

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université A.MIRA-BEJAIA**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Electrique**

**Spécialité : Electrotechnique Industrielle**



## **Mémoire de fin d'étude**

En Vue de L'obtention du diplôme de master en électrotechnique options :  
Electrotechnique industrielle

**Thème :**

**Mise en œuvre d'un variateur  
de vitesse industriel**

**Proposé par : SONATRACH – ENI /MLE**

Soutenu le 22/06/2023

**Réalisé Par :**

*M<sup>r</sup>* OUTE//MZABET Mehrez

*M<sup>r</sup>* OUAZENE Lamine

**Devant le Jury :**

**M<sup>r</sup> GHEDAMSI Kaci**

**M<sup>r</sup> TAZRART**

**M<sup>r</sup> BOUTEBEL**

**Président**

**Examineur**

**Rapporteur**

**Promotion 2022 - 2023**

# REMERCIEMENT

*...Je tenais à prendre quelques instants pour exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à toutes les personnes qu'ont contribué à la réalisation de ce mémoire.*

*Tout d'abord, je souhaite exprimer ma gratitude envers mon directeur de mémoire, GHEDAMSI Kaci. Sa guidance, son expertise et sa disponibilité tout au long de ce processus ont été d'une valeur inestimable. Ses conseils avisés, sa patience et son soutien constant ont grandement enrichi mon travail. Je lui suis extrêmement reconnaissant(e) pour sa confiance en mes capacités et pour m'avoir donné l'opportunité de mener à bien ce projet.*

*Je tiens également à remercier les membres du jury, pour leur temps précieux et leur expertise qu'ils ont généreusement partagée lors de l'évaluation de mon mémoire. Leurs commentaires constructifs et leurs suggestions ont été d'une grande aide pour améliorer la qualité de mon travail.*

*Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers mes enseignants et mes professeurs qui m'ont transmis leurs connaissances et leur passion pour la recherche. Leur dévouement à l'enseignement et leur engagement envers leurs étudiants ont été une source d'inspiration tout au long de mon parcours académique.*

*Je tiens également à remercier ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible. Leur présence encourageante, leurs mots d'encouragement et leur compréhension durant les moments de stress ont été essentiels pour me motiver et me permettre de persévérer dans l'accomplissement de ce mémoire.*

*Enfin, je voudrais exprimer ma reconnaissance envers la société « SONATRACH » pour m'avoir offert les ressources nécessaires à la réalisation de ce mémoire.*

*Ce mémoire représente pour moi une étape significative dans mon parcours éducatif, et je suis profondément reconnaissant(e) envers toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.*

*Avec toute ma reconnaissance*

MEHREZ  
LAMINE



# *Dédicace . . .*

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes parents*

*Qui ont été ma source de générosité et de patience tout au long de ma carrière  
scolaire, Que Dieu les protège.*

*À mes sœurs*

*Qui m'ont toujours indiqué la bonne voie et qui ont su m'aider.*

*À mon frère*

*Pour toute leur aide précieuse.*

*À mon binôme*

*Qui a su me soutenir tout au long de notre préparation de ce travail.*

*À mes amies*

*Pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.*

*Et à toutes les personnes qui m'ont accompagnée durant mon cursus universitaire,  
Leurs conseils, leurs encouragements et leur présence ont été essentiels dans ma  
réussite. Merci du fond du cœur pour votre soutien*

*Mehrez*

# *Dédicace . . .*

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes parents*

*Qui ont été ma source de générosité et de patience tout au long de  
ma carrière scolaire. Que Dieu les protège.*

*À ma sœur*

*Qui m'ont toujours indiqué la bonne voie et qui ont su m'aider.*

*À mon oncle*

*Pour toute leur aide précieuse.*

*À mon binôme*

*Qui a su me soutenir tout au long de notre préparation de ce  
travail.*

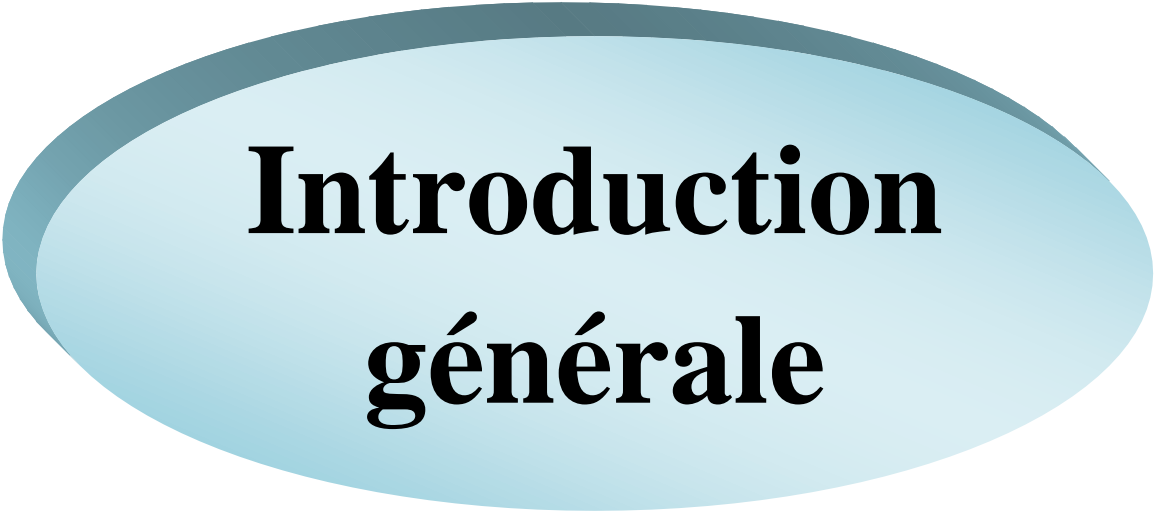
*À mes amis*

*Toufik, Walid, Bilal, Nadjim, Zinedine, Yacine, Ferhat, Abdelouhab, Nabil,...*

*Pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.*

*Et à toutes les personnes qui m'ont accompagnée durant mon cursus  
universitaire, Leurs conseils, leurs encouragements et leur présence  
ont été essentiels dans ma réussite. Merci du fond du cœur pour  
votre soutien inconditionnel tout au long de ce parcours.*

LAMINE



**Introduction  
générale**



# **Sommaire**



# **Bibliographie**

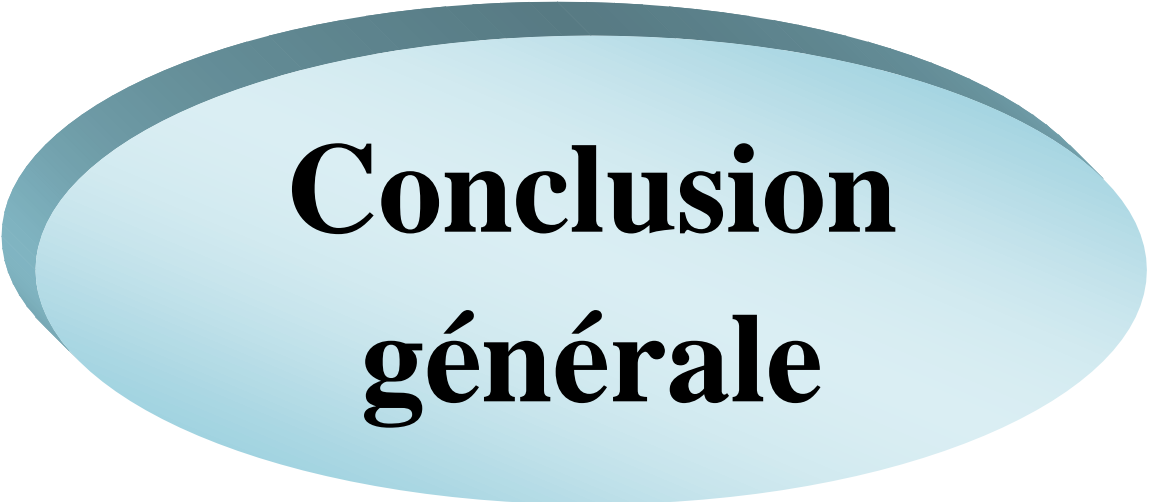




**Principales notations  
et abréviations**



**Listes des figures  
et des tableaux**



**Conclusion  
générale**



**Annexe A**



**Annexe B**

# Chapitre I

**Présentation de la région du champ  
MLE**

# Chapitre II

**Généralités sur les entraînements  
industriels à vitesse**

# Chapitre III

**Etude d'un variateur de vitesse  
industriel SINAMICS GH 150 de  
Siemens**



# Chapitre IV

**Variation de vitesse  
d'un entraînement électrique  
SINAMICS GH 150**

Chapitre

V

**Simulations numériques des  
différents fonctionnements du  
moteur asynchrone**

# SOMMAIRE

<b>Liste des Abréviations.....</b>	<b>I</b>
<b>Notations.....</b>	<b>III</b>
<b>Liste des figures et des tableaux.....</b>	<b>V</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Présentation de la région du champ MLE</b>	
Introduction.....	3
I.1 Présentation de l'établissement d'accueil.....	3
I.1.1 Présentation de SONATRACH.....	3
I.1.2 Présentation de FCP.....	3
I.1.3 Présentation d'ENI.....	4
I.2 Projet production (gaz-huile) bloc 405b MLE.....	4
I.3 Situation géographique du champ MLE.....	6
I.4 Structure géologique.....	7
I.4.1 Triasique argileux gréseux inférieur (TAGI).....	7
I.4.2 Réservoirs carbonifères.....	8
I.4.3 Dévonien inférieur.....	8
Conclusion.....	10
<b>Chapitre II : Généralités sur les entraînements industriels à vitesse variable</b>	
Introduction.....	11
II.1 Place de la motorisation dans la consommation électrique.....	11
II.2 Utilisation des systèmes d'entraînement sa vitesse variable.....	12
II.3 Architecteur d'un système d'entraînement a vitesse variable.....	13
II.4 Intérêt économique des entraînements électriques à vitesse variable.....	14
II.5 Domaines d'application des entraînements électriques à vitesse variable.....	15
II.6 Structure générale des entraînements électrique à vitesse variable.....	16

# SOMMAIRE

1. Le convertisseur statique.....	17
2. Le moteur.....	17
3. L'équipement de commande.....	17
<b>II.7 Autres avantages de la vitesse variable.....</b>	<b>17</b>
1. Avantages pour le réseau d'alimentation.....	17
2. Avantages pour le moteur.....	18
3. Avantages pour la charge entraînée.....	18
4. Autres avantages et inconvénients.....	19
<b>Conclusion.....</b>	<b>19</b>
 <b>Chapitre III : Etude d'un variateur de vitesse industriel SINAMICS GH 150 de Siemens</b>	
<b>Introduction.....</b>	<b>20</b>
III.1 Présentation du variateur de vitesse industriel SINAMICS GH 150 de Siemens.....	20
III.2 Principe de la variation de vitesse.....	21
III.3 Domaine d'application.....	22
III.4 Polyvalences des modules d'un SINAMICS GH 150.....	23
III.5 Performance standard ou Protection de la performance totale d'un VSDS SINAMICS GH 150.....	25
III.5.1 Performance standard.....	25
III.5.2 Protection de la performance totale.....	25
III.6 Conception du convertisseur SINAMICS GH 150 de Siemens.....	27
III.7 Module de contrôle (ou module de commande) pour un SINAMICS GH 150.....	27
III.7.1 Module de ligne de base.....	28
III.7.2 Module moteur employant la technologieM2C.....	28
III.7.2.1 Les Cellule de puissance.....	29
A. Module IGBT.....	30

# SOMMAIRE

B. Batterie de condensateurs.....	30
III.7.3 Module de freinage.....	30
III.8 Autres composants.....	31
III.9 Unité de refroidissement.....	33
III.10 Les cinq règles de sécurité.....	33
III.11 Les avantages d'un variateur de vitesse SINAMICS GH 150.....	34
<b>Conclusion.....</b>	<b>35</b>
 <b>Chapitre IV : Variation de vitesse d'un entraînement électrique SINAMIC GH 150</b>	
<b>Introduction .....</b>	<b>36</b>
IV.1 L'application sur le variateur de vitesse d'un entraînement (SINAMICS GH 150).....	36
IV.1.1 Principaux éléments de l'unité de conversion SINAMICS GH150.....	37
IV.1.2 Connexions d'un VFD SINAMICS GH 150 de Siemens.....	37
IV.2 Composants de la section puissance du VSDS.....	38
IV.2.1 Disjoncteur à haute tension.....	39
IV.2.2 Transformateur .....	42
IV.2.3 Redresseur.....	42
IV.2.4 Onduleur.....	42
IV.2.5 Unité de refroidissement.....	43
IV.2.6 Commande en boucle ouverte et en boucle fermée.....	44
IV.3 Convertisseur.....	46
IV.3.1 Fonctionnement et applications du contrôle en boucle ouverte et en boucle fermée avec excitation.....	46
IV.3.2 Principe de fonctionnement de la section de puissance.....	47
IV.3.3 Principe de fonctionnement du contrôle en boucle fermée .....	47

# SOMMAIRE

IV.4 Boucle ouverte et boucle fermée : Fonctionnement et affichage – Schéma typique.....	49
IV.4.1 Fonctionnement et affichage.....	50
A. Panneau de commande.....	50
B. Instruments indicateurs et lampes.....	52
C. Entrée de la valeur de consigne de la vitesse.....	52
IV.4.2 Fonctions individuelles paramétrables.....	53
A. Générateur de fonction de rampe.....	53
B. Contrôle du redémarrage automatique .....	54
C. Commande de disjoncteur .....	54
D. Suppression de la gamme de fréquences .....	54
E. Réglage des limites de couple pour le fonctionnement des moteurs et des générateurs.....	55
IV.4.3 Fonctions de protection et de contrôle internes.....	55
A. Détection de surintensité.....	55
B. Protection contre la survitesse.....	56
C. L'Écart entre la consigne de vitesse et la valeur réelle.....	56
D. Mise à l'arrêt (Fermeture).....	56
E. Contrôle de l'IGBT (ou Surveillance du transistor IGBT).....	57
F. Contrôle de l'isolation.....	57
G. Surveillance des composants périphériques.....	58
IV.5 Vue d'ensemble des principaux composants de l'entraînement électrique.....	58
IV.5.1 Moteur de moyenne tension.....	58
1. Moteur de moyenne tension.....	58
2. Méthode de ventilation et de refroidissement.....	59
3. Construction mécanique du moteur.....	59
IV.5.2 Transformateur.....	60
IV.5.3. Sectionneur moyenne tension.....	61
<b>Conclusion.....</b>	<b>61</b>

# SOMMAIRE

## Chapitre V : Simulations numériques de différents fonctionnements du moteur asynchrone

<b>Introduction.....</b>	<b>62</b>
V.1 Modélisation de la machine asynchrone.....	62
V.2 Théorie de la commande vectorielle de la machine asynchrone.....	63
V.2.1 Principe et l'objectif d'une commande vectorielle.....	63
V.2.2 Principe de la commande vectorielle par orientation du flux (FOC).....	65
a) commande à flux rotorique orienté directe DFOC.....	66
b) commande à flux rotorique orienté indirecte IDFOC.....	66
V.3 Commande vectorielle directe à flux rotorique orienté DFOC.....	66
A. Equation du modèle.....	66
B. Estimateur du flux rotorique .....	67
C. Estimation de $\omega_{set}$ de $\theta_s$ .....	68
D. Organisation fonctionnelle de la Commande Vectorielle Directe à Flux.....	68
E. Découplage par compensation.....	69
F. Schéma de compensation.....	71
V.4 Commande MLI 3 Théorie des techniques de.....	72
IV.4.1 Principe d'association entre un onduleur et une machine asynchrone.....	72
IV.4.2 Modélisation de l'onduleur triphasé.....	73
IV.4.3 Contrôle courant par MLI.....	75
V.5 Simulation de l'association Machine asynchrone-Onduleur de tension.....	76
V.5.1 Simulation de moteur asynchrone-alimentation directe.....	76
A. Résultats de simulation.....	77
B. Interprétations des résultats obtenus.....	78
V.5.2 Simulation de l'association Moteur asynchrone-FOC.....	78
A. Résultats de simulation.....	79
B. Interprétations des résultats obtenus .....	80

# SOMMAIRE

<b>Conclusion.....</b>	<b>81</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>82</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>83</b>
<b>Annexe A.....</b>	<b>86</b>
<b>Annexe B.....</b>	<b>87</b>



# ABBREVIATIONS

## Liste des abréviations

SYMBOLES	SIGNIFICATIONS	UNITES
$V, i, \Phi$	Tension, courant, flux	[V], [A], [Wb]
$w_r$	Vitesse rotorique	[rad/s]
$w_s$	Vitesse angulaire du champ tournant par rapport au stator	[rad/s]
$R_s, R_r$	Résistances statorique et rotorique	[ $\Omega$ ]
$l_s, l_r$	Inductances cycliques statorique et rotorique	[H]
$M$	Inductance cyclique mutuelle maximale entre phases statoriques et rotoriques	[H]
$\sigma$	Coefficient de dispersion de Blondel ( $\sigma = \frac{1-M^2}{l_s l_r}$ )	/
$m_r$	Rapport de transformation ( $m_r = \frac{M}{l_r}$ )	/
$T_s$	Constante de temps statorique ( $T_s = \frac{l_s}{R_s}$ )	[S]
$T_r$	Constante de temps rotorique ( $T_r = \frac{l_r}{R_r}$ )	[S]
$J$	Moment d'inertie	[Kg.m <sup>2</sup> ]
$P$	Nombre de paires de pôles	/
$T_e$	Couple électromagnétique	[N.m]
$T_r$	Couple résistant (Couple de charge)	[N.m]
$f$	Coefficient de frottement	N.s/rad
$P, P_n$	Puissance, Puissance nominale	[W]
$Q, Q_n$	Débit, Débit nominal	[m <sup>3</sup> /s]
$H, H_n$	Hauteur, Hauteur nominal	[m]
$s, r$	Indices correspondant au stator et au rotor	/
$d, q$	Axes direct et quadrature	/
$f, f_{\min}, f_{\max}$	Fréquence, Fréquence minimale, Fréquence maximale	[Hz]
$T_R, T_H, T_F$	Temps de Réponse, Temps de Haut, temps de freinage indépendant	[S]
$S_1, S_2, S_3$	Les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement	[VA]

## ABBREVIATIONS

$V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}$	Les trois tensions d'alimentation de la machine asynchrone	[V]
$\theta_s$	Position angulaire du repère (d, q) par rapport au stator	[rad]
$\theta_r$	Position angulaire du repère (d, q) par rapport au rotor	[rad]
$a, b, c$	Indices correspondant aux trois phases (a, b, c)	/
$A, B, C$	Les interrupteurs des phases	/
$s$	Opérateur de la Place	/
$I_a$	Courant d'induit de la MCC	[A]
$I_f$	Courant d'excitation de la MCC	[A]
$k$	Constante	/
$\theta_{r-est}$	Estimation de position angulaire du repère (d, q) par rapport au rotor	[rad]
$w_{s-est}$	Estimation de vitesse angulaire du champ tournant par rapport au stator	[rad/s]
$\Phi_{r-est}$	Estimation de Flux rotorique	[Wb]
$\Omega$	Vitesse mécanique de rotation du rotor	[rad/s]
$V_{ds1}, V_{qs1}$	Tensions de l'étoile 1 dans le référentielle de Park (d, q)	[V]
$\Phi_{dr}, \Phi_{qr}$	Flux rotorique dans le référentiel de Park (d, q)	[Wb]
$\Phi_{ds}, \Phi_{qs}$	Flux statorique dans le référentiel de Park (d, q)	[wb]
$e_{ds}, e_{qs}$	Termes des tensions de couplage entre l'axe direct et l'axe quadratique (d, q)	[V]
$\vec{\Phi}_s, \vec{\Phi}_r$	Vecteurs de flux statorique et rotorique	/
$V_{pv}$	Tension continu	[V]

# NOTATIONS

## Liste des notations

NOTATIONS	SIGNIFICATIONS EN FRANÇAIS	SIGNIFICATIONS EN ANGLAIS
<b>AOP30</b>	Panneau de Commande Avancé 30	Advanced Operator Panel 30
<b>ASD</b>	Développement de Système Actif	Active System Development
<b>CA</b>	Courant Alternatif	Alternating Current
<b>CAFC (OIL)</b>	Refroidissement par Fluide Chimiquement Actif (gaz)	Chemically Active Fluid Cooling (oil)
<b>CC</b>	Courant Continu	Direct Current (DC)
<b>CU230</b>	Contrôleur Universel 230	Contrôleur Universel 230
<b>CVDFRO</b>	Commande Vectorielle Directe à Flux Rectifié Optimal	Vector Control with Direct Flux Rectification Optimal
<b>DFOC</b>	Commande Directe à flux orienté	Direct Field-Oriented Control
<b>ENI</b>	Entreprise Nationale des Hydrocarbures	Ente Nazionale Idrocarburi
<b>F.E.M</b>	Force Electromotrice	Electromotive Force (E.M.F)
<b>FCP</b>	Premiers Pétroles de Calgary	First Calgary Petroleums
<b>FOC</b>	Commande à flux orienté	Field-Oriented Control
<b>IGBT</b>	Transistor Bipolaire à Grille Isolée	Insulated Gate Bipolar Transisto
<b>IIoT</b>	Intelligence Artificielle Industrielle de l'Internet des Objets	Industrial Internet of Things
<b>INFOC</b>	Commande INdirecte à flux orienté	Indirect Field-Oriented Control
<b>IT-NET</b>	Réseau de Télécommunications Intégré	Integrated Telecommunications Network
<b>LCD</b>	Affichage à Cristaux Liquides	Liquid Crystal Display
<b>LED</b>	Diode Électroluminescente	Light Emitting Diode
<b>M2C</b>	Moteur vers Convertisseur	Motor To Converter
<b>MAS</b>	Machine ASynchrone	Asynchronous Machine
<b>MC SET</b>	Ensemble de Commande Moteur	Motor Control Set
<b>MCC</b>	Machine à Courant Continu	Direct Current Machine
<b>MENA</b>	Moyen-Orient et Afrique du Nord	Middle East and North Africa

## NOTATIONS

<b>MLE</b>	Menzel Ledjmet Est	Menzel Ledjmet East
<b>MLI</b>	Modulation de Largeur d'Impulsion	Pulse Width Modulation (PWM)
<b>MLSE</b>	Menzel Ledjmet Sud-Est	Menzel Ledjmet South-East
<b>MS</b>	Machine Synchrone	Synchronous machine
<b>PI</b>	Proportionnel Intégral	roportional-Integral Controller
<b>PSA</b>	Adaptateur de Pile de Puissance	Power Stack Adapter
<b>PT100</b>	Thermomètre à résistance en platine 100	Platinum Resistance Thermometer 100
<b>RC</b>	résistance-condensateur	Resistor-Capacitor
<b>SMLI</b>	Modulation de Largeur d'Impulsion Sinusoïdale	Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)
<b>TAGI</b>	Triasique Argileux Gréseux Inférieur	Lower Triassic Clayey Sandy Reservoir
<b>UPS</b>	Alimentation Sans Interruption (ASI)	Uninterruptible Power Supply
<b>VSD</b>	Variateur de Vitesse	Variable Speed Drive
<b>VSDS</b>	Système de Variateur de Vitesse	Variable Speed Drive System

# LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

## Chapitre I

Figure-01 : Localisation du champ MLE/ SH-ENI.....	6
Figure-02 : Carte géographique du champ MLE (bloc 405b).....	6
Figure-03 : Stratigraphie productive du bloc (405b).....	9
Figure-04 : Caractéristiques des réservoirs majeurs du bloc 405b.....	10

## Chapitre II

Figure-05 : Architecteur d'un système d'entraînement a vitesse variable.....	13
Figure-06 : Analyse des pertes de charge lors l'installation d'une pompe sans variateur.....	14
Figure-07: Analyse des pertes de charge lors l'installation d'une pompe avec variateur.....	14
Figure-08 : Structure générale des entrainements électrique à vitesse variable.....	16

## Chapitre III

Figure-09 : Le variateur de vitesse SINAMICS GH 150 de Siemens.....	20
Figures-10 : Quelques secteurs d'utilisation les variateurs de vitesse SINAMICS GH 150...23	
Figure-11 : Les polyvalences des modules d'un GH 150.....	24
Figure-12: Performance standard.....	25
Figure-13 : Protection de la performance totale.....	26
Figure-14: Optimisation de la disponibilité et de la fiabilité grâce à une circulation cellulaire rapide et efficace.....	27
Figure-15 : Exemple sur la conception d'un convertisseur.....	28
Figure-16 : Diagramme de bloc: Module de ligne de base avec diodes.....	29
Figure-17 : Schéma fonctionnel : Module moteur utilisant la technologie.....	30
Figure-18 : Cellule de puissance.....	30
Figure-19 : Module de freinage dans la technologie M2C.....	32

# LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure-20 : Exemple de schéma : Interrupteur de mise à la terre côté ligne.....34

## Chapitre IV

Figure-21: Vue d'ensemble du système de conversion.igure-31: Principe de la commande vectorielle.....	39
Figure-22: Vue d'ensemble du disjoncteur MC set.....	41
Figure-23 : Convertisseur à diodes sur de côté la ligne.....	43
Figure-24: Convertisseur à IGBT sur de côté du moteur.....	43
Figure-25 : Unité de refroidissement.....	44
Figure-26 : Vue du VFD SINAMICS GH 150.....	45
Figure-27: conditions de commutation du collecteur électronique pour un champ tournant dans le sens des aiguilles d'une montre.....	48
Figure-28 : Schéma typique du système SINAMICS GH150.....	50
Figure-29 : Panneau de commande - AOP30.....	51
Figure-30: Caractéristiques du générateur de rampe.....	53
Figure-31 : Exemple de conception d'une limitation de couple en fonction de la fréquence...55	
Figure-32 : Mesure des défauts à la terre GH 150 (câble à fibre optique vert, connexions bus internes).....	58
Figure-33 : Moteur de moyenne tension (5.5 KV).....	59
Figure-34: Transformateur.....	60

## Chapitre V

Figure-35: Principe de la commande vectorielle.....	64
Figure-36: Principe de la commande vectorielle par orientation du flux.....	65
Figure-37: Représentation et Modélisation de l'estimateur.....	68

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure-38: Commande vectorielle directe de flux d'une machine alimentée en tension.....	69
Figure-39 : Commande découplée : Expression de $\Phi_r$ et $C_e$ .....	71
Figure-40 : Bloc de compensation $e_{sd}$ .....	71
Figure-41 : Bloc de compensation $e_{sq}$ .....	72
Figure-42 : L'ensemble onduleur-machine asynchrone.....	73
Figure-43 : Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé.....	74
Figure-44 : diagramme de blocs de contrôle pour le courant instantané SPWM (ou SMLI)...	76
Figure-45 : Schéma bloc de la simulation de la MAS alimentée en tension.....	77
Figure-46 : Résultats de simulation de la MAS à vide, suivi d'une application d'un couple décharge ( $C_r=0.4 \times 10^5$ [N.m]) à $t=01$ [s].....	77
Figure-47: Schéma bloc de la simulation de l'ensemble [MAS+FOC].....	79
Figure-48 : Résultats de simulation du procédé [MAS+FOC] à vide, suivi d'une application d'une charge ( $C_r=0.4 \times 10^5$ [N.m]) à $t=07$ [s].....	79

# LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

## Chapitre II

Tableau-01 : Formations géologiques du réservoir.....7

## Chapitre II

Tableau-02 : la répartition de la production française des moteurs alternatifs triphasés.....12

## Chapitre IV

Tableau-03 : les connexions d'un VFD SINAMICS GH 150.....37



# Introduction générale

---

## Introduction générale

Les installations industrielles sont alimentées par un réseau électrique à fréquence constante de 50 Hz ou 60 Hz, ce qui entraîne un fonctionnement à vitesse fixe des machines à courant alternatif si elles sont directement alimentées. Cependant, de nombreux processus industriels modernes exigent une variation de vitesse. Ces applications incluent la propulsion électrique, les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, l'automatisation des usines, les actionneurs aérospatiaux, les actionneurs robotiques, l'industrie textile, les applications automobiles, les équipements miniers, les convoyeurs, les ascenseurs, les escaliers mécaniques, les outils électriques, etc.

L'introduction de variateurs de vitesse permet d'automatiser et d'augmenter la productivité, tout en améliorant l'efficacité énergétique. Le fonctionnement à vitesse variable peut réduire la consommation d'énergie et augmenter l'efficacité de la transmission mécanique, permettant ainsi des économies d'énergie significatives. En effet, l'efficacité du système peut augmenter de 15 à 27 % grâce à l'utilisation d'entraînements à vitesse variable par rapport aux entraînements à vitesse constante. Cette réduction de la consommation d'énergie se traduit par des économies importantes sur les factures énergétiques annuelles [1].

Outre les avantages économiques, l'utilisation d'entraînements à vitesse variable contribue à la préservation des ressources naturelles, à la réduction de la pollution atmosphérique grâce à une production et une consommation d'énergie réduites, et à la compétitivité accrue grâce aux économies réalisées [1].

Ce mémoire se compose de quatre chapitres qui explorent différentes facettes de l'entraînement industriel à vitesse variable et mettent en évidence l'application d'un variateur de vitesse spécifique le SINAMICS GH 150.

Le premier chapitre de ce mémoire s'articule autour des généralités sur les entraînements industriels à vitesse variable. Il vise à fournir une vue d'ensemble des concepts clés, des principes de fonctionnement et des applications courantes de ces systèmes. Une analyse approfondie des avantages et des défis associés à l'utilisation d'entraînements à vitesse variable sera également présentée, permettant ainsi de mieux comprendre l'importance de ce domaine dans le contexte industriel actuel.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'étude d'un variateur de vitesse industriel spécifique, le SINAMICS GH 150. Ce variateur est largement utilisé dans l'industrie en raison

# Introduction générale

---

de ses fonctionnalités avancées et de sa fiabilité. L'objectif de ce chapitre est d'analyser en détail les caractéristiques et les spécifications techniques du SINAMICS GH 150, en mettant l'accent sur son rôle dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable.

Le troisième chapitre se penche sur l'application pratique du variateur de vitesse industriel SINAMICS GH 150 dans la variation de vitesse d'un entraînement électrique spécifique. Cette section met en évidence les différentes étapes et les considérations clés impliquées dans la mise en œuvre d'un tel système, en mettant l'accent sur les paramètres de configuration, les méthodes de contrôle et les résultats obtenus.

Enfin, le quatrième chapitre se concentre sur les simulations numériques des différents modes de fonctionnement d'un moteur asynchrone. Nous explorerons les principaux modèles mathématiques utilisés pour simuler le comportement du moteur et analyserons les résultats obtenus pour différents scénarios de fonctionnement. Ces simulations nous permettent de mieux comprendre les performances du moteur asynchrone lorsqu'il est associé à un variateur de vitesse tel que le SINAMICS GH 150.

Dans l'ensemble, ce mémoire fournit une étude approfondie des entraînements industriels à vitesse variable, en mettant l'accent sur le variateur de vitesse industriel SINAMICS GH 150 et ses applications pratiques. Les connaissances acquises à travers cette recherche permettent de mieux comprendre les aspects techniques, les avantages économiques et les enjeux liés à l'utilisation de ces systèmes dans l'industrie moderne.

