

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الألية و الالكتروتقني  
Département d'Automatique et électrotechnique



## Mémoire de Master

Mention Electrotechnique

Spécialité Machines Electrique

Présenté par

**Keroui Walaaeddine**

**Remini Sid ahmed**

---

# Étude et Comparaison des Performances des Moteurs à Courant Continu et à Courant Alternatif pour une Application dans l'Industrie Cimentière

---

Promoteur : P. Bradai Rafik

Co-promoteur : Kerkar Mohammed

Année Universitaire 2023-2024



## Remerciements

---

Je voudrais avant tout remercier Allah le Tout-Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a données durant toutes ces longues années.

Mes remerciements s'adressent également à mon enseignante et promoteur Mr. BRADAI Rafik , pour la qualité de son enseignement, ses conseils et sa disponibilité durant ma préparation de ce mémoire ainsi que son intérêt incontestable qu'elle porte à tous les étudiants.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon Co-promoteur Mr. KARKAR Mohammed pour m'avoir encadré durant mon projet de fin d'études et m'avoir conseillé tout le long de mon stage.

J'exprime aussi ma sincère reconnaissance au personnel de SCMI, en citant Mr. DJANATI et Mme. LAHCINE et Mr. MANSOUR et Mr. SOFIAN et toutes les personnes qui ont contribué à ce travail.

Mes remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail, en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

A la fin, je voudrai remercier tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant mes études supérieures.

*KerouiWalaeddine . Remini Sid ahmed*

*Je tiens à dédier ce mémoire*

*À mon cher père que j'aurais aimé qu'il soit parmi nous, que Dieu l'accueille dans son vaste paradis.*

*À ma chère Maman qui m'a soutenu de toutes les manières possibles et m'a encouragé durant ces années d'études.*

*À mes sœurs, mes frères qui ont toujours cru en moi et m'ont poussé à faire mon possible pour réussir.*

*À tous mes amis et mes collègues sans exception pour leur soutien infini et leurs encouragements.*

*A toute personne qui occupe une place dans mon cœur.*

**Keroui Walaaeddine**

*Je tiens à dédier ce mémoire*

*À mon cher père que j'aurais aimé qu'il soit parmi nous, que Dieu l'accueille dans son vaste paradis.*

*À ma chère Maman qui m'a soutenu de toutes les manières possibles et m'a encouragé durant ces années d'études.*

*À mes sœurs, mes frères qui ont toujours cru en moi et m'ont poussé à faire mon possible pour réussir.*

*À tous mes amis et mes collègues sans exception pour leur soutien infinis et leurs encouragements.*

*A toute personne qui occupe une place dans mon cœur.*

**Remini Sid ahmed**

---

## الملخص:

تم إعداد هذه المذكرة في إطار ختم المرحلة النهائية من التعليم العالي لنيل شهادة الماجستير في تخصص الآلات الكهربائية، حيث قمنا بإجراء تريبص داخل مؤسسة إسمنت متيجة.

يستكشف هذا المشروع الانتقال من محركات التيار المباشر إلى محركات غير متزامنة مع أجهزة تغيير التردد في مصنع لتصنيع الأسمنت. الهدف هو تقييم الفوائد من حيث كفاءة استخدام الطاقة، وتقليل تكاليف الصيانة، وتحسين الأداء التشغيلي.

قمنا بتحليل الآثار التقنية والاقتصادية لهذا الانتقال، مع تقييم الأثر البيئي والجدوى طويلة الأجل لتبني هذه التكنولوجيا في صناعة الأسمنت.

**الكلمات المفتاحية:** محركات غير متزامنة، مغير السرعة، صناعة الأسمنت، الصيانة الصناعية

---

## Résumé :

Ce mémoire a été préparée dans le cadre de la finalisation des études supérieures pour l'obtention d'un diplôme Master en Machines Électriques, incluant un stage au sein de Cimenterie de Mitidja.

Ce projet examine le remplacement des moteurs à courant continu par des moteurs asynchrones associés à des convertisseurs de fréquence dans une chaîne de production de ciment. L'objectif est l'évaluation des avantages de ce choix, en termes d'efficacité énergétique, de réduction des coûts de maintenance et d'amélioration des performances opérationnelles.

Une analyse des impacts techniques et économiques de cette transition est examinée, tout en évaluant l'impact environnemental et la viabilité à long terme de l'adoption de cette technologie dans l'industrie du ciment.

**Mots Clé :** Asynchronous moteurs, Variateur de vitesse, Energy efficiency, Cement industry,

---

## Abstract:

This thesis was prepared as part of the final stage of higher education to obtain a Master's degree in Electrical Machines, involving an internship at Metija Cement Company.

This project explores the transition from direct current motors to asynchronous motors equipped with frequency converters in a cement manufacturing plant. The objective is to evaluate the benefits in terms of energy efficiency, maintenance cost reduction, and operational performance improvement.

We analyzed the technical and economic impacts of this transition, assessing the environmental impact and the long-term feasibility of adopting this technology in the cement industry.

**Key Words:** Asynchronous motors , Energy efficiency,Cement industry,Maintenance

---

# **Table des Matières**

## Table des matières

*Remerciements*

*Dédicaces*

*Résumés*

*Table des Matières*

*Liste des Figures & Tableaux*

*Liste des Abréviations*

### *Chapitre 1 : Présentation de la Société et Processus de*

#### *Fabrication.....3*

**1.1 Introduction.....3**

**1.2 Présentation groupe GICA.....3**

1.2.1 Historique ..... 3

1.2.2 Localisation de SCMI..... 4

**1.3 Le Ciment.....4**

1.3.1 Les composants du ciment ..... 5

1.3.2 La fabrication du ciment ..... 5

**1.4 Le processus de fabrication du ciment.....5**

1.4.1 Zone Carrière ..... 6

1.4.2 Zone crue ..... 7

1.4.3 Zone Cuisson ..... 9

1.4.4 Zone Ciment ..... 10

1.4.5 Zone expédition..... 11

**1.5 Conclusion.....12**

### *Chapitre 2 : Etude de l'installation Industrielle Actuelle..... 13*

**2.1 Introduction.....13**

**2.2 Généralités sur les fours rotatifs .....13**

2.2.1 Fonctionnement des fours rotatifs ..... 14

2.2.2 Avantages des fours rotatifs ..... 14

2.2.3 Types de Fours Rotatifs ..... 14

2.2.4 Maintenance et Durabilité..... 15

**2.3 Four rotatif de notre installation.....15**

2.3.1 Dimensions et Capacité ..... 15

2.3.2 Structure et Matériaux ..... 16

2.3.3 Système de Chauffage ..... 17



2.3.4	Contrôle et Automatisation .....	17
2.3.5	Avantages Spécifiques.....	18
2.3.6	Maintenance.....	18
<b>2.4</b>	<b>Généralités sur les réducteurs .....</b>	<b>19</b>
2.4.1	Fonctionnement des Réducteurs.....	19
2.4.2	Types de Réducteurs.....	19
2.4.3	Avantages des Réducteurs .....	20
2.4.4	Applications des Réducteurs .....	20
2.4.5	Maintenance des Réducteurs.....	21
2.4.6	Le réducteur de notre installation .....	21
<b>2.5</b>	<b>Généralités sur les moteurs à courant continu (CC).....</b>	<b>24</b>
2.5.1	Principe de Fonctionnement.....	24
2.5.2	Composants Principaux .....	25
2.5.3	Types de Moteurs à Courant Continu .....	25
2.5.4	Avantages des Moteurs à Courant Continu.....	26
2.5.5	Applications des Moteurs à Courant Continu.....	26
2.5.6	Maintenance des Moteurs à Courant Continu .....	26
<b>2.6</b>	<b>Spécificités des moteurs LAK 4280B de notre installation .....</b>	<b>27</b>
2.6.1	Caractéristiques Techniques.....	27
2.6.2	Performance Électrique.....	28
2.6.3	Applications .....	29
2.6.4	Maintenance.....	29
	.....	30
<b>2.7</b>	<b>Généralités sur les variateurs de vitesse à Courant Continu.....</b>	<b>30</b>
2.7.1	Principe de Fonctionnement.....	30
2.7.2	Types de Variateurs de Vitesse à Courant Continu .....	30
2.7.3	Avantages des Variateurs de Vitesse à Courant Continu .....	31
2.7.4	Applications des Variateurs de Vitesse à Courant Continu.....	31
2.7.5	Composants Principaux des Variateurs de Vitesse à Courant Continu .....	32
2.7.6	Maintenance des Variateurs de Vitesse à Courant Continu.....	32
<b>2.8</b>	<b>Variateur de vitesse ABB DCS800 de l'installation .....</b>	<b>33</b>
2.8.1	Informations Générale .....	33
2.8.2	Configuration Maître-Esclave .....	34
2.8.3	Caractéristiques Techniques.....	34
2.8.4	Fonctionnalités Avancées .....	35
<b>2.9</b>	<b>Problématiques et maintenance de l'installation .....</b>	<b>35</b>
2.9.1	Problématiques de Maintenance.....	36
2.9.2	Gammes de Maintenance.....	36

