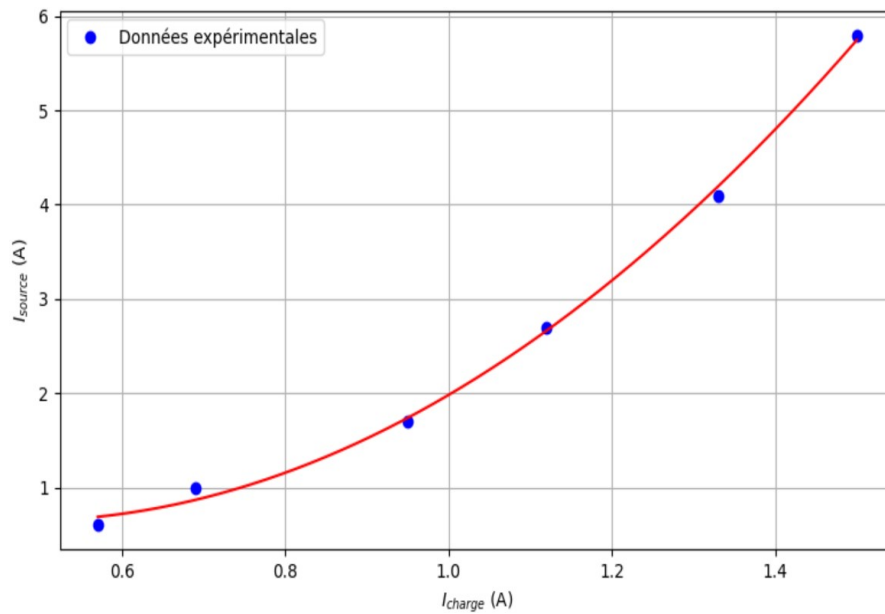


FIGURE 4.18 – la tension d'entrée V_{source} en fonction de rapport cyclique α

FIGURE 4.19 – la tension de sortie V_{charge} en fonction de rapport cyclique α FIGURE 4.20 – le courant d'entrée I_{source} en fonction de courant de sortie I_{charge}

4.10 Alimentation de la partie DC de variateur ATV71

Le but de cette partie est d'assembler le hacheur boost conçu précédemment avec le variateur de vitesse ATV71, ainsi que l'ensemble du système (pompes, circuit hydraulique), afin de le rendre opérationnel pour des applications de pompage solaire. Dans cette section, nous nous concentrerons particulièrement sur l'alimentation du bus continu (DC) du variateur ATV71.

Il existe d'autres modèles de variateurs de vitesse proposés par Schneider Electric, spécialement conçus pour les applications de pompage solaire, tels que l'ATV320 Solar et l'ATV312 Solar. Ces modèles sont légèrement plus coûteux que les versions stan-

dards des variateurs ATV320 et ATV312, en raison de leurs fonctionnalités spécifiques adaptées à l'énergie photovoltaïque.

Le variateur ATV71 dont nous disposons n'est pas initialement conçu pour une utilisation dans des systèmes de pompage solaire. Il est donc nécessaire de contourner certaines de ses sécurités intégrées afin de permettre son fonctionnement dans ce contexte. Cela peut entraîner une augmentation du risque pour variateur, mais ce risque peut être maîtrisé par l'ajout de systèmes de protection externes appropriés.

La sortie du hacheur est connectée directement au bus continu (DC) du variateur ATV71. Cependant, un problème se pose : lorsque l'ATV71 détecte une tension continue correcte sur le bus DC (comprise entre 500V et 600V), mais qu'aucune alimentation secteur n'est présente sur ses bornes d'entrée AC, il verrouille automatiquement son fonctionnement. Dans ce cas, le démarrage du moteur devient impossible et le variateur affiche le message d'erreur NLP (No Line Power) sur son interface HMI.

Nous avons contourné cette erreur en désactivant la protection contre l'absence de phase ainsi que celle contre le fonctionnement en sous-tension. En configuration standard, l'ATV71 passe en mode de freinage en roue libre dès qu'il détecte l'un de ces défauts, ce qui empêche le démarrage du moteur en l'absence d'alimentation secteur.

Afin d'assurer la protection du variateur dans ce mode de fonctionnement particulier (désactivation des protections), il est nécessaire d'ajouter un relais de surveillance de tension continue en externe, qui permettra de protéger le variateur contre les surtensions ou les sous-tensions au niveau du bus DC.

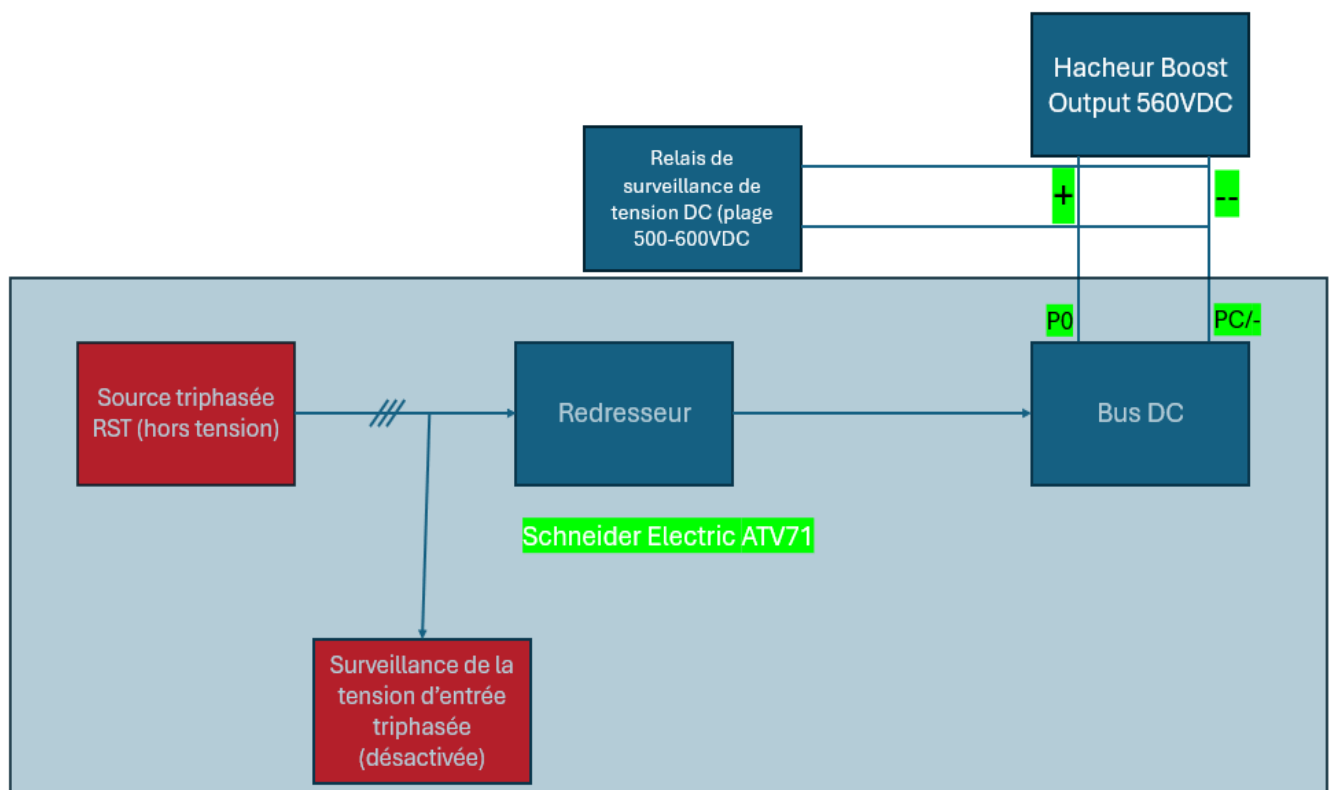


FIGURE 4.21 – Schéma de configuration de l'ATV71 alimenté directement par le bus DC

Dans un premier temps, nous avons envisagé d'alimenter le hacheur Boost à l'aide de

modules photovoltaïques. Cependant, cette solution n'a pas pu être mise en œuvre en raison de conditions atmosphériques défavorables (irradiation faible et températures peu optimales).