## **Introduction**

Le bassin de BERKINE en Algérie est largement reconnu comme l'un des bassins d'hydrocarbures les plus prometteurs du pays. Il contient des réserves exceptionnelles qui contiennent une gamme complète de pétroliers et gaziers, tels que l'huile, le GPL, le condensat et le gaz. Ces précieuses ressources sont produites par les roches-mères siluriennes et franciennes présentes dans la région. En raison de son potentiel inégalé, le bassin de BERKINE tient un grand nombre de partenaires étrangers qui collaborent étroitement avec la société nationale algérienne SONATRACH. Cette collaboration fructueuse a permis de maximiser l'exploitation de ces ressources et de renforcer le développement économique de la région.

### **I.1 Présentation de l'établissement d'accueil**

#### **I.1.1 Présentation de SONATRACH**

SONATRACH, la principale entreprise de l'industrie pétrolière en Afrique, a été créée en 1963 dans le but d'exploiter les ressources en hydrocarbures du pays. Cette entreprise nationale a été chargée par le gouvernement d'exploiter les gisements précédemment découverts pendant l'occupation française, à savoir le champ pétrolier à Hassi Messaoud et le champ gazier à Hassi R'mel.

En tant qu'acteur majeur du secteur pétrolier, SONATRACH assume des responsabilités stratégiques critiques, notamment l'exploration, la production, le traitement, le transport et la commercialisation internationale des hydrocarbures. Son objectif principal réside dans la gestion efficace et efficiente de l'ensemble de la chaîne de valeur de ces précieuses ressources pour le marché mondial [2].

#### **I.1.2 Présentation de FCP**

La société First Calgary Petroleum Ltd, basée à Calgary en Alberta, Canada, se distingue par son activité dans le secteur des hydrocarbures. Spécialisée dans l'exploration, le développement et la production de pétrole et de gaz naturel, elle opère principalement en Afrique du Nord et au Moyen-Orient (MENA). Grâce à son expertise et à sa présence stratégique dans ces régions, First Calgary Petroleum Ltd joue un rôle clé dans l'exploitation des ressources énergétiques de ces territoires [3].

### **I.1.3 Présentation d'ENI**

L'Eni, également connu sous le nom d'Ente nazionale idrocarburi, est une société italienne dont les activités principales se concentrent traditionnellement sur l'exploration, la production et la distribution de pétrole et de gaz naturel. Fondé en 1953, il occupe actuellement la 9e place parmi les plus grandes entreprises pétrolières mondiales en termes de chiffre d'affaires (derrière Shell, Sinopec, China National Petroleum, Exxon Mobil, BP, Total, Chevron et Phillips 66). De plus, l'Eni est la première entreprise d'Italie en termes de capitalisation boursière, témoignant de son importance économique dans le pays [2].

## **I.2 Projet production (gaz-huile) bloc 405b MLE**

Le projet de partenariat entre SONATRACH et ENI (SH-ENI) est une initiative visant à développer le champ pétrolier et gazier du bloc 405b MLE, situé dans le bassin de Berkine en Algérie. Dans le cadre de ce plan de développement, une infrastructure de collecte ainsi qu'une usine de traitement du gaz sera mise en place pour traiter quotidiennement 9 millions de mètres cubes de gaz.

Le champ MLE comprend deux gisements : un gisement de gaz humide (MLE) et un gisement d'huile et de gaz CAFC (Central Area Field Complex). Les installations actuelles du champ MLE permettent la production et le traitement du gaz humide, générant ainsi 9 millions de mètres cubes de gaz commercial par jour, soit 3 milliards de mètres cubes par an. De plus, le champ produit 12 000 barils par jour de GPL, 10 000 barils par jour de condensat et 5 000 barils par jour de pétrole. L'augmentation de la production de pétrole et de gaz a contribué à la réalisation des objectifs de Sonatrach en termes d'augmentation des capacités de production pour approvisionner le marché national et répondre à la demande internationale.

Le plan de développement du gisement MLE, mené par l'association entre Sonatrach et First Calgary Petroleum Ltd (FCP) du Canada, acquis par ENI en 2008, a reçu l'approbation de l'Agence nationale de valorisation des ressources en hydrocarbures (Alnaft) en février 2007. Le coût total du projet s'élève à environ 1,3 milliard de dollars, comprenant la construction d'une usine de traitement et la mise en place d'un réseau de collecte et de canalisations d'évacuation. Les frais de développement sont répartis à hauteur de 75 % pour FCP et 25 % pour Sonatrach, engagés sur la période 2007-2009.

Toute la production gazière issue du champ MLE sera commercialisée par Sonatrach au nom de l'association entre les deux opérateurs du projet. L'acquisition de FCP par ENI, pour un

montant de 923 millions de dollars canadiens, a entraîné une augmentation de 190 millions de barils équivalent pétrole (BEP) des réserves d'ENI en Algérie.

Récemment, FCP et Sonatrach ont signé un accord de commercialisation à long terme pour la vente du gaz naturel provenant du Bloc 405b. Cet accord est structuré de manière similaire aux accords de fourniture standard à long terme de gaz naturel. Aucun accord commercial n'a encore été conclu pour la vente de la production de liquides, qui sera vendu au prix du marché mondial.

Le développement du champ MLE, comprenant le gaz sec et les liquides, est prévu de manière simultanée, avec une première production prévue pour fin 2009. Sonatrach et FCP ont travaillé en étroite collaboration pour concevoir, construire et exploiter la production. Les réserves estimées à développer et à récupérer s'élèvent à 1,3 milliard de pieds cubes équivalent gaz (environ 230 millions de barils équivalent pétrole), dont environ la moitié provient du gaz sec et l'autre moitié des liquides (pétrole, condensats et gaz de pétrole liquéfié), contribuant ainsi aux revenus totaux de la production MLE.

Le coût total brut estimé pour le développement de MLE, y compris les installations de collecte sur le terrain, s'élève à environ 1,3 milliard de dollars US, tenant compte de l'accord entre FCP et Sonatrach, y compris les coûts des canalisations de raccordement en tant que coûts de développement conjoints.

En conséquence, le FCP recevra une part accrue de la production en compensation de l'augmentation des coûts. Des pipelines de gaz sec et de pétrole seront construits par la coentreprise du Bloc 405b jusqu'à un point situé à environ 140 km à l'ouest du bloc, où ils seront raccordés au réseau national de gazoducs. De plus, un pipeline de pétrole sera construit pour se connecter à un pipeline existant dans le bassin de Berkine (PK0).

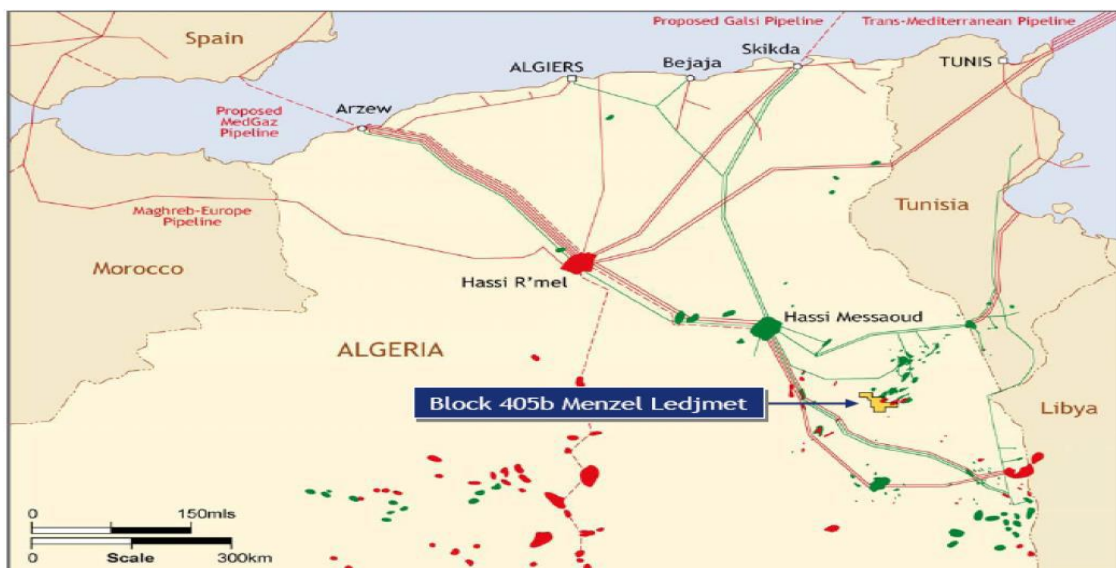
Les coûts de développement seront principalement engagés sur la période 2007-2009 et seront financés à hauteur de 75 % par FCP et 25 % par Sonatrach. Le contrat pour l'ingénierie de base, la conception (FEED) et les travaux supplémentaires a déjà été attribué. L'attribution du contrat de construction aura lieu en 2007. Le coût du projet sera affiné lors du processus de FEED [3].



**Figure-01** : Localisation du champ MLE/ SH-ENI.

### I.3 Situation géographique du champ MLE

Situé à environ 220 km au sud-est de Hassi Messaoud, dans le bassin de Berkine, le champ de gaz Menzel Ledjmet Est (MLE) est le fruit d'une collaboration commerciale entre Sonatrach et First Calgary Petroleum Ltd (FCP). Il est situé dans le bloc 405b Ledjmet et représente un projet de développement conjoint [4].



**Figure-02** : Carte géographique du champ MLE (bloc 405b).

Depuis sa mise en service en 2013, ce site a joué un rôle majeur dans la production nationale d'hydrocarbures, occupant une place significative.

## I.4 Structure géologique

Voici un récapitulatif des principales roches réservoirs du champ MLE, présenté dans le tableau ci-dessous [5] :

**Tableau-01** : Formations géologiques du réservoir.

<b>TAGI</b>	<b>Carnian</b>	<b>Triassique</b>
<b>F1A</b>	<b>Tournasian</b>	<b>Carbonifere</b>
<b>F1B</b>		
<b>F2A</b>		
<b>F2B</b>	<b>Strunian</b>	<b>Dévonien supérieur</b>
<b>F6-1</b>	<b>Siegenian</b>	<b>Dévonien inferieure</b>
<b>F6-2A UPPER</b>		
<b>F6-2A lower</b>		

### I.4.1 Triassique argileux gréseux inférieur (TAGI)

Le réservoir TAGI est caractérisé par une série de dépôts de nature fluviatile qui se trouve à la base du mésozoïque et se développe dans l'ensemble du bassin. Il est composé de deux séquences principales :

1. Le TAGI inférieur : également appelé série de remplissages, dont l'étendue et l'épaisseur sont déterminées par la paléographie post-hercynienne. Cette séquence représente les dépôts qui se sont qualifiés à la suite du processus de remplissage dans le bassin.
2. Le TAGI moyen à supérieur : où prédomine la formation d'un système de canaux en anastomose, de type sinueux. Cette séquence se caractérise par la présence de canaux entrelacés qui se sont développés dans la région. Les séquences terminales du TAGI supérieur, se manifestent principalement dans la partie centrale et nord-est du bassin de Berkine, marquent le début d'une période de transgression marine, marquées par l'apparition des calcaires triassiques à la base de cette séquence [5].

## **I.4.2 Réservoirs carbonifères**

Dans les formations géologiques allant du Strunien au Viséan, les réservoirs carbonifères se présentent sous la forme d'intervalles de sable-pierre qui se trouvent au sein de séquences d'argile et de grès associés à un environnement marin peu profond. Les dépôts carbonifères de base se limitent principalement à la partie centrale et aux bords terminés du bassin de Berkine. L'étude des faciès des grès, qui sont de type proximal, révèle l'influence prédominante de l'ancien relief d'Amguid-Messaoud et Dahar, qui a servi de principale source de matériau.

Les réservoirs Strunien-Carbonifère ont des épaisseurs moyennes comprises entre 20 et 50 mètres, et ils se distinguent par d'excellentes caractéristiques pétrophysiques. Ces grès sont producteurs de gaz à condensat et d'huile à Menzel Lejmet, et ils produisent principalement de l'huile à Rhourde El Khrouf (RKF).

## **I.4.3 Dévonien inférieur**

Les réservoirs du Dévonien inférieur dans le bassin de Berkine en Algérie se composent principalement de deux séquences clés, le Gedinnien et le Siegenien. La séquence Gedinnien est dominée par une série de grès massifs d'origine fluviale (post-calédonien), avec une épaisseur moyenne d'environ 200 mètres. Quant au Siegenien transgressif, il présente des réservoirs constitués de grès interconnectés, correspondant à la barre offshore et au type deltaïque.

La distribution des faciès dans le Dévonien inférieur est également activée par le relief majeur d'Amguid-Messaoud ainsi que par les apports détritiques provenant du sud-est et se déversant dans le bassin de Berkine. Ces grès présentent d'excellentes caractéristiques pétrophysiques et sont connues pour produire du condensat de gaz et de l'huile légère dans la zone MLSE et MLE du bassin.

Les réservoirs de grès du Dévonien inférieur, formés par ces séquences, sont désignés comme des formations pétrolières prometteuses, en raison de leur nature poreuse et perméable. Ils constituent des cibles attrayantes pour l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures dans la région du bassin de Berkine [5].



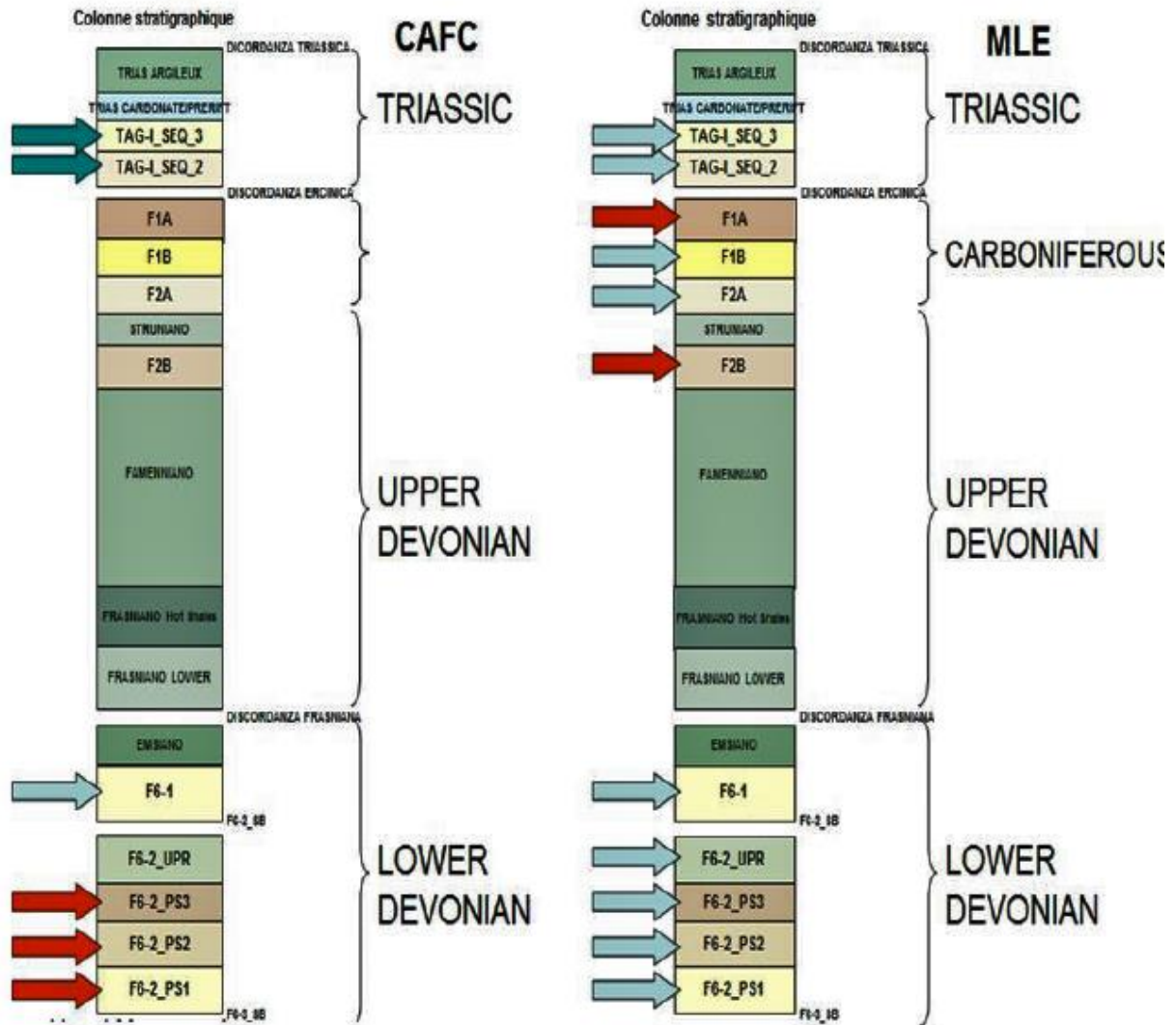
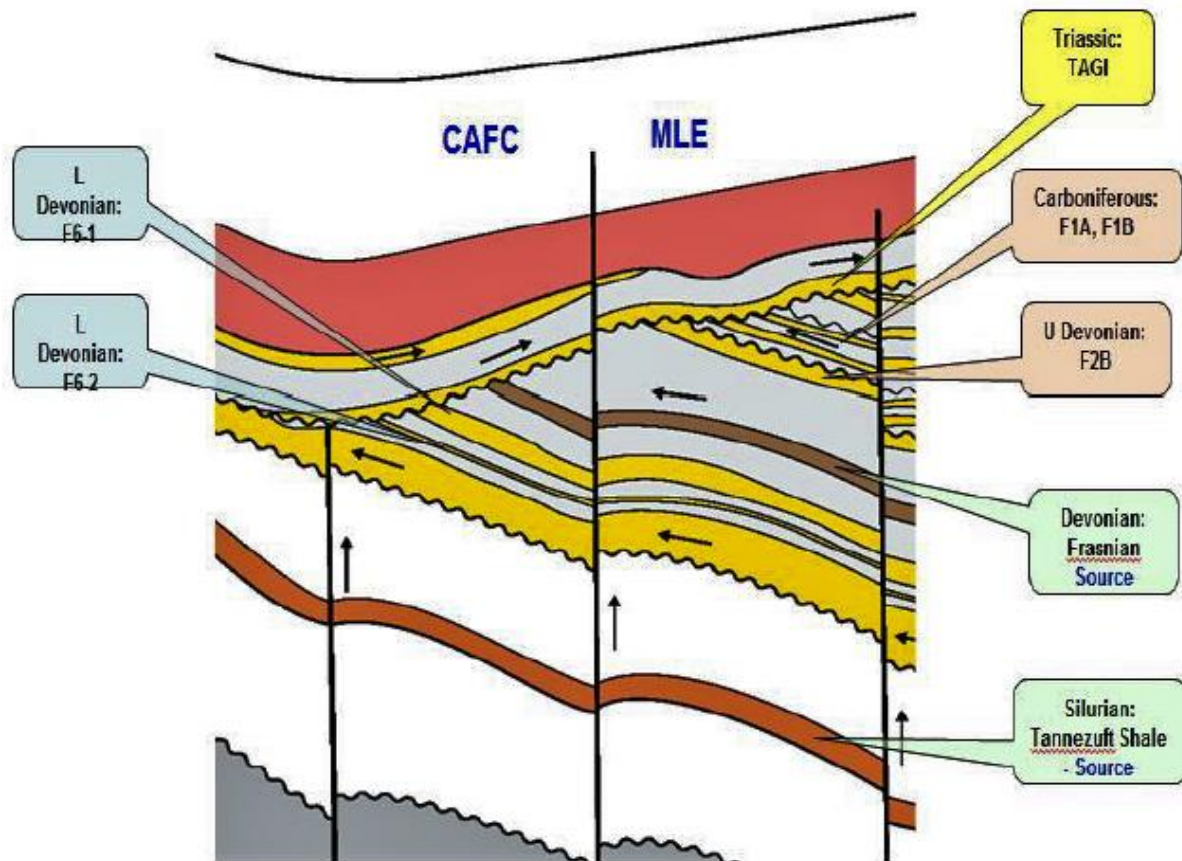


Figure-03 : Stratigraphie productive du bloc (405b).

Les informations géologiques essentielles concernant le champ MLE ont été recueillies à partir des journaux pétrophysiques, des rapports finaux et des analyses détaillées. De plus, des puits d'exploration ont été forés par FCP dans le bloc 405b, à l'ouest du champ MLE, fournissant ainsi des informations régionales supplémentaires. Ces données se sont révélées très précieuses pour caractériser les zones de réservoir des formations TAGI et F6 (les zones intermédiaires ayant été érodées).



**Figure-04 :** Caractéristiques des réservoirs majeurs du bloc 405b.

## Conclusion

Nous avons conclu dans ce chapitre, que le développement du champ MLE dans le bassin de Berkine représente une opportunité significative pour exploiter les ressources pétrolières et gazières de la région, tout en renforçant la collaboration entre les acteurs nationaux et internationaux. Ce projet contribuera à la croissance économique de l'Algérie et à la satisfaction de la demande énergétique tant au niveau national qu'international.

## Introduction

Les entraînements industriels à vitesse variable ont révolutionné l'automatisation et la production en permettant un ajustement précis de la vitesse et du couple des moteurs électriques. Grâce aux convertisseurs d'électronique de puissance appelés variateurs de vitesse, qui combinent plusieurs disciplines (informatique, automatique, électronique de puissance, électrotechnique et mécanique), ces systèmes permettent une souplesse et un meilleur rendement, optimisant ainsi les mécanismes industriels.

Les avantages de l'utilisation de la vitesse variable dans les entraînements électriques industriels sont nombreux. Elle permet une adaptation précise aux exigences des systèmes, permettant ainsi l'amélioration de la productivité, la minimisation des pertes d'énergie et optimisant les performances globales des systèmes.

Ce chapitre explore les atouts des entraînements électriques industriels à vitesse variable, en mettant en évidence les avantages qu'ils offrent aux industries. Il étudie les principes fondamentaux, les technologies utilisées et les domaines d'application usuels. En saisissant ces avantages et possibilités, les industries peuvent optimiser leurs processus industriels, améliorer leur efficacité énergétique et renforcer leur compétitivité sur les marchés.

### II.1 Place de la motorisation dans la consommation électrique

Dans les pays industrialisés, les moteurs électriques sont les principaux utilisateurs d'énergie électrique. En outre, il convient de prendre en compte la consommation des moteurs de traction ferroviaire, ainsi que celle des nombreux petits moteurs utilisés dans les secteurs tertiaires et résidentiels.

La supériorité de l'énergie électrique dans la production de force motrice découle de la capacité des réseaux électriques à transporter à la fois l'énergie et l'information par le même canal. Par conséquent, la motorisation d'origine électrique se caractérise par :

- Sa souplesse d'utilisation.
- Sa précision dans l'exécution des consignes (de couple, accélération, vitesse ou position).
- Ses performances énergétiques.
- Son taux de disponibilité élevé.
- Ses coûts de maintenance réduits et programmables.
- Sa capacité d'adaptation aux évolutions des processus industriels représente un avantage significatif lorsqu'une industrie cherche à réduire ses impacts environnementaux tels

que le bruit, la pollution de l'air et de l'eau.

Il est intéressant de souligner l'importance en termes de nombre et de puissance des moteurs électriques. À titre d'exemple, le tableau suivant présente la répartition de la production française des moteurs alternatifs triphasés. Il indique, pour chaque gamme de puissance  $P$ , le pourcentage de moteurs intégrés ainsi que le pourcentage de la puissance totale qu'ils sont capables de développer [6].

**Tableau-02** : la répartition de la production française des moteurs alternatifs triphasés.

Puissance	% de moteurs	% de puissance
$P < 0,75 \text{ kW}$	~ 40%	~ 3%
$0,75 < P < 7,5 \text{ kW}$	~ 55%	~ 35%
$7,5 < P < 75 \text{ kW}$	~ 4%	~ 20%
$75 < P < 750 \text{ kW}$	~ 0,5%	~ 18%
$750 \text{ kW} < P$	~ 0,05%	~ 24%

Un tableau similaire pourrait être dressé pour les moteurs à courant continu utilisés dans les secteurs tertiaires et domestiques, où la production annuelle atteint plusieurs millions d'unités.

Dans le seul secteur industriel, on estime que les moteurs de moins de 4 kW représentent 80 % du parc en termes de nombre, mais seulement 10 % en termes de consommation. Cependant, moins de 20 % des moteurs du secteur industriel en France sont équipés de variateurs électroniques de vitesse [6].

## II.2 Utilisation des systèmes d'entraînements a vitesse variable

Le contrôle à vitesse variable des processus joue un rôle primordial dans tous les secteurs industriels, notamment ceux où elle a apporté des améliorations significatives, notamment dans des domaines tels que la métallurgie, le papier, les plastiques, le caoutchouc procurant l'entraînement de laminoirs, de rouleaux, d'extrudeuses, de émetteurs, de machines-outils, de traction électrique pour la propulsion marine et de systèmes de réception de la turbine (pompes, ventilateurs, compresseurs centrifuges).

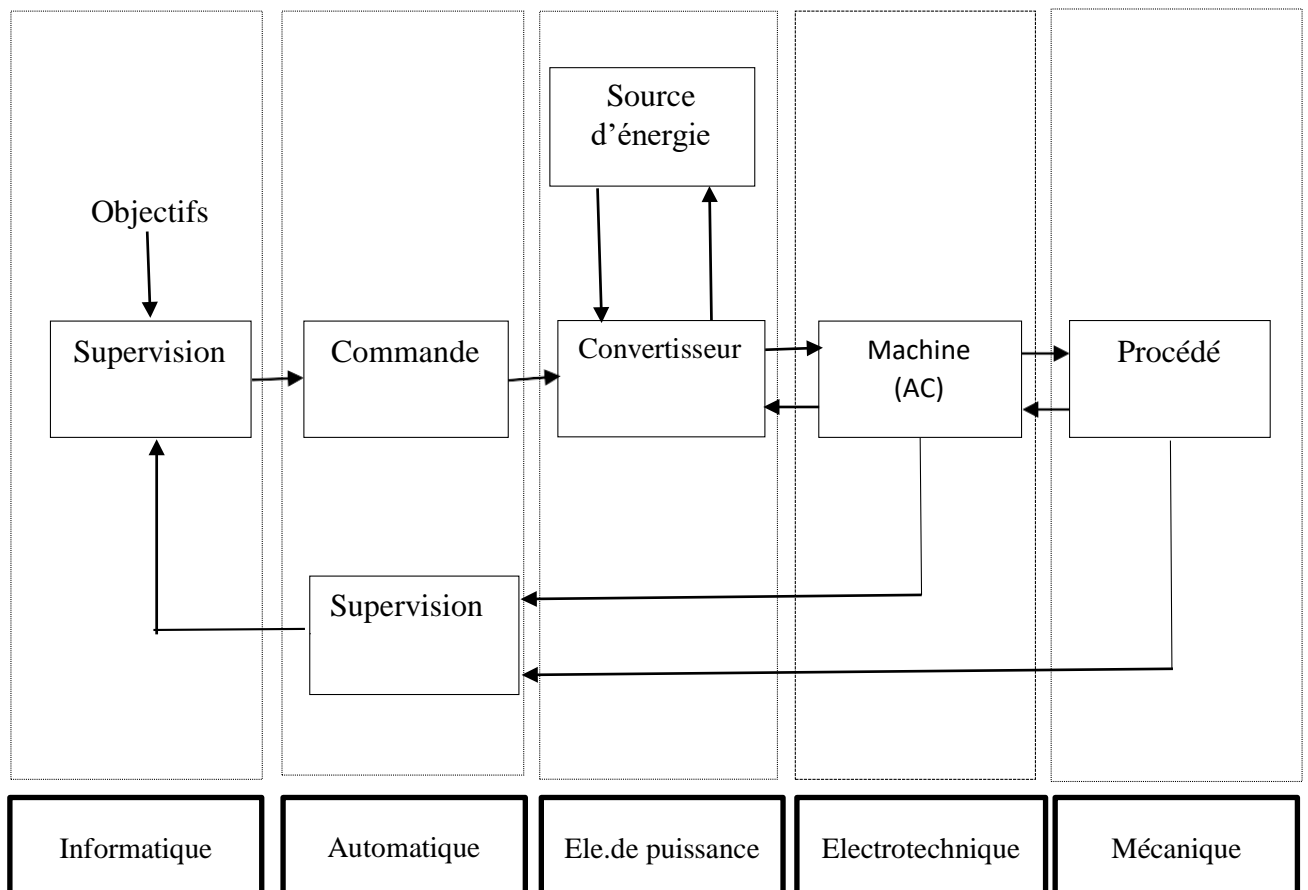
Sur la plupart de ces applications sont apparues des modifications de la vitesse et du couple de la machine tout au long du cycle de fonctionnement. Les techniques modernes de

variation de vitesse du moteur dans ces applications offrent une solution économique et capable d'adapter les paramètres d'entraînement aux objectifs des processus [7].

### II.3 Architecteur d'un système d'entraînement à vitesse variable

L'architecture des systèmes d'entraînement à vitesse variable fait appel à plusieurs disciplines principales, notamment [7] :

- **Informatique** : supervision et génération de consignations.
- **Automatique** : commande, observation et identification.
- **Électronique de puissance** : convertisseurs de puissance et sources d'énergie.
- **Électrotechnique** : machines à courant alternatif/continu (MAS, MS, MCC, etc.).
- **Mécanique** : transmissions, procédés de contrôle.



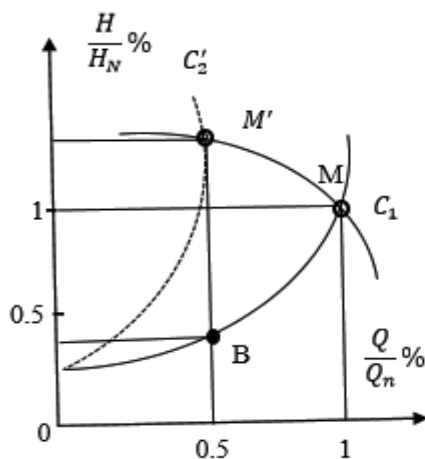
**Figure-05** : Architecteur d'un système d'entraînement a vitesse variable [7].

## II.4 Intérêt économique des entraînements électriques à vitesse variable

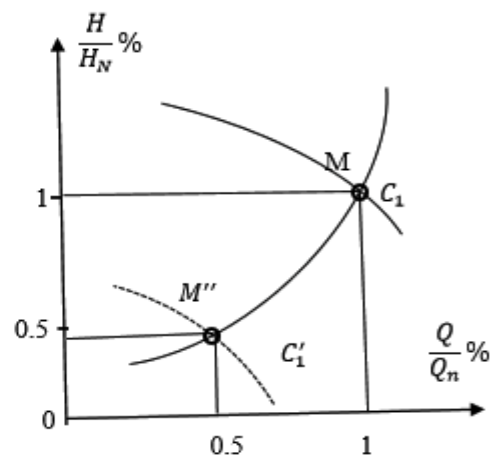
Dans un variateur électronique de vitesse, la variation de la vitesse n'est pas obtenue en agissant sur les pertes d'énergie dans le circuit d'alimentation électrique, le moteur ou la charge. Au lieu de cela, on modifie la façon dont l'énergie est fournie au moteur afin qu'il produise les caractéristiques mécaniques, telles que la vitesse, avec un minimum de pertes.