2.10	Conclusion.....	38
<b>Chapitre 3 : Solution propose et étude d'ingenierie .....</b>		<b>36</b>
3.1	Introduction .....	36
3.2	Généralités sur les moteurs asynchrones .....	36
3.2.1	Définition et Constitution .....	36
3.2.2	Principe de fonctionnement.....	37
3.2.3	Avantages .....	37
3.2.4	Applications.....	38
3.3	Généralités sur les variateurs de vitesse pour courant alternatif.....	38
3.3.1	Principe de fonctionnement.....	39
3.3.2	Avantages des variateurs de vitesse.....	39
3.3.3	Applications des variateurs de vitesse .....	40
3.4	Critères de choix des moteurs et variateurs.....	41
3.4.1	Calcul du choix industriel de moteur : .....	Error! Bookmark not defined.
3.4.2	Critères de choix des variateurs de vitesse .....	49
3.5	Installation Siemens.....	50
3.5.1	Moteurs SIMOTICS et Variateurs SINAMICS.....	50
3.6	Installation ABB .....	54
3.6.1	Moteurs ABB et Variateurs de Fréquence ACS880 .....	Error! Bookmark not defined.
3.6.2	Variateur de Vitesse ACS880 et Moteur ABB 315 kW .....	55
3.7	Comparaison entre l'Installation ABB et SIEMENS.....	58
3.7.1	Introduction.....	58
3.7.2	Comparaison entre l'Installation.....	59
3.7.3	Conclusion .....	Error! Bookmark not defined.
3.8	Simulation de Variateur et le Moteur avec MATLAB .....	Error! Bookmark not defined.
3.8.1	Composants Principaux du Schéma de Simulation.....	Error! Bookmark not defined.
3.8.2	Fonctionnement de la Commande Vectorielle .....	Error! Bookmark not defined.
3.8.3	Avantages de la Commande Vectorielle.....	Error! Bookmark not defined.
3.9	Conclusion.....	64
<b>Chapitre 4 : Mise en service et Comparaison .....</b>		<b>65</b>
4.1	Introduction :.....	66

<b>4.2</b>	<b>mise en service</b> .....	Error! Bookmark not defined.
4.2.1	Transformateur Double Secondaire .....	66
<b>4.3</b>	<b>Installation en Configuration Master-Slave des Variateurs ACS880</b> .....	<b>68</b>
4.3.1	Synchronisation des Variateurs .....	68
4.3.2	Avantages de la Configuration Master-Slave .....	68
<b>4.4</b>	<b>Filtres des Variateurs de Vitesse ACS880</b> .....	<b>69</b>
4.4.1	Impact sur le Réseau Électrique .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>4.5</b>	<b>Outil de Simulation ETAP</b> .....	<b>75</b>
4.5.1	À propos d'ETAP .....	75
4.5.2	Mise en œuvre de la Simulation .....	75
<b>4.6</b>	<b>Caractéristiques Techniques</b> .....	Error! Bookmark not defined.
4.6.1	Système à Courant Continu.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.6.2	Système ABB à Courant Alternatif .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>4.7</b>	<b>Comparaisons des Performances et de l'Effacité</b> .....	Error! Bookmark not defined.
4.7.1	Système à Courant Continu (CC) .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.7.2	Système ABB à Courant Alternatif (CA).....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>4.8</b>	<b>Comparaisons de la Maintenance</b> .....	Error! Bookmark not defined.
4.8.1	Système à Courant Continu (CC) .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.8.2	Système ABB à Courant Alternatif (CA).....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>4.9</b>	<b>Comparaison du Coûts</b> .....	Error! Bookmark not defined.
4.9.1	Système à Courant Continu.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.9.2	4.2 Système ABB à Courant Alternatif.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>4.10</b>	<b>Comparaisons de la Flexibilité et de l'Adaptabilité</b> .....	Error! Bookmark not defined.
4.10.1	Système à Courant Continu .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.10.2	Système ABB à Courant Alternatif .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>4.11</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>83</b>
<b>5</b>	<b>Conclusion Générale</b> .....	<b>79</b>

# **Liste des Figures et Tableaux**

## Liste des Figures

Figure 1-1 : Logo du groupe GICA .....	3
Figure 1-2 : Localisation de SCMI.....	4
Figure 1-3 : Zones de fabrication du ciment .....	5
Figure 1-4 : Transport des matières premières .....	6
Figure 1-5 : Concassage et stockage du calcaire.....	7
Figure 1-6 : Zone Crue SCMI .....	7
Figure 1-7 : Broyeur à boulets .....	8
Figure 1-8 : Zone cuisson .....	9
Figure 1-9 : Four rotatif SCMI.....	10
Figure 1-10 : Zone ciment SCMI .....	10
Figure 1-11 : Expédition en sacs .....	12
Figure 1-12 : Expédition en vrac .....	12
Figure 2 1 : four rotatif.....	15
Figure 2 2 : Schéma d'Élévation d'un Four Rotatif Incliné à 3%.....	16
Figure 2 3 : bruleurs.....	17
Figure 2 4 : Scada.....	17
Figure 2 5 : Réducteur mécanique.....	20
Figure 2 6 : principe de réduction de vitesse.....	22
Figure 2 7 : moteur T-T LAK 4280.....	23
Figure 2 8 : types de moteur.....	24
Figure 2 9 : plaque signalétique moteur Lak 4280 .....	26
Figure 2 10 : caractéristique de moteur LAK 4280B.....	27
Figure 2 11 : maintenance de moteur.....	28
Figure 2 12 : micro console.....	30
Figure 2 13 : paramètre DCS800 .....	31
Figure 2 14 : configuration Maitre -esclave .....	32

## Liste des Figures et Tableaux

---

Figure 3 1 : Vue Éclaté d'un moteur Electrique asynchrone.....	37
Figure 3 2 : schéma Electrique d'un variateur de Vitesse .....	39
Figure 3 3 : graphes de puissance et de vitesse dans régime transitoire.....	42
Figure 3 4 : graphes de puissance et de vitesse dans régime permanent .....	43
Figure 3 5 : Siemens AG LOGO .....	47
Figure 3 6 : Caractéristique Variateur SINAMICS G120X.....	48
Figure 3 7 : SINAMICS G120X.....	49
Figure 3 8 : caractéristique SIMOTICS SD .....	50
Figure 3 9 : SIMOTICS SD .....	51
Figure 3 10 : LOGO ABB.....	51
Figure 3 11 : caractéristique Variateur ACS880.....	52
Figure 3 12 : : ABB ACS880.....	53
Figure 3 13 : Circuit d'un filtre passif .....	54
Figure 3 14 : caractéristique moteur ABB M3BP.....	55
Figure 3 15 : moteur ABB M3BP.....	56

### Liste des Tableaux

Tableau 1-1 : moteur asynchrone dans usage normal et avec variateur .....	40
Tableau 1-2 : comparaison entre efficacité des moteurs .....	46
Tableau 1-3 : comparaison entre installation ABB et Siemens.....	58



# **Liste des Abréviations**



**SCMI : Société des Ciments de la Mitidja**

**GICA : Groupe Industriel des Ciments d'Algérie**

**SNC : Société Nationale de Ciment**

**KHI : Kawasaki Heavy Industries Ltd**

**FCB : Fives Cail Babcock**

**CC : Courant Continu**

**CA: Courant Alternative**

**Scada: Supervisory Control and Data Acquisition**

**HVAC : haute voltage alternative courant**

**LAK : Type de moteur T-T Electric LAK 4280B**

**MTIFSE : Maintenance Type Fours et Séchoirs à Étapes**

**MTIFRE : Maintenance Type Fours et Réducteurs**

**MTISSE : Maintenance Type Installation des Systèmes de Sécurité**

**MTISRE : Maintenance Type Installation des Systèmes de Réduction**

**SCCR: Short Circuit Current Rating**

**IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor**

**CVC : Chauffage, Ventilation, et Climatisation**

**IP : Indice de Protection**

**IEC : International Electrotechnical Commission**

**ETAP : Electrical Transient and Analysis Program**

**PLC : Automate programmable industriel**

# **Introduction Générale**

Le présent mémoire de Projet de Fin d'Études a pour objectif de détailler l'étude et l'amélioration d'une installation industrielle dans une usine de production de ciment. L'amélioration vise à augmenter la fiabilité et la durabilité de l'installation, ainsi qu'à optimiser la chaîne de production.

Dans le domaine industriel, les performances et la fiabilité des équipements sont essentielles pour assurer un fonctionnement efficace des processus de production. Dans le cadre spécifique de la cimenterie, où des opérations complexes sont nécessaires pour produire du ciment, les moteurs et les variateurs de vitesse jouent un rôle important.

Cette installation est cruciale pour le bon fonctionnement du processus de fabrication du ciment et nécessite une attention particulière en matière de maintenance et d'efficacité opérationnelle assurant les objectifs suscités et une qualité supérieure du ciment.

Afin d'atteindre notre objectif, une analyse critique de la chaîne de production actuelle est effectuée, accompagnée par une étude de la meilleure solution disponible sur le marché algérien pour améliorer la production. En effet, la machine à courant continu entraînant le four rotatif a plusieurs inconvénients, ce qui nécessite son remplacement par une machine asynchrone.

Ce mémoire est structuré en plusieurs chapitres, traitant l'aspects spécifiques de l'installation et les technologies impliquées.

Le mémoire commence par une présentation de la société, incluant son historique, sa mission, et sa vision, suivie d'une description des différentes étapes du processus de fabrication du ciment. Cette première partie établit le contexte pour comprendre les besoins et défis techniques de l'usine.

Le deuxième chapitre se concentre sur une installation industrielle clé : un four rotatif de 84 mètres de long, entraîné par deux moteurs à courant continu de 235 kW chacun. Les moteurs sont connectés à un réducteur mécanique

Le troisième chapitre explore les options de remplacement des moteurs à courant continu par des moteurs asynchrones à courant alternatif, en tenant compte des critères de choix et des normes d'installation. Il inclut une comparaison entre les configurations ABB et Siemens, évaluant leurs performances, coûts, et avantages.

Enfin, une synthèse des points abordés et des suggestions d'améliorations potentielles pour l'installation conclut le mémoire. Le choix final et sa justification sont basés sur une analyse comparative détaillée des deux systèmes de motorisation.

Ce mémoire vise à fournir une analyse exhaustive et détaillée des différents aspects techniques et économiques de l'installation industrielle, afin de proposer des solutions d'amélioration qui renforceront la compétitivité et la durabilité de l'usine de ciment.

# **Chapitre 1**

## **Présentation de la Société et Processus de Fabrication**

## 1.1 Introduction

La Société des Ciments de la Mitidja « SCMI » est parmi les plus grandes entreprises Algériennes dans le domaine de la production et de la commercialisation des ciments ordinaires.

Ce chapitre va comporter une présentation de la cimenterie de MEFTAH afin de donner une idée générale sur les différentes étapes de la production de ciment.