Chaque module solaire utilisé délivre une tension de 34 V et un courant maximal de 2,7 A, soit une puissance de 92 W. Seules deux branches ont pu être mises en œuvre, chacune composée de deux modules connectés en série. Ainsi, la tension totale disponible était de 68 V avec un courant d'environ 5,5 A, soit une puissance approximative de 374 W. Cette valeur reste insuffisante pour alimenter le système de pompage.

Pour pallier cette contrainte, une solution alternative a été mise en œuvre en utilisant une source triphasée à tension variable, obtenue grâce à un autotransformateur, couplée à un redresseur triphasé. Cette solution permet de générer une tension continue adéquate pour alimenter le hacheur Boost. Celui-ci élève ensuite cette tension jusqu'à environ 560 V, valeur requise au niveau du bus continu (DC) du variateur de vitesse ATV71.

Concrètement, la tension de sortie d'un autotransformateur a été augmentée progressivement, tout en étant surveillée à l'aide d'un voltmètre. Cette tension alternative est ensuite appliquée à l'entrée du redresseur triphasé, qui la convertit en tension continue. Cette dernière est ensuite appliquée à l'entrée du hacheur Boost précédemment conçu.

Avant de connecter la sortie du hacheur au variateur, une charge résistive de 2,3kW (560V) a été utilisée pour valider le bon fonctionnement du montage. Après vérification, la sortie du hacheur a été connectée au bus DC du variateur de vitesse : la borne P0 pour le positif, et la borne PC (-) pour le négatif.

En ajustant la tension d'entrée via l'autotransformateur, le hacheur a permis d'élever cette tension jusqu'à la valeur requise par le variateur. Une fois les 560V atteints, le variateur s'allume. Après un appui sur le bouton RUN, le moteur démarre, entraînant la pompe qui transfère l'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur.

Cette démonstration valide la possibilité d'alimenter le variateur ATV71 à partir d'une source de tension continue équivalente à celle fournie par un champ photovoltaïque, à condition de désactiver certaines sécurités (protection contre l'absence de phase et contre la sous-tension). En présence d'un nombre suffisant de modules PV et de bonnes conditions d'ensoleillement.



FIGURE 4.22 – Autotransformateur utilisé



FIGURE 4.23 – Redresseur utilisé du laboratoire d'électronique de puissance

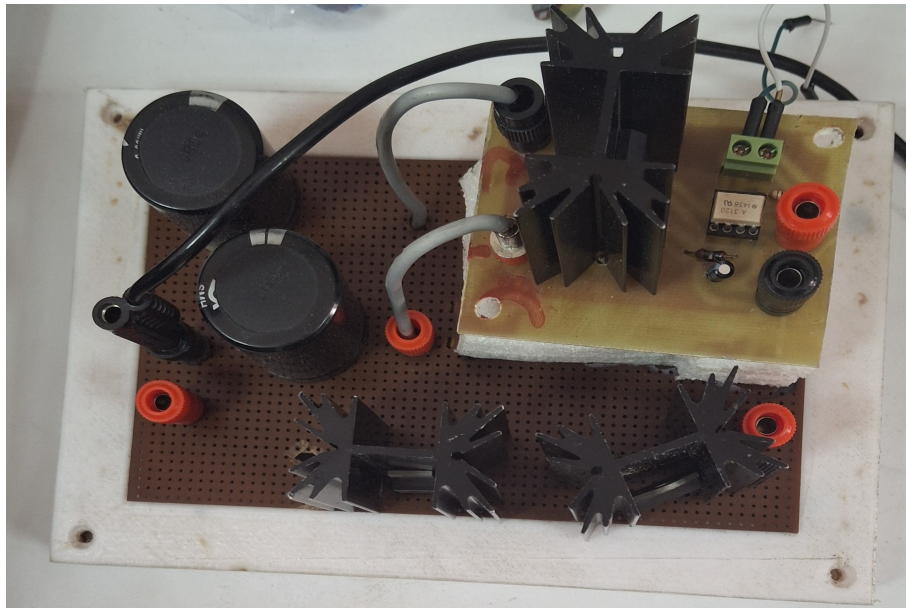


FIGURE 4.24 – Hacheur boost

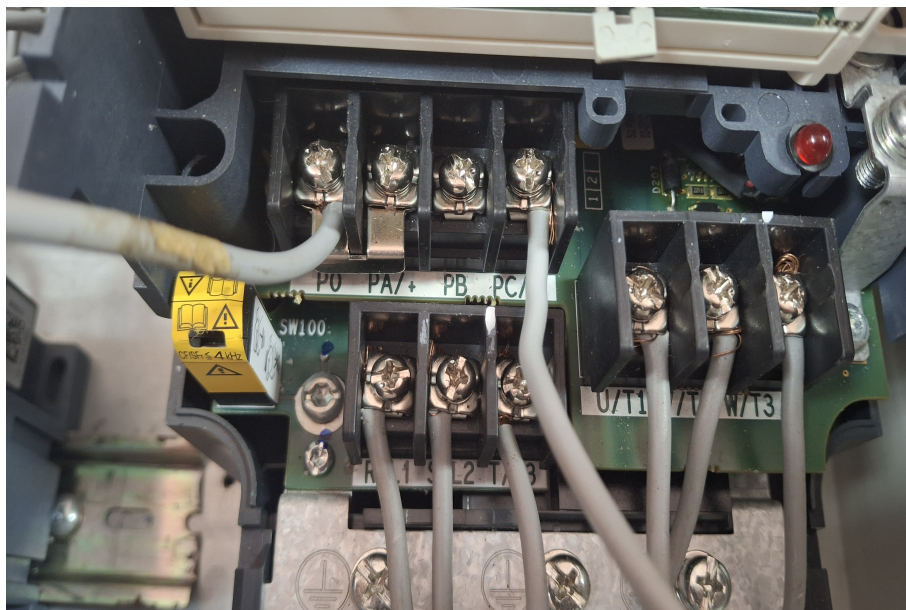


FIGURE 4.25 – Les bornes P0 et PC/– du bus DC du variateur

- Remarque :

On a rencontré un problème lors de l'alimentation du bus DC du variateur : la résistance interne de l'inductance du hacheur est relativement élevée, sa valeur atteint 2,4 Ohms, ce qui engendre une chute de tension importante en fonction du courant d'appel. Il est donc nécessaire que la machine démarre lentement, car le courant d'appel au démarrage est très élevé, ce qui provoque une chute de tension encore plus importante.

4.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'analyse et la conception d'un système de pompage solaire photovoltaïque. Nous avons commencé par introduire l'énergie solaire ainsi que les différents types de panneaux photovoltaïques utilisés pour la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette étape a permis de mieux comprendre le fonctionnement global du système.

Ensuite, nous avons abordé les généralités sur les hacheurs et nous avons justifié le choix de la topologie du hacheur Boost, capable d'élever la tension de sortie des panneaux solaires. Une simulation de ce hacheur Boost a été réalisée, accompagnée d'un dimensionnement précis des composants nécessaires à son bon fonctionnement.

L'analyse de la simulation a mis en évidence l'effet des variations d'irradiation et de température sur la tension de sortie des panneaux. Il a été observé qu'une augmentation de l'irradiation entraîne une hausse de la tension, tandis qu'une diminution de l'irradiation la fait baisser. Pour la température, le comportement est inverse : une température élevée réduit la tension de sortie, alors qu'une baisse de température l'augmente. Ces résultats soulignent l'importance d'un stabilisateur de tension pour maintenir une tension constante malgré les variations climatiques.

Suite à la simulation, un prototype physique du hacheur Boost a été réalisé. Des essais expérimentaux ont montré que ce hacheur permet d'augmenter la tension de sortie jusqu'à environ quatre fois la tension d'entrée, confirmant ainsi les résultats obtenus par simulation.