Pour illustrer les économies d'énergie réalisées, prenez l'exemple simple d'une pompe entraînée à vitesse constante dont le débit est ajusté à l'aide d'une vanne de régulation.

Le groupe motopompe est caractérisé par la courbe  $C_1$  (figure-02), qui représente la relation entre le débit  $Q$  et la hauteur manométrique totale  $H$  pour un fluide donné. Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de  $C_1$  avec la caractéristique  $C_2$  du système, qui représente la perte totale de charge en fonction du débit dans le circuit du fluide [6].



**Figure-06 :** Analyse des pertes de charge lors l'installation d'une pompe sans variateur.



**Figure-07 :** Analyse des pertes de charge lors l'installation d'une pompe avec variateur.

Lorsque la pompe est bien adaptée au système et au fluide, l'intersection M correspond au point nominal (débit nominal  $Q_n$ , hauteur nominale  $H_n$ ) lorsque la vanne est complètement ouverte.

Si l'on souhaite réduire le débit, on peut augmenter les pertes de charge en fermant la vanne, ce qui fait passer de la courbe  $C_2$  à la courbe  $C'_2$ . Le point de fonctionnement se déplace vers  $M'$ , et la fraction  $BM'/AM'$  de la puissance fournie par la pompe est dépensée en pertes par

vanne.

En supprimant la vanne de régulation et en utilisant un variateur de vitesse pour alimenter le moteur, il suffit de réduire la vitesse en agissant sur l'alimentation du moteur pour diminuer le débit.

Cela permet de passer de la caractéristique  $C'_1$  (figure-03) où toutes les pertes dues à la régulation par vanne sont éliminées.

Pour une installation de taille moyenne, le temps de retour de l'investissement pour passer de la solution de régulation par vanne à la solution de variateurs électroniques de vitesse, c'est-à-dire le rapport entre le coût d'investissement et les économies d'énergie électrique réalisées, est de quelques années. Après cela, il ne reste que les économies d'énergie et les autres avantages de la vitesse variable, qui ne sont pas négligeables.

## II.5 Domaines d'application des entraînements électriques à vitesse variable

Les entraînements électriques à vitesse variable sont largement utilisés dans tous les secteurs industriels nécessitant la force motrice. Ils peuvent être regroupés en deux grandes catégories :

- **Le premier groupe** comprend les applications où la vitesse variable est une condition intrinsèque du procédé dès le départ. Cela inclut
  - La traction électrique.
  - Les entraînements de laminoirs et leurs auxiliaires.
  - Les entraînements d'extrudeuses.
  - les entraînements de fours à ciment.

---

Et d'une manière générale les lignes de production dans les secteurs de la métallurgie, du textile, du caoutchouc, du papier,

- les machines-outils.
  - la robotique
  - la manutention...etc.
- **Le deuxième groupe** est principalement constitué des entraînements de turbomachines réceptrices telles que les pompes, les ventilateurs, les soufflantes et les compresseurs. Historiquement, ces applications ont souvent utilisé des solutions traditionnelles telles que le vannage ou le laminage, qui étaient peu efficaces en termes d'énergie.

Dans ce domaine, le réglage du débit se fait généralement en améliorant la résistance à l'écoulement du fluide (liquide ou gazeux).

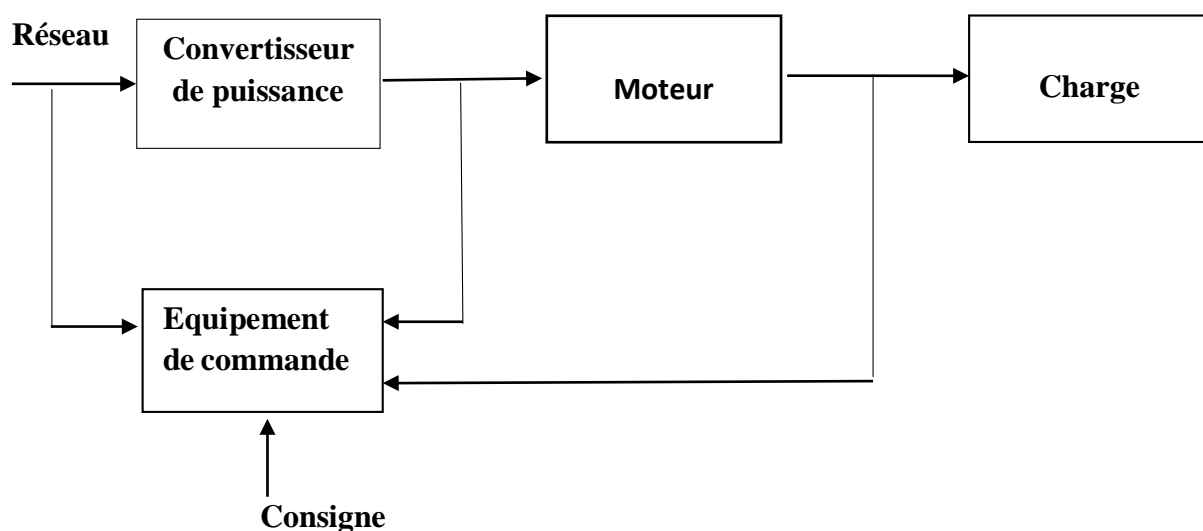
Les entraînements à vitesse variable jouent un rôle important dans ce secteur, représentant près des deux tiers de la consommation d'énergie électrique des moteurs industriels.

Grâce à leurs caractéristiques de couple et de vitesse, les turbomachines peuvent bénéficier de la variation de vitesse fournie par les moteurs asynchrones à vitesse variable. Cela ouvre de nouvelles possibilités pour améliorer l'efficacité énergétique et les performances des systèmes de turbomachines [6].

## II.6 Structure générale des entraînements électrique à vitesse variable

Un entraînement électrique à vitesse variable est un système qui permet de contrôler et d'ajuster la vitesse de rotation d'un moteur électrique de manière précise et flexible.

Il est composé d'un convertisseur électronique de puissance, d'un moteur électrique, d'une charge mécanique entraînée et d'un équipement de commande. Ce type d'entraînement offre la possibilité d'optimiser les performances et l'efficacité énergétique dans diverses applications industrielles en adaptant la vitesse de rotation du moteur aux besoins spécifiques du processus, veuillez-vous référer à la figure correspondante pour une illustration visuelle [6].



**Figure-08** : Structure générale des entraînements électrique à vitesse variable [6].



## 1. Le convertisseur statique

Le convertisseur statique alimenté par le réseau industriel, transforme l'énergie électrique pour atteindre les caractéristiques énergétiques (tension, courant, fréquence). Grâce à l'avancement des composants semi-conducteurs et à l'amélioration de leur fonctionnement, des convertisseurs offrant un rendement élevé et une faible latence permettent désormais d'obtenir des signaux qui étaient auparavant inaccessibles, du moins à la puissance souhaitée.

## 2. Le moteur

Traditionnellement, le moteur à courant continu a été utilisé pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique pour entraîner la charge. Cependant, son utilisation est limitée en raison de contraintes technologiques et environnementales liées à la présence du collecteur.

Avec l'évolution des semi-conducteurs, il est maintenant possible de réaliser des convertisseurs électroniques de fréquence qui peuvent être associés à des moteurs à courant alternatif synchrones ou asynchrones pour permettre des entraînements à vitesse variable.

## 3. L'équipement de commande

L'équipement de commande a généré les signaux de commande des semi-conducteurs du convertisseur en utilisant les instructions de pilotage du processus et les mesures de tension, courant, vitesse, couple, accélération, etc. fournis par les capteurs situés à l'entrée et à la sortie du convertisseur, ainsi que sur l'arbre du moteur.

Les progrès réalisés dans le domaine de la microinformatique ont joué un rôle majeur dans l'évolution des variations de vitesse en améliorant les performances et en utilisant le nombre de capteurs nécessaires [6].

## II.7 Autres avantages de la vitesse variable

Les avantages des entraînements électriques à vitesse variable reportés sur plusieurs aspects importants, offrant divers bénéfices selon l'application considérée. Voici les étapes clés et les informations essentielles à prendre en compte [6] :

### 1. Avantages pour le réseau d'alimentation

#### • Suppression des fortes surintensités au démarrage du moteur

Lorsqu'un moteur asynchrone est directement connecté au réseau, le courant de démarrage peut être de 4 à 6 fois le courant nominal (jusqu'à 10 fois pour les petites unités). En utilisant une variation électronique de vitesse, le démarrage s'effectue avec un courant d'environ

0,3 fois le courant nominal pour les charges dont le couple croît comme le carré de la vitesse (pompes, ventilateurs), et n'excède pas 1,5 fois le courant nominal pour les charges à couple constant.

- **Diminution de la puissance requise par le système d'alimentation**

Contrairement au démarrage direct des moteurs, qui nécessite une puissance plus élevée pour compenser les appels de courant et les chutes de tension, les entraînements à vitesse variable correspondent à cette exigence.

## **2. Avantages pour le moteur**

- **Allongement de la durée de vie du moteur**

Les démarrages directs sur le réseau entraînent des échauffements importants dans le rotor du moteur, provoquant des dilatations différentielles et des contraintes magnétiques élevées. Cela conduit à la dégradation du moteur, limitant ainsi la fréquence des démarrages. En revanche, les entraînements électriques à vitesse variable permettent des démarrages avec un courant limité et des temps d'accélération contrôlés, éliminant ainsi cette limitation et augmentant la durée de vie des composants.

- **Réduction des échauffements**

Les moteurs alimentés à puissance réduite produisent moins de chaleur, ce qui contribue également à prolonger leur durée de vie.

- **Isolation du moteur du réseau**

Le convertisseur utilisé dans les entraînements électriques isole le moteur du réseau, évitant ainsi les inconvénients tels que les déséquilibres de tension qui peuvent entraîner des échauffements et des couples parasites.

## **3. Avantages pour la charge entraînée**

- **Démarrages sans à-coups**

Les entraînements à vitesse variable permettent des démarrages en douceur, sans à-coups de couple, à couple constant ou à accélération constante. Cela supprime le bruit, les vibrations et les caractéristiques anormales subies par l'équipement lors du démarrage direct du moteur sur le réseau.

- **Contrôle du couple pendant les variations de tension**

Les variations de tension sur le réseau peuvent provoquer une chute de vitesse importante lorsqu'un moteur est directement connecté. En revanche, avec un équipement à vitesse variable, le couple du moteur est contrôlé pendant les creux de tension et lors du retour à la tension normale, évitant ainsi les risques de décrochage et de pertes considérables.

**• Souplesse, flexibilité et vitesse de régulation**

Les entraînements à vitesse variable permettent une souplesse, une flexibilité, une précision et une régulation rapide, ce qui se traduit par une augmentation de la productivité, une réduction des pertes de matières premières, des vitesses de réalisation augmente et une transition possible d'un processus discontinu à un processus continu. Ils se traduisent également par l'automatisation et l'adaptation aux évolutions des processus industriels.

**4. Autres avantages et inconvénients****• Réduction des coûts et du temps de dépannage**

Les variateurs électroniques de vitesse sont plus faciles à dépanner grâce à leur conception modulaire, ce qui permet de remplacer facilement une carte défectueuse [6].

**• Inconvénients mineurs des équipements avec variateur électronique de vitesse**

Les moteurs peuvent nécessiter une légère décalcification en raison de courants non parfaitement lissés pour les moteurs à courant continu, ou non parfaitement sinusoïdaux pour les moteurs à courant alternatif. De plus, les convertisseurs génèrent des courants harmoniques et peuvent perturber leur environnement par les ondes électromagnétiques rayonnées. Cependant, les normes précises régissent les niveaux maximums de perturbations tolérées.

Il convient de noter que d'autres avantages spécifiques à chaque domaine d'application peuvent également être pris en compte. Cependant, il est important de considérer les avantages sous mentionnés ainsi que la réduction des coûts et du temps de dépannage.

**Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons conclu que les entraînements électriques à vitesse variable offrent plusieurs avantages dans l'industrie. Ils permettent une utilisation précise et flexible de la force motrice, avec des performances énergétiques supérieures et une disponibilité élevée.

Ces entraînements jouent un rôle essentiel en régulant la vitesse et le couple des machines pour améliorer l'efficacité des processus industriels. Toutefois, leur complexité nécessite une analyse approfondie afin de garantir un fonctionnement optimal.

En plus des économies d'énergie qu'ils permettent, ces entraînements contribuent à éliminer les surintensités au démarrage, le bruit ainsi que la pollution de l'air et de l'eau. De plus, ils s'adaptent aux évolutions des processus industriels, ce qui les rend flexibles et précis.

## Introduction

Le variateur de vitesse industriel SINAMICS GH 150 de Siemens est un équipement de haute technologie utilisé dans les applications industrielles pour réguler la vitesse de rotation des moteurs électriques. Il peut contrôler des moteurs de puissance allant jusqu'à 450 kVA tout en garantissant une consommation d'énergie optimale et une productivité accrue. Grâce à ses fonctionnalités avancées, il est largement utilisé dans divers secteurs tels que l'automobile, l'agroalimentaire et l'industrie chimique. Le convertisseur de fréquence intégré permet d'adapter la vitesse de rotation du moteur aux besoins spécifiques de chaque application, ce qui permet une réduction des coûts énergétiques et une amélioration de l'efficacité de la production.

Le SINAMICS GH 150 est également équipé de fonctionnalités de sécurité avancées pour une utilisation sûre et fiable dans des environnements industriels exigeants. En outre, sa conception compacte et modulaire facilite son installation, sa configuration et sa maintenance, ce qui réduit les coûts de fonctionnement et améliore la fiabilité de l'équipement.

### III.1 Présentation du variateur de vitesse industriel SINAMICS GH 150 de Siemens

Le SINAMICS PERFECT HARMONY GH 150 est un variateur destiné aux applications dans la plage moyenne tension 4 - 13,8 kV, notamment pour les compresseurs de l'industrie pétrolière et gazière. Il offre une grande flexibilité avec ses quatre types de refroidissement et une disponibilité maximale grâce à sa conception à base de cellules. Il offre une possibilité de contourner toutes les cellules en moins de 1 ms et de maintenir la tension de sortie complète. Ce variateur produit une sortie de tension quasi sinusoïdale et est équipé de la dernière version des composants SIDRIVE IQ pour permettre l'accès aux données sur site distantes et fournir des données en direct du variateur [8].



**Figure-09** : Le variateur de vitesse SINAMICS GH 150 de Siemens [8].

## ▀ SIDRIVE IQ

SIDRIVE IQ est une solution holistique de l'IIoT pour les systèmes d'entraînement de Siemens, qui est un composant intégral des variateurs SINAMICS. Les variateurs SINAMICS sont équipés du module de connectivité SINAMICS CONNECT 500 pour une intégration facile avec la solution numérique basée sur le Cloud de SIDRIVE IQ.

Les données d'état, telles que les informations sur les variateurs, les journaux historiques, les paramètres et les journaux de défauts, sont nécessaires, émises et envoyées pour analyser sur le Cloud de SIDRIVE IQ.

Les utilisateurs peuvent également analyser ces données avec la plateforme numérique SIDRIVE IQ Suite pour visualiser les différentes conditions du système d'entraînement, suivre les tendances, détecter les erreurs et produire des rapports.

### ● L'objectif de SIDRIVE IQ

Est d'améliorer la productivité, de réduire les coûts d'entretien et de maintenance, d'augmenter la disponibilité et de réduire les temps d'arrêt non programmés [9].

## ▀ Quatre types de refroidisseur

Flexibilité pour répondre à toutes les exigences de refroidissement du client, indépendamment des conditions du site [8].

- Refroidissement direct par eau.
- Refroidissement direct par air.
- Refroidissement indirect par air (échangeur de chaleur air/air).
- Refroidissement indirect par eau (échangeur de chaleur air/eau).

## III.2 Principe de la variation de vitesse

Le variateur de vitesse SINAMICS GH 150 de Siemens est un équipement qui permet de contrôler la vitesse de rotation d'un moteur électrique. Il utilise un principe de fonctionnement basé sur la modulation de la fréquence et de la tension d'alimentation du moteur.

Le SINAMICS GH 150 utilise des techniques de contrôle avancées pour offrir une grande précision de régulation de la vitesse et une grande stabilité de fonctionnement. Il dispose également de fonctionnalités avancées telles que la protection contre les surcharges, les court-

circuites et les surtensions, ce qui garantit une sécurité élevée et une durée de vie prolongée pour l'équipement [10].

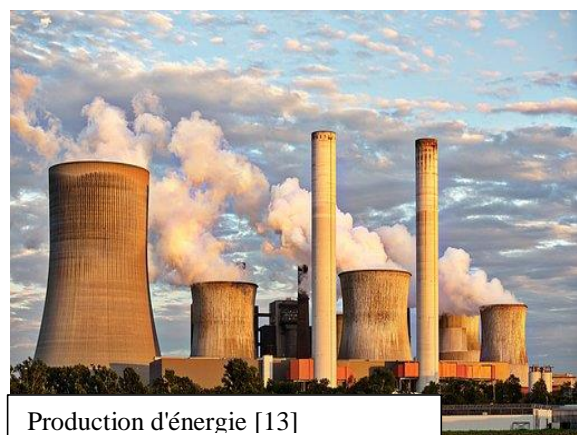
### III.3 Domaine d'application

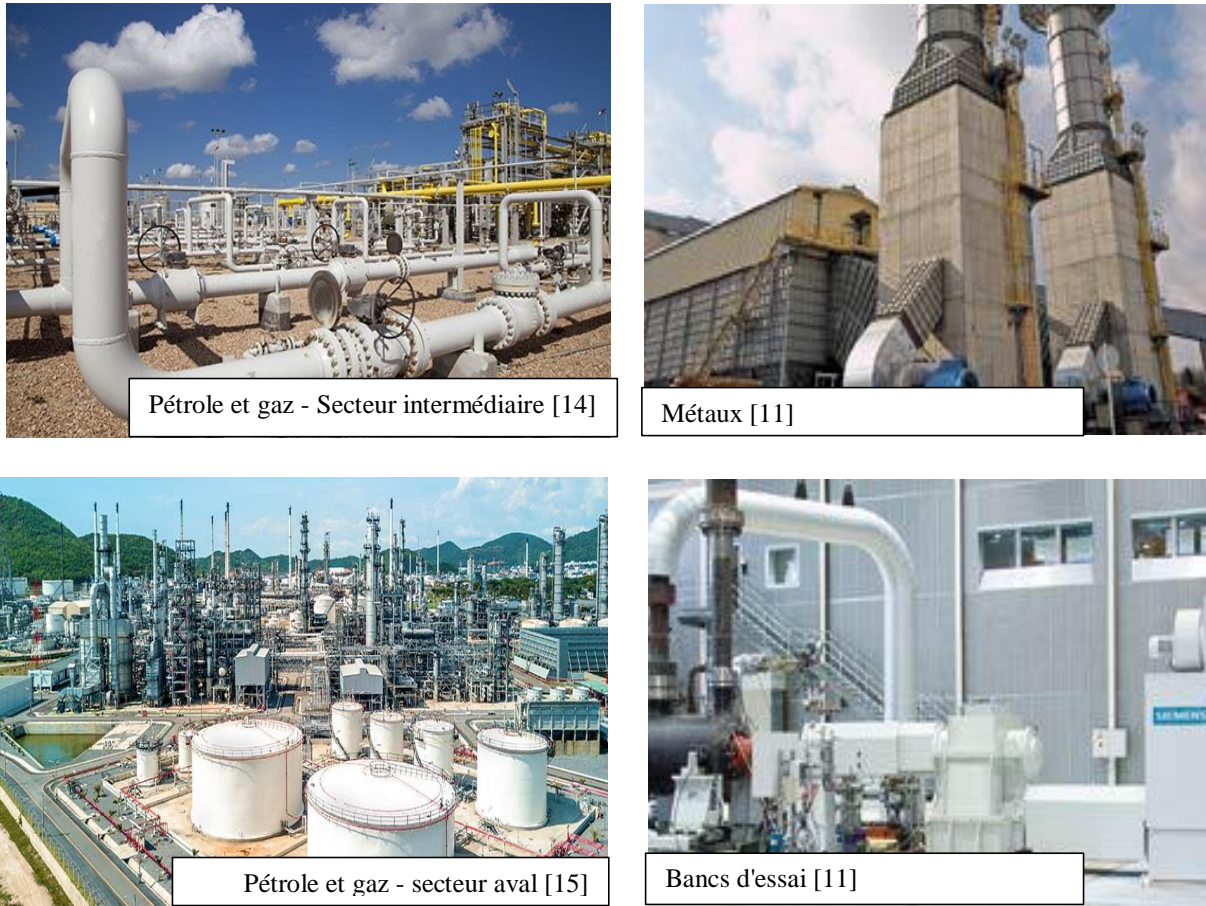
Le SINAMICS PERFECT HARMONY GH150 est spécialement conçu pour les pompes, les ventilateurs et les compresseurs utilisés avec un transformateur séparé. Il élargit également les applications existantes du variateur SINAMICS PERFECT HARMONY en incluant la prise en charge des applications marines et offshore.

Les variateurs SINAMICS PERFECT HARMONY GH150 sont largement utilisés dans des secteurs tels que :

- Le pétrole et le gaz.
- La production d'énergie.
- L'eau et les eaux usées.
- Les métaux.
- L'exploitation minière.
- Marine.
- Et les applications offshore.

Ces variateurs sont utilisés dans le monde entier pour des applications critiques qui nécessitent une haute fiabilité et une efficacité énergétique optimale [11].





**Figures-10 :** Quelques secteurs d'utilisation des variateurs de vitesse SINAMICS GH 150.

### III.4 Polyvalences des modules d'un SINAMICS GH 150

#### ❖ Flexibilité de l'entraînement

Les variateurs SINAMICS PERFECT HARMONY GH150 sont spécialement conçus pour offrir une plus grande polyvalence et une intégration facile. Leur conception modulaire permet d'utiliser un transformateur séparé ainsi qu'une armoire de commande séparée. Cela permet d'ajuster l'encombrement du variateur et d'optimiser l'agencement de l'installation. L'armoire de commande peut même être installée dans un local opérateur basse tension pour faciliter l'utilisation du variateur.

#### ❖ Polyvalence côté ligne

Le SINAMICS PERFECT HARMONY GH 150 relève le niveau de flexibilité des transformateurs dans les variateurs moyenne tension à base de cellules : En permettant différentes spécifications de transformateur - telles que le refroidissement, la taille, le nombre

d'impulsions et la tension primaire - il peut s'adapter aux conditions du site qui nécessitent un placement à distance du transformateur, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'usine.

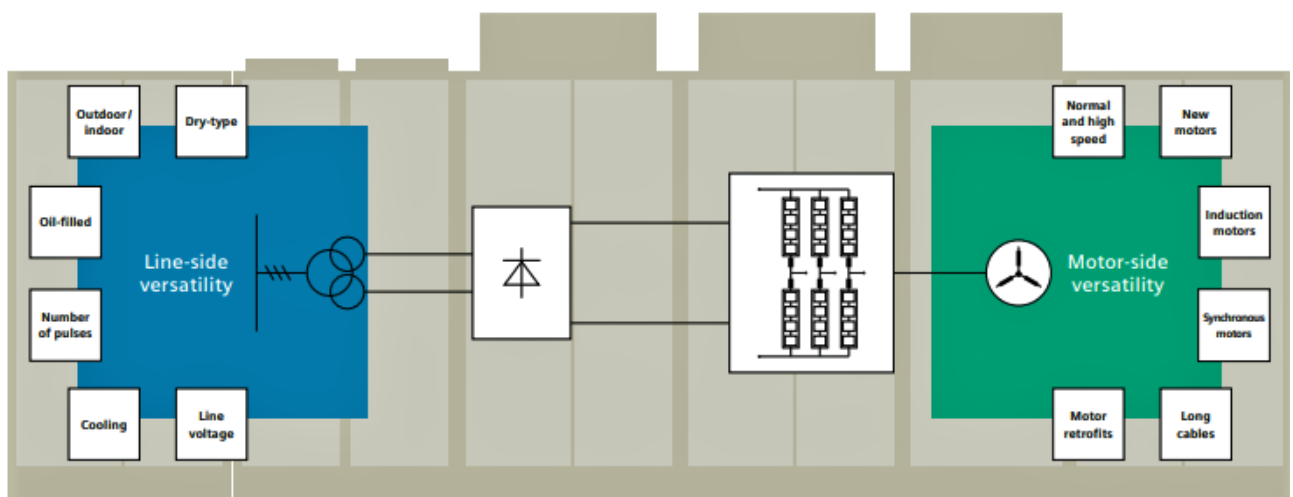
Le SINAMICS PERFECT HARMONY GH150 peut également contribuer à minimiser les coûts d'investissement initiaux pour la climatisation de la salle électrique ainsi que les coûts d'exploitation continus. La possibilité de choisir un transformateur standard d'origine locale peut même contribuer à réduire le coût total de possession.

#### ❖ Polyvalence côté moteur

Les variateurs SINAMICS PERFECT HARMONY GH150 sont capables de fonctionner avec presque tous les moteurs asynchrones ou synchrones disponibles, ce qui les rend parfaits pour les projets de modernisation et les applications à grande vitesse. Ils offrent également une grande flexibilité dans l'utilisation d'un moteur avec de longs câbles, même au-delà de plusieurs kilomètres.

#### ❖ Configuration optimale pour les applications de moteurs à grande vitesse

Ce variateur est souvent utilisé avec des compresseurs à grande vitesse ou des compresseurs intégrés qui ont besoin d'une fréquence de sortie élevée. Plus la vitesse du moteur est élevée, plus la fréquence de sortie du variateur est importante. Le GH150, avec sa fréquence de commutation inhérente et très efficace, nécessite moins ou pas de déclassement du courant, ce qui permet de réduire le surdimensionnement du variateur et d'obtenir un meilleur rendement. Les pertes supplémentaires dans le moteur doivent souvent être minimisées en raison de la conception compacte du moteur [16].



**Figure-11 :** Les polyvalences des modules d'un GH 150 [16].

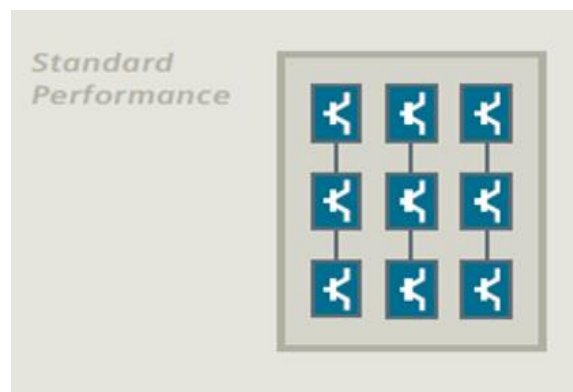


## III.5 Performance standard ou protection de la performance totale d'un VSDS SINAMICS GH 150

Chaque application ou processus nécessite un niveau spécifique de disponibilité pour garantir une productivité et une rentabilité optimales. Le SINAMICS PERFECT HARMONY GH150 propose deux niveaux de performance différents pour s'adapter aux exigences de votre application. Vous pouvez choisir le niveau qui répond le mieux aux besoins de votre application afin de maximiser sa productivité et sa rentabilité [11]:

### III.5.1 Performance standard

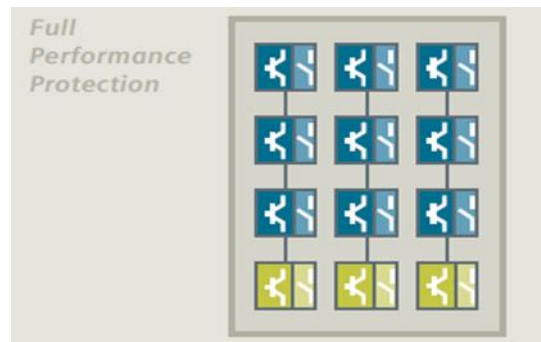
Notre classe de performance de base respecte la norme industrielle généralement utilisée dans la plupart des variateurs moyenne tension actuels, mais elle intègre également notre module moteur M2C. Grâce à sa conception basée sur des cellules, le variateur a généré une forme d'onde presque sinusoïdale, similaire à celle de variateur SINAMICS PERFECT HARMONY GH180.



**Figure-12** : Performance standard d'IGBT [11].

### III.5.2 Protection de la performance totale

La classe de performance supérieure garantit un fonctionnement ininterrompu à long terme pour votre application critique. Avec la conception Protection de la performance totale. Vous bénéficiez de fonctionnalités uniques telles que la fonction de contournement de cellule la plus rapide du marché et la redondance des cellules. En cas de défaillances d'une cellule, votre application maintiendra son fonctionnement ininterrompu sans aucune perte de performance ou d'efficacité.



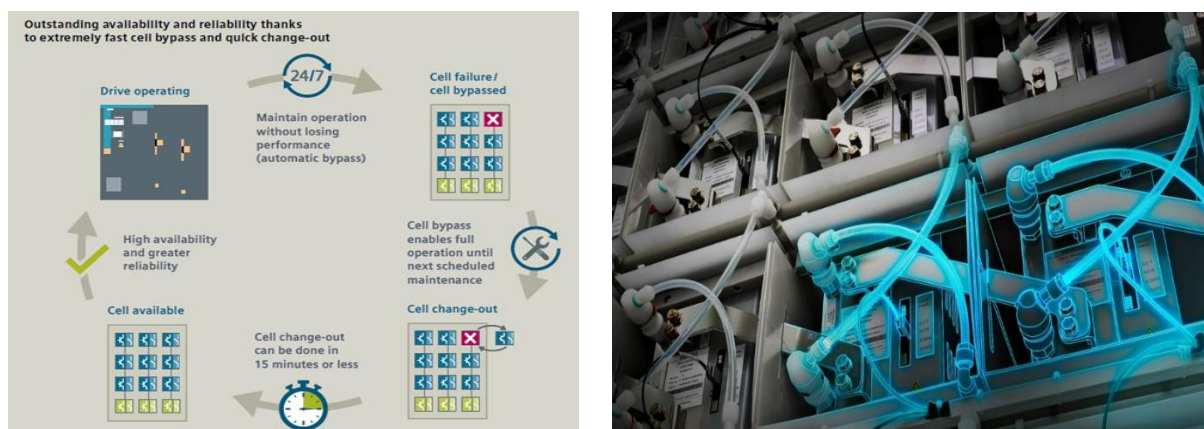
**Figure-13** : Protection de la performance totale [11].

#### ✚ Scalabilité est essentielle pour la redondance

Les cellules supplémentaires peuvent être ajoutées au variateur pour renforcer la conception de protection totale des performances. Cette redondance améliore encore la fiabilité globale de l'application et sa disponibilité en fournissant suffisamment de puissance de sortie même en cas de défaillances d'une cellule. Dans un variateur SINAMICS PERFECT HARMONY GH 150 doté de cellules redondantes, la tension de sortie reste suffisante pour maintenir le processus en marche sans interruption, et la qualité de la tension et la forme d'onde reste conservée.