## 1.2 Présentation groupe GICA

Le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie "Groupe GICA" (**Figure 1-1**) a été créé par décision de l'Assemblée Générale Extraordinaire, suite à la transformation juridique de l'ex Société de Gestion des participations « Industrie des Ciments » en date du 26 novembre 2009.

C'est une société par actions au capital de 25.358.000.000 dinars et est composée de 23 filiales spécialisées, dont 14 cimenteries, 3 sociétés de Granulats et BPE, une société de distribution, deux sociétés de maintenance industrielle, un centre d'assistance technique, un centre de formation et perfectionnement, et une société de gardiennage [2].



Figure 1-1 : Logo du groupe GICA

## Historique

La réalisation de la cimenterie S.C.M.I a été faite par le bureau d'études SNC de Montréal Canada suivant la formule « lot par lot » avec une sous-traitance étrangère (KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES LTD (KHI) et FIVES CAIL BABCOCK (F.C.B)) et est passée par les étapes suivantes :

- Démarrage de l'atelier Cru le 31 Janvier 1975
- Allumage du four le 6 Mai 1975
- Production du ciment le 1 septembre 1975

- Commercialisation du ciment le 6 novembre 1975

Et la restructuration de la SNMC en 1982, a donné naissance à 4 groupes de ciment : Centre, Est, Ouest et Chlef. La SCMI est devenue l'une des filiales du groupe ERCC restructuré en 1998 [1].

### Localisation de SCMI

La cimenterie de Meftah qui est en activité depuis plus de 46 ans est l'une des filiales du Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (GICA). Elle est implantée à une vingtaine de kilomètres au sud-est d'Alger, aux pieds des montagnes de l'Atlas, en bordure de la route nationale N°29, reliant la commune de Meftah à celle de Khemis-El-Khechna (**Figure1-2**) [1].

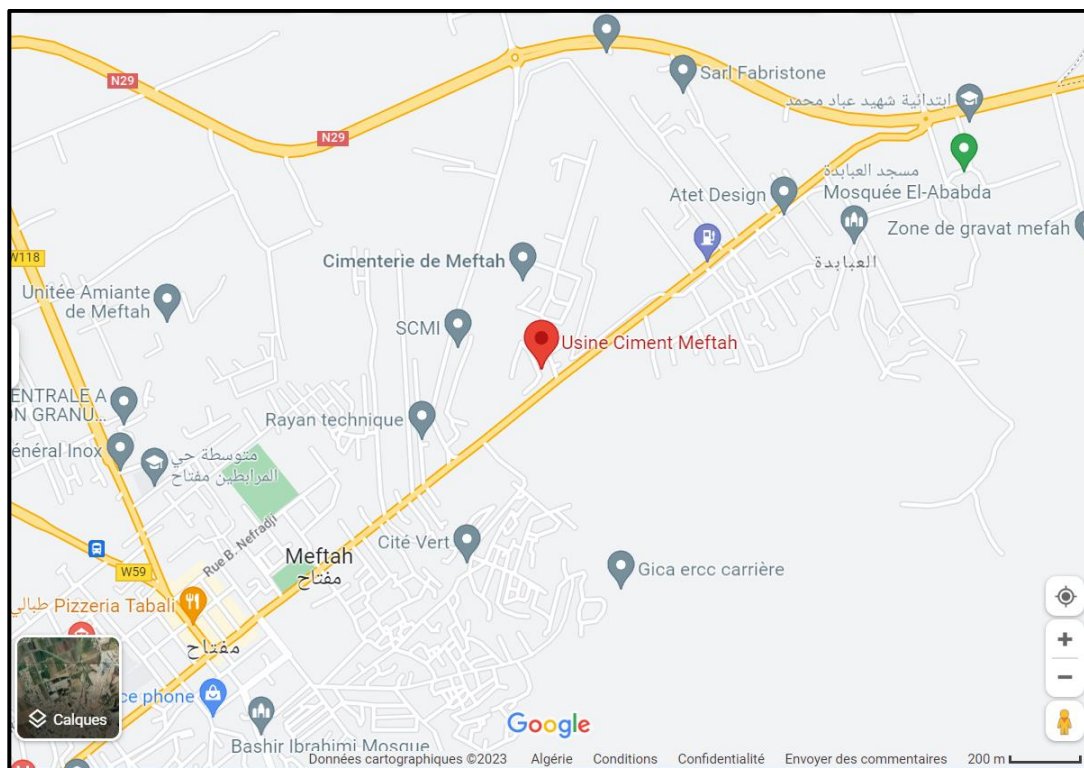


Figure 1-2 : Localisation de SCMI

### 1.3 Le Ciment

Le ciment est un matériau de construction en poudre fine, composé principalement de calcaire, d'argile, de sable et d'eau. Il est utilisé pour lier les matériaux de construction tels que les briques, les blocs de béton, les pierres et les poutres d'acier ensemble pour former une structure solide.

## Les composants du ciment

Le ciment est fabriqué généralement à partir d'un mélange de :

- Calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ).
  - Sable.
  - Fer.
  - Argile ( $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ ).
  - Tuf.
  - Gypse.
- } Clinker

## La fabrication du ciment

Le ciment est fabriqué en montant en température jusqu'à  $1\,450\text{ }^\circ\text{C}$ , à partir d'un mélange défini et finement broyé de calcaire, d'argile et de sable dans un four rotatif. Sous l'effet de la chaleur, la farine issue de ce mélange se transforme en clinker.

Le clinker sortant du four est refroidi, puis finement broyé pour produire la poudre que nous appelons ciment [3].

### 1.4 Le processus de fabrication du ciment

Le processus de fabrication du ciment est un processus complexe et nécessite des équipements sophistiqués pour obtenir les normes de qualité requises.

La chaîne de production de l'usine de Meftah est composée de cinq ateliers qui correspondent au processus habituel de fabrication de ciment par voie sèche. Ainsi le processus de fabrication est divisé en cinq zones principales (**Figure 1-3**).

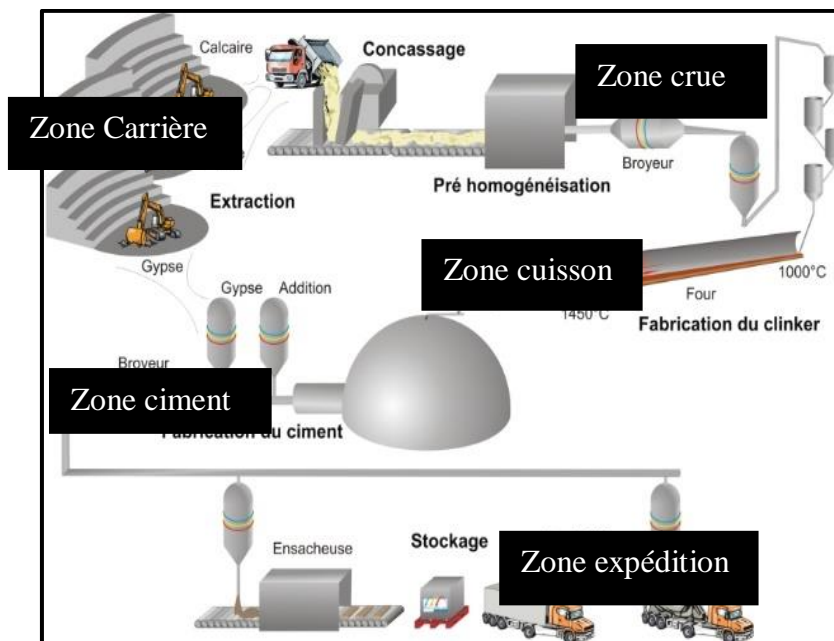


Figure 1-3 : Zones de fabrication du ciment [4]



## Zone Carrière

Elle est constituée d'un concasseur et de tapis pour transporter le calcaire vers le hall de stockage.

## L'extraction des matières premières

Le calcaire, l'argile et le sable sont extraits des carrières et des mines à proximité de l'usine de ciment par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique.

## Chargement et transport

Le chargement est réalisé par des engins (des chargeuses et des mini chargeuses). Les matières premières sont ensuite transférées dans un dumper (**Figure 1.4**) afin de les transporter vers les concasseurs pour les décharger dans la chambre de concassage.



Figure 1-4 : Transport des matières premières [5]

## Concassage

Le concassage est une opération destinée à la réduction des blocs de calcaires qui sont obtenus pendant l'extraction. Le calcaire se dirige vers le concasseur avec ATM (Alimentation Tablier Métallique). Et là, on trouve deux types des ATM : FCB 450 T/h et KHD 1000 T/h, où il se concasse à des petits morceaux à la sortie. La matière première (calcaire), après concassage, est transportée à l'usine par des tapis roulants T0, T1, T2, T3 bis, où elle est stockée dans le hall de stockage calcaire dont la capacité est de 60 000 T (**Figure 1-5**).

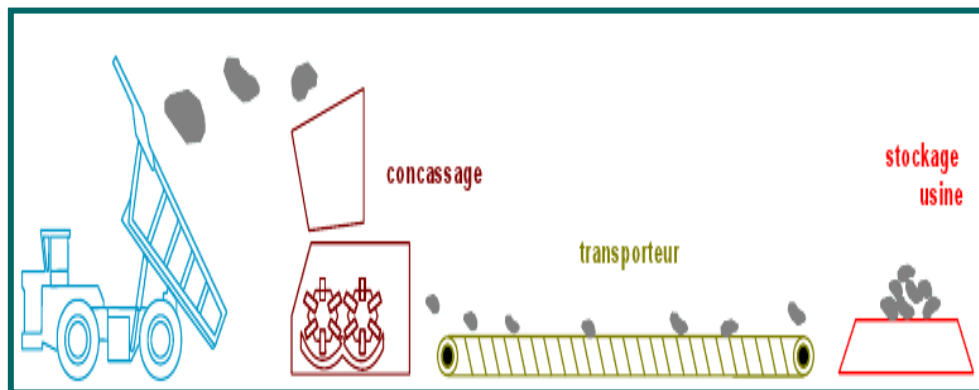


Figure 1-5 : Concassage et stockage du calcaire

## Zone crue

Le mélange de matières premières, qui se compose de 80 % de calcaire et de 20 % d'argile, est stocké dans le hall de pré-homogénéisation sous forme de mélange appelé "matière crue" (Figure 1-6).