Enfin, dans le but d'alimenter le bus DC du variateur de vitesse avec une tension continue pour assurer le pompage solaire, des modifications ont été apportées au variateur. Bien qu'il ne soit pas initialement conçu pour ce type d'application, certaines sécurités ont été contournées, notamment celles liées à l'absence de phase et au fonctionnement en sous-tension. Les essais réalisés ont prouvé que le variateur peut fonctionner en courant continu sans être alimenté en triphasé, et que la pompe fonctionne normalement, permettant ainsi le transfert d'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur.

Ainsi, les différentes étapes de ce chapitre ont permis de valider la faisabilité d'un système de pompage solaire basé sur un hacheur Boost et un variateur de vitesse, ouvrant la voie à une solution autonome et efficace pour l'irrigation ou l'approvisionnement en eau dans les zones isolées.

Conclusion générale et Perspectives

Notre travail s'est centré sur le concept de «puissance mécanique à la demande», une approche économique visant à accroître l'efficacité des systèmes de pompage. Les résultats montrent que l'intégration d'un variateur de vitesse (VSD) dans une pompe centrifuge améliore simultanément les performances hydrauliques et l'efficacité énergétique : selon les lois d'affinité, la puissance absorbée varie au cube du rapport de vitesses, si bien qu'une pompe tournant à 80% de sa vitesse nominale ne consomme qu'environ 50% de l'énergie requise à pleine vitesse.

Les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink, comparant la régulation de débit par vanne (à vitesse constante) à celle par variateur de vitesse (VSD, à vitesse variable), confirment les calculs : plus le système s'éloigne du point de fonctionnement nominal, plus la différence de puissance consommée devient significative, en particulier pour les faibles et moyens débits. Même à fort débit, une réduction de la consommation est observée, bien qu'elle soit moins importante.

Combiné à un dimensionnement précis du moteur asynchrone, du VSD en commande RFOC et du circuit hydraulique, ce contrôle électronique assure un démarrage progressif, limite l'usure des roulements et joints, réagit rapidement aux variations de charge et réduit la puissance réactive. Le pompage à vitesse variable s'impose donc comme la solution la plus rentable et la plus fiable : il diminue nettement les coûts d'exploitation et les émissions de CO₂, tout en prolongeant la durée de vie des équipements.

Les essais réalisés sur la maquette, intégrant un variateur de vitesse, ont confirmé les résultats des simulations en mettant en évidence l'avantage énergétique du pompage à vitesse variable. Comparée à la régulation par vanne, cette stratégie permet une réduction significative de la puissance électrique consommée. La différence devient d'autant plus marquée que le système s'éloigne du point de fonctionnement nominal, défini à la fréquence fondamentale, avec une vanne totalement ouverte. Ces observations expérimentales confirment pleinement les simulations et valident l'intérêt technique et économique de l'intégration des variateurs de vitesse dans les systèmes de pompage, renforçant ainsi la pertinence de l'approche adoptée pour des applications industrielles futures.

Une analyse et conception d'un système de pompage solaire photovoltaïque a été réalisée afin de développer une solution hydraulique complète, capable de fonctionner soit en alimentation triphasée classique, soit directement via une tension continue délivrée par les panneaux solaires. L'étude a démontré la faisabilité et l'efficacité de ce système autonome en intégrant un hacheur Boost pour élever la tension. En parallèle, des ajustements ont été apportés au variateur de vitesse pour assurer son fonctionnement en courant continu, malgré l'absence d'alimentation triphasée. Les tests ont

démontré que la pompe fonctionne normalement, assurant le transfert d'eau entre les réservoirs. Ces résultats confirment la viabilité d'un système de pompage solaire optimisé, capable de fonctionner de manière fiable et efficace dans des zones isolées, sans recours au réseau électrique conventionnel.

Dans le cadre de l'optimisation de la fiabilité et de la disponibilité du système de pompage, l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) permet de mettre en place une stratégie de maintenance prédictive efficace. Des capteurs intelligents (température, vibrations, pression, courant, débit, etc.) sont installés sur les composants critiques tels que la pompe, le moteur asynchrone, le variateur de vitesse et le circuit hydraulique. Ces capteurs transmettent en temps réel les données de fonctionnement vers une plateforme cloud ou un système de supervision local. Des algorithmes d'intelligence artificielle et de machine learning sont utilisés pour analyser ces données. L'analyse continue de ces données permet de détecter précocement toute dérive de performance ou signe de défaillance, tels qu'une surchauffe moteur, une chute de pression anormale ou une variation inhabituelle du courant absorbé. Ainsi, les interventions de maintenance peuvent être planifiées de manière anticipée et ciblée, évitant les arrêts imprévus, réduisant les coûts d'entretien, et prolongeant la durée de vie des équipements. Cette approche intelligente renforce la fiabilité du système de pompage, tout en assurant un fonctionnement optimal et durable, notamment dans les environnements isolés ou difficiles d'accès.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] B. K. Bose. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR, 2002.
- [2] Convertisseur AC/AC.
- [3] M Lahbabi. Cours Électronique de puissance. *UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH*.
- [4] M. H. Rashid. *Power Electronics Handbook*. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [5] Thomas Friedli and Johann W. Kolar. Milestones in matrix converter research. *IEEJ Journal of Industry Applications*, 1(1) :2–14, 2012.
- [6] Lee Empringham, Johann W. Kolar, Jose Rodriguez, Pat W. Wheeler, and Jon C. Clare. Technological issues and industrial application of matrix converters : A review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(10) :4260–4271, 2013.
- [7] François Gruson. *Modulation naturelle généralisée des convertisseurs matriciels pour la variation de vitesse*. Theses, Ecole Centrale de Lille, December 2010.
- [8] A. Alesina and M.G.B. Venturini. Analysis and design of optimum-amplitude nine-switch direct ac-ac converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 4(1) :101–112, 1989.
- [9] Johann W. Kolar, Thomas Friedli, Jose Rodriguez, and Patrick W. Wheeler. Review of three-phase pwm ac-ac converter topologies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(11) :4988–5006, 2011.
- [10] K. Ghedamsi. *Contribution à la modélisation et la commande d’un convertisseur direct de fréquence*. Phd thesis, Ecole Nationale Polytechnique d’alger, 2008.
- [11] P. Szczesniak. *Three-Phase AC-AC Power Converters Based on Matrix Converter Topology*. Springer, 2013.
- [12] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg. *Control in Power Electronics*. Elsevier, 2002.
- [13] J. Arrillaga and N. R. Watson. *Power System Harmonics*. John Wiley & Sons, 2004.
- [14] James W. A. Wilson. The forced-commutated inverter as a regenerative rectifier. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-14(4) :335–340, 1978.
- [15] Thomas Friedli, Jose Rodriguez, and P. Wheeler. Review of three-phase pwm ac-ac converter topologies. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 58 :4988 – 5006, 12 2011.
- [16] D. G. Holmes and T. A. Lipo. *Pulse Width Modulation for Power Converters : Principles and Practice*, volume 18 of *Wiley-IEEE Press*. John Wiley & Sons, 2003.
- [17] Ibrahim Al-Bahadly. Energy saving with variable speed drives in industry applications. 01 2007.
- [18] MO. Mahmoudi. Commande scalaire de la machine asynchrone. École Nationale Polytechnique (ENP). Support de cours.