#### ✚ Bass cellulaire à grande vitesse

Les variateurs SINAMICS PERFECT HARMONY GH 150 sont équipés d'une fonction de dérivation (bypass) cellulaire à grande vitesse qui permet de contourner les cellules défaillantes en moins d'une milliseconde. Cette fonctionnalité garantit que la tension de sortie reste ininterrompue et maintient la performance de votre processus sans perturbation ni baisse de performance [16].

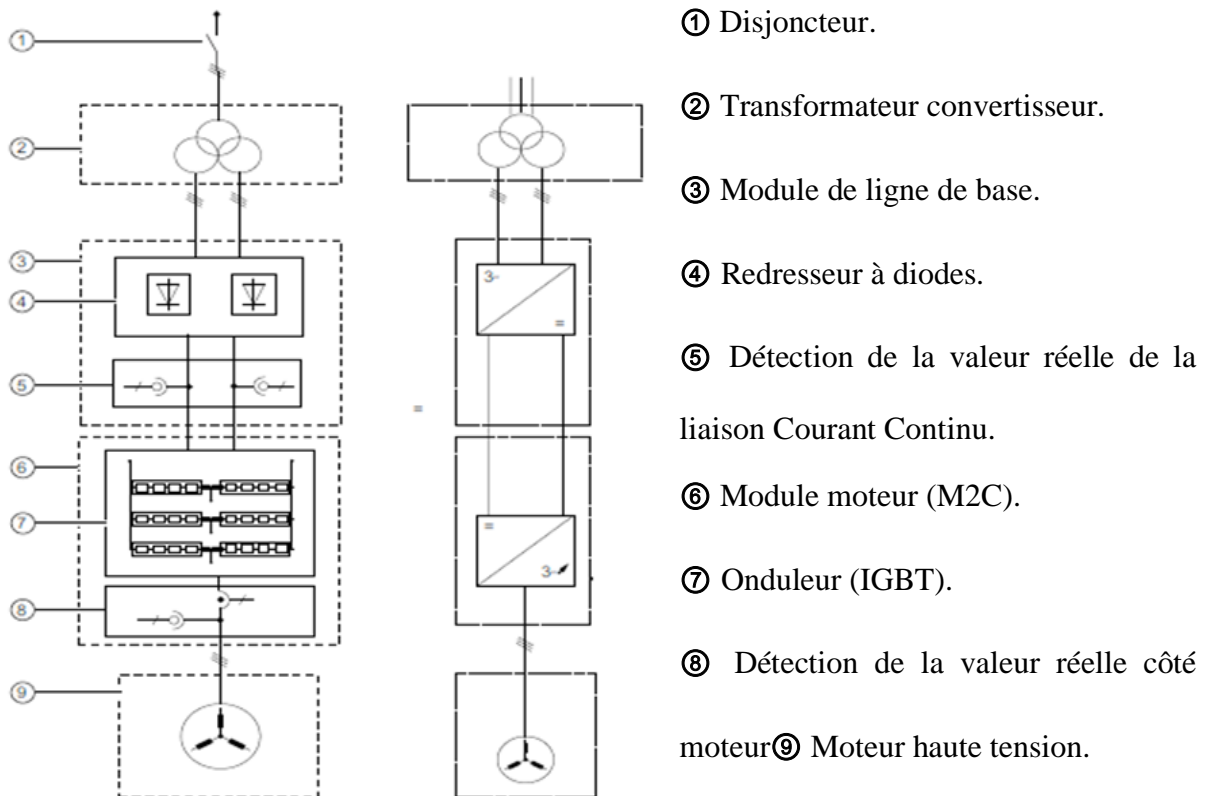


**Figure-14** : Optimisation de la disponibilité et de la fiabilité grâce à une circulation cellulaire rapide et efficace [11].

### III.6 Conception du convertisseur SINAMICS GH 150 de Siemens

Le variateur dans la configuration de base est équipé des composants suivants [10] :

- Module de ligne de base (12, 18, 24 ou 36 impulsions).
- Un module moteur déployant la technologie M2C.
- Un module de freinage en technologie M2C est disponible en option.



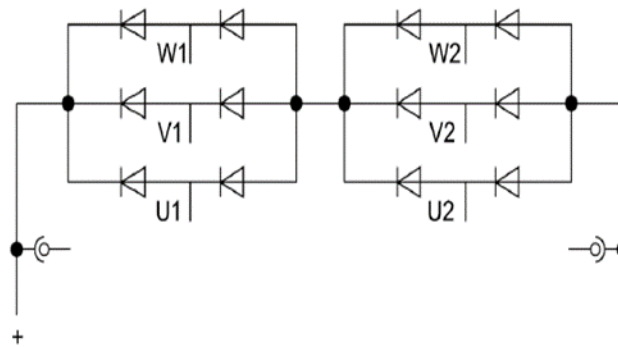
**Figure-15** : Exemple sur la conception d'un convertisseur [10].

### III.7 Module de contrôle (ou module de commande) pour un SINAMICS GH 150

Le module de commande est un composant essentiel du variateur qui permet de réguler la vitesse et le couple du moteur en utilisant une commande en boucle ouverte ou en boucle fermée. En plus de contrôler le fonctionnement du variateur, le module de commande offre des capacités avancées de diagnostic pour identifier les problèmes potentiels et les défaillances. En somme, le module de commande est un outil puissant pour optimiser les performances du variateur et assurer un fonctionnement fiable et efficace du moteur [10].

### III.7.1 Module de ligne de base

Les modules de ligne de base sont responsables de la génération de tension continue et de la distribution d'énergie aux autres modules connectés à la ligne. Pour assurer un fonctionnement fiable, il est crucial que la tension de la ligne reste stable et dans les limites de tolérance spécifiées. Les modules de ligne de base sont généralement construits à partir de redresseurs à six impulsions connectés en série et sont souvent divisés en plusieurs armoires pour limiter les courants de court-circuit. Des combinaisons RC sont également utilisées pour protéger les diodes et garantir un fonctionnement sûr et efficace des modules de ligne de base. Cependant, il est probable que ces combinaisons RC soient intégrées à l'intérieur des modules eux-mêmes, peuvent-être à proximité des diodes qu'elles sont autorisées.



**Figure-16** : Diagramme de bloc: Module de ligne de base avec diodes [10].

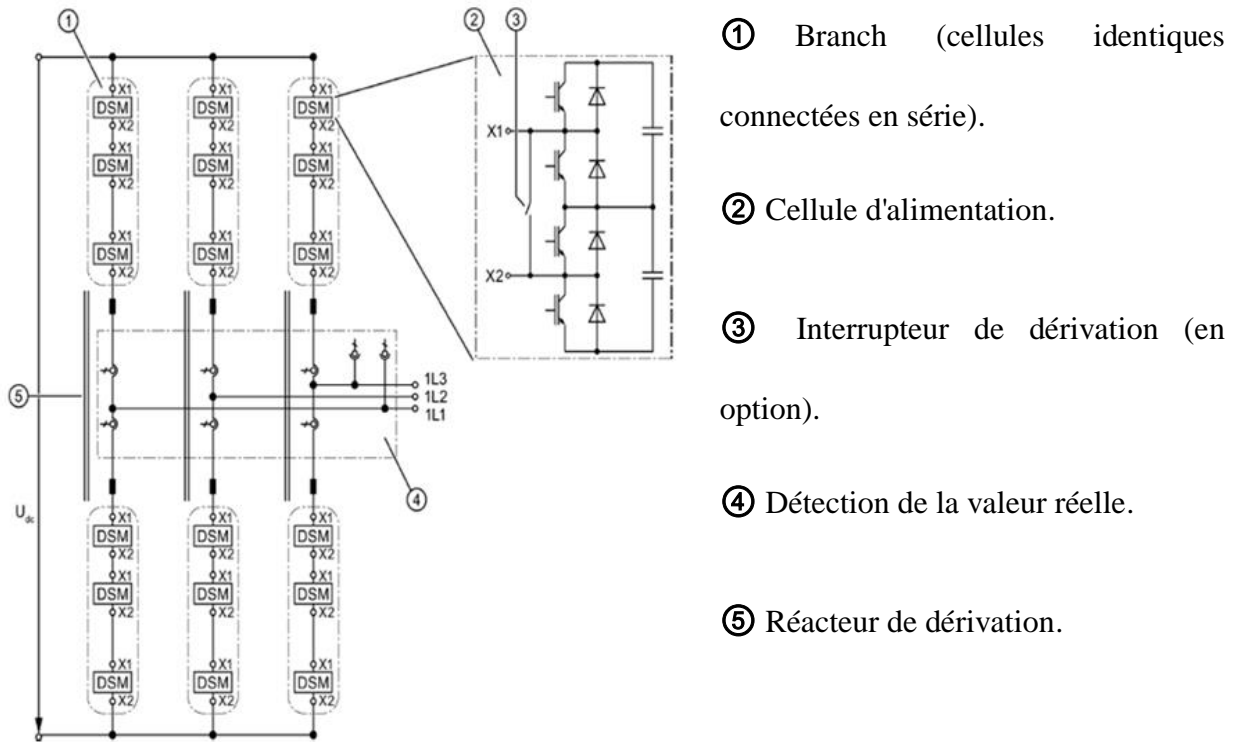
### III.7.2 Module moteur employant la technologie M2C

Les modules moteurs, conçus en technologie M2C avec des semi-conducteurs IGBT, fournissent la puissance électrique nécessaire au moteur connecté via une liaison CC. Ils produisent des tensions presque sinusoïdales qui permettent au moteur de générer le couple et la vitesse requis pour accomplir sa tâche.

Le Module Moteur M2C est composé d'un sous-module et d'une armoire de réactance de dérivation, où les cellules de puissance logées avec les semi-conducteurs IGBT sont stockées. L'armoire de réactance de dérivation comprend des réacteurs de dérivation et de l'équipement de mesure associé.

L'unité d'onduleur comprend trois phases, chacune avec deux branches M2C. Les six branches de l'onduleur M2C se composent chacune des cellules de puissance identiques connectées en série. Pour la phase de l'entraînement de la liaison CC à source de tension, la

technologie M2C est utilisée avec des cellules de puissance connectées en série pour deux branches [10].



**Figure-17** :Schéma fonctionnel : Module moteur utilisant la technologie M2C [10].

### III.7.2.1 Cellule de puissance

Une cellule de puissance comprend les unités mécaniques suivantes qui peuvent être séparées :

- Module IGBT.
- Batterie de condensateurs.



① Module IGBT.

② Batterie de condensateurs.

**Figure-18** : Cellule de puissance [10].

## A. Module IGBT

Chaque module IGBT est constitué :

- D'une plaque de refroidissement.
- De deux IGBT.
- D'une électronique de contrôle.
- De résistances de décharge.

Une réactance de dérivation est présente dans chaque phase entre les connexions de dérivation et la sortie de phase. Les IGBT peuvent limiter et déconnecter un courant de court-circuit, ce qui protège le convertisseur.

Pour la topologie M2C, une barre omnibus à faible inductance n'est nécessaire qu'à l'intérieur de la cellule d'alimentation. L'électronique de commande est alimentée par une batterie de condensateurs et est montée directement au-dessus des modules IGBT, assurant une conception compacte avec une forte immunité au bruit.

Les semi-conducteurs de puissance sont connectés via l'électronique de commande, et la commande d'enclenchement est transmise de l'adaptateur de pile de puissance (PSA) à l'électronique de commande via un câble en fibre optique [10].

## B. Batterie de condensateurs

Dans l'onduleur M2C, la batterie de condensateurs agit comme des condensateurs de liaison CC répartis, éliminant ainsi le besoin d'un condensateur de stockage d'énergie central. Elle lisse et stocke l'énergie de la liaison CC et protège les semi-conducteurs de puissance contre les surtensions de commutation. La batterie de condensateurs est autonome et ne nécessite pas d'entretien.

Lorsque le disjoncteur est déconnecté, le variateur est mis hors tension et la batterie de condensateurs est déchargée par l'intermédiaire de l'électronique de déclenchement et des résistances de décharge [10].

### III.7.3. Module de freinage

Le module de freinage utilise une résistance de freinage externe pour éviter une surtension dans la liaison CC. La résistance de freinage n'est pas fournie avec le module de freinage et doit être montée séparément.

Le module de freinage basé sur la technologie M2C est composé de cellules de puissance identiques connectées en série, et le nombre de cellules dans le module de freinage est égal au nombre de cellules dans une branche du module moteur. Par exemple, un module moteur de 36 cellules aura un module de freinage de 6 cellules.

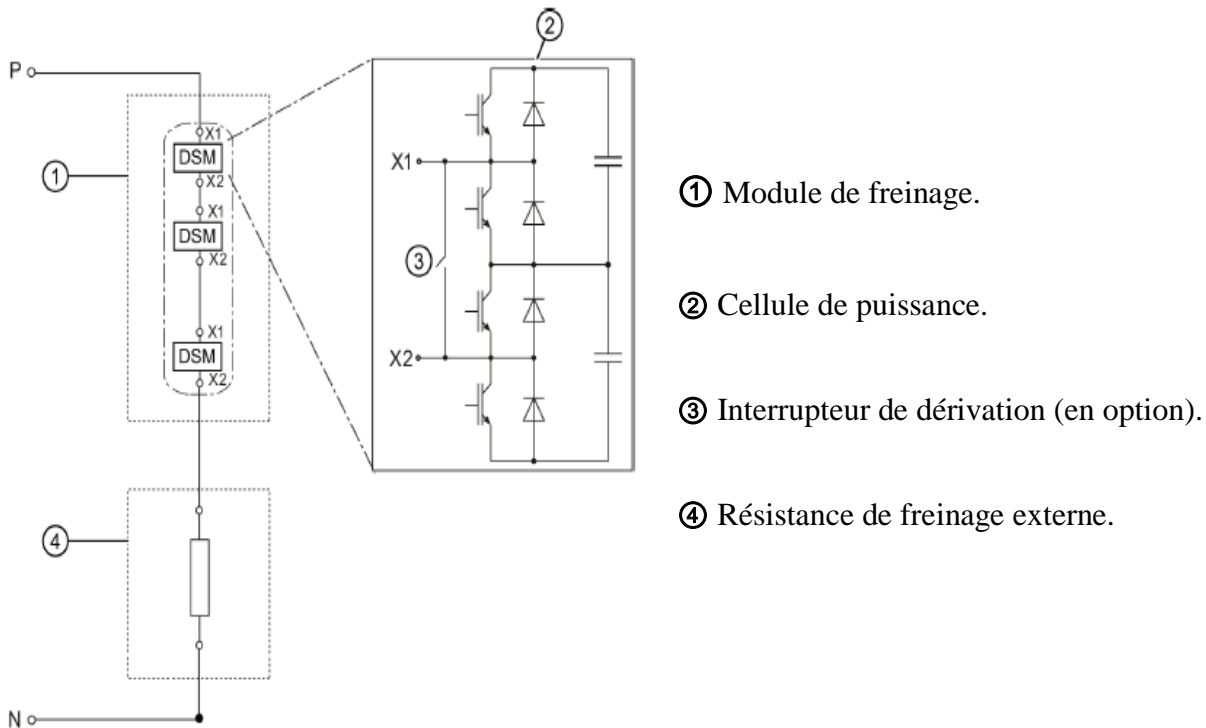


Figure-19 : Module de freinage dans la technologie M2C [10].

### III.8 Autres composants

#### ○ Préchargement

Les condensateurs de la cellule de puissance nécessitent une précharge pour éviter les surintensités et les surtensions temporaires dans la liaison CC lors de la connexion de l'alimentation en ligne. La précharge de la liaison CC est effectuée via l'alimentation auxiliaire en utilisant un circuit de précharge comprenant :

- Transformateur de précharge.
- Pont de diodes.
- Résistances de précharge.
- Contacteur pour la mise en marche et l'arrêt.
- Disjoncteur.

Les informations détaillées sur l'interconnexion des composants de précharge sont fournies dans le manuel du circuit, tandis que les emplacements de montage des composants sont fournis dans le schéma d'implantation [10].

### ○ **Adaptateur de pile de puissance (PSA)**

L'Adaptateur de Pile de Puissance (PSA) assure l'interface physique entre l'Unité de Puissance et le Contrôleur en Boucle Ouverte/Fermée, permettant l'isolation galvanique (couplage électrique via la lumière) entre eux. L'interface de communication série à haute vitesse DRIVE-CLIQ facilite l'échange de données entre l'Adaptateur de Pile de Puissance et l'Unité de Contrôle (ou commande).

### ○ **Unité de commande CU320-2 PN**

La CU320-2 PN est l'unité de contrôle principale du système de contrôle à boucle ouverte et fermée du variateur. Elle est équipée d'un bornier client interne pour les connexions câblées.

### ○ **Alimentation électrique auxiliaire**

#### **a. Tension auxiliaire 1 CA**

Une alimentation auxiliaire 1 CA est requise pour les composants suivants fournis par le client :

- Éclairage de l'armoire.
- Prises de courant de service.
- Chauffage anti-condensation.
- Contrôle en boucle ouverte et en boucle fermée.

Le courant nominal de l'alimentation auxiliaire est spécifié dans les caractéristiques techniques du variateur. Le schéma électrique du variateur indique l'affectation des bornes.

#### **b. Alimentation en tension auxiliaire 3 CA**

Les composants suivants nécessitent une alimentation en tension auxiliaire de 3 CA :

- Ventilateur
- Contrôle en boucle ouverte et en boucle fermée
- Équipement de protection et de surveillance.
- Précharge de la liaison CC.



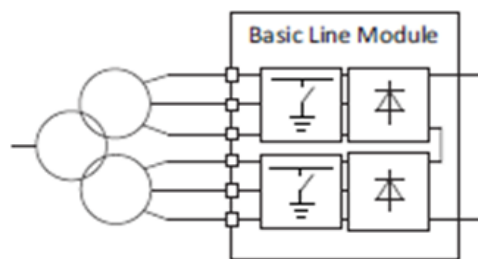
- Pompes de l'unité de refroidissement.

Le courant nominal de l'alimentation auxiliaire est spécifié dans les caractéristiques techniques. L'affectation des bornes est indiquée dans le schéma de câblage [10].

### ○ Interrupteur de mise à la terre côté ligne

Le commutateur de mise à la terre actionné par le moteur court-circuite et met à la terre le côté ligne. Sa commande est effectuée par un interrupteur à clé installé dans la porte de la section de contrôle en boucle fermée.

La commande de ce commutateur est verrouillée avec l'état de fonctionnement et la commande de mise en marche du convertisseur.



**Figure-20** : Exemple de schéma : Interrupteur de mise à la terre côté ligne [10].

## III.9 Unité de refroidissement

### • Principe de fonctionnement

L'unité de refroidissement est utilisée pour dissiper la perte de chaleur du variateur. Le circuit d'eau interne use de l'eau déminéralisée pour absorber la chaleur de l'unité d'entraînement et la pompe vers l'échangeur de chaleur via une pompe de circulation sans entretien. L'eau chaude déionisée est refroidie par le circuit d'eau brute externe et renvoyée vers l'entraînement. Deux tuyaux sont installés dans l'entraînement pour que l'eau froide de l'unité de refroidissement circule dans l'un des tuyaux, soit chauffée par les pertes de chaleur, et retournée à l'unité de refroidissement par l'autre tuyau [10].

## III.10 Cinq règles de sécurité

Avant d'effectuer des travaux, il est essentiel de respecter les instructions de sécurité et de suivre les cinq règles de sécurité conformément à la norme EN 50110-1 "Travailler en l'absence de tension" pour garantir votre sécurité personnelle et éviter tout dommage matériel.

Les cinq règles de sécurité doivent être appliquées dans l'ordre indiqué avant de commencer les travaux [10]:

1. Déconnecter le système ainsi que les circuits auxiliaires, tels que le chauffage anti-condensation.
2. Vérifier qu'il n'y a pas de reconnexion possible.
3. Vérifier l'absence de tension de fonctionnement.
4. Mettre à la terre et court-circuiter.
5. Assurer la protection contre les pièces sous tension adjacentes.

Pour remettre le système sous tension, les mesures doivent être appliquées dans l'ordre inverse.

### **III.11 Avantages d'un variateur de vitesse SINAMICS GH 150**

L'entraînement SINAMICS PERFECT HARMONY GH150 offre de nombreux avantages pour une solution de système d'entraînement intégré respectueux des plantes, des systèmes et des moteurs. Les étapes pour configurer l'entraînement comprennent :

- 1) Configuration facile pour des applications à grande vitesse.
- 2) Adaptation à des tensions d'entrée élevées.
- 3) Réduction des courants d'appel élevés lors de la mise sous tension (transformateur).
- 4) Fonctionnement avec différentes longueurs de câble.
- 5) Combinaison avec n'importe quel type de moteur.
- 6) Adaptation à n'importe quel niveau de performance.
- 7) Flexibilité du transformateur.

Le variateur SINAMICS PERFECT HARMONY GH150 offre un système de grande flexibilité et un potentiel élevé pour une solution optimale dans votre application. Les éléments clés du variateur permettent de maximiser l'agencement de votre installation, le concept de votre système d'entraînement, la disponibilité et la fiabilité globale de votre application de manière hautement personnalisable [16].

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pris le temps de vous présenter en détail le variateur de vitesse industriel SINAMICS GH 150 de Siemens. Notre approche s'est fondée sur une analyse synthétique des documents techniques disponibles sur site durant notre étape, ainsi que sur les informations précieuses communiquées par notre encadreur sur place. Ces éléments nous ont permis d'acquérir une compréhension approfondie des fondamentaux de ce variateur, préparant ainsi le terrain pour l'étude fonctionnelle détaillée qui sera présentée dans le prochain chapitre.

## Introduction

Le convertisseur SINAMICS GH 150 de Siemens utilisé pour contrôler la vitesse et la fréquence de rotation d'un moteur électrique à quatre quadrants. Le convertisseur est composé d'un cadre en acier soudé avec des sections pour le refroidissement, la puissance et le contrôle.

Le convertisseur utilise un redresseur à diodes côté ligne et des cellules de puissance avec des IGBT basse tension côté moteur. Des circuits snubber sont utilisés pour contrôler les harmoniques de commutation et des transformateurs sont utilisés pour la détection du courant et de la tension du moteur. La commande vectorielle en boucle fermée adaptée vers le champ est utilisée pour réaliser la commande en boucle fermée, permettant une commande précise de la vitesse ou du couple. Le panneau de commande AOP30 permet la modification des paramètres et la lecture des données pendant le fonctionnement, ainsi que l'affichage des points de consigne, de l'état du convertisseur, des messages d'avertissement et des alarmes.

Le GH 150 décrit également les principaux composants de l'entraînement électrique, notamment le moteur de moyenne tension, le transformateur et le sectionneur de moyenne tension.

### IV.1 Application sur le variateur de vitesse d'un entraînement (SINAMICS GH 150)

Le convertisseur SINAMICS GH 150 : est un convertisseur moyen tension conçu pour les machines à rotation de phase. Il est utilisé pour contrôler la vitesse et la fréquence de rotation d'un moteur électrique à quatre quadrants, ce qui permet un fonctionnement bidirectionnel sans aucun circuit supplémentaire.

Le SINAMICS GH 150 : est particulièrement adapté aux applications avec une caractéristique de charge constante quadratique et sans flux régénératif. Il est doté d'une configuration de pont triphasé à 24 impulsions (Basic Line Module) côté ligne, et côté moteur, il est intégré en technologie M2C avec des semi-conducteurs IGBT.

La plage de vitesse pour l'application "CAFC OIL" est de 1050 à 1575 tr/min, avec une vitesse nominale de 1500 tr/min. Le processeur numérique SINAMICS CU320 est utilisé pour la commande en boucle ouverte, la commande en boucle fermée et la surveillance des semi-conducteurs de l'ensemble de l'entraînement.

Les modules côté moteur sont commandés électroniquement à l'aide de câbles à fibre optique, ce qui permet une transmission de signal rapide et fiable. La dissipation de chaleur est gérée par un échangeur de chaleur eau-eau avec de l'eau déionisée dans le circuit primaire, ou des échangeurs de chaleur eau-air peuvent également être utilisés [17].

#### IV.1.1 Principaux éléments de l'unité de conversion SINAMICS GH 150

Le convertisseur complet comprend tous les composants nécessaires à l'alimentation d'un moteur de convertisseur [17] :

- Convertisseurs côté ligne (Redresseur).
- Réactances de liaison CC.
- Convertisseur côté moteur (Onduleur).
- Contrôle en boucle ouverte et en boucle fermée, y compris la surveillance et la protection de l'installation complète.
- Unité de refroidissement.

#### IV.1.2 Connexions d'un VFD SINAMICS GH 150 de Siemens

Du côté de l'installation, il est nécessaire d'effectuer les connexions suivantes :

**Tableau-03** : les connexions d'un VFD SINAMICS GH 150 [17].

<b>GH 150 Circuit d'alimentation :</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Connexions du transformateur, du sectionneur et du moteur à l'aide des câbles haute tension à conducteur unique.</li> </ul>
<b>Panneau de contrôle GH 150 :</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 1 ph. 230V 50 Hz Alimentation UPS pour la commande SINAMICS GH 150.</li> <li>▶ Alimentation 1 ph. 230V 50 Hz pour l'éclairage de la cabine, les prises de courant et le chauffage de l'armoire.</li> <li>▶ 3 ph. 400V 50 Hz ventilateurs et précharge ligne CC.</li> <li>▶ 3 ph. 400 V 50 Hz précharge Transformateur moyenne tension.</li> <li>▶ 3 ph. 110 V 50 Hz synchronisation Tension.</li> <li>▶ Appareillage moyenne tension (signaux de commande et d'état, tension de synchronisation).</li> </ul>

<b>Unité de refroidissement :</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 1 ph. 230V 50 Hz Alimentation UPS pour l'unité de refroidissement contrôlent.</li> <li>▶ Alimentation 1 ph. 230V 50 Hz pour les auxiliaires, l'éclairage des cabines, les prises de courant et le chauffage de l'armoire.</li> <li>▶ 3 ph. 400 V 50 Hz pour les pompes.</li> <li>▶ Interface avec le MCC pour le contrôle et le retour d'information sur les pompes.</li> <li>▶ Connexions d'entrée et de sortie d'eau déionisée.</li> </ul>
<b>Refroidisseur :</b>	▶ 3 ph. 400 V 50 Hz pour les pompes.
<b>Moteur :</b>	▶ 1 ph. 230 V 50 Hz pour le chauffage d'appoint.
<b>Déconnecteur :</b>	▶ 1 ph. 230 V 50 Hz pour les auxiliaires.

## IV.2 Composants de la section puissance du VSDS

D'après La figure-17 qui illustre le schéma de "Vue d'ensemble du système de conversion", qui présente un aperçu détaillé du convertisseur complet, qui regroupe tous les composants essentiels nécessaires à l'alimentation d'un moteur de convertisseur. Ce système de conversion joue un rôle crucial dans la transformation de l'énergie électrique, permettant ainsi de convertir une forme d'énergie en une autre de manière efficace et fiable [17].

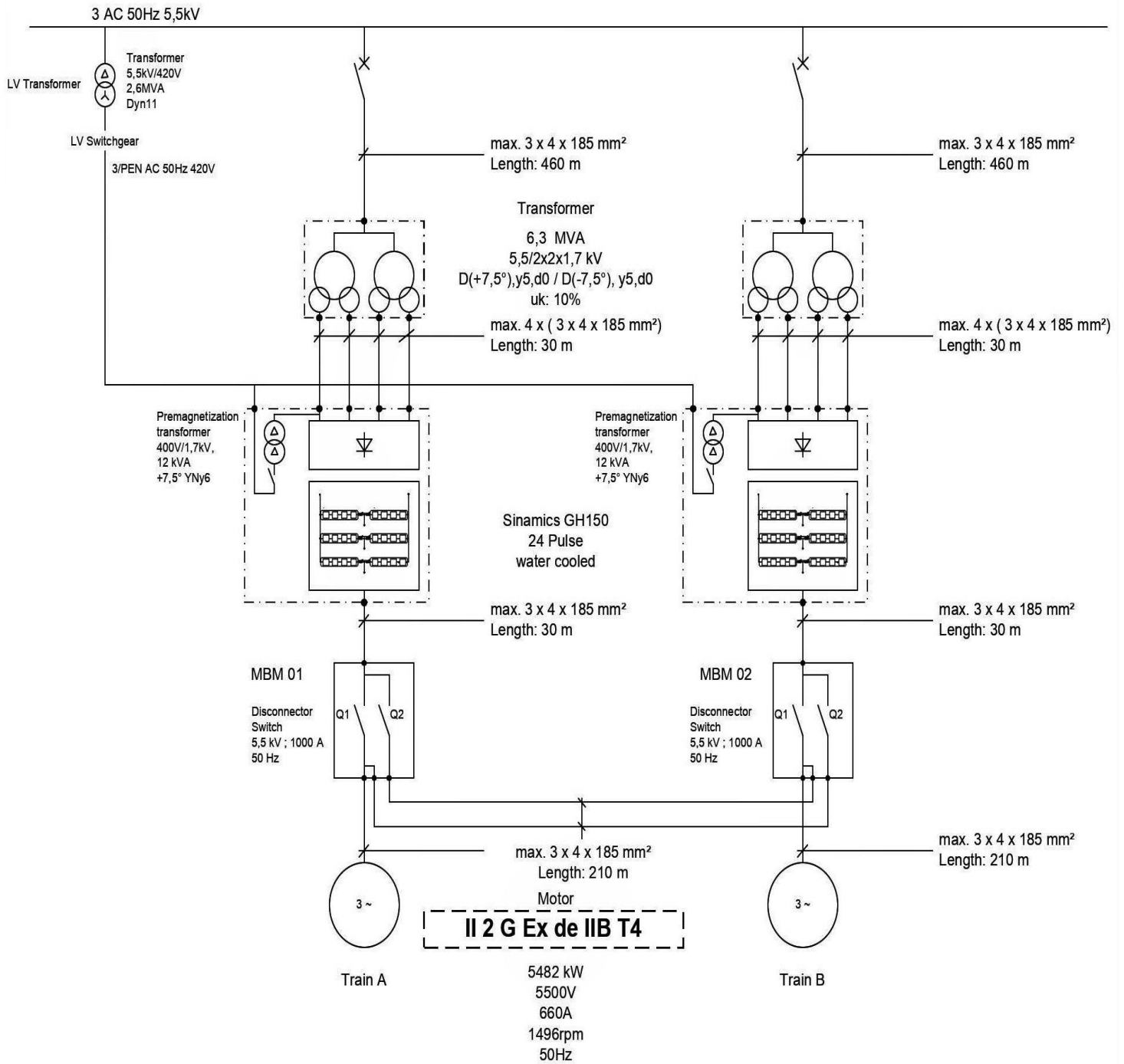


Figure-21: Vue d'ensemble du système de conversion [17].

### IV.2.1. Disjoncteur à haute tension

Le disjoncteur est généralement installé dans la salle de commutation de la moyenne tension, où il assure la coupure du courant sur le côté primaire du transformateur de conversion.

Le temps de déconnexion ne doit pas dépasser 80 ms pour permettre au disjoncteur de couper rapidement la tension de ligne en cas de défaut étendu, lorsque les systèmes de contrôle

en boucle ouverte ou fermée sont défaillants, afin d'éviter tout dommage ultérieur. Il est donc nécessaire que le disjoncteur soit équipé d'un relais de protection contre les surintensités qui doit réagir à environ 2,5 fois le courant nominal.