Figure 1-6 : Zone Crue SCMI

## Hall calcaire

Le grateur portique à palette est utilisé pour gratter le calcaire en se déplaçant d'un tas à l'autre, avant de le déposer sur un tapis pour le transporter jusqu'à la trémie calcaire.

## Hall ajouts

Il y a deux grateurs semi-portiques à palette qui sont utilisés pour gratter les ajouts (argile, sable, fer), puis les déverser sur un tapis qui les transporte vers les trémies T6, T7, T8,

T9 et T11. Il existe quatre trémies différentes pour : le calcaire, le fer, l'argile et le sable. Le dosage des constituants du ciment est le suivant :

- Calcaire : 80 %
- Argile : 20 %
- Sable : 2 %
- Fer : 1 %

Une fois dosés, les produits sont transportés par le tapis T13 vers le broyeur à marteau, qui est utilisé pour concasser la matière première.

### Séparateur statique

La matière est aspirée par le ventilateur de tirage, d'une puissance de 1200 KW, via le séparateur statique qui permet de séparer les particules en fonction de leur granulométrie, en distinguant les grosses particules qui sont renvoyées vers le broyeur à boulets et les fines particules qui sont acheminées vers le stockage dans des silos d'homogénéisation.

### Broyeur à boulets

Afin de faciliter les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et finement broyées (jusqu'à quelques microns) dans un broyeur à boulets (**Figure 1.7**).

Après le broyage, les matières premières sont parfaitement homogénéisées et séchées pour obtenir de la farine, qui peut être directement introduite sous forme pulvérulente dans le four.



Figure 1-7 : Broyeur à boulets [6]

### L'homogénéisation

Après avoir été mélangé dans les silos H1 et H2, le produit est prêt à être stocké. La farine crue, qui est expédiée par l'air lift, est déversée dans la boîte de récupération.

Chaque silo a une capacité de stockage de 10 000 tonnes et est équipé de deux sorties latérales qui peuvent acheminer l'ensemble du débit de farine vers le four.

## Zone Cuisson

La ligne de cuisson se compose de trois éléments (**Figure 1.8**) :

- un préchauffeur
- un four rotatif
- un refroidisseur

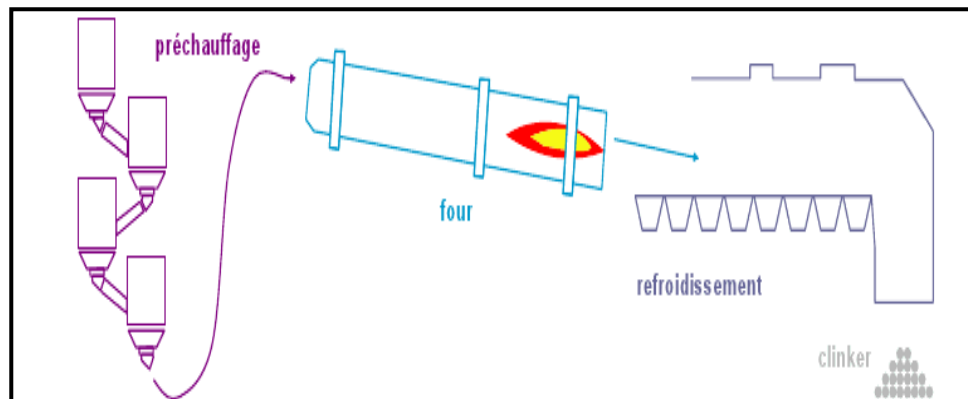


Figure 1-8 : Zone cuisson

### Préchauffage

La matière crue est introduite dans une tour de préchauffage à une température de 800°C avant d'être transférée au four rotatif vertical, où elle est portée à une température de 1450°C.

La combustion entraîne une réaction chimique appelée « décarbonatation », qui libère le CO<sub>2</sub> contenu dans le calcaire.

Le préchauffage est effectué dans un préchauffeur constitué d'une série de cyclones disposés verticalement sur plusieurs étages. La matière froide est introduite dans la partie supérieure et se réchauffe au contact des gaz. Elle arrive partiellement décarbonatée à chaque étage, jusqu'à atteindre la température d'environ 800°C à l'étage inférieur.

### Four Rotatif

En cimenterie, les systèmes de fours sont spécialement conçus pour répondre aux exigences chimiques du processus de transformation de la matière crue en clinker.

Le four rotatif (**Figure 1.9**), constitué d'un cylindre en acier posé sur des stations de roulement et doublé à l'intérieur par des produits réfractaires, est en mouvement de rotation pendant la cuisson. Sa pente permet à la matière première d'être injectée à une extrémité et de se déplacer tout en étant chauffée par la flamme.

Tout au long de ce processus, la matière se transforme par cuisson jusqu'à atteindre l'état de "clinkérisation" à une température de 1450 °C.



Figure 1-9 : Four rotatif SCMI

## Refroidissement

Après sa sortie du four, le clinker est acheminé vers un refroidisseur à ballonnets ou à grilles pour y être refroidi jusqu'à une température de 120°C.

Les refroidisseurs ont pour rôle de garantir une trempe efficace du clinker afin d'obtenir une structure minéralogique et des dimensions de cristaux favorables. Ils permettent également de baisser la température du clinker afin de faciliter sa manutention jusqu'aux silos de stockage.

## Zone Ciment

L'atelier de zone ciment (**Figure 1-10**) est composé de deux lignes électriques avec un débit de production de 90 T/H pour chacune.



Figure 1-10 : Zone ciment SCMI



## Le remplissage des trémies (clinker gypse, tuf)

On y rencontre :

- Remplissage par la trémie de réception : Des camions sont utilisés pour transporter à la trémie de réception à la fois le gypse et le tuf. Le gypse est ensuite transporté par le tapis T 19 pour être déversé sur T 20. Un élévateur de gypse est utilisé pour stocker le gypse dans le silo spécial gypse d'une capacité de 5000 T. Les ajouts et le gypse sont acheminés depuis T 20 vers le tapis AMOUND et l'élévateur à godet, qui alimente la chaîne TKF2 pour remplir la trémie avec du tuf et du gypse.
- Remplissage par T 16 : Il y a deux façons de remplir les trémies avec du clinker, la première consiste à le faire directement depuis la zone de cuisson, où les chaînes transporteuses déversent le clinker dans une goulotte qui à son tour le verse sur le T16. La deuxième option consiste à utiliser les silos de stockage, chacun ayant trois bouches : deux manuelles et une motorisée. Le clinker est versé à travers ces bouches dans le T16, qui le transporte ensuite vers l'élévateur à godets pour être envoyé à la chaîne TKF1 et remplir les trémies (clinker, gypse).

## Broyeur ciment

Une fois que les matières ont été dosées (80% de clinker, 15% d'ajouts et 5% de gypse), elles sont transportées par un tapis vers les broyeurs de ciment "BK1" et "BK2" pour être broyées.

La matière broyée est ensuite transportée par un élévateur à godets jusqu'à la sortie du broyeur, puis versée dans le séparateur dynamique. Les déchets sont transportés par aéroglisseur vers l'entrée du broyeur pour être re-broyés.

Le produit fini (ciment) est acheminé par la principale aéroglissière jusqu'aux silos de stockage à l'aide d'un élévateur à godets sur un air lift.

## Zone expédition

C'est la dernière phase du processus de production du ciment, qui se fait en sacs et en vrac :

## Expédition en sacs

Elle se fait par quatre ensacheuses avec un débit de 90 T/h, chacune possède huit becs pour le remplissage des sacs. Les sacs de 50 kg sont chargés sur des camions à bennes. **(Figure 1-11).**



Figure 1-11 : Expédition en sacs

## Expédition en vrac

Le remplissage se fait par un flexible branché au fond d'une trémie et qui est dirigé par l'opérateur pour mettre à l'intérieur de la bouche de cocotte des camions pour les remplir. **(Figure 1.12)**



Figure 1-12 : Expédition en vrac

## 1.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté la société SCMI en général et décrit le processus de fabrication du ciment, en le divisant en cinq zones principales. Cela nous a permis de mieux identifier la zone qui constitue l'objectif de notre projet « la zone cuisson ».

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier le principe de fonctionnement de l'échangeur air-air situé dans l'atelier aval-four de la zone cuisson.



**Chapitre 2**

**Étude de l'Installation Industrielle**

**Actuelle**

## 2.1 Introduction

Dans le domaine industriel, la performance et la fiabilité des équipements sont essentielles pour assurer un fonctionnement efficace des processus de production. Dans le cadre spécifique de la cimenterie, où des opérations complexes sont nécessaires pour produire du ciment, les moteurs et les variateurs de vitesse jouent un rôle crucial.

Ce chapitre se concentre sur l'étude du moteur T-T Electric LAK 4280 et du variateur de vitesse ABB DCS 800, utilisés pour faire tourner un four rotatif au sein de la cimenterie de SCMI, appartenant au groupe GICA. Le four rotatif est l'épine dorsale de la production de ciment, où des processus de chauffage précis et contrôlés sont nécessaires pour obtenir des produits de qualité.

Nous débuterons par une présentation du contexte général de l'industrie cimentière et du rôle vital joué par les fours rotatifs. Ensuite, nous explorerons les principes de base des moteurs à courant continu, ainsi que l'importance des variateurs de vitesse dans le contrôle de ces moteurs.

Nous poursuivrons en détaillant les caractéristiques techniques du moteur T-T Electric LAK 4280 et du variateur de vitesse ABB DCS 800, en mettant en évidence leur fonctionnement spécifique et leur intégration dans le processus global de la cimenterie.