- [19] Ayman Yousef and Samir Abdel maksoud. Review on field oriented control of induction motor. *International Journal for Research in Emerging Science and Technology (IJREST)*, 2, 07 2015.
- [20] I. Takahashi and T. Noguchi. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-22(5) :820–827, 1986.
- [21] U. Baader, M. Depenbrock, and G. Gierse. Direct self control (dsc) of inverter-fed induction machine : A basis for speed control without speed measurement. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(3) :581–588, 1992.
- [22] M. Matteini. *Control Techniques for Matrix Converter Adjustable Speed Drives*. Phd thesis, University of Bologna, 2001.
- [23] Quel est l'intérêt des résistances de freinage, comment les choisir et comment les mettre en oeuvre ? | Schneider Electric France, January 2011.
- [24] Acheter Variateurs de vitesse - catalogue, prix ProfElec.fr.
- [25] Démarreur progressif WEG, électronique démarrage moteurs asynchrones.
- [26] Acheter Démarreurs progressifs - catalogue, prix ProfElec.fr.
- [27] Aida Spahiu, Orion Zavalani, and Altin Uka. Using variable speed control on pump application. *Iliria International Review*, 1 :251 – 261, 12 2012.
- [28] Jafar Ghafouri, Farid Khayatzadeh, and Amin Khayatzadeh. Dynamic modeling of variable speed centrifugal pump utilizing matlab/simulink. *International Journal of Science and Enineering. Investigation*, 1, 01 2012.
- [29] M.F. Baharom, M.H Jali, M.N.M Nasir, Z.H. Bohari, S.A. Tarusan, and M.H. Misran. Performance study in energy efficiency on variable speed drive, vsd design for serting high lift pumping station. In *2014 International Symposium on Technology Management and Emerging Technologies*, pages 328–331, 2014.
- [30] Kenza Bouhoune, Krim Yazid, Mohamed Seghir Boucherit, Babak Nahid-Mobarakeh, and Mohamed Menaa. Electrical-sensorless control of induction motor. In *2019 IEEE 10th International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED)*, pages 1–6, 2019.
- [31] PEDROLLO S.p.A. *Catalogue Technique Général*. PEDROLLO S.p.A, San Bonifacio (VR), Italie, 2024. Catalogue complet des produits PEDROLLO.

Annexes

Chapitre 5

Annexes

5.1 Exemple de variateur de vitesse pour MAS : ATV18 de Schneider Electric

5.1.1 Présentation

Le convertisseur de fréquence pour moteurs asynchrones triphasés à cage, l'Altivar 18, intègre les derniers progrès technologiques.

Robuste et peu encombrant, conforme aux normes internationales, l'Altivar 18 est un produit universel issu de plusieurs générations de variateurs.

Il comprend les fonctions répondant aux applications les plus courantes, notamment :

- Ventilation / climatisation
- Pompes et compresseurs
- Manutention horizontale
- Emballage et conditionnement

Les performances élevées de ses algorithmes ont été mises au service de la robustesse, de la sécurité et de la facilité de mise en œuvre.

- démarrage et régulation de vitesse, freinage de ralentissement et freinage d'arrêt ,
- économie d'énergie,
- régulateur PI (débit, pression...),
- protection moteur et variateur,
- protection thermique,
- vitesses présélectionnés,
- marche pas à pas,
- limitation automatique de temps de marche à petite vitesse, etc...



5.1.2 Choix d'un variateur pour MAS : altivar 18 de Schneider

Choix du variateur

Réseau Tension d'alimen- tation	Courant de ligne (1)		Moteur Puissance indiquée sur plaque		Altivar 18			Référence	Masse
	à U1	à U2			Courant de sortie perma- nent	Courant transi- toire maxi (2)	Puis- sance dissipée à la charge nominale		
U1...U2	V	A	A	kW	HP	A	A	W	kg
200...240 50/60 Hz monophasé	4,4	3,9	0,37	0,5	2,1	3,1	23	ATV-18U09M2	1,5
	7,6	6,8	0,75	1	3,6	5,4	39	ATV-18U18M2	1,5
	13,9	12,4	1,5	2	6,8	10,2	60	ATV-18U29M2	2,1
	19,4	17,4	2,2	3	9,6	14,4	78	ATV-18U41M2	2,8
200...230 50/60 Hz triphasé	16,2	14,9	3	—	12,3	18,5	104	ATV-18U54M2	3,3
	20,4	18,8	4	5	16,4	24,6	141	ATV-18U72M2	3,3
	28,7	26,5	5,5	7,5	22	33	200	ATV-18U90M2	7,8
	38,4	35,3	7,5	10	28	42	264	ATV-18D12M2	7,8
380...460 50/60 Hz triphasé	2,9	2,7	0,75	1	2,1	3,2	24	ATV-18U18N4	2
	5,1	4,8	1,5	2	3,7	5,6	34	ATV-18U29N4	2,1
	6,8	6,3	2,2	3	5,3	8	49	ATV-18U41N4	3,1
	9,8	8,4	3	—	7,1	10,7	69	ATV-18U54N4	3,3
	12,5	10,9	4	5	9,2	13,8	94	ATV-18U72N4	3,3
	16,9	15,3	5,5	7,5	11,8	17,7	135	ATV-18U90N4	8
	21,5	19,4	7,5	10	16	24	175	ATV-18D12N4	8
	31,8	28,7	11	15	22	33	261	ATV-18D16N4	12
	42,9	38,6	15	20	29,3	44	342	ATV-18D23N4	12

(1) Valeur typique sans inductance additionnelle.
(2) Pendant 60 secondes.

L'Altivar 18 a été conçu pour alimenter les moteurs d'une puissance adaptée à chacun de ses calibres.

FIGURE 5.1 – Choix du variateur Gamme ATV18 Schneider Electric

5.1.3 Schéma de câblage d'un altivar 18

La commande est réalisée dans les deux sens de rotation par les entrées LI1 et LI2. La consigne de vitesse est donnée soit par un potentiomètre, soit par une tension externe (sortie analogique d'un API par exemple) .

LI3 et LI4 sont des entrées configurables (vitesse de rotation présélectionnées).

LI1 permet le sens avant (direct) et LI2 permet le sens arrière (sens inverse).

R1A et R1C (ou SB et SC) suivant le modèle de variateur est un contact qui indique, lorsqu'il est fermé, que le variateur est sous tension et sans défaut.