Le disjoncteur doit être commandé uniquement par le système de commande en boucle ouverte du convertisseur. Cependant, en cas de déclenchement externe, un signal instantané ou avancé doit être émis simultanément vers la commande du convertisseur pour ramener le courant à zéro avant que le disjoncteur ne s'ouvre. Cela empêchera les débordements. Après l'ouverture, le disjoncteur passe à l'état de repos sans courant.

Le disjoncteur doit signaler son état (ouvert ou fermé) à la commande du convertisseur à l'aide de contacts auxiliaires.

Le disjoncteur doit avoir un circuit de déclenchement d'urgence avec une bobine d'ouverture à tension minimale, pouvant être commandé par la commande du convertisseur. Le temps entre la commande d'arrêt du disjoncteur et la vérification du signal " circuit snubber " est surveillé, et si cela dépasse un temps prédéfini, le déclenchement d'urgence de la bobine à tension minimale est activé [17].



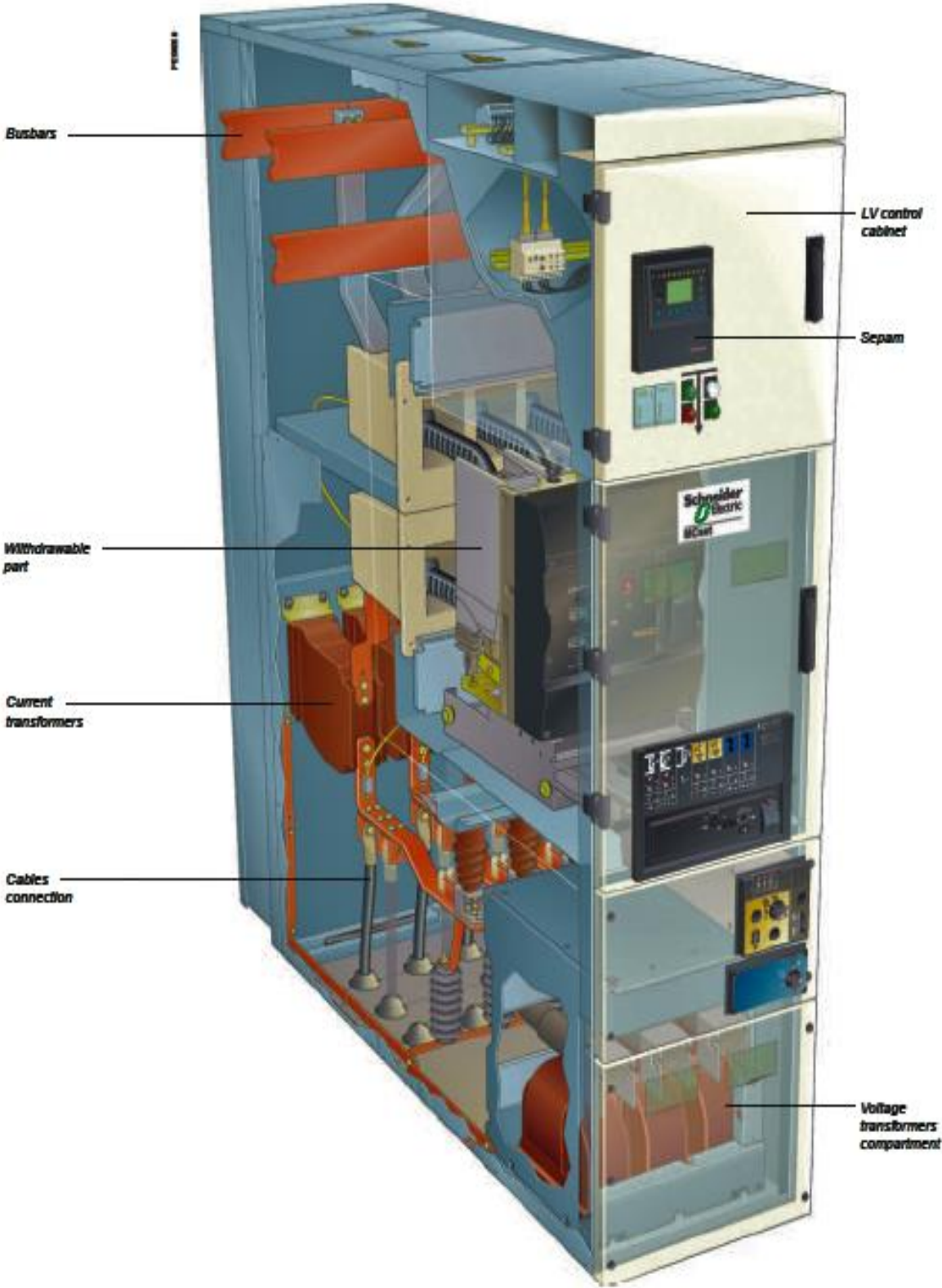


Figure-22: Vue d'ensemble du disjoncteur MC set [18].

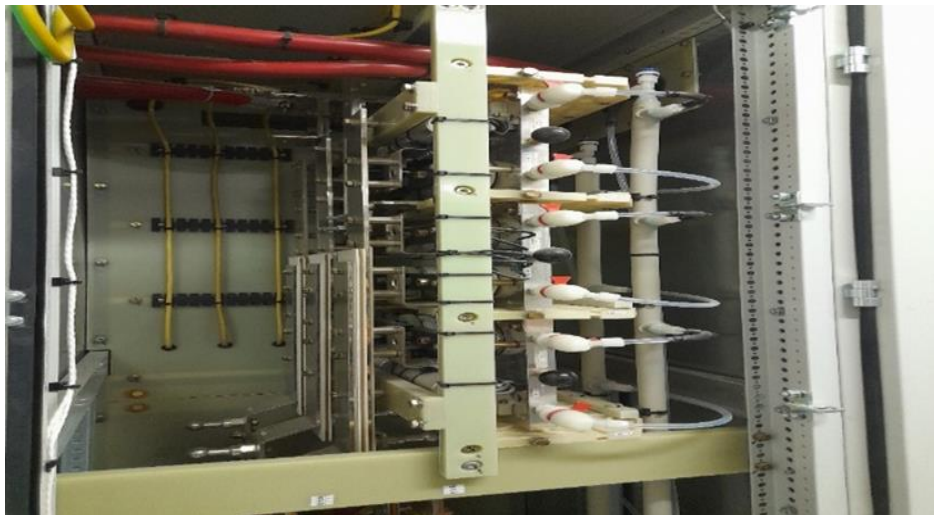
## IV.2.2 Transformateur

Le transformateur est responsable de l'isolement du convertisseur du réseau d'alimentation et limite le courant du convertisseur en cas de défaut en raison de sa réactance.

Il s'agit d'un transformateur à 24 impulsions à deux niveaux avec quatre enroulements secondaires déphasés de  $30^\circ$  pour supprimer les harmoniques 5 et 7. Il est surveillé par la commande de l'entraînement pour l'accélération, les enroulements, les défauts d'isolation interne et l'embrassement (relais Buchholz), et équipé de capteurs de température, d'un relais Buchholz et d'un dispositif de décompression.

## IV.2.3 Redresseur

Le convertisseur côté ligne utilise un pont triphasé à 24 impulsions (diodes) du Basic Line Module pour générer une tension continue et injecte un courant correspondant au couple requis dans le convertisseur côté moteur via la réactance de liaison CC et la commande de courant. Pour l'onduleur à 12 lignes d'impulsion, les enroulements du transformateur secondaire sont déphasés de  $30^\circ$ , ce qui réduit considérablement les harmoniques sur l'alimentation principale.



**Figure-23** : Convertisseur à diodes sur de côté la ligne.

## IV.2.4 Onduleur

Le commutateur cyclique du courant vers les enroulements statoriques correspondants du moteur génère un champ tournant qui produit le couple moteur. Les modules moteurs (ou

les modules d'onduleurs) alimentent le moteur via la liaison CC et sont construits en technologie M2C avec des semi-conducteurs IGBT.

Le module moteur M2C fournit des tensions presque sinusoïdales et est composé d'un sous-module et d'une armoire de réacteur de dérivation. Les doubles sous-modules avec les semi-conducteurs IGBT (36 IGBT) sont logés dans l'armoire du sous-module, tandis que les réactances de dérivation et l'équipement de mesure associé se trouvent dans l'armoire de la réactance de dérivation.



**Figure-24:** Convertisseur à IGBT sur de côté du moteur.

#### IV.2.5 Unité de refroidissement

Utilisation d'un échangeur de chaleur eau/eau pour dissiper les pertes de puissance des semi-conducteurs, des résistances et des selfs, avec de l'eau déionisée à l'intérieur et de l'eau glycolée à l'extérieur.

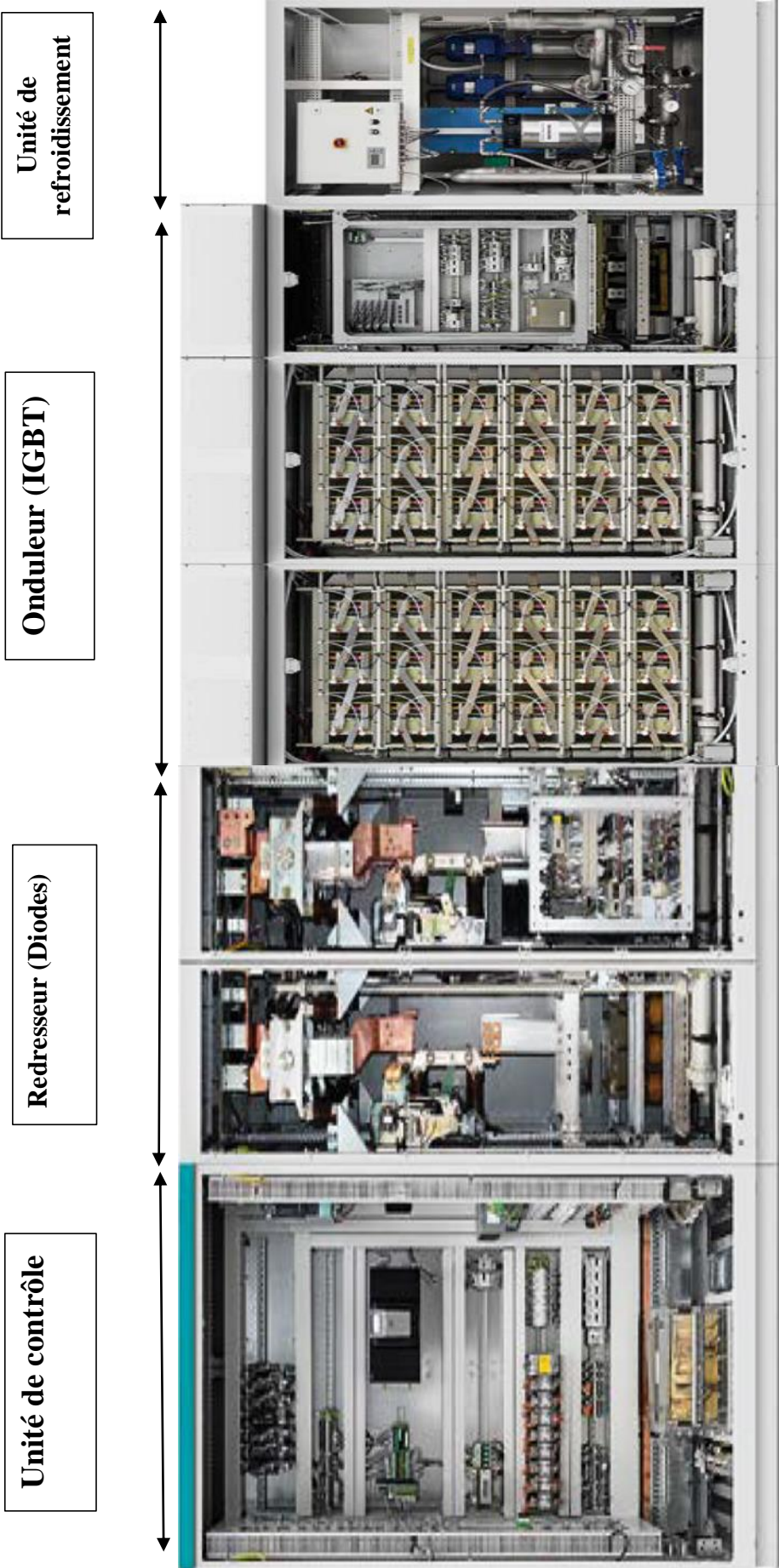


**Figure-25 :** Unité de refroidissement.

#### **IV.2.6 Commande en boucle ouverte et en boucle fermée**

Le système de commande numérique SINAMICS GH 150 est responsable de toutes les fonctions en boucle ouverte et en boucle fermée, ainsi que de l'interface de l'automatisation du convertisseur. Il est possible de subdiviser la version configurée pour le convertisseur complet en deux groupes principaux [17]:

- **Le premier groupe :** inclut la commande en boucle ouverte et en boucle fermée liée au variateur, qui fournit les fonctions de contrôle de la vitesse et du courant, la surveillance des semi-conducteurs, ainsi que des auxiliaires du convertisseur tels que l'unité de refroidissement, l'alimentation de la commande en boucle ouverte, la tension de synchronisation, l'alimentation de l'unité de commande en boucle fermée, l'alimentation électrique de contrôle en boucle ouverte, la tension de synchronisation et l'état des disjoncteurs.
- **Le deuxième groupe :** comprend la commande en boucle ouverte orientée vers l'usine avec des circuits de surveillance du transformateur et du moteur. Les fonctions de boucle ouverte et de surveillance peuvent être intégrées de manière étendue pour répondre aux besoins de l'application.



**Figure-26 : Vue du VFD SINAMICS GH 150 [11]**

## IV.3 Convertisseur

Le convertisseur de fréquence variable est un dispositif utilisé pour réguler la vitesse d'un moteur électrique en ajustant la fréquence de l'alimentation électrique qui lui est fournie. Le convertisseur est installé dans un cadre en acier soudé, qui est divisé en plusieurs sections : une unité de refroidissement pour le convertisseur, deux sections de puissance et une section de contrôle. Le cadre est complètement fermé par des portes et des panneaux pour assurer la sécurité et la protection des composants électroniques.

Le convertisseur côté ligne est équipé d'un redresseur à diodes, tandis que le convertisseur côté moteur utilise des cellules de puissance avec des IGBT basse tension. Les IGBT sont disposés dans des colonnes avec des dissipateurs thermiques en aluminium, ce qui permet de dissiper la chaleur générée par les IGBT. Les circuits snubber sont également utilisés pour contrôler les harmoniques de commutation, et l'électronique de déclenchement avec couplage optoélectronique est utilisée pour la commande en boucle fermée et la surveillance des IGBT.

Chaque module représente un pont triphasé complet, et la liaison CC est située entre le convertisseur côté ligne et le convertisseur côté moteur. La section de connexion des câbles comprend des rails auxiliaires pour la connexion des câbles d'alimentation haute tension unipolaires et la connexion du moteur. Des transformateurs sont également utilisés pour la détection du courant et de la tension du moteur, ce qui permet au convertisseur de contrôler efficacement la vitesse et le couple du moteur électrique [17].

### IV.3.1 Fonctionnement et applications du contrôle en boucle ouverte et en boucle fermée avec excitation

La commande en boucle ouverte et la commande en boucle fermée sont logées dans une cabine en tôle d'acier, avec la flexibilité de pouvoir être montées soit directement sur la section de puissance, soit dans une pièce distincte.

Cette conception permet de minimiser la longueur des connexions électriques à la section de puissance, tout en permettant à l'usine de fabriquer et de vérifier ces connexions électriques de manière efficace.

## ☛ La section de puissance d'un variateur SINAMICS GH 150

La section de puissance est la partie du variateur qui gère et contrôle la puissance électrique fournie au moteur. Elle est responsable de la conversion de l'énergie électrique d'une source d'alimentation à fréquence fixe en une fréquence variable et d'une tension adaptée pour le moteur. La section de puissance comprend des composants tels que les convertisseurs de puissance, les circuits de commande et les dispositifs de protection. Elle assure également le contrôle de la vitesse, du couple et d'autres paramètres de fonctionnement du moteur, permettant ainsi une régulation précise et efficace de la machine entraînée.

### IV.3.2 Principe de fonctionnement de la section de puissance

La section de puissance de l'installation comprend un convertisseur côté ligne, une liaison CC et un convertisseur côté moteur. Le contrôle de vitesse de la commande en boucle fermée est assuré par un contrôle de courant subordonné, qui alimente le moteur en courant pour fournir le couple nécessaire ou maintenir la vitesse.

Pour les circuits à 12 impulsions du convertisseur côté moteur, les deux liaisons CC parallèles sont contrôlées de manière indépendante avec deux contrôleurs de courant. L'alimentation de l'enroulement du stator du moteur est presque sinusoïdale, et la tension aux bornes du moteur est mesurée et évaluée pour générer les impulsions d'enclenchement du convertisseur côté moteur.

La commande en boucle fermée côté moteur est réalisée sous la forme d'une commande vectorielle en boucle fermée orientée vers le champ, permettant une commande précise de la vitesse ou du couple.

La commande vectorielle en boucle fermée permet également de contrôler indépendamment les composantes du courant formant le couple et le flux pour une observation et une limitation précises des couples spécifiés [17].

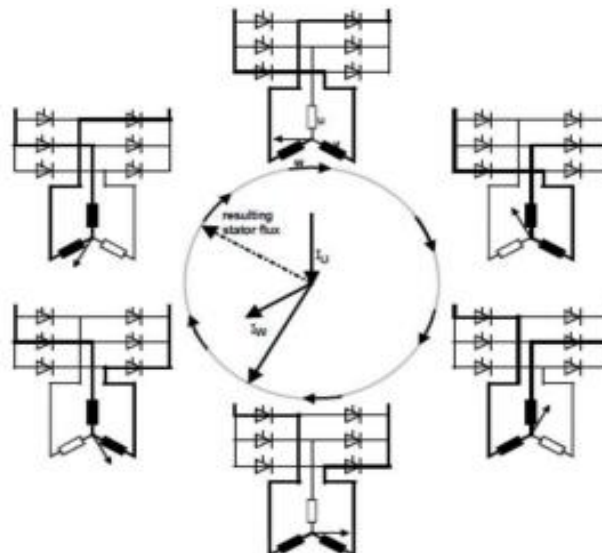
### IV.3.3 Principe de fonctionnement du contrôle en boucle fermée

Les variateurs SINAMICS GH 150 utilisent une commutation externe de tension, qui est fournie par le transformateur ou le moteur. Le calcul de l'angle de phase du vecteur de flux dans le modèle de tension est utilisé pour commuter le convertisseur côté moteur. Le convertisseur est ainsi à commutation externe. La variation de la vitesse du moteur se produit

jusqu'à ce qu'un équilibre atteigne entre le couple de charge et le couple du moteur avec la tension du moteur, empêche le moteur de sortir du pas.

Cependant, lorsque la vitesse est comprise entre 0 et environ 10 % de la vitesse nominale, la tension du moteur est insuffisante pour assurer une commutation fiable du convertisseur côté moteur. Pour pallier cela, la tension de la liaison CC est inversée périodiquement par le convertisseur côté ligne en mode onduleur, ce qui éteint les thyristors du convertisseur côté moteur. Cette plage de fonctionnement est appelée Impulsion de la liaison CC.

La commande en boucle fermée du variateur est une commande de vitesse avec une commande de courant subordonnée, utilisant des composants du système de commande en boucle ouverte et fermée SINAMICS GH 150. Tout changement de la valeur de consigne ou de la valeur réelle de la vitesse modifie la tension de sortie du variateur, qui est utilisée comme point de consigne pour le régulateur de courant connecté. Le courant de liaison CC change alors proportionnellement, modifie le couple du moteur et donc la vitesse [17].



**Figure-27** : Conditions de commutation du collecteur électronique pour un champ tournant dans le sens des aiguilles d'une montre [17].

La commutation externe assure la synchronisation de la commutation IGBT du convertisseur côté moteur. Les fluctuations du couple électrique dans l'entrefer entraînent des fluctuations du couple sur le rotor du moteur.



Cependant, le moment d'inertie du rotor atténue considérablement cet effet, rendant les fluctuations de couple au niveau de l'arbre du moteur difficile à mesurer. Pour déterminer les valeurs absolues de l'ondulation du couple pour différentes fréquences, il est nécessaire de prendre en compte le point de fonctionnement de la charge, les paramètres du moteur et les caractéristiques du convertisseur.

#### **IV.4 Boucle ouverte et boucle fermée : fonctionnement, affichage et schéma typique**

Le schéma ci-dessous qui montre sur la Figure-24 intitulé "Schéma typique du système SINAMICS GH 150" propose une représentation visuelle et détaillée du schéma électrique caractéristique du système SINAMICS GH 150. Ce schéma offre un aperçu complet des composants clés et de leur interconnexion, permettant ainsi de mieux comprendre le fonctionnement global de ce système [17].

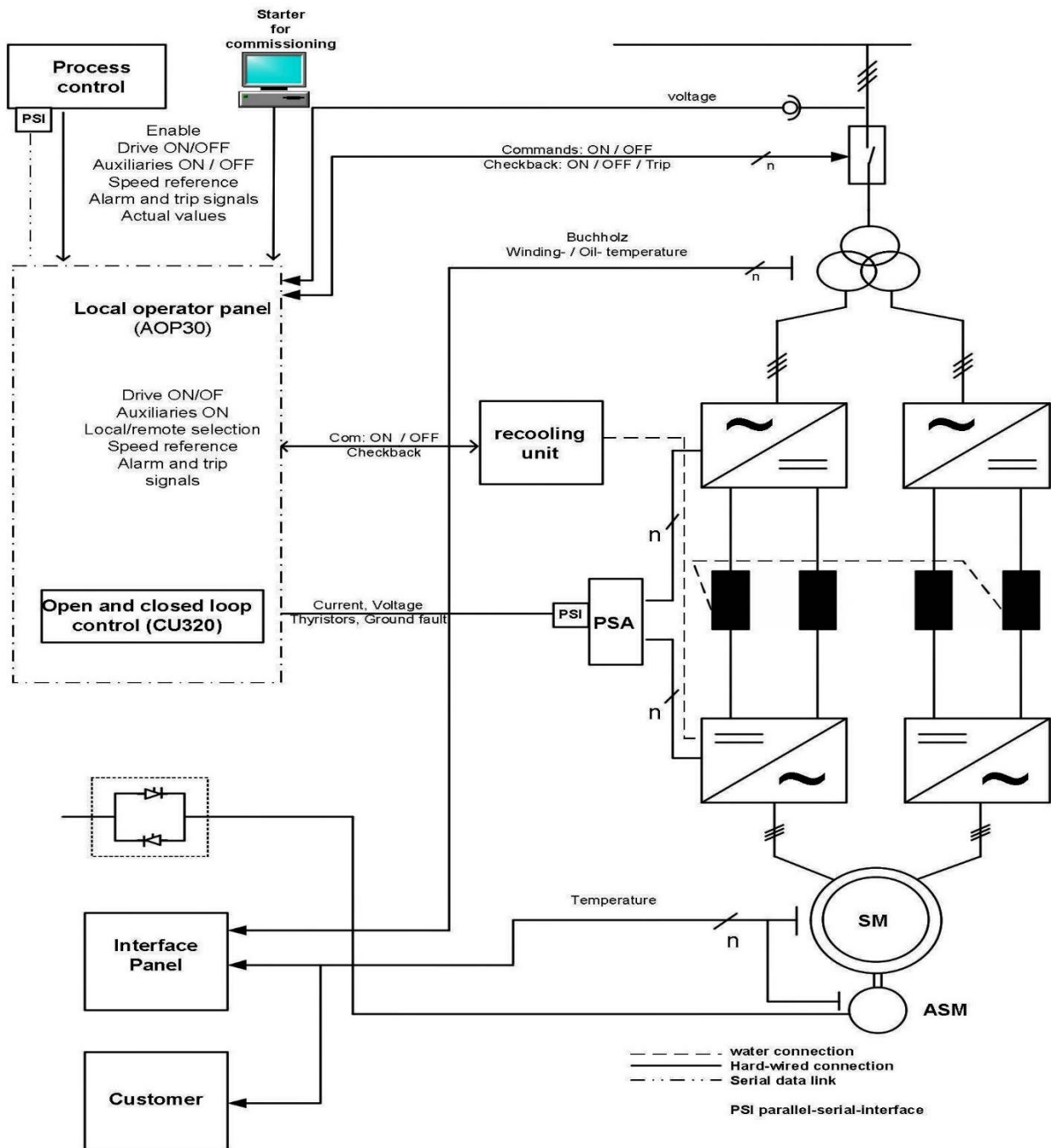


Figure-28 : Schéma typique du système SINAMICS GH 150.

### IV.4.1 Fonctionnement et affichage

#### A. Panneau de commande

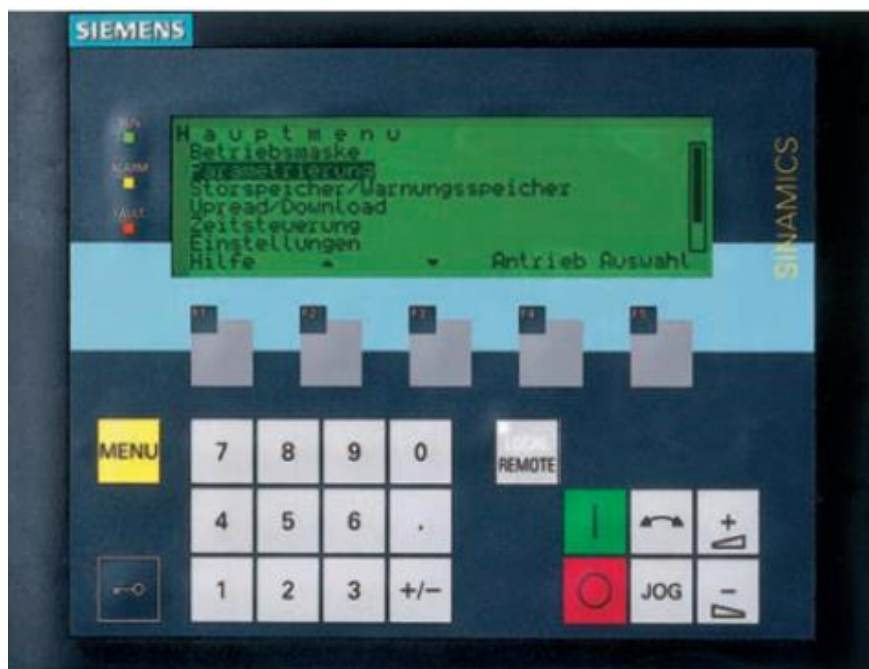
Le panneau de commande AOP30 est localisé dans la porte de la cabine de commande pour les modes de boucle ouverte et boucle fermée. Il permet de modifier les paramètres et lire

les données pendant le fonctionnement. En cas de défaut, les signaux peuvent être analysés dans l'ordre chronologique sur l'écran.

Les fonctions incluent sont :

- L'affichage des points de consigne et des valeurs réelles.
- L'affichage l'état du convertisseur
- L'affichage les messages d'avertissement et de déclenchement.
- L'affichage de la commande locale pour l'entretien et la mise en service.

Les messages et alarmes sont enregistrés avec une plage horaire et un emplacement, et sont transmis au panneau opérateur. Le panneau de commande est donc un élément crucial pour la surveillance et la gestion de l'équipement SINAMICS GH 150 [17].



**Figure-29** : Panneau de commande - AOP30.

#### **L'AOP30 dispose des caractéristiques suivantes**

- Un écran graphique LCD rétroéclairé pour l'affichage du texte et d'une barre de variables du processus.
- Des LED pour l'affichage de l'état de fonctionnement.
- Une fonction d'aide pour les défauts et alarmes.
- Un clavier pour la commande opérationnelle d'un variateur.
- Une commutation locale/à distance pour la sélection du point d'entrée.

- Un clavier numérique pour la saisie des valeurs de consigne et des paramètres.
  - Des touches de fonction pour une navigation rapide dans le menu.
  - Une stratégie de sécurité à deux niveaux pour protéger contre les modifications accidentelles ou non autorisées des réglages :
- ❖ Le variateur peut être désactivé par un mot de passe pour n'afficher que les valeurs de paramètres et les variables de procédé.
- ❖ Un mot de passe peut également être utilisé pour empêcher la modification non autorisée des paramètres du convertisseur.

### **B. Instruments indicateurs et lampes**

Des instruments analogiques sont situés dans la porte de la cabine de contrôle pour indiquer :

- Indication de la vitesse.
- Tension du moteur.
- Puissance de la liaison CC.
- Courant de liaison CC.

Des témoins lumineux sont incorporés dans la porte de la cabine de commande pour indiquer l'état de fonctionnement du système ou les alarmes :

- OFF/READY.
- MARCHE.
- AVERTISSEMENT.
- TRIP.

L'IHM (Interface Homme-Machine) est située dans le panneau de contrôle pour permettre à l'opérateur de contrôler et surveiller le système :

- État du système d'entraînement.
- Avertissement du système d'entraînement.
- Mise en sécurité du système d'entraînement.

### **C. Entrée de la valeur de consigne de la vitesse**

#### **- Local**

Le panneau de commande est équipé d'un bouton-poussoir qui permet de passer de la vitesse supérieure à la vitesse inférieure. Il est également possible d'introduire numériquement une consigne de vitesse via le panneau de commande.

- **A distance**

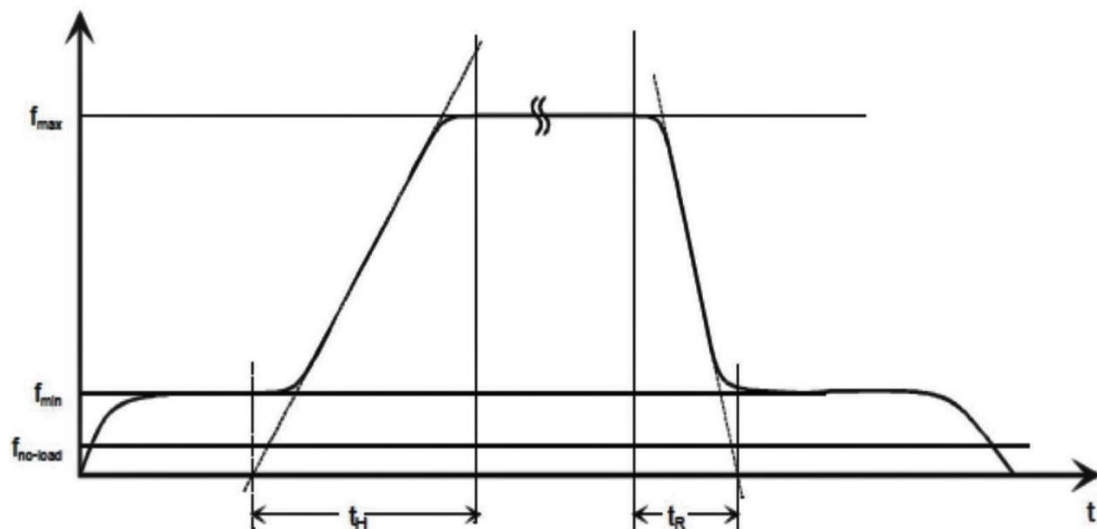
Le point de consigne de la vitesse (ou du couple) peut être transmis à distance via un câblage 4-20 mA.