Enfin, nous aborderons les défis de maintenance rencontrés avec ces équipements critiques, en analysant les statistiques de pannes, les modes de défaillance principaux et les procédures de maintenance recommandées pour assurer un fonctionnement continu et fiable du four rotatif.

À travers cette exploration, nous mettrons en lumière l'importance capitale des moteurs et des variateurs de vitesse dans le secteur cimentier, ainsi que les défis et les solutions associés à leur utilisation dans un environnement industriel exigeant.

## 2.2 Généralités sur les fours rotatifs

Les fours rotatifs sont des équipements industriels essentiels, principalement utilisés dans l'industrie du ciment pour la calcination des matières premières. Le four rotatif se présente sous la forme d'un cylindre métallique incliné qui tourne lentement sur son axe longitudinal. Cette rotation lente permet une distribution uniforme de la chaleur à l'intérieur du four et assure un mélange efficace des matériaux.

### Fonctionnement des fours rotatifs

- a) **Alimentation et Préparation** : Les matières premières, généralement un mélange de calcaire, d'argile et d'autres matériaux, sont introduites à une extrémité du four. Ce mélange, appelé "farine crue", est préalablement broyé et homogénéisé avant d'être alimenté dans le four.
- b) **Calcination** : À mesure que le four tourne, la farine crue progresse lentement vers l'autre extrémité, où elle est chauffée à des températures extrêmement élevées, souvent supérieures à 1450°C. Ce chauffage intense provoque une série de réactions chimiques qui transforment les matières premières en clinker, le composant principal du ciment.
- c) **Refroidissement et Extraction** : Une fois le processus de calcination terminé, le clinker chaud est ensuite refroidi rapidement et extrait du four pour être broyé et mélangé à du gypse, créant ainsi le ciment prêt à être utilisé.

### Avantages des fours rotatifs

- a) **Distribution Uniforme de la Chaleur** : La rotation du four permet une distribution homogène de la chaleur, ce qui est crucial pour la qualité du clinker produit.
- b) **Efficacité Énergétique** : Les fours rotatifs modernes sont conçus pour maximiser l'efficacité énergétique, souvent équipés de systèmes de récupération de chaleur.
- c) **Contrôle Précis des Conditions de Procédé** : La température et le temps de résidence des matières dans le four peuvent être contrôlés avec précision, assurant ainsi une qualité constante du produit final.
- d) **Flexibilité de Production** : Les fours rotatifs peuvent être utilisés pour différents types de matières premières et peuvent être ajustés pour produire différents types de ciment.

### Types de Fours Rotatifs

- a) **Fours à Voie Sèche** : Ce type de four utilise des matières premières sèches et est le plus courant en raison de son efficacité énergétique supérieure.
- b) **Fours à Voie Humide** : Utilisé lorsque les matières premières sont humides, nécessitant ainsi plus d'énergie pour évaporer l'eau pendant le processus de calcination.

- c) **Fours à Suspension Préchauffée** : Équipés de préchauffeurs à suspension, ces fours permettent de chauffer les matières premières avant leur entrée dans le four principal, améliorant ainsi l'efficacité du processus.



Figure 2-1 : four rotatif

## Maintenance et Durabilité

La maintenance régulière des fours rotatifs est cruciale pour leur bon fonctionnement et leur longévité. Cela inclut des inspections fréquentes, la lubrification des parties mobiles, et le remplacement des pièces usées ou endommagées. Une maintenance adéquate permet de minimiser les temps d'arrêt et de maximiser la productivité.

En résumé, les fours rotatifs jouent un rôle indispensable dans l'industrie du ciment, permettant de transformer efficacement les matières premières en clinker grâce à un processus de calcination contrôlé et uniforme. [7]

### 2.3 Four rotatif de notre installation

Le four rotatif de notre installation possède des caractéristiques spécifiques qui le rendent performant et adapté à vos besoins de production. Voici un aperçu détaillé des spécificités de ce four rotatif :

#### Dimensions et Capacité

- **Longueur** : 84 mètres

- **Diamètre** : 5.6 mètres
- **Capacité de Production** : 6000 tonnes de ciment par jour
- **Vitesse de Rotation** : 2.2 tours par minute (tr/min)
- **Moteurs d'entraînement** : Le four est entraîné par deux moteurs à courant continu de marque T-T Electric, modèle LAK 4280B, chacun ayant une puissance de 235 kW. Ces moteurs sont reliés à un réducteur qui ajuste la vitesse d'entrée de 1140 tr/min à la vitesse de sortie de 2.2 tr/min adaptée au four rotatif.

### Coefficient Dynamique : 1.3

Le coefficient dynamique de 1.3 indique la capacité du four à résister aux forces dynamiques et aux contraintes opérationnelles pendant la rotation. Ce coefficient est crucial pour assurer la stabilité et la durabilité du four en service continu.

- **Pente** : 3%

La pente de 3% du four rotatif joue un rôle crucial dans le processus de calcination. Cette inclinaison permet aux matériaux de progresser naturellement à travers le four grâce à la gravité, tout en étant mélangés et chauffés uniformément.

### Structure et Matériaux

- **Matériau de Construction** : Le four est fabriqué en acier robuste, capable de résister à des températures extrêmement élevées nécessaires pour la calcination des matières premières.
- **Revêtement Réfractaire** : L'intérieur du four est revêtu de matériaux réfractaires qui protègent la structure en acier des températures élevées et des réactions chimiques.

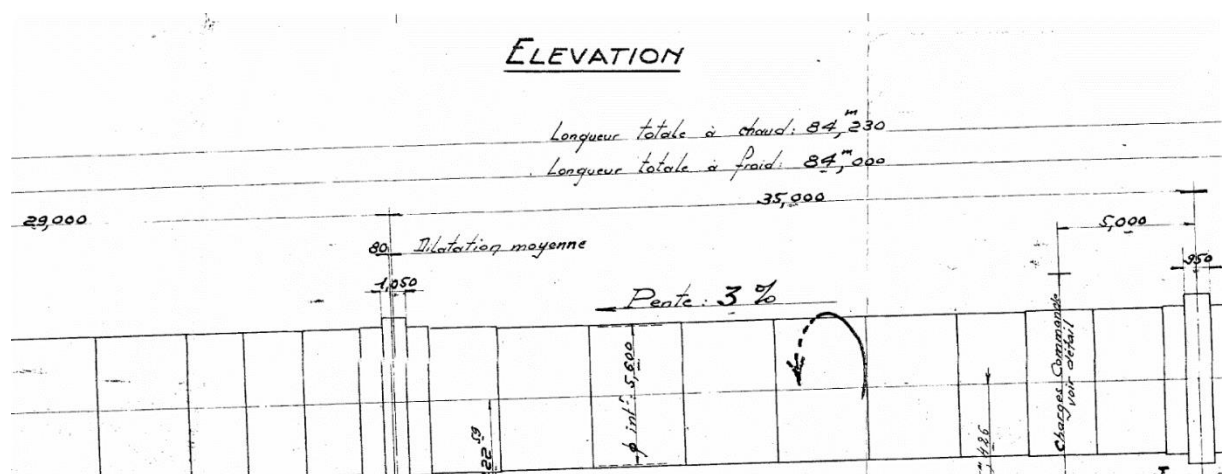


Figure2-2: Schéma d'Élévation d'un Four Rotatif Incliné à 3%

## Système de Chauffage

- **Brûleurs** : Le four est équipé de brûleurs à haute efficacité énergétique qui fournissent la chaleur nécessaire pour atteindre les températures de calcination. Ces brûleurs sont conçus pour une combustion optimale, réduisant les émissions et améliorant l'efficacité énergétique globale.



Figure2-3: Brûleurs

## Contrôle et Automatisation

- a) **Systèmes de Contrôle** : Le four rotatif est doté de systèmes de contrôle avancés pour surveiller et réguler les conditions de fonctionnement, notamment la température, la vitesse de rotation et la pression. Ces systèmes assurent une opération stable et sécurisée.

- b) **Automatisation** : L'automatisation permet un contrôle précis du processus de calcination, optimisant ainsi la qualité du clinker produit et la consommation d'énergie.

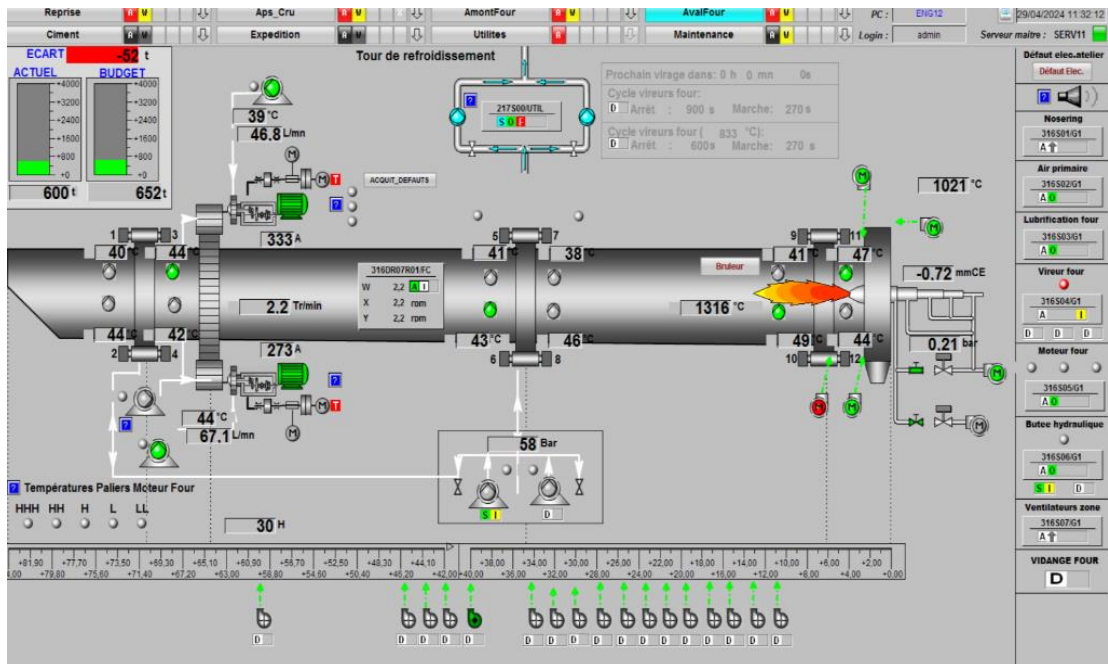


Figure 2-4 : Scada

### Avantages Spécifiques

- a) **Haute Capacité de Production** : Avec une capacité de production de 6000 tonnes par jour, ce four rotatif permet une production de ciment à grande échelle, répondant ainsi aux besoins industriels importants.
- b) **Efficacité Opérationnelle** : La vitesse de rotation de 2.2 tr/min est idéale pour un mélange efficace des matériaux et une distribution uniforme de la chaleur, garantissant une qualité constante du produit final.
- c) **Durabilité et Fiabilité** : Le coefficient dynamique de 1.3, associé à une structure robuste et des matériaux réfractaires de haute qualité, assure une longue durée de vie du four et une fiabilité opérationnelle même dans des conditions de travail intenses.