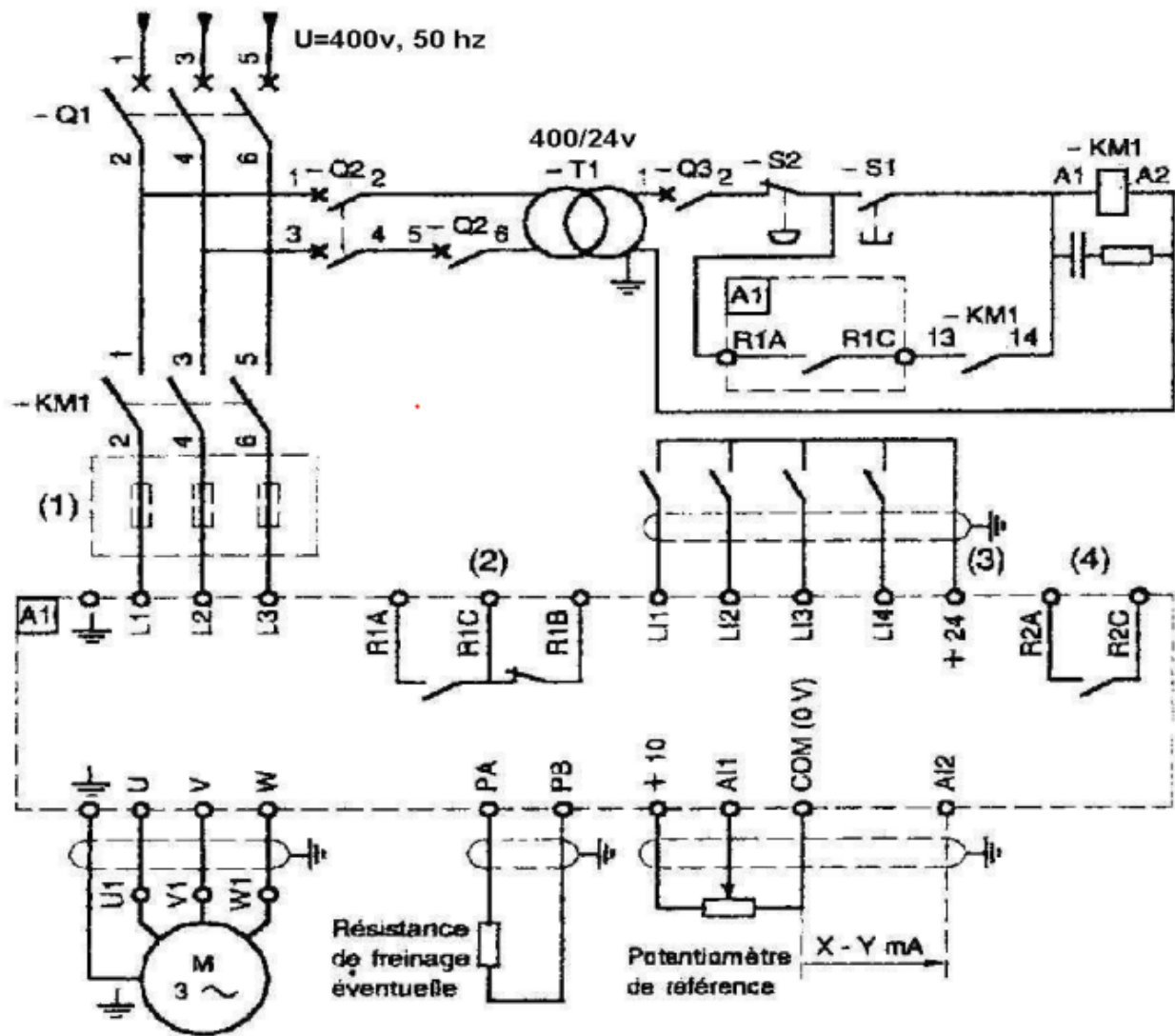


FIGURE 5.2 – Schéma de câblage d'un ATV18 Schneider Electric

5.2 Schéma MATLAB/Simulink utilisé pour la comparaison entre le contrôle du débit à vitesse variable et à vitesse constante

Les figures suivantes présentent le schéma global de la simulation ainsi que les représentations détaillées de chaque bloc.

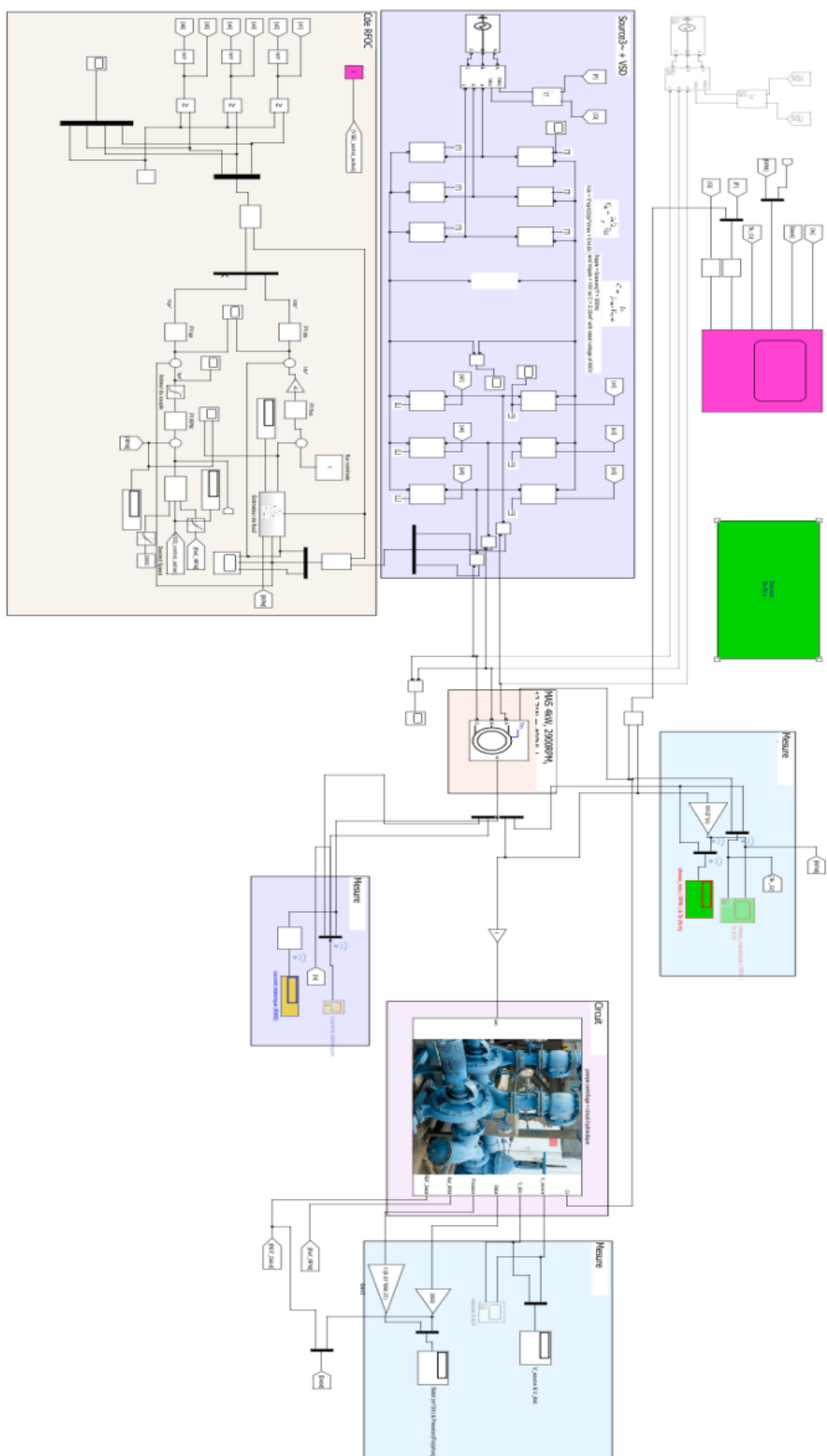


FIGURE 5.3 – Bloc d'alimentation en tension et variateur de vitesse dans la simulation