## IV.4.2 Fonctions individuelles paramétrables

### A. Générateur de fonction de rampe

La fonction de rampe du générateur a deux temps de montée et de descente réglables séparément :

- 1) Démarrage standard - décélération standard avec  $t_H = 5-5000$  s,  $t_R = 5-5000$ .
- 2) Arrêt rapide, temps de décélération indépendant ( $t_F = 5-5000$  s) mais pas plus rapide que la courbe caractéristique de limitation de courant.
  - Fréquence minimale  $f_{min}$ :  $10\% f_{max} < f_{min} < f_{max}$ .
  - Fréquence maximale  $f_{max}$ :  $10 \text{ Hz} < f_{max} < 110 \text{ Hz}$  (les réglages raisonnables doivent être ajustés).



**Figure-30** : Caractéristiques du générateur de rampe [17].

D'après la figure-26 on remarque qu'au démarrage du convertisseur, la fréquence minimale  $f_{min}$  est sélectionnée à partir de  $f = 0$  Hz. Pendant le fonctionnement du convertisseur, la fréquence ne peut jamais descendre en dessous de  $f_{min}$ . Si l'utilisateur tente de réduire la fréquence en dessous de cette limite, le convertisseur valide la valeur minimale de

fréquence autorisée et la constante. La réduction de la fréquence est uniquement possible en arrêtant le convertisseur et en effectuant une nouvelle sélection de la fréquence minimale lors du démarrage suivant. Cette limitation est conçue pour assurer un fonctionnement sûr et stable du convertisseur, en évitant des fréquences de sortie dangereusement basses qui pourraient endommager le moteur ou l'installation.

### **B. Contrôle du redémarrage automatique**

1. Brève interruption : 0-1 msec - pas de détection de sous-tension, pas de changement de signaux de sortie, maintien du couple.
2. Interruption de 100 msec à 2 sec (sélectionnable) - l'alarme ASD est active, aucun couple n'est disponible, message d'alarme indiquant une défaillance de la ligne.
3. Après rétablissement de l'alimentation en ligne, la commande en boucle fermée recherche la position du rotor, le ralentisseur redémarre automatiquement ou continue de fonctionner, et devient opérationnel.
4. Interruption de > 2...30 secs (sélectionnable) - l'ASD se déclenche, le disjoncteur est ouvert, le témoin de déclenchement s'allume et un signal indiquant un défaut OFF est émis.

### **C. Commande de disjoncteur**

Le disjoncteur d'installation est commandé par un contact sec avec une capacité de charge maximale de 220 V / 1 A CC ou 110 V / 2 A CC. L'état du disjoncteur est signalé par des contacts auxiliaires (un contact NF, un contact NO) et est transmis à la commande comme signal de validation.

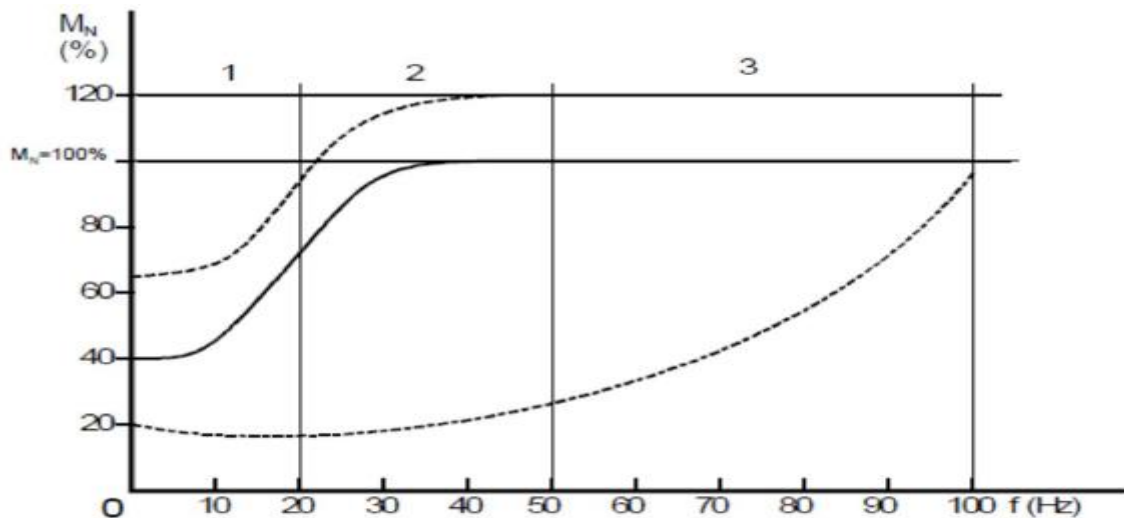
Un signal d'arrêt d'urgence est émis vers le disjoncteur si le signal de retour de contrôle "Le disjoncteur est désactivé" n'est pas émis dans un délai d'environ 80 msec après la commande "disjoncteur OFF".

### **D. Suppression de la gamme de fréquences**

Il est parfois impossible de placer la première vitesse critique du moteur en dehors de la plage de contrôle de la vitesse. Dans ce cas, il est possible de créer jusqu'à 4 zones de fréquence indépendantes avec des plages réglables pour empêcher le fonctionnement du variateur à ces vitesses. Ces plages de fréquences sont supprimées, empêchant ainsi le fonctionnement du variateur en continu dans ces plages. Lorsqu'une fréquence correspondante à la plage à supprimer est entrée, la dernière fréquence possible avant le début de la plage de suppression de fréquence est automatiquement sélectionnée.

### E. Réglage des limites de couple pour le fonctionnement des moteurs et des générateurs

Le couple peut être sélectionné, en fonction de la fréquence, dans 3 gammes [17]:



----- Caractéristique du couple de charge.

——— Couple standard caractéristique.

——— Caractéristique de couple avec limitation accrue du courant.

**Figure-31** : Exemple de conception d'une limitation de couple en fonction de la fréquence.

### IV.4.3 Fonctions de protection et de contrôle internes

La commande du convertisseur surveille tous les paramètres de fonctionnement importants et émet un signal correspondant. Si nécessaire, l'entraînement s'arrête lorsque les paramètres sortent de la plage de fonctionnement. Les alarmes signalant l'heure et l'information sur le défaut sont affichées sur le panneau de commande. La catégorie du signal de l'arrêt à l'alarme ou vice versa ne peut normalement pas être changée pour les fonctions de surveillance interne [13].

#### A. Détection de surintensité

Contrôle en boucle fermée prévient normalement les valeurs de courant inadmissibles. Si le courant côté ligne ou côté moteur dépasse environ 140 %, le variateur est arrêté et isolé de l'alimentation pour éviter des dommages. Les défauts de commutation, la surtension de l'alimentation ou les défauts d'enclenchement peuvent en être la cause. Le déclenchement rapide du disjoncteur évite

les dommages ultérieurs. Pour le freinage, les deux convertisseurs sont immédiatement commutés en mode onduleur pour réduire le courant, et le disjoncteur est ouvert.

### **B. Protection contre la survitesse**

Le temps écoulé entre les passages par zéro de la tension du moteur est surveillé. Le variateur est arrêté si le temps est inférieur à une valeur spécifiée (correspondant généralement à 105 % de la valeur nominale).

Il est pratiquement impossible que le variateur se mette en survitesse car :

1. La consigne de vitesse maximale admissible correspond à la limite physique de l'entrée applicable.
2. A vitesse maximale, la tension d'alimentation et la tension du moteur sont approximativement égales. Si la vitesse maximale devait être dépassée, la tension du moteur (au flux nominal) dépasserait la tension d'alimentation. Cependant, aucun courant supplémentaire ne peut circuler dans le moteur dans ce cas, ce qui signifie qu'aucun couple supplémentaire n'est généré et que la vitesse ne peut pas être augmentée.

Pour éviter les survitesses dans des cas particulièrement critiques, comme lorsque la machine entraînée entraîne la charge, le système "multi-quadrants" peut être utilisé. De plus, un dispositif de protection de survitesse indépendant peut être installé en montant un émetteur d'impulsions sur l'arbre du moteur, dont le signal est évalué par son propre système électronique.

### **C. L'Écart entre la consigne de vitesse et la valeur réelle**

Le système de contrôle de vitesse émettra un signal d'alarme ou arrêtera le variateur (en fonction de sa conception) si le point de consigne n'est pas atteint dans le délai spécifié, afin de prévenir une surtaxe prolongée.

### **D. Mise à l'arrêt (Fermeture)**

Le temps entre la validation du contrôleur et l'atteinte d'une vitesse minimale (environ 10 % de la valeur nominale) est surveillé pour prévenir une longue charge en courant continu de l'IGBT du convertisseur côté moteur et pour éviter une détection imprécise de la position du rotor et des impulsions du convertisseur.



Si ce temps est dépassé, la séquence de démarrage est interrompue et une nouvelle tentative est effectuée. Cette fonction assure la protection du rotor bloqué [17].

### **E. Surveillance du transistor IGBT**

Les IGBT sont testés individuellement pour leur capacité de blocage et leur déclenchement correct. Un adaptateur de pile de puissance (PSA) envoie la commande d'ouverture par fibre optique au circuit de mise à feu de l'IGBT, qui mesure la tension de l'IGBT et la renvoie au PSA.

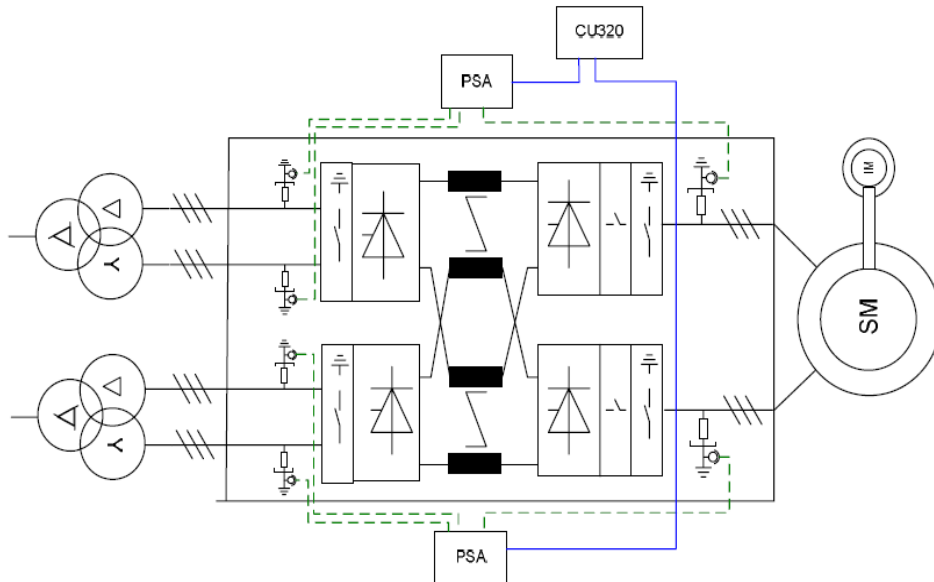
Le PSA détermine alors si l'IGBT est endommagé ou en bon état. Si l'IGBT est endommagé, le module peut être contourné pour éviter l'arrêt du variateur.

### **F. Contrôle de l'isolation**

L'ensemble de la section de puissance est flottante, ce qui permet à un courant de défaut de circuler vers la terre en cas de défaut d'isolement en un point particulier. Bien qu'un défaut d'isolement en lui-même n'affecte pas le fonctionnement, un défaut supplémentaire peut causer des conséquences graves (IT-Net).

La détection de défaut d'isolation est effectuée en comparant les tensions des points neutres artificiels entre l'entrée triphasée (côté ligne) et la sortie triphasée (côté moteur) par rapport à la terre, et couvre l'enroulement secondaire du transformateur et l'enroulement du stator du moteur.

La surveillance de la tension de déplacement du point neutre est ajustée en fonction des caractéristiques de l'installation pendant le démarrage, et une augmentation significative de cette tension indique un défaut d'isolement. En général, l'installation est arrêtée lorsque ce type de défaut est détecté pour éliminer le risque de défaut supplémentaire.



**Figure-32 :** Mesure des défauts à la terre GH 150 (câble à fibre optique vert, connexions bus internes) [17].

### G. Surveillance des composants périphériques

La commande du convertisseur permet la commande et la surveillance des composants de l'entraînement (disjoncteur, transformateur, convertisseur et moteur). Des fonctions supplémentaires peuvent être ajoutées pour la surveillance et la commande en boucle ouverte ou fermée.

Les extensions peuvent être réalisées via un panneau d'interface, qui est le point commun pour les connexions du système.

## IV.5 Vue d'ensemble des principaux composants de l'entraînement électrique

### VI.5.1 Moteur de moyenne tension

#### 1. Les Caractéristiques du moteur

Le moteur utilisé est une motrice asynchrone bipolaire haute tension conçue pour fonctionner à des fréquences et tensions variables. Il est utilisé pour entraîner une charge à vitesse variable en liaison avec le convertisseur statique SINAMICSGH 150. Le moteur est dépourvu de balais et de bagues collectrices [17].

## 2. Méthode de ventilation et de refroidissement

Le moteur est équipé d'un rotor cylindrique fermé et ventilé, doté d'un système de refroidissement en circuit fermé. L'air chaud généré par les parties actives du moteur est évacué vers la partie la plus froide en rotation. Le ventilateur situé du côté de l'extrémité non entraînée du rotor brasse l'air en circuit fermé.

## 3. Construction mécanique du moteur

Le moteur est un système mécanique intégré, constitué des éléments principaux suivants :

**Le châssis de base** : Sert de structure de support pour tous les composants du moteur.

**Le stator** : Est la partie stationnaire du moteur et contient les bobines de fil électrique qui produisent un champ magnétique.

**Le rotor** : Est la partie mobile du moteur et tourne à l'intérieur du stator en créant un champ magnétique rotatif.

**Les roulements** : Permettent au rotor de tourner en douceur dans le stator.

**Le couvercle** : Protège les composants internes du moteur de l'environnement extérieur.

**Les boîtes à bornes** : Sont des compartiments situés à l'extérieur du moteur, où les fils électriques peuvent être branchés.

**L'instrumentation** : Est utilisée pour surveiller et contrôler le fonctionnement du moteur.



Figure-33 : Moteur de moyenne tension (5.5 KV) [11].

## IV.5.2. Transformateur

Le transformateur de conversion du convertisseur de fréquence statique convertit la tension triphasée d'entrée de 5,5 kV en une tension triphasée de sortie de 1,7 kV pour alimenter les systèmes de puissance du convertisseur. Il modifie également l'angle de phase des quatre systèmes de tension triphasés. Les systèmes de puissance du convertisseur sont alimentés par quatre systèmes de tension triphasée de sortie secondaire du transformateur, qui sont décalés de 15°el, par rapport l'un à l'autre.

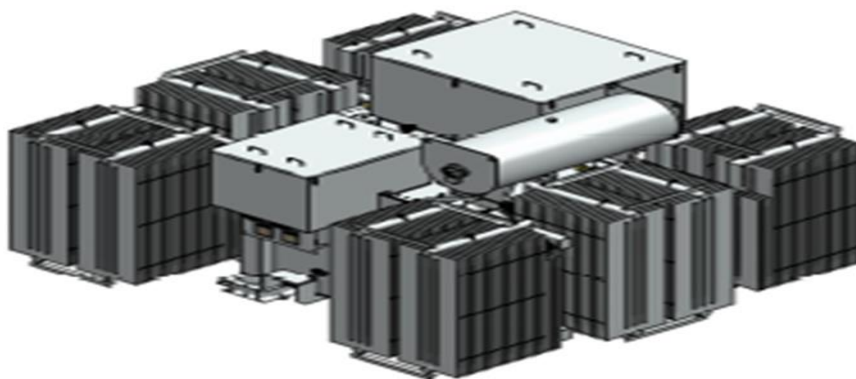
Les pertes totales du transformateur sont dissipées dans l'air ambiant par l'intermédiaire de l'huile du transformateur, du réservoir du transformateur et des radiateurs.

Le transformateur est conçu pour une installation à l'extérieur et pour des températures maximales de l'air ambiant de 55 °C, des enroulements de 50 K et une augmentation maximale de la température de l'huile de 45 K. L'impédance de court-circuit des enroulements secondaires est d'environ 10 % pour éviter les surintensités en cas de court-circuit.

### ❖ Dispositifs de protection et de surveillance

Relais Buchholz avec contacts pour alarme et déclenchement.

- Indicateur de niveau d'huile magnétique.
- Soupape de surpression avec contact de déclenchement.
- Thermomètre à cadran pour la température de l'huile avec contacts pour alarme et déclenchement.
- Thermomètre à cadran pour température de bobinage avec contacts pour alarme et déclenchement.
- Température de bobinage PT100 [17].



**Figure-34** : Transformateur [19]

### IV.5.3 Sectionneur moyenne tension

Le sectionneur moyen tension est placé entre le moteur et le convertisseur côté moteur. Il est conçu pour garantir la sécurité des travaux de maintenance sur le moteur et pour permettre de passer du train A au train B. Lorsque le sectionneur est fermé, le moteur A peut-être démarré soit par le convertisseur A, soit par le convertisseur B.

Note :

Le sectionneur de moyenne tension est un interrupteur inactif (position ouverte).

## Conclusion

On déduit que, le variateur SINAMICS GH 150 se distingue des autres variateurs par ses caractéristiques avancées et ses fonctionnalités supérieures. Son architecture de contrôle innovante permet une gestion précise et efficace des moteurs asynchrones, offrant ainsi des performances optimales dans diverses applications industrielles.

De plus, le SINAMICS GH 150 se distingue par sa capacité à gérer le comportement non linéaire des moteurs asynchrones et des onduleurs, simplifiant ainsi l'analyse et la commande de ces systèmes complexes. Grâce à ses performances supérieures et à sa souplesse, le variateur SINAMICS GH 150 est un choix privilégié pour les applications exigeant un contrôle précis et fiable des moteurs asynchrones.

## Introduction

La technique de commande vectorielle joue un rôle essentiel dans l'analyse et l'optimisation des performances de ce moteur asynchrone. Cette approche de simulation offre la possibilité d'étudier en détail le comportement du moteur asynchrone dans des conditions variées.

La commande vectorielle permet une régulation précise de la vitesse et du couple, tandis que la modulation MLI de bloc permet de générer les signaux de commande nécessaires pour alimenter le moteur. En utilisant cette méthode de simulation, il est possible de modéliser le moteur asynchrone dans son intégralité, d'explorer différentes configurations de commande et de moduler les paramètres pour optimiser les performances.

La simulation permet également d'évaluer les réponses transitoires du système et détecter d'éventuelles limitations ou problèmes.

## V.1 Modélisation de la machine asynchrone

L'analyse de la commande d'un moteur asynchrone couplé à un onduleur est complexe en raison du comportement non linéaire de ces composants. En se basant sur les équations de la machine asynchrone exprimées dans un repère lié au champ tournant, nous obtenons les équations suivantes [20] :

- **Coté stator**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_g \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} - \omega_g \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

- **Coté rotor**

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - \omega_g \Phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} - \omega_g \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

L'expression du couple électromagnétique sous sa forme scalaire s'écrit :

$$T_e = P \frac{M}{l_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{IV.3})$$

L'équation fondamentale de la mécanique :

$$J \frac{d}{dt} \omega_r + f \omega_r = T_e - T_r \quad (\text{VI.4})$$

Les relations reliant le flux et les courants sont :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = l_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = l_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} = M i_{ds} + l_r i_{dr} \\ \Phi_{qr} = M i_{qs} + l_r i_{qr} \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

Le modèle en courant statorique et flux rotorique peut être donné par la représentation d'état suivante [IV-5] :

$$\begin{pmatrix} \frac{d}{dt} \bar{i}_s \\ \frac{d}{dt} \bar{\Phi}_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{\Phi}_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\bar{V}_s}{\sigma l_s} \quad (\text{IV.6})$$

Avec :  $a_1 = -(R_s + m_r \frac{M}{T_r}) \frac{1}{\sigma l_s}$  ;  $a_2 = -\frac{m_r}{\sigma l_s} (j\omega - \frac{1}{T_r})$  ;  $a_3 = \frac{M}{T_r}$  ;  $a_4 = j\omega - \frac{1}{T_r}$

## V.2 Théorie de la commande vectorielle de la machine asynchrone

### V.2.1 Principe et l'objectif d'une commande vectorielle

Dans une machine à courant continu (MCC), le couple est contrôlé par le courant d'induit ( $I_a$ ) et le flux est contrôlé par le courant inducteur ( $I_f$ ). Le couple électromagnétique est déterminé par cette relation :

$$\mathbf{T}_e = \Phi_f \mathbf{I}_a = \mathbf{K}' \mathbf{I}_f \mathbf{I}_a \quad (\text{IV.7})$$

Avec :

$\Phi$  : Flux imposé par le courant d'excitation  $I_f$ .

$I_a$  : Courant d'induit.

$I_f$  : Courant d'excitation.

$k$  : Constante.

Le principe fondamental de la commande vectorielle consiste à contrôler indépendamment le flux et le couple électromagnétique. Cela implique de distinguer la composante du courant statorique responsable du flux et celle responsable du couple électromagnétique. Ainsi, il est possible d'obtenir un fonctionnement similaire à une machine à courant continu à excitation indépendante, où le découplage entre le flux et le couple se produit naturellement.

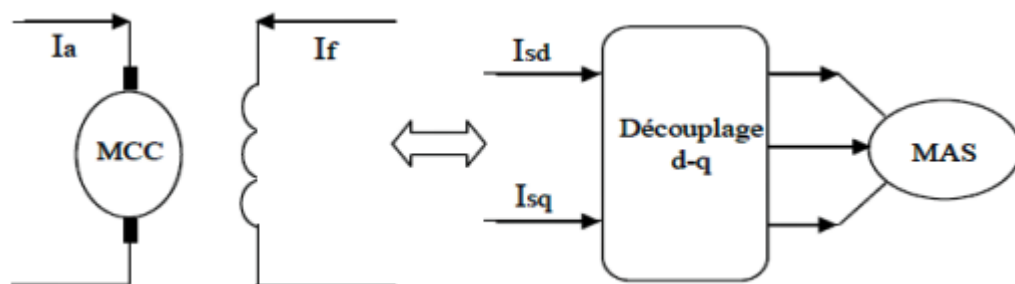
Dans le cas de la machine asynchrone à alimentation simple (MAS), seuls les courants statoriques sont mesurables, et l'objectif de la commande est d'éliminer la composante quadratique du flux rotorique ( $\Phi_{rq}$ ). Par conséquent, l'expression du couple électromagnétique fait intervenir les flux rotoriques et les courants statoriques.

- Pour une machine asynchrone, le couple électromagnétique est donné dans l'équation (IV.8)

$$T_e = P \frac{M}{l_r} (\Phi_{rd} i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd}) \quad (\text{IV.8})$$

L'objectif de la commande vectorielle vise à réaliser un découplage en suivant les principes suivants :

- Le contrôle du flux est réalisé par la composante directe du courant statorique ( $I_{sd}$ ).
- Le contrôle du couple est réalisé par la composante inverse du courant statorique ( $I_{sq}$ ).



**Figure-35** : Principe de la commande vectorielle.





### **a) commande à flux rotorique orienté directe DFOC**

La méthode de commande vectorielle à flux rotorique dirigé de la machine asynchrone implique la détermination précise de la position et du module du flux, indépendamment du régime de fonctionnement. Deux méthodes sont généralement utilisées :

- Mesure du flux dans l'entrefer de la machine en plaçant une spire sous un pôle de chaque phase. Cependant, cette méthode présente des inconvénients majeurs liés à la fragilité et à la fiabilité limitée, ce qui restreint son utilisation pratique.
- Estimation du flux à l'aide de méthodes mathématiques. Cette approche est sensible aux variations des paramètres de la machine, ce qui peut affecter la précision de l'estimation du flux.

Il est important de noter que ces deux méthodes sont utilisées pour obtenir des informations précises sur la position et le module du flux, permettant ainsi une commande vectorielle efficace de la machine asynchrone à flux rotorique dirigé.

### **b) commande à flux rotorique orienté indirecte IDFOC**

La méthode indirecte de commande consiste à contrôler uniquement la position du flux, sans prendre en compte son amplitude. Dans ce cas, le flux est régulé en boucle ouverte, ce qui signifie que le contrôle se fait sans mesurer directement l'amplitude du flux. Cette approche peut être utilisée lorsque la connaissance précise de l'amplitude du flux n'est pas nécessaire ou difficile à obtenir. Elle permet de réaliser un contrôle basé uniquement sur la position du flux, offrant ainsi une pratique alternative dans certains scénarios de commande vectorielle.

## **V.3 Commande vectorielle directe à flux rotorique orienté DFOC**

La commande vectorielle de ce type nécessite une connaissance précise du module et de la position du flux à tout moment. Ce mode de contrôle assure un découplage correct entre le flux et le couple, indépendamment du point de fonctionnement de la machine.

Ainsi, il permet de maintenir un contrôle précis et efficace sur le flux et le couple électromagnétique, assurant ainsi les performances souhaitées quelles que soient les conditions de fonctionnement.

### **A. Equation du modèle**

Le modèle de la machine dans le repère lié au champ tournant est défini comme suit :

$$\left[ \begin{aligned}
 \frac{d}{dt} i_{ds} &= -\lambda i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{k}{T_r} \Phi_{dr} + k\omega \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma l_s} v_{ds} \\
 \frac{d}{dt} i_{qs} &= -\omega_s i_{ds} - \lambda i_{qs} - k\omega \Phi_{dr} + \frac{k}{T_r} + \frac{1}{\sigma l_s} v_{qs} \\
 \frac{d}{dt} \Phi_{dr} &= \frac{M}{T_r} i_{ds} - \frac{1}{T_r} \Phi_{dr} + \omega_r \Phi_{qr} \\
 \frac{d}{dt} \Phi_{qr} &= \frac{M}{T_r} i_{qs} - \omega_r \Phi_{dr} - \frac{1}{T_r} \Phi_{qr}
 \end{aligned} \right. \quad (IV.11)$$

Pour mettre en œuvre la commande vectorielle avec orientation du flux rotorique, il est nécessaire de respecter la condition suivante :

$$\left[ \begin{aligned}
 \Phi_{dr} &= l_r i_{dr} + M i_{ds} = \Phi_r \\
 \Phi_{qr} &= l_r i_{qr} + M i_{qs} = 0
 \end{aligned} \right. \quad (IV.12)$$

$$\left[ \begin{aligned}
 i_{dr} &= \frac{1}{l_r} \Phi_r - \frac{M}{l_r} i_{ds} \\
 i_{qr} &= -\frac{M}{l_r} i_{qs}
 \end{aligned} \right. \quad (IV.13)$$

En substituant l'équation (IV.13) dans l'équation (IV.11), on obtient le résultat suivant :

$$\left[ \begin{aligned}
 \frac{d}{dt} i_{ds} &= -\lambda i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{k}{T_r} \Phi_r + \frac{1}{\sigma l_s} v_{ds} & (14.a) \\
 \frac{d}{dt} i_{qs} &= -\omega_s i_{ds} - \lambda i_{qs} - k\omega \Phi_r + \frac{1}{\sigma l_s} v_{qs} & (14.b) \\
 \frac{d}{dt} \Phi_{dr} &= \frac{M}{T_r} i_{ds} - \frac{1}{T_r} \Phi_r & (14.c) \\
 0 &= \frac{M}{C_r} i_{qs} - \omega_r \Phi_r & (14.d) \\
 T_e &= P \frac{M}{l_r} (\Phi_r i_{qs}) & (14.e)
 \end{aligned} \right. \quad (IV.14)$$

## B. Estimateur du flux rotorique :

En utilisant la notation de Laplace ( $(s) = \frac{d}{dt}$ ), à partir de l'équation (14.c), on obtient :

$$\Phi_{r-est}(s) = \frac{M}{(1 + T_r s)} I_{ds}(s) \quad (IV.15)$$

Le flux rotorique ( $\Phi_r$ ) peut être estimé (noter  $\Phi_{r-est}$ ) en utilisant le courant  $i_{ds}$ , qui est une grandeur statorique accessible à partir de la mesure des courants statoriques réels  $i_{ds}$ . Cependant, pour réaliser cette estimation, il est nécessaire de réaliser la transformation de Park, ce qui implique la connaissance de l'angle  $\theta_s$ . La transformation de Park permet de passer du repère triphasé au repère d-q, où le flux rotorique peut être estimé et utilisé dans la commande vectorielle. Ainsi, en utilisant les courants statoriques mesurés et la transformation de Park, il est possible d'estimer le flux rotorique et de l'exploiter dans le contrôle de la machine asynchrone.

### C. Estimation de $w_s$ et de $\theta_s$

La pulsation des courants rotoriques peut être déduite à partir de l'équation (14.d) :

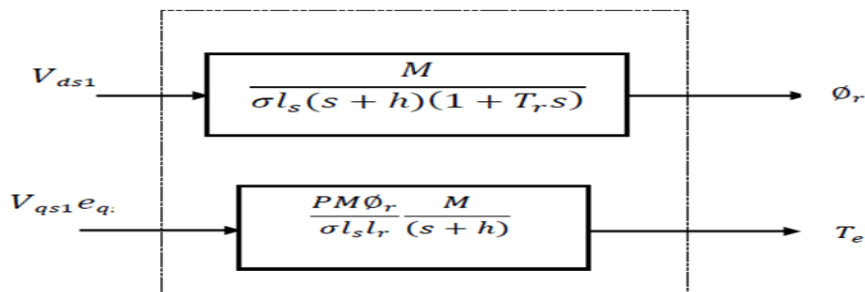
$$w_r = w_s - w = \frac{M i_{qs}}{T_r \Phi_r} \quad (IV.16)$$

Ainsi, la pulsation du champ tournant est calculée de cette manière :

$$w_{s-est} = w_r + w = \frac{M i_{qs}}{T_r \Phi_r} + w \quad (IV.17)$$

On déduit l'angle  $\theta_s$  :

$$\theta_{s-est} = \frac{1}{s} w_{s-est} = \frac{1}{s} \left( \frac{M i_{qs}}{T_r \Phi_r} + w \right) \quad (IV.18)$$



**Figure-37:** Représentation et Modélisation de l'estimateur.

### D. Organisation fonctionnelle de la Commande Vectorielle Directe à Flux

La stratégie de la commande vectorielle directe à flux et couple églables (CVDFRO) est illustrée par le schéma fonctionnel présenté dans la Figure-34. Les équations du système

(IV.14) peuvent être utilisées directement pour mettre en œuvre la commande vectorielle, mais elles présentent un inconvénient majeur :

Les variations de la tension  $V_{ds}$  influencent à la fois le courant  $I_{sd}$  et le courant  $I_{sq}$ , ce qui affecte à la fois le flux et le couple. Il en va de même pour la tension  $V_{qs}$ . Par conséquent, il est nécessaire de réaliser un découplage pour obtenir un contrôle indépendant du flux et du couple.