### Maintenance

- a) **Inspections Régulières** : Des inspections régulières sont nécessaires pour vérifier l'état des moteurs, du réducteur, et des composants du four, afin de prévenir les pannes et d'assurer un fonctionnement continu.

- b) **Entretien Préventif** : L'entretien préventif inclut la lubrification des parties mobiles, le remplacement des pièces usées et la vérification des systèmes de contrôle et de sécurité.

En conclusion, le four rotatif de notre installation, avec ses caractéristiques spécifiques, sa capacité de production élevée et sa pente de 3%, est un équipement clé pour la production efficace et de haute qualité de ciment. Sa conception robuste et ses systèmes avancés de contrôle et de chauffage en font un élément essentiel de votre processus industriel.

## 2.4 Généralités sur les réducteurs

Les réducteurs sont des dispositifs mécaniques essentiels utilisés dans de nombreuses applications industrielles pour ajuster la vitesse de rotation des moteurs et augmenter le couple transmis aux machines.

### Fonctionnement des Réducteurs

Les réducteurs fonctionnent en utilisant un ensemble de roues dentées (engrenages) pour réduire la vitesse de rotation d'un moteur tout en augmentant le couple. Les engrenages sont conçus pour transformer une vitesse élevée de l'entrée en une vitesse plus basse à la sortie, avec une augmentation correspondante du couple. Le rapport de réduction est déterminé par la taille et le nombre de dents des engrenages utilisés.[7]

### Types de Réducteurs

Il existe plusieurs types de réducteurs, chacun adapté à des applications spécifiques :

- a) **Réducteurs à Engrenages Droits** : Utilisés pour les applications nécessitant des vitesses modérées et des couples élevés. Ils sont simples et économiques mais peuvent être bruyants.
- b) **Réducteurs à Engrenages Hélicoïdaux** : Offrent une transmission de puissance plus douce et plus silencieuse que les engrenages droits, grâce à leurs dents inclinées. Ils sont couramment utilisés dans les applications industrielles.
- c) **Réducteurs à Vis sans Fin** : Idéaux pour les applications nécessitant de grandes réductions de vitesse et un couple élevé. Ils permettent une transmission de puissance très compacte mais sont généralement moins efficaces que les autres types de réducteurs.



- d) **Réducteurs Planétaires** : Offrent une haute efficacité et une grande capacité de couple dans un espace compact. Ils sont souvent utilisés dans les applications nécessitant une haute précision et une fiabilité élevée.
- e) **Réducteurs à Engrenages Coniques** : Utilisés pour les transmissions de puissance à angle droit. Ils sont idéaux pour les applications où l'espace est limité et où une direction de couple changeante est nécessaire.

### Avantages des Réducteurs

- a) **Augmentation du Couple** : Les réducteurs permettent de multiplier le couple fourni par le moteur, rendant possible le fonctionnement de machines lourdes et exigeantes.
- b) **Réduction de la Vitesse** : Ils ajustent la vitesse de rotation du moteur pour qu'elle soit adaptée aux exigences spécifiques de l'application.
- c) **Efficacité et Précision** : Les réducteurs modernes sont conçus pour offrir une transmission de puissance efficace avec un minimum de perte d'énergie.
- d) **Durabilité et Fiabilité** : Ils sont construits pour résister à des conditions de travail rigoureuses et offrir une performance fiable sur le long terme.

### Applications des Réducteurs

Les réducteurs sont utilisés dans une variété d'industries et d'applications, notamment :

- a) **Industrie du Ciment** : Pour entraîner les fours rotatifs, les broyeurs à boulets et d'autres équipements lourds nécessitant un couple élevé.
- b) **Automobile** : Dans les transmissions des véhicules pour ajuster la vitesse et le couple des moteurs.
- c) **Énergie Éolienne** : Dans les turbines pour convertir la vitesse élevée de rotation des pales en une vitesse plus basse adaptée aux générateurs.
- d) **Robotique** : Pour contrôler avec précision les mouvements des bras robotiques et autres mécanismes.

- e) **Traitement des Matériaux** : Dans les convoyeurs, les broyeurs, et les presses pour optimiser la performance des équipements.

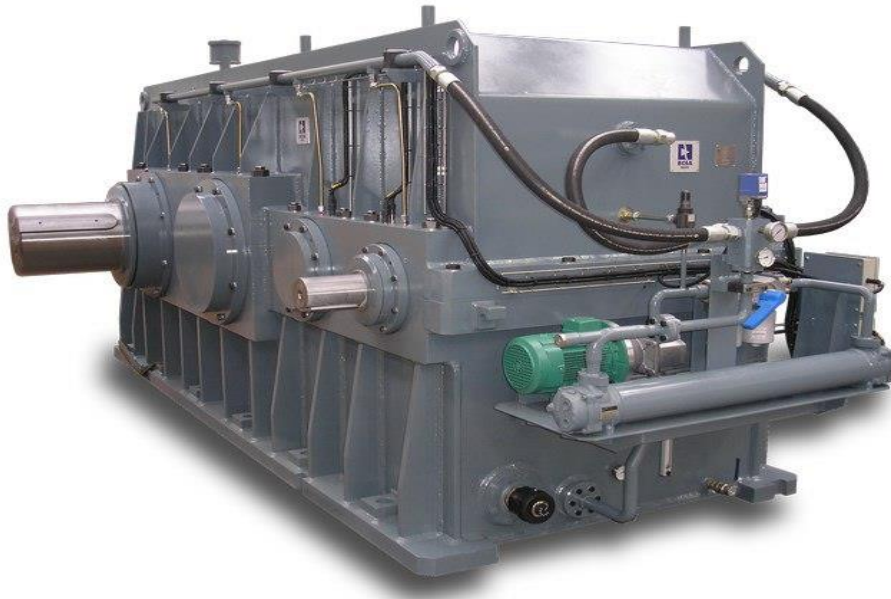


Figure 2-5 : réducteur mécanique

### Maintenance des Réducteurs

La maintenance régulière des réducteurs est cruciale pour garantir leur bon fonctionnement et prolonger leur durée de vie. Cela inclut :

- a) **Lubrification** : Maintenir un niveau adéquat de lubrifiant pour réduire l'usure et la friction entre les engrenages.
- b) **Inspections Visuelles** : Vérifier régulièrement l'état des engrenages, des roulements et des joints pour détecter tout signe de dommage ou d'usure.
- c) **Remplacement des Pièces Usées** : Remplacer les engrenages, les roulements et d'autres composants lorsqu'ils montrent des signes d'usure excessive.
- d) **Vérification des Alignements** : S'assurer que les engrenages sont correctement alignés pour éviter des charges inégales et une usure prématurée.

### Réducteur de l'installation

Dans notre installation, le réducteur joue un rôle crucial en convertissant la haute vitesse des moteurs à courant continu en une vitesse appropriée pour le fonctionnement du four rotatif. Voici les spécificités détaillées de ce réducteur :

### a) Fonctionnement du Réducteur

Le réducteur utilisé dans notre installation est conçu pour transformer la vitesse élevée des moteurs LAK 4280B en une vitesse basse mais avec un couple élevé, adapté aux besoins du four rotatif. Voici les caractéristiques et le fonctionnement détaillés du réducteur :

#### Conversion de Vitesse

**Vitesse d'entrée :** 1140 tours par minute (tr/min)

**Vitesse de sortie :** 2.2 tours par minute (tr/min)

#### Rapport de Réduction

Le rapport de réduction est calculé en divisant la vitesse d'entrée par la vitesse de sortie :

$$\text{Rapport de Reduction} = \frac{1140}{2.2} = 518.18$$

Ce rapport de réduction signifie que pour chaque 518.18 tours effectués par le moteur, le four rotatif effectue un tour complet.[8]

#### Conception et Matériaux

- 1) **Type de Réducteur :** Le réducteur à double attaque, étant donné qu'il doit supporter des charges lourdes et offrir une grande précision dans la transmission du couple.
- 2) **La couronne d'entrée de 8080 mm :** indique que cette couronne est conçue pour des applications nécessitant une haute capacité de charge et une transmission de puissance fiable et stable, typiques des environnements industriels lourds.

#### Refroidissement

- 1) **Système de Refroidissement :** Pour éviter la surchauffe et assurer un fonctionnement optimal, le réducteur est équipé d'un système de refroidissement, qui peut inclure des ventilateurs ou des systèmes de circulation d'huile refroidie.

#### Maintenance

- 1) **Inspections Régulières :** Des inspections périodiques sont nécessaires pour vérifier l'état des engrenages, des roulements et des joints, et pour s'assurer que

le réducteur fonctionne correctement sans signes d'usure excessive ou de défaillance.

**Entretien Préventif** : Inclut la lubrification régulière, le remplacement des pièces usées et la vérification des alignements pour prévenir les pannes inattendues.