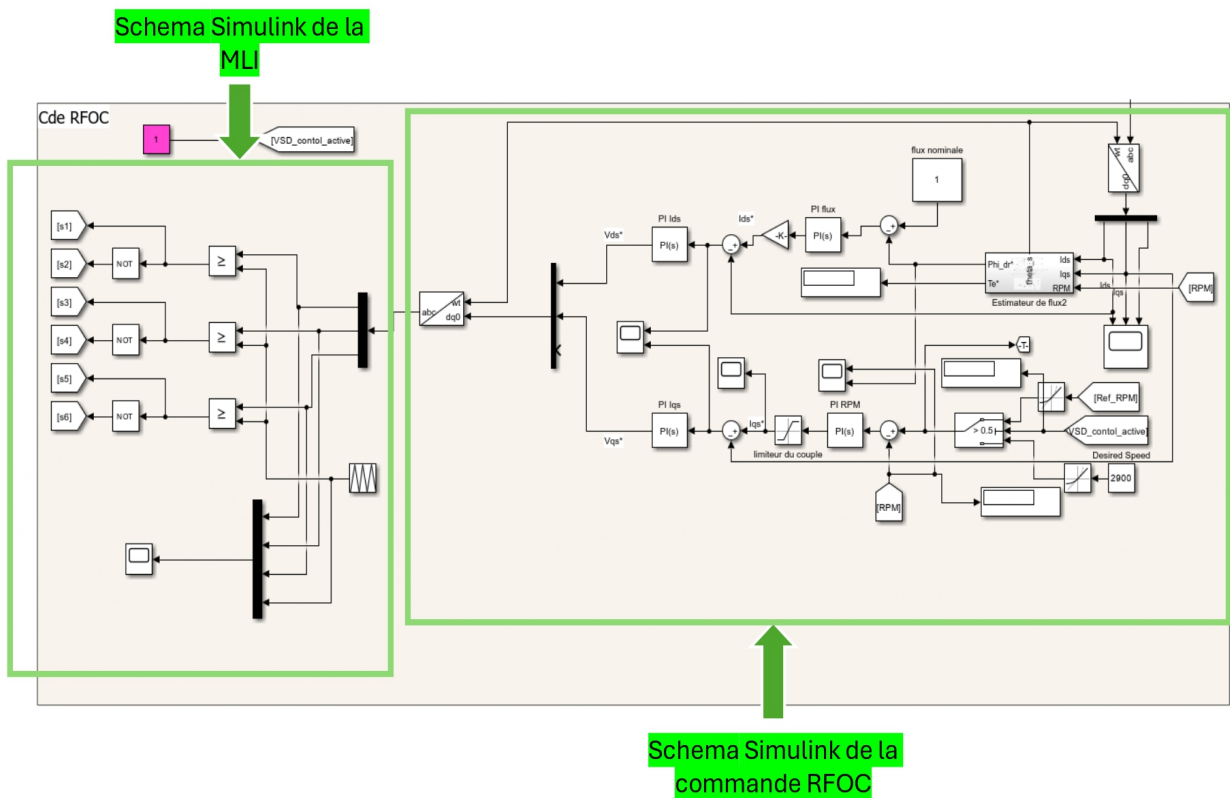


FIGURE 5.4 – Schema Simulink de commande RFOC

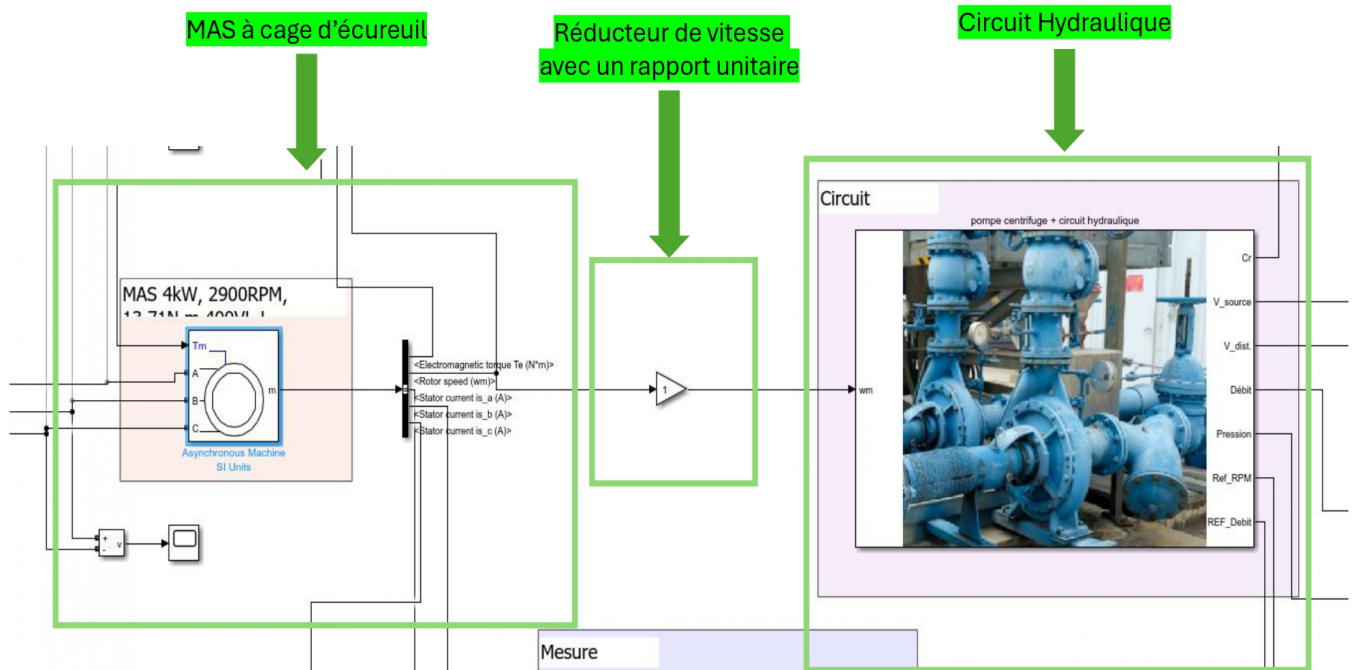


FIGURE 5.5 – Machine Asynchrone à cage d'écureuil 4kW, Réducteur de vitesse, Circuit hydraulique