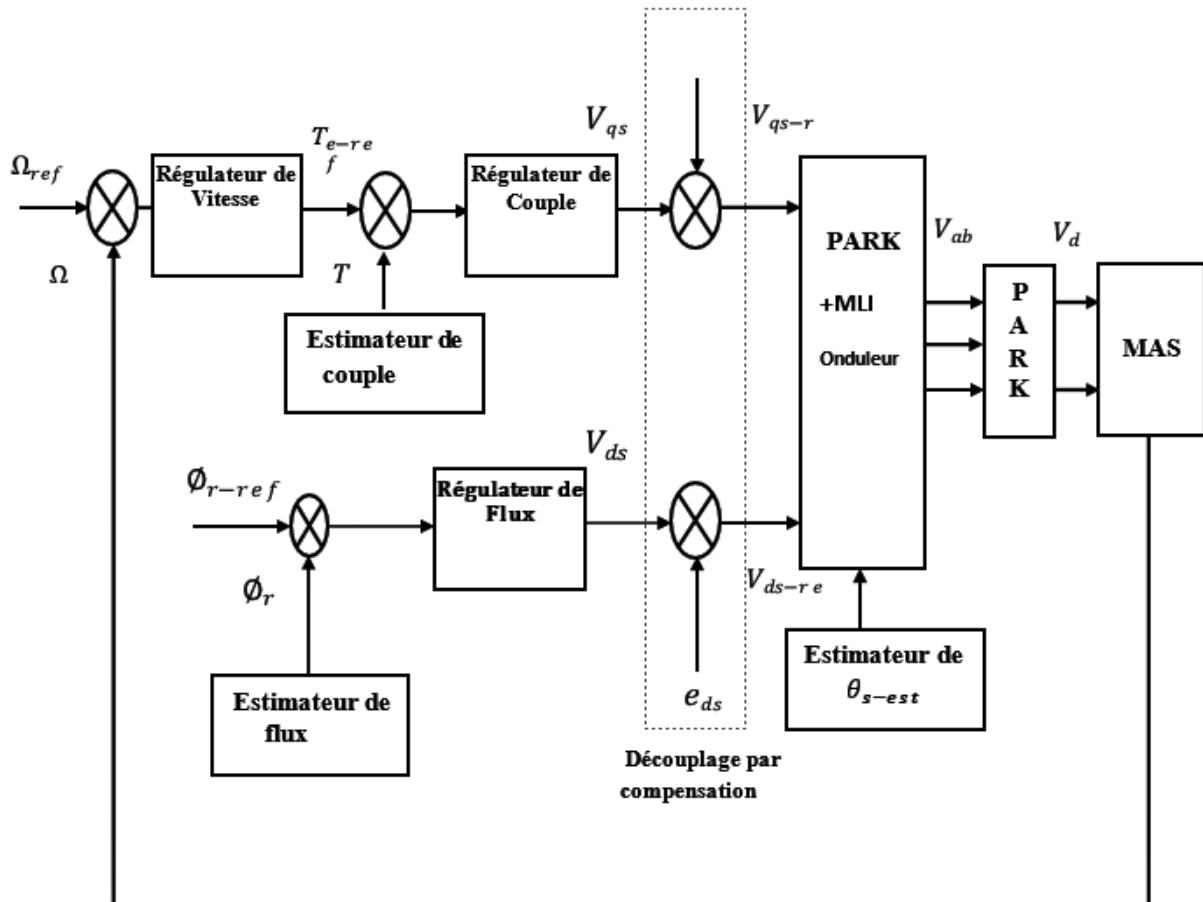


Figure-38 : Schéma fonctionnel de la Commande vectorielle directe de flux orienté.

### E. Découplage par compensation

En utilisant les équations (14.a) et (14.b) et en remplaçant la vitesse angulaire du rotor  $w$  par  $w_s - \frac{M}{T_r} \frac{i_{qs}}{\Phi_r}$ , nous pouvons développer ces équations de la manière suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = \sigma l_s \frac{d}{dt} i_{ds} + \sigma l_s \lambda i_{ds} - \sigma l_s \omega_s i_{qs} - \sigma l_s \frac{k}{T_r} \Phi_r = V_{ds1} + e_{ds} \\ V_{qs} = \sigma l_s \frac{d}{dt} i_{qs} + \sigma l_s \lambda i_{qs} + \sigma l_s \omega_s i_{ds} + \sigma l_s k \omega_s \Phi_r - \sigma l_s k \frac{M}{T_r} i_{qs} = V_{dq1} + e_{qs} \end{cases} \quad (\text{IV.19})$$

Avec :

$$\omega = \omega_s \frac{M}{T_r} \frac{i_{qs}}{\Phi_r} \quad ; \quad T_r = \frac{l_r}{R_r} \quad ; \quad k = \frac{1}{\sigma l_s} \frac{M}{l_r}$$

$$\begin{aligned} \bullet \quad V_{ds1} &= \sigma l_s \frac{d}{dt} i_{ds} + \sigma l_s \lambda i_{ds} \\ \bullet \quad V_{qs1} &= \sigma l_s \frac{d}{dt} i_{qs} + \sigma l_s \lambda i_{qs} \end{aligned} \quad (\text{IV.20})$$

Pour appliquer le principe de découplage, nous introduisons deux nouvelles variables, à savoir  $V_{ds1}$  et  $V_{qs1}$ , qui agissent respectivement uniquement sur  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$ . Les termes de couplage entre l'axe direct et l'axe quadratique sont calculés en remplaçant la constante  $k$  dans les équations suivantes :

$$\begin{cases} e_{ds} = -\sigma l_s \omega_s i_{qs} - \frac{R_r M}{l_r^2} \Phi_r \\ e_{qs} = \sigma l_s \omega_s i_{ds} + \frac{M}{l_r} \omega_s \Phi_r - \frac{M^2}{l_r T_r} \end{cases} \quad (\text{IV.21})$$

○ Alors on définit un nouveau système avec l'utilisant la notation de Laplace pour les courants :

$$\begin{cases} V_{ds1} = \sigma l_s \frac{d}{dt} i_{ds} + (R_s + \frac{M^2}{l_r^2} R_r) i_{ds} \\ V_{qs1} = \sigma l_s \frac{d}{dt} i_{qs} + (R_s + \frac{M^2}{l_r^2} R_r) i_{qs} \end{cases} \quad (\text{IV.22})$$

$$\begin{cases} i_{ds}(s) = \frac{1}{\sigma l_s} \frac{1}{(s+h)} V_{ds1}(s) \\ i_{qs}(s) = \frac{1}{\sigma l_s} \frac{1}{(s+h)} V_{qs1}(s) \end{cases} \quad (\text{IV.21})$$

Tel que :  $\sigma = (1 - \frac{M^2}{l_s l_r})$  et  $\lambda = \frac{1}{\sigma l_s} (R_s + \frac{M^2}{l_r^2} R_r)$

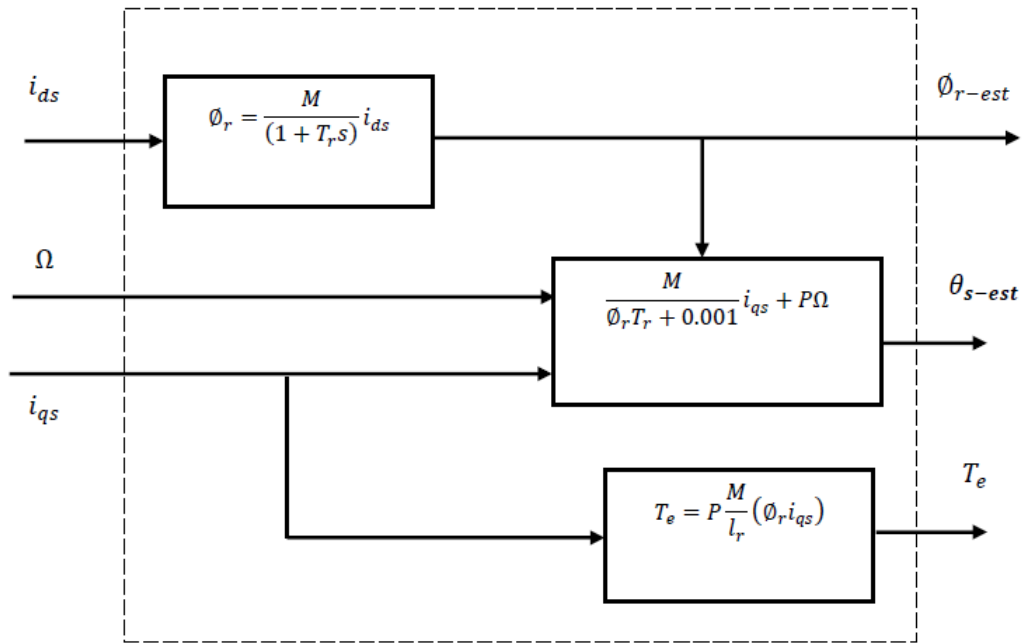


Figure-39 : Commande découplée : Expression de  $\Phi_r$  et  $C_e$ .

### F. Schéma de compensation

Les termes  $(e_{ds}, e_{qs})$  correspondant aux forces électromotrices de compensation, qui doivent être ajoutés à la sortie de chaque régulateur pour reconstituer la vectrice tension modulant appliqué à la machine. Ces forces électromotrices (**f. e. m**) de compensation sont essentielles pour garantir le découplage. En se référant aux équations des tensions, nous pouvons représenter le bloc de compensation de la manière suivante :

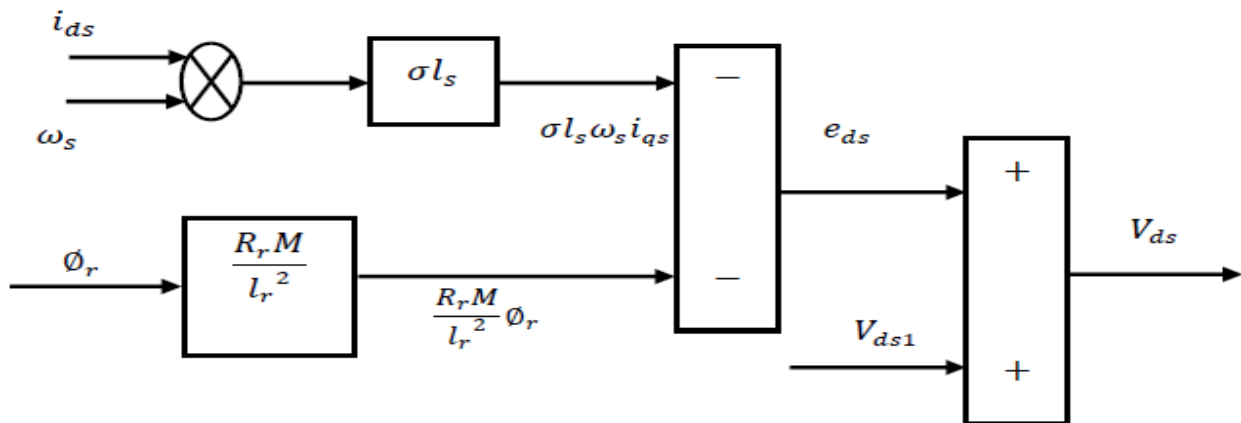


Figure-40 : Bloc de compensation  $e_{sd}$ .

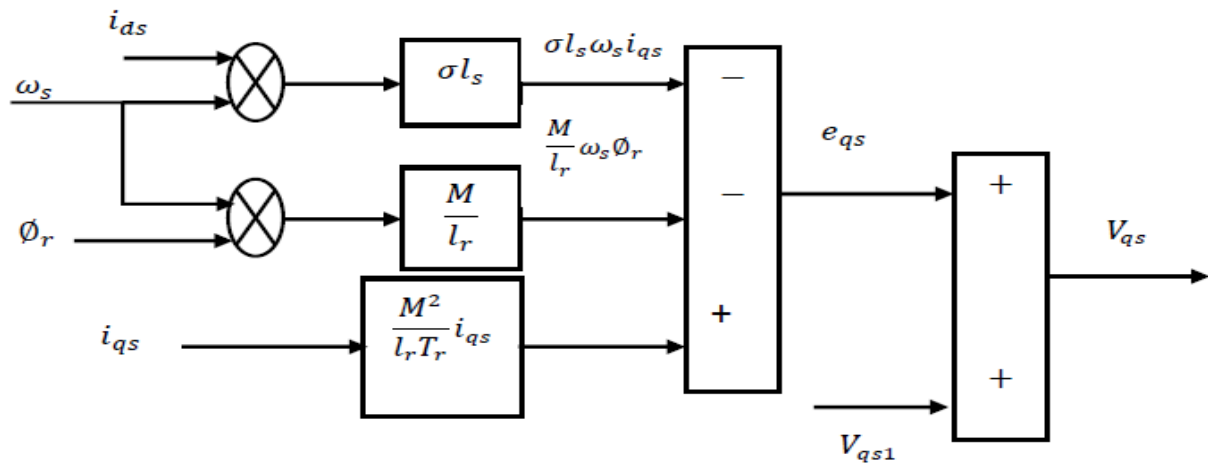


Figure-41 : Bloc de compensation  $e_{sq}$ .

## V.4 Commande MLI de Théorie des techniques de

Au cours des années récentes, diverses techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI) ont été développées. Ces techniques sont utilisées pour moduler la durée des impulsions électriques afin de contrôler et de réguler efficacement les systèmes de puissance.

Effectivement, plusieurs techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI) ont été développées et utilisées dans diverses applications de contrôle. Parmi les techniques couramment utilisées, on retrouve les suivantes [21]:

- MLI Simple.
- MLI Multiple.
- MLI Sinusoïdale modifiée.
- MLI sinusoïdale échantillonnée basée sur la dispersion de la tension triphasée.
- MLI vectorielle basée sur la dispersion de la tension triphasée.
- MLI en contrôle de courant... etc.

### V.4.1 Principe d'association entre un onduleur et une machine asynchrone

L'alimentation directe d'une machine asynchrone depuis le réseau ne permet pas de varier sa vitesse de rotation. Pour remédier à cela, nous utilisons un convertisseur statique capable de modifier la fréquence d'alimentation, ce qui permet de contrôler la vitesse de rotation du moteur.

Grâce aux progrès de l'électronique de puissance et aux techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI), il est maintenant possible de concevoir des convertisseurs statiques



qui contrôlent directement les signaux de commande des interrupteurs. Cela permet d'imposer le profil de tension souhaité aux bornes du moteur.

En utilisant un convertisseur statique et les techniques de modulation de largeur d'impulsion, il est donc possible de contrôler la vitesse de rotation d'une machine asynchrone en faisant varier la fréquence d'alimentation. Cela ouvre de nouvelles possibilités d'application et de performance pour ces types de moteurs [22].

Le schéma de l'ensemble onduleur-machine asynchrone est représenté dans la figure-38 :

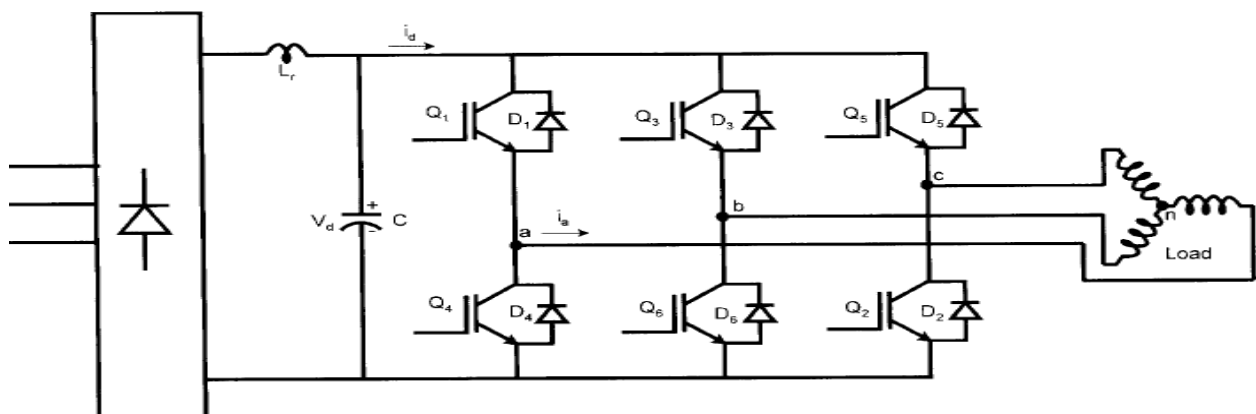


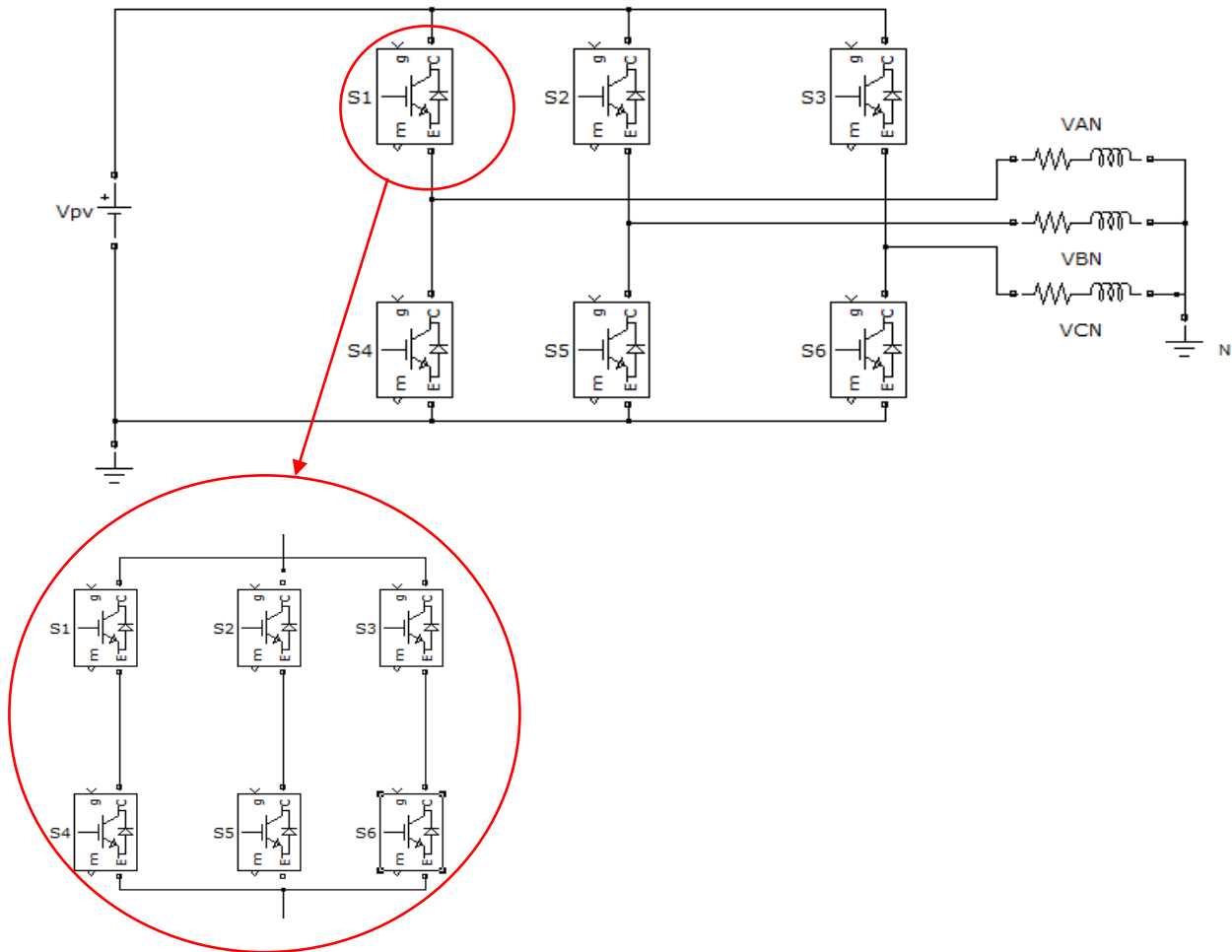
Figure-42 : L'ensemble onduleur-machine asynchrone [23].

#### V.4.2 Modélisation de l'onduleur triphasé

L'onduleur triphasé à deux niveaux, représenté par le circuit de puissance de la figure-39, présente deux types de tensions importantes. D'une part, nous avons les tensions de branche  $V'_{AN}$ ,  $V'_{BN}$  et  $V'_{CN}$ , qui sont mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue  $V_{pv}$ . D'autre part, nous avons les tensions de phase  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$  et  $V_{CN}$ , qui sont mesurées par rapport à un point neutre flottant représentant une charge équilibrée montée en étoile.

À partir de ces tensions simples, il est possible de dériver facilement les tensions composées  $V'_{AN}$ ,  $V'_{BN}$  et  $V'_{CN}$ . Ces informations sont essentielles pour comprendre le fonctionnement et les caractéristiques de l'onduleur triphasé à deux niveaux [20].

Pour notre application, nous allons utiliser un circuit d'onduleur qui se compose traditionnellement de trois bras, un pour chaque phase de l'alimentation électrique triphasée. Chaque bras est constitué de deux IGBT, cependant, chaque IGBT est en réalité composé d'un ensemble de six IGBT, ce qui donne un total de 36 IGBT.



**Figure-43** : Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé.

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé illustré dans la Figure-38, il est important de souligner que les états des interrupteurs appartenant à un même bras sont complémentaires.

Cette propriété permet d'obtenir les tensions de sortie de l'onduleur mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue du côté de l'alimentation en utilisant les états des interrupteurs de la manière suivante [20] :

$$V_{An} = S_1 V_{pv}$$

$$V_{Bn} = S_2 V_{pv} \quad (\text{IV.24})$$

$$V_{Cn} = S_3 V_{pv}$$

Dans le contexte de l'onduleur triphasé à deux niveaux, les interrupteurs des phases A, B et C sont désignés par les états S1, S2 et S3 respectivement [20].

- Les tensions composées sont :

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{AN} + V_{NB} = V_{AB} - V_{BN} = (S_1 - S_2)V_{pv} \\ V_{BC} &= V_{BN} + V_{NC} = V_{BC} - V_{CN} = (S_2 - S_3)V_{pv} \\ V_{CA} &= V_{CN} + V_{NA} = V_{CA} - V_{AN} = (S_3 - S_1)V_{pv} \end{aligned} \quad (IV.25)$$

- On peut écrire l'équation (IV.24) sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (IV.26)$$

- Les tensions simples sont :

$$\begin{aligned} V_{AN} &= \frac{2}{3}V_{AN} - \frac{1}{3}(V_{BN} + V_{CN}) \\ V_{BN} &= \frac{2}{3}V_{BN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{CN}) \\ V_{CN} &= \frac{2}{3}V_{CN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{BN}) \end{aligned} \quad (IV.27)$$

Donc :

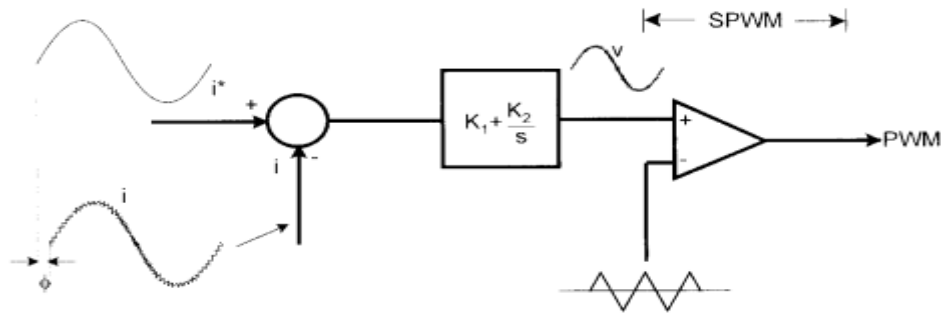
$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{V_{pv}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (IV.28)$$

### V.4.3 Contrôle courant par MLI

Le contrôle du courant dans un système d'entraînement de machine est crucial pour influencer le flux et le couple générés. Les entraînements hauts performance nécessitent un contrôle précis du courant. Un onduleur alimenté en tension avec un MLI de contrôle de tension utilise une boucle de courant de retour pour réguler le courant de la machine, agissant ainsi comme une source de courant programmable.

La Figure-39 illustre un schéma de commande de courant instantané utilise une MLI de tension sinusoïdale dans la boucle interne, convertissant l'erreur de la boucle de commande

de courant en commande de tension sinusoïdale à l'aide d'un régulateur PI. Pour un onduleur triphasé, trois contrôleurs similaires sont utilisés. Cependant, ce contrôle présente des problèmes tels qu'un retard de phase et une erreur de magnitude croissants avec la fréquence, ainsi qu'une ondulation de la commande de tension sinusoïdale, pouvant entraîner des problèmes de passage à zéro multiple. Ces problèmes peuvent être résolus avec un contrôleur de courant synchrone [23].



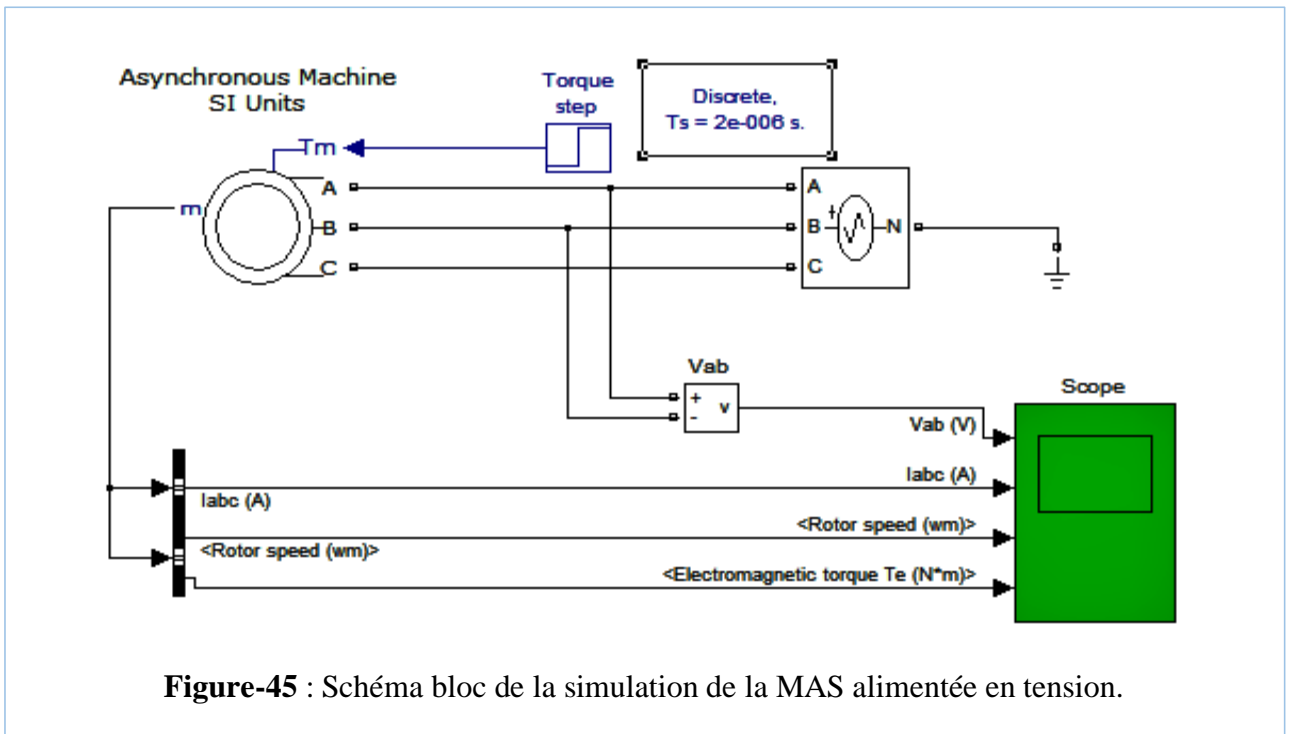
**Figure-44** : diagramme de blocs de contrôle pour le courant instantané SPWM (ou SMLI) [23].

## V.5 Simulations numériques de différents fonctionnements du moteur asynchrone :

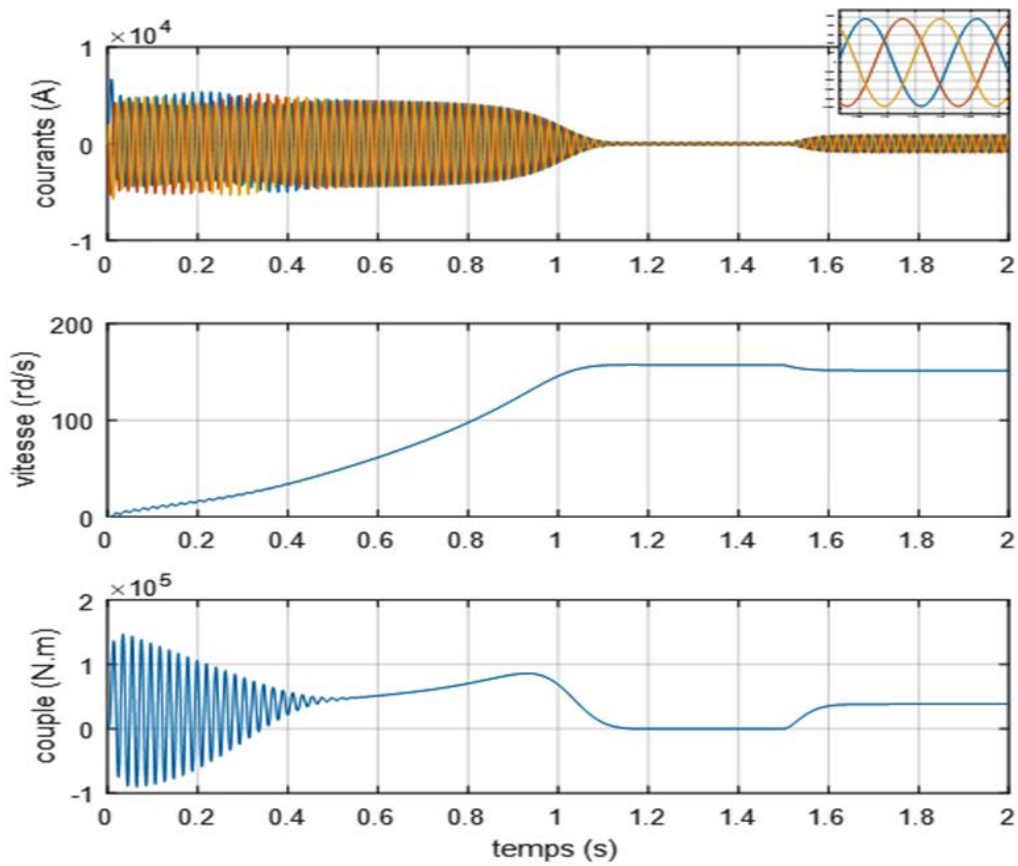
### V.5.1 Simulation de moteur asynchrone-alimentation directe

La simulation a été réalisée dans l'environnement Matlab/Simulink, en utilisant les paramètres de la MAS mentionnés dans l'annexe A.

Cette partie expose la simulation numérique d'un moteur asynchrone triphasé alimentée directement par un réseau standard. La machine est alimentée par une source de tension sinusoïdale, illustrée dans la figure-40 ci-dessous.