### b) Avantages du Réducteur

1. **Efficacité de Transmission** : Le réducteur offre une transmission efficace de la puissance, garantissant que la vitesse et le couple sont adaptés aux exigences du four rotatif.
2. **Robustesse et Fiabilité** : Conçu pour des applications industrielles lourdes, le réducteur est capable de résister à des conditions de fonctionnement sévères et de fournir une performance fiable sur le long terme.
3. **Réduction du Bruit** : Les engrenages hélicoïdaux ou planétaires, souvent utilisés dans de tels réducteurs, permettent une réduction significative du bruit par rapport aux engrenages droits.

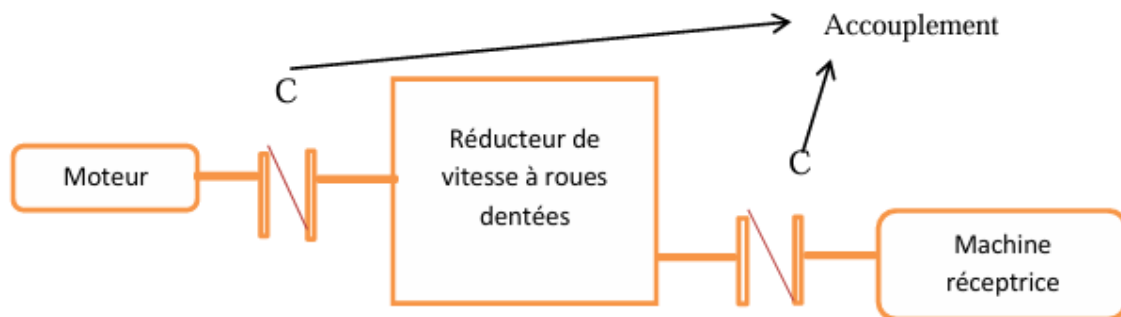


Figure 2-6 : Principe de Réduction de Vitesse

### c) Importance dans l'Installation

Le réducteur est un composant essentiel de notre installation, permettant de synchroniser parfaitement la vitesse de rotation du four avec les besoins du processus de calcination. En convertissant la vitesse élevée des moteurs LAK 4280B en une vitesse basse mais avec un couple élevé, le réducteur assure que le four rotatif fonctionne de manière stable et efficace, contribuant à la qualité constante du clinker produit.

En conclusion, le réducteur de notre installation est conçu pour offrir une performance optimale en ajustant la vitesse des moteurs à courant continu à celle requise par le four rotatif. Sa robustesse, son efficacité et sa capacité à gérer des charges lourdes en font un élément crucial pour le bon fonctionnement de notre processus industriel.

## 2.5 Généralités sur les moteurs à courant continu (CC)

Les moteurs à courant continu (CC) sont des dispositifs électriques utilisés pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Ils sont largement appréciés dans diverses applications industrielles en raison de leur capacité à offrir un contrôle précis de la vitesse et du couple.

### Principe de Fonctionnement

Les moteurs à courant continu fonctionnent sur le principe de l'interaction entre un champ magnétique et un courant électrique. Lorsqu'un courant continu traverse les enroulements du moteur, il génère un champ magnétique qui interagit avec le champ magnétique du stator (l'élément fixe du moteur), créant ainsi une force de rotation ou un couple sur le rotor.[15]



Figure 2-7 : moteur T-T Lak 4280

## Composants Principaux

- a) **Stator** : Partie fixe du moteur qui fournit le champ magnétique. Le stator peut être composé d'aimants permanents ou d'électroaimants.
- b) **Rotor (ou Armature)** : Partie mobile du moteur qui tourne en réponse au champ magnétique. Le rotor contient des enroulements où le courant circule.
- c) **Commutateur (ou Collecteur)** : Dispositif mécanique qui inverse la direction du courant dans les enroulements du rotor, permettant au moteur de tourner continuellement dans une direction.
- d) **Balais** : Composants en carbone qui maintiennent le contact électrique avec le collecteur, assurant ainsi la continuité du courant dans les enroulements du rotor.

## Types de Moteurs à Courant Continu

- a) **Moteurs à Excitation Série** : Le champ magnétique est produit par des enroulements en série avec l'armature. Ces moteurs offrent un couple élevé à basse vitesse et sont utilisés dans les applications nécessitant une grande force de démarrage, comme les locomotives et les treuils.
- b) **Moteurs à Excitation Shunt** : Les enroulements de champ sont connectés en parallèle avec l'armature. Ils offrent une vitesse stable sous diverses charges et sont couramment utilisés dans les applications industrielles nécessitant un contrôle précis de la vitesse.
- c) **Moteurs à Excitation Compound** : Combinaison des caractéristiques des moteurs série et shunt, ces moteurs peuvent fournir à la fois un couple élevé et une vitesse stable. Ils sont utilisés dans les applications où les conditions de charge varient largement.
- d) **Moteurs à Aimants Permanents** : Utilisent des aimants permanents pour produire le champ magnétique. Ces moteurs sont compacts et efficaces, souvent utilisés dans les petits appareils et les outils portatifs.

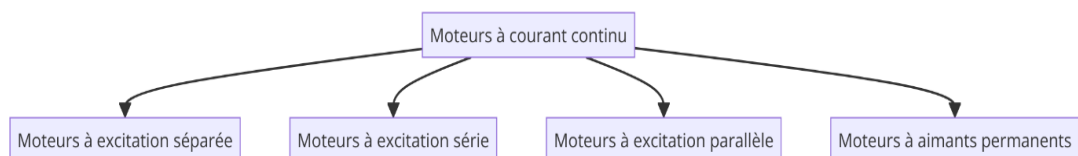


Figure 2-8 : types de moteurs

### **Avantages des Moteurs à Courant Continu**

- a) **Contrôle Précis de la Vitesse** : Les moteurs à courant continu permettent un contrôle facile et précis de la vitesse en ajustant la tension d'alimentation.
- b) **Couple Élevé** : Ils peuvent fournir un couple élevé à basse vitesse, idéal pour les applications nécessitant une forte puissance de démarrage.
- c) **Simplicité de Conception** : La conception des moteurs à courant continu est relativement simple, ce qui facilite leur maintenance et leur réparation.

### **Applications des Moteurs à Courant Continu**

- a) **Applications Industrielles** : Utilisés dans les machines-outils, les convoyeurs, les grues, et autres équipements nécessitant un contrôle précis de la vitesse et du couple.
- b) **Transport** : Essentiels dans les véhicules électriques, les trains, et les systèmes de propulsion maritime en raison de leur capacité à fournir un couple élevé.
- c) **Appareils Portatifs** : Utilisés dans les outils électriques, les jouets, et les petits appareils électroménagers grâce à leur compacité et leur efficacité.
- d) **Robotiques et Automatismes** : Employés dans les robots industriels, les systèmes de contrôle automatisés et les équipements médicaux pour leur précision et leur régularité.

### **Maintenance des Moteurs à Courant Continu**

- a) **Remplacement des Balais** : Les balais en carbone s'usent avec le temps et doivent être remplacés régulièrement pour maintenir un bon contact électrique.
- b) **Inspection du Commutateur** : Le commutateur doit être inspecté et nettoyé pour éviter l'accumulation de résidus qui pourraient perturber le fonctionnement du moteur.
- c) **Lubrification des Roulements** : Les roulements du moteur doivent être lubrifiés pour réduire la friction et prolonger la durée de vie du moteur.
- d) **Vérification des Enroulements** : Les enroulements doivent être inspectés pour détecter tout signe de surchauffe ou de dommages.

## 2.6 Spécificités des moteurs LAK 4280B de notre installation

Les moteurs à courant continu LAK 4280B de T-T Electric sont des moteurs robustes et puissants, conçus pour des applications industrielles exigeantes. Voici les spécificités détaillées basées sur les images fournies :

### Caractéristiques Techniques

- **Type** : LAK 4280B
- **Puissance Continue** : 235 kW
- **Vitesse Nominale** : 1000 tr/min
- **Tension d'Armature** : 420 V
- **Tension d'Excitation** : 220 V
- **Courant d'Armature** : 601 A
- **Courant d'Excitation** : 8.6 A
- **Devoir (Duty)** : S1 (Service continu)
- **MOTEUR B3** : FIXATION À PATTES
- **Classe d'Isolation** : H - Rise B
- **Indice de Protection (IP)**: IP55 (Protection contre la poussière et les jets d'eau)
- **Mode de Refroidissement** : IC 861 (Ventilation forcée)



- Poids : 1745 kg

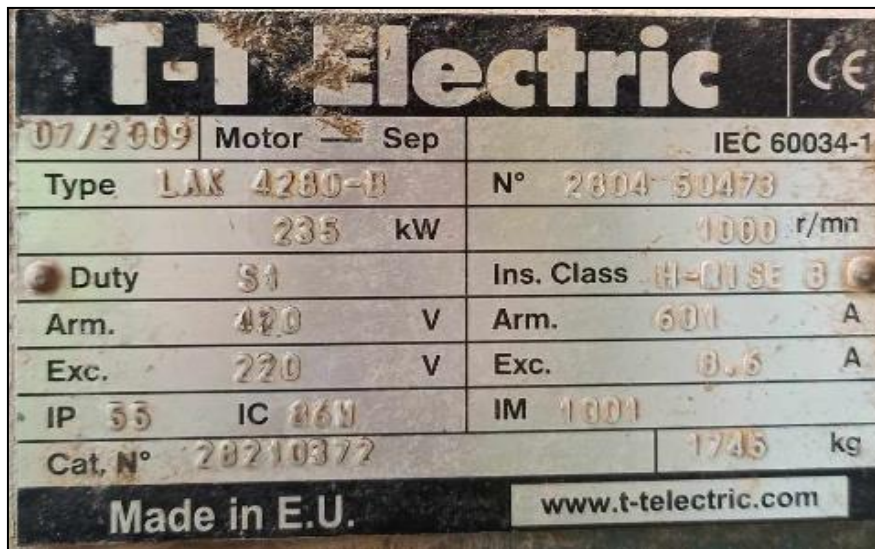


Figure 2-9 : plaque signalétique moteur Lak 4280

### Performance Électrique

- Vitesse de Base à Tension d'Armature : 400 - 500 V
- Courant Nominal d'Armature : 609 A
- Couple : 3652 Nm
- Vitesse Électrique Maximale : 1420 tr/min
- Efficacité : 89.1%
- Résistance de l'Armature : 0.0643 Ohms
- Inductance de l'Armature : 3.0 mH
- Pertes du Champ : 5630 W