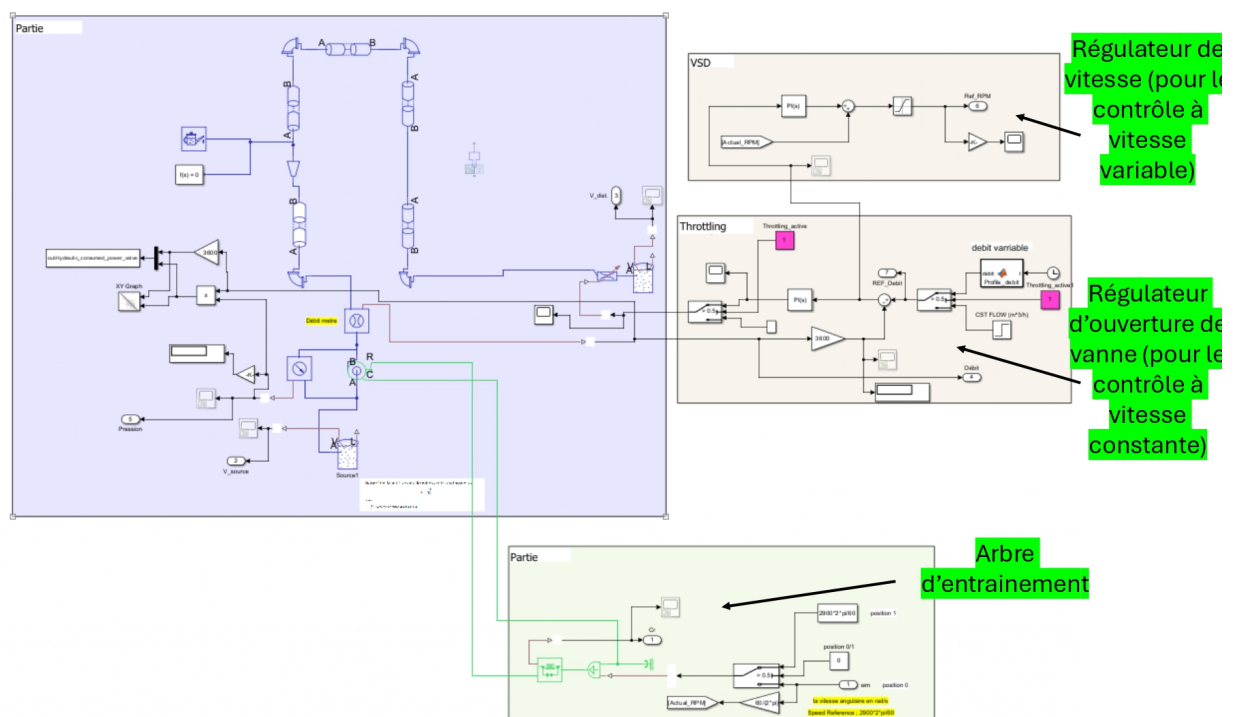


FIGURE 5.6 – Circuit hydraulique

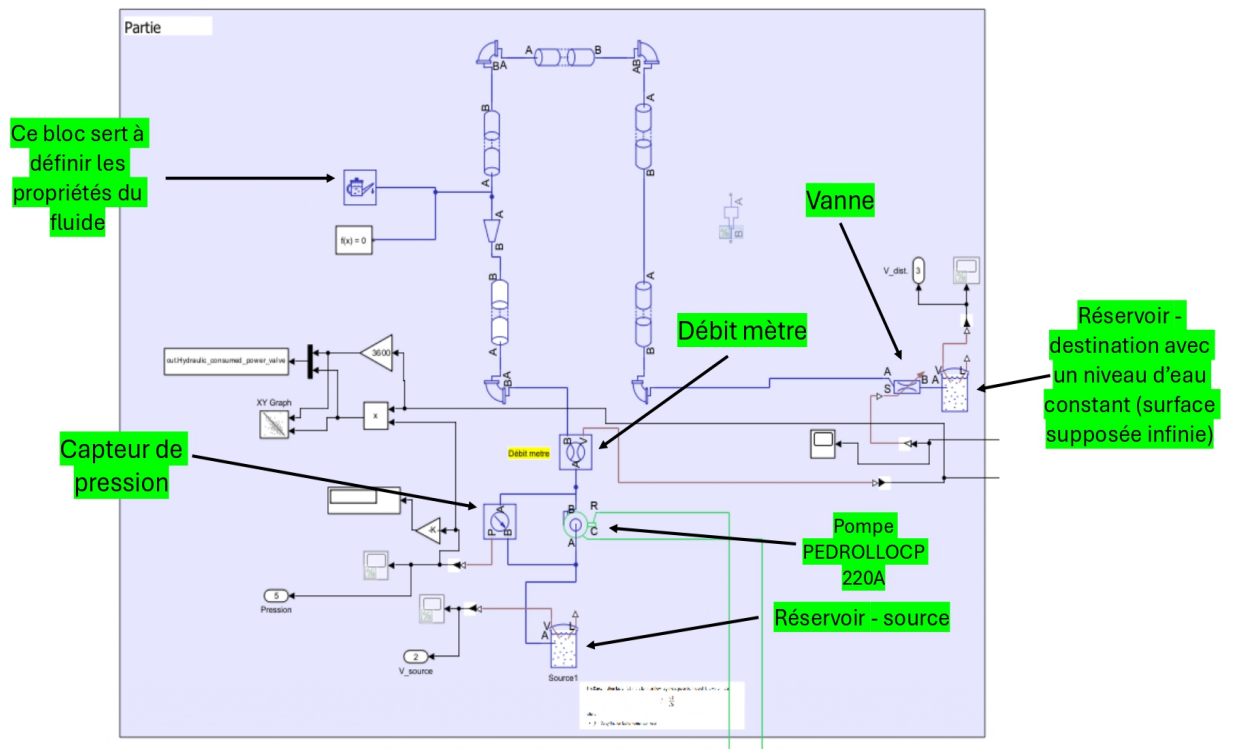


FIGURE 5.7 – Circuit hydraulique utilisé dans la simulation

5.3 Les schémas de câblage électrique conçus avec le logiciel EPLAN Electric

Vous trouverez ci-dessus les schémas de câblage électrique, présentés en grand format pour une meilleure lisibilité et compréhension.

F26_001



Ecole nationale polytechnique

Ecole nationale polytechnique
16200
Tél. +213 (0)6 75 59 47 09



الدراسة الوطنية للهندسة والتكنولوجيا
Ecole Nationale Polytechnique



Société / Client
Description de projet
Numéro de projet
Commission

Variable Speed Drive Control Prototype
IEC_bas001
EPLAN

Fabricant (société)
Ecole nationale polytechnique

Colonne
Nom de projet
Produit

Exemple de projet EPLAN
Armoire

Type
Lieu d'installation
Responsable du projet
Particularités de pièce

Créé le
Edité le

29/04/2025
30/04/2025

de (nom abrégé) HP

Nombre de pages 7

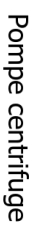
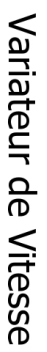
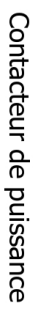
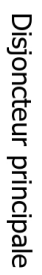
1- Liste des symboles

		DATE	30/04/2025	EPLAN	Ecole nationale polytechnique	- SIDHOUM Mohamed Anis			
		Traitement	HP	Variable Speed Drive Control Prototype					
		Vérf.		Remplacemnt de					
		Orig.		Remplacé par					
Modification	Date	Nom							

Impression de garde
Page 1 / 7

La liste des Symboles

Circuit de puissance



Terre



Bornier



Cable Electrique

[illegible]

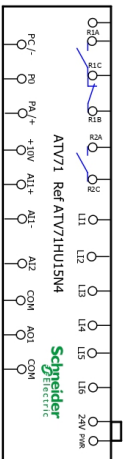
La liste des Symboles

Circuit de commande



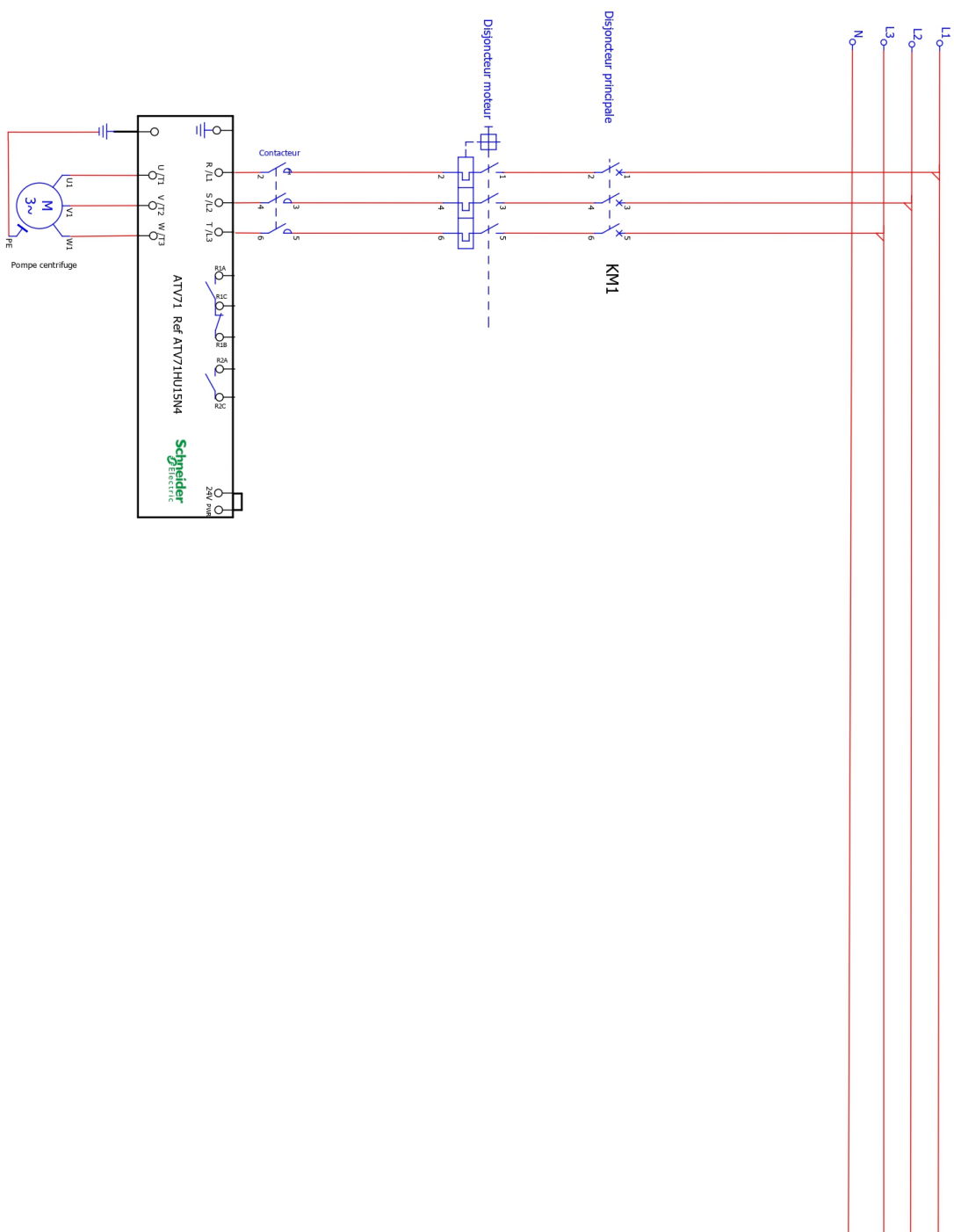
Voyant vert

Voyant rouge



Commande de Variateur de Vitesse

1- Liste des symboles							
	DME	20/04/2025	EPLAN				
	Traitement HP						
	Véif.		Variable Speed Drive Control Prototype				
	Nom Orig.		Remplacemnt de				
	Date		Rempilé par				
				Ecole nationale polytechnique			
				- SIDHOUN Mohamed Anis - MILLANI Khayreddine			
				= + IEC - IEC801			
				2- Initiales symboles Page 3 / 7			