### A. Résultats de simulation



**Figure-46** : Résultats de simulation de la MAS à vide, suivi d'une application d'un couple décharge ( $C_r=0.4 \times 10^5$  [N.m]) à  $t=01.5$  [s].

## B. Interprétations des résultats obtenus

L'interprétation des résultats obtenus de la simulation d'une alimentation directe d'un moteur asynchrone se décompose en plusieurs étapes.

Dans une première étape, nous commençons par simuler numériquement le démarrage à vide de la machine asynchrone, alimentée directement par un réseau standard de 5.5 [kV] à une fréquence de 50 [Hz]. En examinant les courbes de la figure-41, nous pouvons observer que :

- dans les premiers instants du démarrage, le courant statorique présente des oscillations successives. Cependant, ce courant disparaît rapidement en régime permanent, restait placé à une forme sinusoïdale d'amplitude constante.
- En outre, nous remarquons que le couple présente une composante pulsante significative. Après la disparition du régime transitoire, le couple tend automatiquement vers zéro.
- La montée en vitesse du moteur est quasi linéaire au début du démarrage, puis se stabilise en régime permanent à une vitesse proche de celle du synchronisme, soit 157 [rad/s].

Dans la deuxième étape, nous ajoutons une charge (couple résistant  $C_r = 0,4 \times 10^5$  N.m) appliquée à l'arbre du moteur à l'instant  $t = 1.5$  [s]. Lors de l'application de cette charge :

- le couple électromagnétique du moteur a rejoint sa valeur de référence pour compenser cette perturbation, avec une réponse presque instantanée, avant de se stabiliser à la valeur du couple résistant.
- Cependant, une diminution permanente de la vitesse apparaît, étant donné l'absence d'une boucle de régulation de vitesse.
- Le courant statorique évolue en fonction de la charge appliquée à l'arbre du moteur.

### V.5.2 Simulation de l'association Moteur asynchrone-FOC :

La simulation a été réalisée dans l'environnement Matlab/Simulink, intitulé "vector control of AC Motor Drive", en utilisant les paramètres de la MAS mentionnés dans l'annexe A.

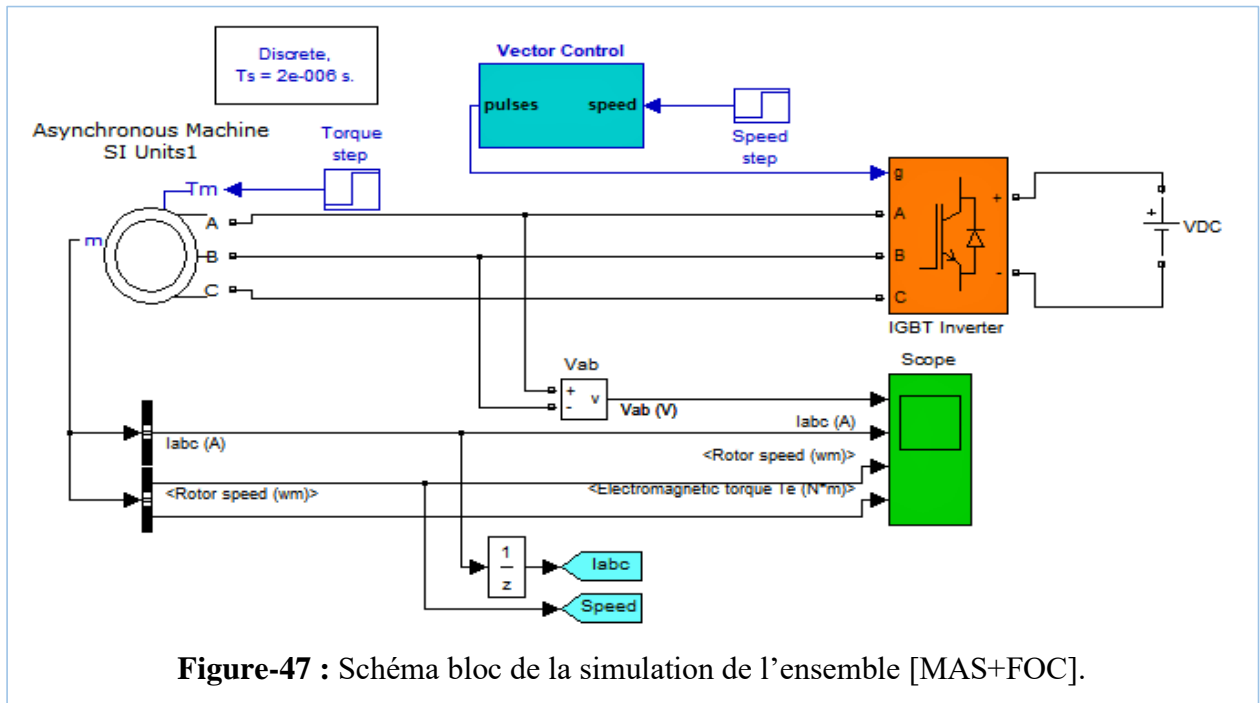


Figure-47 : Schéma bloc de la simulation de l'ensemble [MAS+FOC].

### A. Résultats de simulation

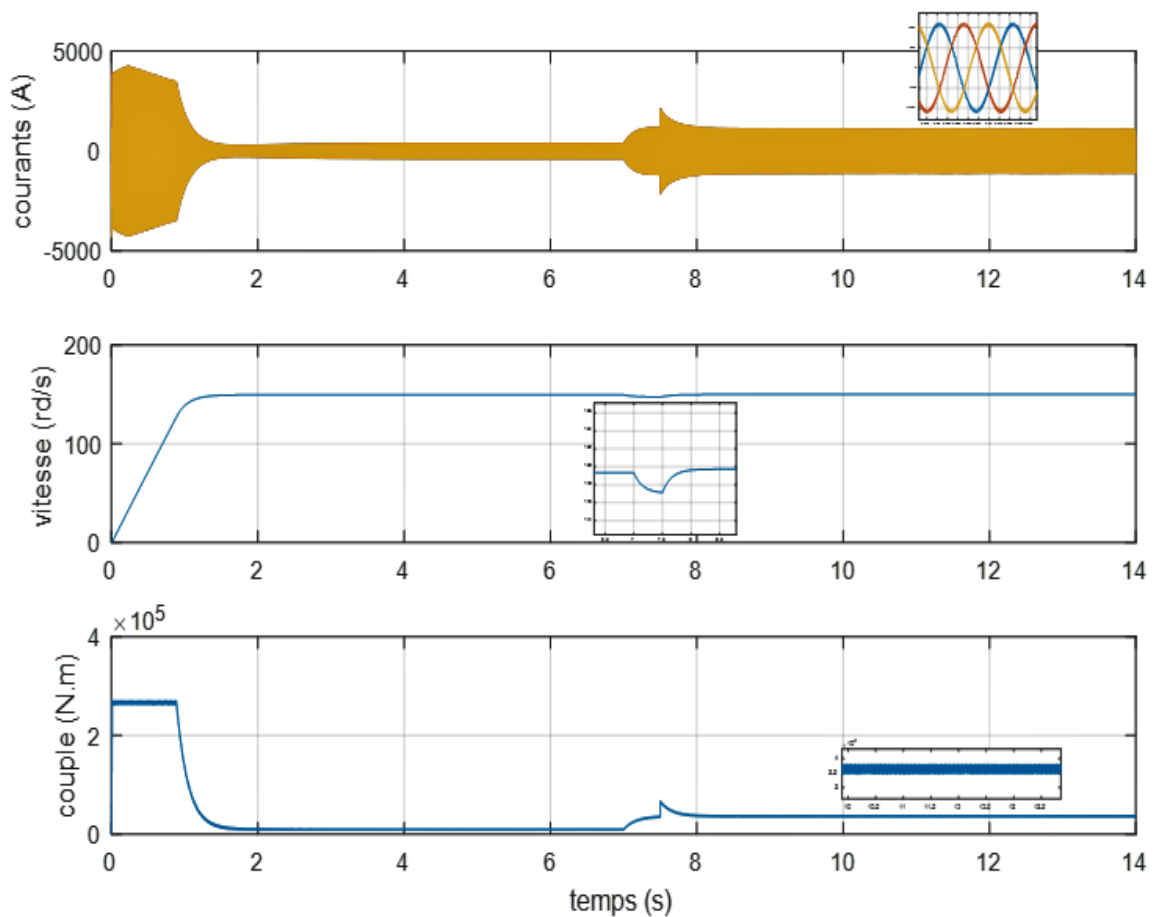


Figure-48 : Résultats de simulation du procédé [MAS+FOC] à vide, suivi d'une application d'une charge ( $C_r=0.4 \times 10^5$  [N.m]) à  $t=7$  [s].

## B. Interprétations des résultats obtenus

L'interprétation des résultats obtenus de la simulation d'une alimentation d'un moteur asynchrone avec une commande vectoriel (FOC) se analysé comme suite :

- Les résultats de simulation ont démontré que la vitesse du moteur asynchrone convient parfaitement à sa référence grâce à l'action sur le régulateur. Cela signifie que le moteur permet de maintenir une vitesse constante malgré les variations de charge. De plus, l'erreur de poursuite lors de l'application d'une charge est faible, ce qui indique un bon contrôle de la vitesse.
- En ce qui concerne le couple du moteur, les résultats de simulation ont démontré une grande valeur de couple au démarrage, ce qui est attendu. De plus, le couple convient parfaitement à sa référence, bien que de petites oscillations puissent être présentées. Cependant, ces oscillations se rétablissent rapidement, ce qui indique une bonne stabilité du moteur.
- L'analyse des courants de démarrage confirme également un bon contrôle dans ce cas de simulation. Les courants de démarrage sont bien maîtrisés, ce qui est crucial pour éviter des surcharges excessives et protéger le moteur ainsi que le système d'alimentation.
- Il convient également de noter la robustesse de la commande vectorielle directe (CVD) du moteur face à de faibles variations de vitesse. Les résultats montrent que la CVD est capable de maintenir le moteur dans des conditions stables même en présence de perturbation externes légères.



## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence l'importance de la technique de commande vectorielle pour l'analyse, l'optimisation et la validation des performances d'un moteur asynchrone.

Elle permet une étude détaillée du comportement du moteur dans différentes conditions, en utilisant des modèles théoriques et des équations pour estimer les paramètres. La commande vectorielle offre une régulation précise de la vitesse et du couple, avec la modulation MLI de bloc pour générer les signaux de commande. La simulation renvoie les réponses transitoires, identifie les limitations et permet d'explorer différentes configurations et paramètres pour optimiser les performances.

L'utilisation de la commande vectorielle avec orientation du flux (FOC) permet un contrôle indépendant du flux et du couple électromagnétique, similaire à une machine à courant continu à excitation indépendante. Les méthodes de commande vectorielle à flux rotorique dirigé (DFOC et IDFOC) permettent des approches alternatives pour contrôler le flux rotorique.

Cette technique de commande vectorielle est une ressource précieuse pour les ingénieurs et chercheurs, leur offrant la possibilité d'améliorer les performances des moteurs asynchrones et de concevoir de nouvelles solutions adaptées à des applications spécifiques.

# Conclusion Générale

---

## Conclusion Générale

La présente étude a exploré plusieurs aspects importants des entraînements industriels à vitesse variable, en se concentrant sur le variateur de vitesse industriel SINAMICS GH 150 et son application dans la régulation de la vitesse d'un entraînement électrique SINAMICS GH. De plus, nous avons examiné la simulation vectorielle et numérique des différents modes de fonctionnement du moteur asynchrone.

Tout d'abord nous avons entamé le premier chapitre par examiner les généralités sur les entraînements industriels à vitesse variable. Nous avons exploré les principes de base de ces systèmes, en mettant l'accent sur leur importance dans divers secteurs industriels. Nous avons également souligné les avantages potentiels de l'utilisation de tels entraînements, tels que l'efficacité énergétique, la flexibilité des processus et la réduction des coûts de maintenance.

Le second chapitre a été consacré à l'étude approfondie du variateur de vitesse industriel SINAMICS GH 150. Nous avons examiné ses caractéristiques techniques, sa structure interne et ses capacités de contrôle avancées. Cette étude approfondie nous a permis de comprendre comment ce variateur de vitesse peut être utilisé pour répondre aux besoins spécifiques des systèmes industriels complexes.

Dans le troisième chapitre, nous avons exploré l'application concrète du variateur de vitesse SINAMICS GH 150 dans le cadre de l'entraînement électrique. Nous avons examiné les étapes d'installation, de configuration et de mise en service de cet équipement, tout en mettant en évidence les considérations importantes pour garantir un fonctionnement efficace et fiable. Cette application pratique nous permet d'appréhender les défis réels liés à l'utilisation des variateurs de vitesse dans un contexte industriel.

Enfin, et pour finir ce mémoire, nous avons évoqué la simulation numérique de différents modes de fonctionnement du moteur asynchrone. Nous avons étudié les techniques de modélisation et de simulation utilisées pour analyser les performances du moteur dans diverses conditions de charge et de vitesse. Ces simulations nous ont permis d'optimiser les réglages du variateur de vitesse et d'obtenir une meilleure compréhension des caractéristiques du moteur asynchrone.

# BEBLIOGRAPHIE

## BEBLIOGRAPHIE

- [1] : Bernard de FORNEL « Alimentation des machines asynchrones », article publié en 10 juin 1990, révisé en 2004.
- [2] : Article sur le site euro-petrole, «Pétrole Algérie: Approbation par l'Agence ALNAFT du plan de développement du Champ Menzel Ledjmet - Est - Bassin de Berkine»  
<https://www.euro-petrole.com/petrole-algerie-approbation-par-lagence-alnaft-du-plan-de-developpement-du-champ-menzel-ledjmet-est-bassin-de-berkine--n-f-1004>.
- [3] : ENI, «ENI development and engineering milano data center».
- [4] : Manuel de formation CRO processus, projet MLE, Bloc 405B, Algerie, SH-FCP, 2009.
- [5] : Article sur le site connaissance des energies, «Fiches pédagogiques d'ENI»  
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/eni>.
- [6] : Jean BONAL et Guy SEGUIER « Entraînements électriques à vitesse variable: Rappels d'électrotechnique et de mécanique, les procédés de variation de vitesse », Livre, Vol. 1 Broché – 1 novembre 1996.
- [7] : Jean BONAL « Entraînement à vitesse variable. Des machines à compression de fluide » Scheider. 2008 Carlos canudas de wit "" Modélisation contrôle vectoriel et DTC", Hermes.2000.
- [8] : Siemens AG « SINAMICS PARFAITE HARMONIE GH150 », Documentation Technique, © siemens 1996-2023, sur site web :  
<https://new.siemens.com/global/en/products/drives/sinamics/medium-voltage-converters/sinamics-perfect-harmony-gh150.html>.
- [9] : Siemens AG «Drives for every demand », Article No.: PDL-D-Y10038-02-760, Dispo 41505, ©Siemens 2021, sur le site :  
<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:aa2fc755-29d5-4c14-85f6-c6949a83065b/sinamics-drivesforeverydemand-brochure.pdf>.
- [10] : Siemens AG «SINAMICS PERFECT HARMONY GH150 », type 6SL38253AE412AA1-Z, 28.10.2019 12:31; V10.00, un documentaire sur le site :

## BEBLIOGRAPHIE

<https://new.siemens.com/global/en/products/drives/sinamics/medium-voltage-converters/sinamics-perfect-harmony-gh150.html>.

[11] : Siemens AG, «SINAMICS PERFECT HARMONY GH150 », Article No.: PDLDB10033-01-7600, printed in Germany, dispo 21503, WS 0117.PDF, 2017, sur le site web : <https://www.lda-portal.siemens.com/staticmedia/109746425-sinamics-perfect-harmony-gh150-cellbased-drive-brochure-en-2017.pdf>.

[12] : Personnel médical « Les sociétés pétrolières et gazières en amont sont confrontées à la situation difficile de leur portefeuille », 17 Avril 2018, sur site web « <https://moderndiplomacy.eu/2018/04/17/upstream-oil-gas-companies-face-portfolio-predicament/> ».

[13] : « Industrial Power Generation Solutions », sur le site web : <https://pixabay.com/images/search/power%20plant/>.

[14] : « Midstream Oil and Gas », sur le site web : <https://www.vinsonprocess.com/industries/oil-gas/midstream-oil-and-gas/>.

[15] : « Environmental Solutions for the Downstream Oil & Gas Industry », sur le site web : <https://www.monroenvironmental.com/industries-served/downstream-oil-gas/>.

[16] : Siemens AG «SINAMICS Perfect Harmony GH150 », Order No. LABR-04300-0322 ; ©2022, Siemens Industry, Inc, sur le site web : [https://www.ldaportal.siemens.com/staticmedia/GH150\\_Brochure\\_NEW\\_TEMPLATE\\_MARCH\\_2022.pdf](https://www.ldaportal.siemens.com/staticmedia/GH150_Brochure_NEW_TEMPLATE_MARCH_2022.pdf).

[17] : Siemens AG, « VSIDS functional and technical description », GE Oil & Gas /CAFC OIL, document de projet: CAFC OIL, Rev 01, 12.01.2015.

[18] : « MCset 17.5 kV air insulated switchboard », catalogue de Schneider Electric, page 08, 26/09/07 13:31:43 6/09/07 13:31:43.

[19] : Siemens AG, «C.02 Step-Down Transformer General Arrangement Drawing » document de projet : CAFC OIL, Rev 01, 12.01.2015. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:aa2fc755-29d5-4c14-85f6-c6949a83065b/sinamics-drivesforeverydemand-brochure.pdf>.

## BEBLIOGRAPHIE

[20] : Tarek GALLAH, Mohamed Faouzi MIMOUNI, Faouzi MSAHLI, « Commande vectorielle d'un moteur asynchrone par orientation de flux rotorique », École Nationale d'ingénieurs de Monastir, Route de Kairouan, 5019 Monastir, Tunisie, Conférence : JTEA'2006, January 2007.

[21] : Kamel MERABET, «Commande MLI d'un onduleur triphasé basée sur la dispersion de la tension triphasée », Mémoire de Magister, Université du Québec à Trois-Rivières, décembre 2011

[22] : YAHY Abdenour, « Contribution à la Commande robuste synergétique et à structures variables floue d'un moteur asynchrone à cage », Mémoire de Magister, Université des Science et de la Technologie Houari Boumediene, 2011.

[23] : Bimal K. Bose « Modern Power electronics and AC drives éditeur », livre, ISBN : 9780130167439,12 octobre 2002.

**Données spécifiques à l'installation du moteur asynchrone**

• Puissance nominale	$P_n = 6 \text{ MW}$
• Tension nominale	$V_n = 5.5 \text{ kV}$
• Tension continu	$V_{pv} = 6.8 \text{ kV}$
• Courant nominale	$I_n = 660 \text{ A}$
• Résistance statorique	$R_s = 0.096 \Omega$
• Résistance rotorique	$R_r = 0.168 \Omega$
• Inductance statorique	$L_s = 1.6 \text{ mH}$
• Inductance rotorique	$L_r = 1.4 \text{ mH}$
• Inductance mutuelle	$L_m = 108.2 \text{ mH}$
• Moment d'inertie	$J = 330 \text{ Kg. m}^2$
• Coefficient de frottement	$f = 0.71 \text{ N.s/rad}$
• Fréquence nominale	$f = 50 \text{ Hz}$
• Nombre de paires de pôles	$P = 2$
• Couple électromécanique	$C_\epsilon = 3500 \text{ N.m}$
• Constante de temps rotorique	$T_r = 0.668 \text{ s}$



## Données spécifiques à l'installation du SINAMICS GH150

Nom du projet : ..... CAFC  
Année de construction ..... 2015

### Données techniques de la cabine de contrôle en boucle ouverte et en boucle fermée

#### Données Electriques

##### Alimentation en tension

- Tension d'alimentation de l'alimentation des auxiliaires 1 ..... 3AC 400V, 50Hz
  - Consommation de courant ..... Californie. 10A
  - Tension d'alimentation pour l'alimentation des auxiliaires 2 ..... 400V AC, 50Hz
  - Consommation de courant ..... Californie. 20A  
(utilisation courte durée 20s)
  - Tension d'alimentation pour l'alimentation interne de l'armoire ..... 230V AC, 50Hz UPS
  - Consommation de courant ..... 4A
  - Tension d'alimentation de la cellule éclairage, prises de courant ..... 230V AC, 50Hz
  - Consommation de courant ..... max. 10A
- Perte de puissance de la cabine de commande en boucle ouverte et en boucle fermée... env. 400 W

#### Données Générales

Conception de l'unité (conforme à DIN EN 61800-5-1 (IEC 61800-5-1)) référé aux normes

- DIN EN 61800-3 / VDE 0160 T103 (IEC 61800-3)
- DIN EN 61800-4 / VDE 0160 T104 (IEC 61800-4)
- DIN EN 61800-5-1 / VDE 0160 T105 (IEC 61800-5-1)
- DIN EN 50178 / VDE 0160 (IEC 62103)
- DIN EN 60204-11 / VDE 0113 T11 (IEC 60204-11)

- Isolation ..... DIN en 61800-5- 1
- Degré de protection..... IP43 selon IEC 60529
- Degré de protection interne (avec portes ouvertes)..... IP20 (protection contre le contact direct)
- Niveau de pollution ..... 2 (pas de pollution conductrice)
- Dimensions (w ´ d ´ h) (sans palette et pattes) ..... 1232 mm × 685 mm × 2485 mm
- Lester ..... 400 kg
- finition de peinture ..... RAL 7035

#### Refroidissement

- Température du fluide de refroidissement (air)
- minimum ..... + 5 °C
- maximum ..... + 40 °C (i)



## ANNEXE B

### Conditions ambiantes autorisées

- Écart de température.
- Pour un fonctionnement normal ..... + 5 ° C ... + 40 ° C (i)
- pour le transport et le stockage ..... - 25 ° C ... + 70 ° C
- Humidité aérienne relative
- Pour un fonctionnement normal ..... 5% à 85% de condensation non autorisée
- ..... Classe 3K3 acc. à la IEC 60721-3-3
- pour le transport ..... 5% à 75%
- ..... Classe 2K2 acc. à la IEC 60721-3-2
- pour le stockage ..... 5% à 95% seulement une légère condensation autorisée
- ..... Avant la mise en service, le convertisseur ..... doit être
- ..... complètement sec
- ..... Classe 1K3 selon. selon CEI 60721-3-1
- Altitude d'installation ..... ≤ 1000 m au-dessus du niveau de la mer (Capacité de charge 100%)

### Données techniques de la section d'alimentation

MLFB (Machine-readable product designation) ..... 6SL3825-3AF37-0AA0-Z  
A20+B08+B45+B56+D76+D77+F73+G24+G51+G61+G62+G63+K20+K90+L32+L45+L55+L66+M61+  
Q84+T04+T58+U11+U41+V09+W14+X30(Premag) +Y10

### Données Electriques

#### Entrée d'unité d'alimentation (côté de la ligne)

- Taper ..... DFE
- Nombre d'impulsions ..... 24 impulsions
- Nombre de semi-conducteurs ..... n = 24
- Type de semi-conducteur ..... Diode
- Alimentation ..... 4 x 3AC
- Tension d'entrée nominale ..... 4 x 1700 V
- Tolérance de tension d'entrée ..... ±10%
- Fréquence d'entrée nominale ..... 50 - 60 Hz
- Courant d'entrée nominal ..... 4 x 531 A

#### Prémagnétisation :

- Transformateur d'approvisionnement en groupe vectoriel ..... yny6
- Transformateur d'alimentation de tension primaire ..... 400 V
- Transformateur d'alimentation de tension secondaire ..... 1700 V
- Pouvoir nominal ..... 12 KVA

#### Sortie d'unité d'alimentation (côté moteur)

- Tape ..... M2C
- Nombre de modules ..... n = 36
- Type de semi-conducteur ..... IGBT
- Alimentation ..... 3AC
- Tension de sortie gamme ..... 0 – 5500 V
- Plage de fréquence de sortie ..... 0 – 50 Hz

## ANNEXE B

- Courant de sortie nominal .....	660 A
Alimentation nominale .....	6300 KVA
Pertes de puissance .....	100 kW
Cos phi .....	0,90
Efficacité (à l'opération nominale) $\eta_{nominal}$ .....	98,23%
Classe de service / mode de fonctionnement .....	I, continuellement
Type de charge .....	IM, moteur à induction

### ❖ Autres données techniques

- Redondance .....	non
- Mode de fonctionnement .....	fonctionnement
du moteur avec	
.....	caractéristiques
de charge du compresseur	
- Courbes de charge (avec/ sans suppression de champ) .....	Reportez-vous à
SOS0451207_001_A	
- Minimum temps d'accélération .....	35 secondes
- Facteur de surcharge maximum .....	1
- Surcharge admissible temps par 10min.....	n.a.
- Puissance nominale de l'arbre du moteur $P_{M\ nominal}$ .....	5.482 MW
- Rendement du moteur à charge nominale $\eta_M$ .....	97,3 %
- Réactance minimale de l'alimentation d'entrée (pour Q Factor > 40) UKN .....	8%
- Ligne côté harmonique de courant (THD en%, à 8% d'alimentation réactance) .....	1,26
-.... Courant court-circuit à entrer maximale autorisée .....	12.5 ka pour
chaque entrée 3 phases	
- Section d'alimentation Pertes de puissance .....	96 kW
(Pendant l'opération nominale)	
- Pertes contre l'eau .....	91 kW
- Pertes à l'air à 40 ° C Température ambiante .....	5 kW

### Auxiliaires

- Tension d'alimentation pour chauffage anti-condensation .....	230V AC, 50Hz
- Consommation de courant .....	Max. 5A
- Tension d'alimentation pour le préchargement et les ventilateurs .....	400v AC, 50Hz
- Consommation de courant .....	Max. 10A (30
A pour 30 s usage de temps)	
- Tension d'alimentation pour la prémagnétisation .....	400V AC, 50Hz

## ANNEXE B

- Consommation de courant ..... Californie. 20A (utilisation de courte durée des années 20)

### Côté de la ligne du câble d'alimentation

Désignation..... Nexans Cu / xlpe / PVC / AWA / PVC  
Taper ..... Système de câbles XLPE (6 / 10kV)  
Section transversale nominale du conducteur ..... 185 mm<sup>2</sup> (max. 240 mm<sup>2</sup>)  
Diamètre extérieur du conducteur ..... 5,85 mm (max.35 mm)  
Tension ..... 1,7 KV  
Capacité de fonctionnement par unité de longueur ..... 0,4 µF / km (max .0.4 µF / km)  
Nombre de câbles parallèles par phase de chaque système ..... 4  
Longueur du câble d'alimentation ..... 30

### Côté moteur du câble d'alimentation

Désignation..... Nexans Cu / xlpe / PVC / AWA / PVC  
Taper ..... Système de câbles XLPE (6 / 10kV)  
Section transversale nominale du conducteur ..... 185 mm<sup>2</sup> (max. 240 mm<sup>2</sup>)  
Diamètre extérieur du conducteur ..... 15,85 mm (max.35 mm)  
Tension ..... 5,5 kV  
Capacité de fonctionnement par unité de longueur ..... 0,4 µF / km (max .0,4 µF / km)  
Nombre de câbles parallèles par phase ..... 4  
Longueur du câble d'alimentation ..... 240m

### ❖ Données Générales

Conception de l'unité (conforme à DIN EN 61800-5-1 (IEC 61800-5-1)) référé aux normes

DIN EN 61800-3 / VDE 0160 T103 (IEC 61800-3)

DIN EN 61800-4 / VDE 0160 T104 (IEC 61800-4)

DIN EN 61800-5-1 / VDE 0160 T105 (IEC 61800-5-1)

DIN EN 50178 / VDE 0160 (IEC 62103)

DIN EN 60204-11 / VDE 0113 T11 (IEC 60204-11)

## ANNEXE B

- Isolation ..... DIN en 61800-5-1
- Degré de protection..... IP43 selon la CEI 60529
- Degré de protection interne (avec portes ouvertes) ..... IP00 (armoire haute tension)
- Niveau de pollution ..... 2 (pas de pollution conductrice)
- Niveau de bruit .....  $\leq 79$  dB (A)

### Conditions ambiantes admissibles

- Plage de température
  - pour un fonctionnement normal .....  $+ 5$  °C ...  $+ 40$  °C (ii)
    - pour le transport et le stockage .....  $- 25$  °C ...  $+70$  °C
  - Humidité relative de l'air
    - pour un fonctionnement normal ..... 5% à 85% de condensation non autorisée
      - ..... Classe 3K3 selon selon IEC 60721-3-3
      - pour le transport ..... 5% à 75%
        - ..... Classe 2K2 selon selon IEC 60721-3-2
        - pour le stockage ..... 5% à 95% seulement une légère condensation autorisée
          - ..... avant la mise en service, le convertisseur doit être
          - ..... complètement sec
          - ..... Classe 1K3 selon selon CEI 60721-3-1
  - Altitude d'installation .....  $\leq 1000$  m au-dessus du niveau de la mer (capacité de charge 100%)

### Dimensions

Voir Diagramme de dimension

- Lester .....environ. 5600 kg
- finition de peinture ..... Ral 7035
- Unité de transport 1 (côté ligne) :
  - Dimensions (W× D × H) (sans palette et pattes) ..... 1810 mm × 1275 mm × 2830 mm
- Unité de transport 2 (côté moteur) :
  - Dimensions (W × D × H) (sans palette et pattes) ..... 2910 mm × 1275 mm × 2830 mm

**Refroidissement** ..... eau froide

## ANNEXE B

### - circuit d'eau désionisé

- Température d'entrée (au convertisseur)	
- minimum	+ 5°C
- Maximum	+ 45°C
- Température de sortie (à l'unité de refroidissement du convertisseur)	
- à la charge nominale	max. + 50°C
- Pression d'entrée (à l'entrée du convertisseur)	
- Bar maximum	5.0 bar
- Coup de pression (entrée - sortie)	
- Aux flux nominal	≤ 4 bar
- flux nominal d'env. 210 l/min	
- perte de puissance maximale à dissiper	91 kW
- Conductivité	
- minimum (valeurs nominales)	0,2 µS/cm
- Maximum (valeurs nominales)	0,6 µS/ cm

### - Échangeur d'ions

- Plage de contrôle	
- valeur inférieure	0,2
µS/cm	
- valeur supérieure1	0,7
µS/cm (échangeur d'ions actif)	
- valeur supérieure2	0,9
µS/cm (avertissement échangeur d'ions à changer)	
- limite de déclenchement	1,2
µS/cm (déclenchement)	

## ANNEXE B

Les versions suivantes ont été publiées jusqu'à présent :

Version	Numéro d'article interne
A0	A5E35558862A DC-JD AA
AA	
AB	

---

(i) Le VFD peut fonctionner à 45 ° C (température de l'air) en cas de défaut de CVC (défaillance de 24 heures seulement / max 3 jours par an) avec l'option A20 pour l'armoire de commande.

(ii) Le VFD peut fonctionner à 45 ° C (température de l'air) en cas de défaut de CVC (défaillance de 24 heures seulement / max 3 jours par an) avec l'option A20 pour l'armoire de commande.

(SINAMICS is a trademark of Siemens,  
Siemens AG A5E35558862A DC-JD AB,  
SINAMICS GH150 Plant-specific data)