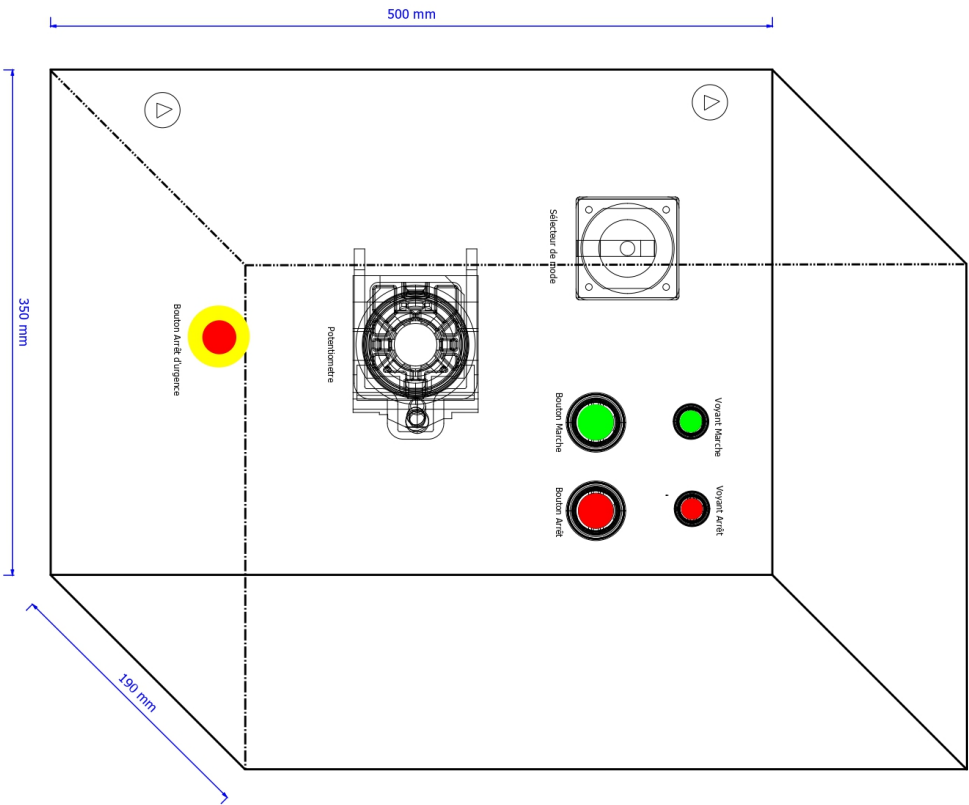


4- Shéma de commande

[illegible]

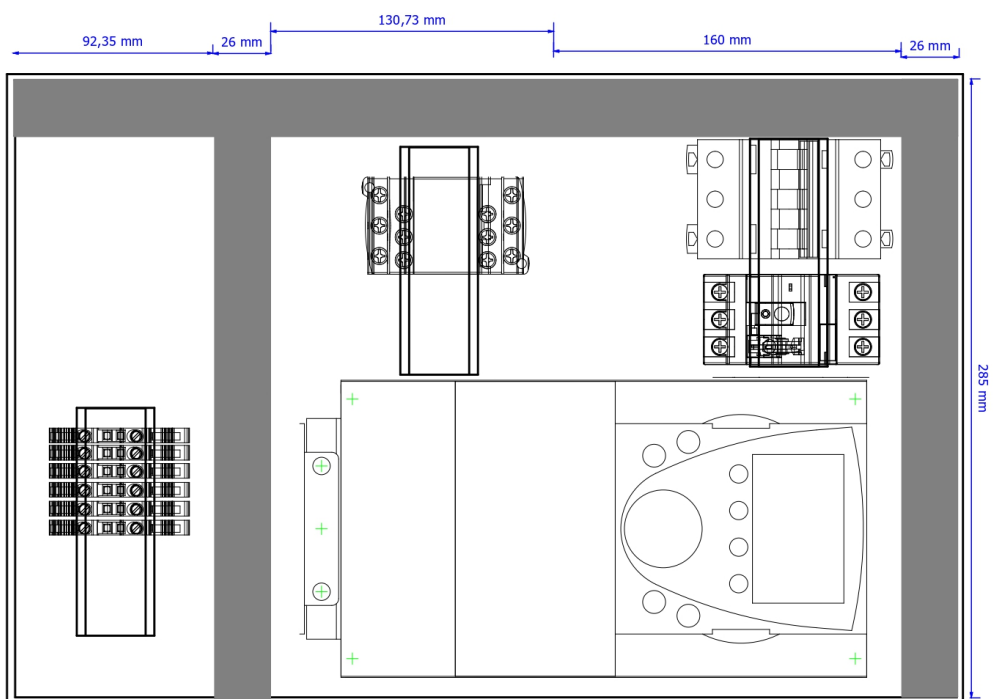


3- Schéma de puissance					EPLAN		Ecole nationale polytechnique		- SIDHOU Mohamed Anis - MILLANI Khayreddine		IFC_C_bas001		=		4		5- Facade armorée	
				Date	30/04/2025													
				Travaux en														
				Verif.														
Modification	Date	Non				Variable Speed Drive Control prototype												
				Obj.		Remplacement de												
						Remplace par												
4 Schéma commande																		
Page 5 / 7																		



4- Schema de commande										6- Implementation amoire			
				Date	30/04/2025	EPLAN	Ecole nationale polytechnique			=			
				Traitement	HP		- SIDHOU Mohamed Anis			+			
				Vérif		Variable Speed Drive Control Prototype	- MILANI Khayreddine			IEC: bs0011			
				Orig.		Remplacement de				Le tableau amoire			
Modification	Date	Nom					Remplacé par				Page 6 / 7		

5- Facade amoire		Date	30/04/2025	EPLAN		Ecole nationale polytechnique	- SIDHOU Mohamed Anis - MILLANI Khayredine		=	
		Training HP		Variable Speed Drive Control Prototype					+	
		Verif.								6 - Impression article
Modification		Nom		Remplacment de						Page 7 / 7



5.4 Code téléversé vers Arduino UNO – Génération du signal PWM (2 kHz)

Ci-dessous, le code Arduino utilisé pour la commande de l'IGBT,

```

1
2 int val = 0;           // Variable de lecture analogique
3 float k = 0;           // Rapport cyclique en PWM (0 255)
4
5 void setup() {
6   pinMode(3, OUTPUT);  // Pin 3 configur e en sortie (OC2B)
7   pinMode(11, OUTPUT); // Pin 11 en sortie (OC2A, inutilis e ici)
8
9   TCCR2A = 0;           // R initialisation du registre de contr le A
10  TCCR2B = 0;           // R initialisation du registre de contr le B
11
12  TCCR2A = 0b10100011;  // Fast PWM, non-invers sur OC2B (D3)
13  TCCR2B = 0b00000011;  // Prescaler = 32 (fr quence PWM 2 kHz)
14
15  OCR2B = 50;           // Rapport cyclique initial sur la broche D3
16  Serial.begin(9600);   // Initialisation du port s rie pour le debug
17 }
18
19 void loop() {
20   val = analogRead(A3); // Lecture de la tension via A3 (0-1023)
21   k = val / 4;          // Mise l' chelle pour PWM (0-255)
22
23   if (k > 200) {
24     k = 200;            // Limitation un duty max 78 %
25   }
26
27   Serial.println(k);    // Affichage du duty cycle actuel (mode Boost)
28   analogWrite(3, k);    // criture du rapport cyclique sur D3
29 }

```