		Base speed (min <sup>-1</sup> ) at armature voltage (V)				Rated armature current (A)	Torque (Nm)	Max. electrical speed** (min <sup>-1</sup> )	Efficiency (%)	Armature circuit			Code number FR 2821
		400	440	460	500					Resist-ance (Ohm)	Induc-tance (mH)	Field loss (W)	
##	239		625		609	3652	1420	89.1	0.0643	3.0	5630	0540	

Figure2-10 : Caractéristique de moteur LAK 4280B

## Applications

Les moteurs LAK 4280B sont adaptés pour des applications industrielles lourdes telles que les entraînements de fours rotatifs dans l'industrie du ciment. Leur robustesse et leur capacité à fournir un couple élevé les rendent idéaux pour les environnements exigeants nécessitant une performance constante et fiable.[17]

## Maintenance

Pour assurer une performance optimale et prolonger la durée de vie des moteurs LAK 4280B, les éléments suivants doivent être vérifiés régulièrement :

- a) **Inspection des Balais** : Les balais doivent être inspectés et remplacés si nécessaire pour maintenir un bon contact électrique.
- b) **Vérification du Commutateur** : Nettoyage régulier du commutateur pour éviter l'accumulation de résidus.
- c) **Lubrification des Roulements** : Maintenir une lubrification adéquate pour réduire la friction.
- d) **Vérification des Connexions Électriques** : S'assurer que toutes les connexions sont sécurisées et exemptes de corrosion.



Figure 2-11 : maintenance de moteur

## 2.7 Généralités sur les variateurs de vitesse à Courant Continu

Les variateurs de vitesse à courant continu (DC) sont des dispositifs électroniques essentiels dans de nombreuses applications industrielles pour contrôler la vitesse et le couple des moteurs à courant continu. Ils permettent d'optimiser les performances des moteurs, d'améliorer l'efficacité énergétique et de prolonger la durée de vie des équipements. Voici une présentation détaillée des variateurs de vitesse à courant continu :

### Principe de Fonctionnement

Les variateurs de vitesse à courant continu ajustent la tension et le courant fournis au moteur pour contrôler sa vitesse de rotation et son couple. Ils permettent de réguler précisément la vitesse du moteur en modifiant la tension appliquée à l'armature du moteur ou en ajustant le courant de champ. [16]

### Types de Variateurs de Vitesse à Courant Continu

- a) Variateurs de Vitesse pour Courant Continu (CC)

- **Contrôle de l'Armature** : Régule la tension d'armature pour contrôler la vitesse du moteur. Ce type de variateur est souvent utilisé dans les applications nécessitant une large plage de vitesses.
- **Contrôle de Champ** : Ajuste le courant d'excitation (champ) pour contrôler le couple du moteur. Cela est particulièrement utile pour les applications où des variations de couple importantes sont requises.

### **Avantages des Variateurs de Vitesse à Courant Continu**

- a) **Efficacité Énergétique** : Les variateurs de vitesse à courant continu réduisent la consommation d'énergie en ajustant la vitesse du moteur en fonction des besoins réels de l'application, plutôt que de fonctionner constamment à pleine vitesse.
- b) **Contrôle Précis** : Ils permettent un contrôle précis de la vitesse et du couple, améliorant ainsi la performance et la qualité des processus industriels.
- c) **Prolongation de la Durée de Vie des Équipements** : En réduisant les démarrages et arrêts brusques, les variateurs de vitesse minimisent les contraintes mécaniques sur les moteurs et les équipements entraînés.
- d) **Flexibilité** : Ils permettent une grande flexibilité dans le contrôle des processus industriels, pouvant être ajustés pour répondre à des conditions de charge variables.

### **Applications des Variateurs de Vitesse à Courant Continu**

- a) **Industrie Manufacturière** : Utilisés pour contrôler la vitesse des machines-outils, des convoyeurs, et des presses.
- b) **HVAC (Chauffage, Ventilation et Climatisation)** : Régulent la vitesse des ventilateurs, des pompes et des compresseurs pour optimiser l'efficacité énergétique des systèmes HVAC.
- c) **Automatisation** : Intégrés dans les systèmes de contrôle automatisés pour des applications telles que les robots industriels et les lignes de production.
- d) **Industrie du Ciment** : Contrôlent la vitesse des moteurs des fours rotatifs, des broyeurs, et des convoyeurs pour une production optimale.
- e) **Transport** : Utilisés dans les systèmes de traction pour les trains, les tramways, et les véhicules électriques pour améliorer l'efficacité et la régulation de la vitesse.

### Composants Principaux des Variateurs de Vitesse à Courant Continu

- a) **Convertisseur de Puissance** : Convertit l'alimentation en courant alternatif fixe en courant continu, puis en courant continu variable.
- b) **Contrôleur** : Module la tension et le courant de sortie pour réguler la vitesse et le couple du moteur.
- c) **Interfaces Utilisateur** : Permettent aux opérateurs de configurer et de surveiller le fonctionnement du variateur de vitesse.
- d) **Capteurs** : Mesurent des paramètres tels que la vitesse, le courant et la tension pour fournir des informations au contrôleur.



Figure2-12 :micro console

### Maintenance des Variateurs de Vitesse à Courant Continu

La maintenance régulière des variateurs de vitesse est essentielle pour garantir leur bon fonctionnement et leur longévité. Les étapes de maintenance influent:

- a) **Inspection Visuelle** : Vérifier les connexions électriques et l'état des composants pour détecter tout signe de dommage ou d'usure.

- b) **Nettoyage** : Éliminer la poussière et les débris des composants électroniques pour prévenir la surchauffe et les courts-circuits.
- c) **Mise à Jour du Firmware** : Mettre à jour le logiciel du variateur de vitesse pour bénéficier des dernières améliorations et corrections de bugs.
- d) **Test Fonctionnel** : Effectuer des tests périodiques pour s'assurer que le variateur de vitesse fonctionne correctement et répond aux spécifications.

## 2.8 Variateur de vitesse ABB DCS800 de l'installation

Le variateur de vitesse ABB DCS800 que vous utilisez est configuré en mode maître-esclave pour synchroniser la vitesse et le couple de plusieurs moteurs connectés sur le même arbre ou réducteur. Voici une présentation détaillée basée sur les informations de la plaque signalétique et le document fourni.

Les variateurs ABB DCS800 sont conçus pour contrôler les moteurs à courant continu dans des applications industrielles exigeantes. Ils sont particulièrement adaptés pour les applications nécessitant un contrôle précis et une haute performance [16]

### Informations Générale

- **Marque** : ABB Automation Products GmbH
- **Type** : DCS800-S01-1200-04
- **Numéro de Série** : 0502272A09427452
- **Tension d'Alimentation (U1)** : 3 x 400 V
- **Tension de Sortie (U2)** : 465 V DC
- **Courant d'Entrée (I1)** : 980 A
- **Courant de Sortie (I2)** : 1200 A
- **Fréquence** : 50/60 Hz
- **SCCR** : 100 kA

CE	<b>ABB Automation Products GmbH</b>		U <sub>1</sub>	3- 400 V	U <sub>2</sub>	465	V <sub>DC</sub>
	Type: DCS800-S01-1200-04		I <sub>1</sub>	980 A	I <sub>2</sub>	1200	A
	Ser No: 0502272A09427452		f <sub>1</sub>	50/60Hz	I <sub>F</sub>	25	A
	MTR OL INCL: See Manual		SCCR	100 kA	Fan	230	V

Figure 2-13: paramètre DCS800

## Configuration Maître-Esclave

En mode maître-esclave, les variateurs DCS800 utilisent un lien de communication DSL pour synchroniser les variateurs :

- **Maître DCS800** : Contrôle principal de la vitesse et du couple.
- **Esclave DCS800** : Suivi des commandes du maître pour assurer une synchronisation précise.

Cette configuration est particulièrement utile pour les applications nécessitant une coordination étroite entre plusieurs moteurs, tels que les systèmes de convoyeurs, les broyeurs, et les machines de traitement continu.

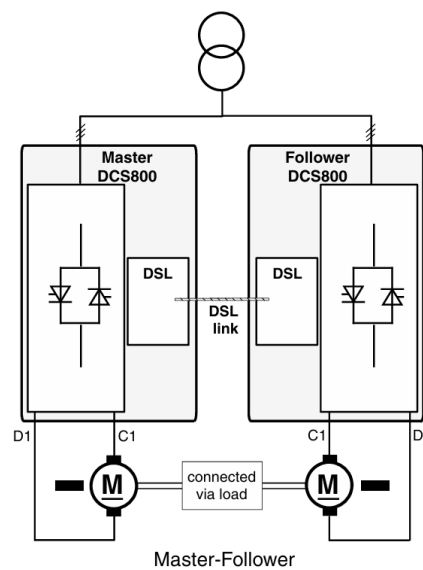


Figure 2-14 : configuration Maître-Esclave

## Caractéristiques Techniques

### a) Large Gamme de Courants et Tensions

- Courants de 20 A à 5200 A
- Tensions alternatives de 230 V à 1200 V

### b) Applications Adaptées

- Systèmes de contrôle des moteurs incluant les applications à haute dynamique
- Opérations 12-pulses pour réduire les harmoniques et améliorer l'efficacité

### c) Modules Convertisseurs

- Disponibles en différentes tailles (D1 à D7) pour répondre aux besoins spécifiques en termes de courant et de tension.

- Équipés de panneaux de contrôle pour une installation et une mise en service faciles.

d) **Options de Communication**

- Interfaces de bus de terrain intégrées, y compris Modbus, Profibus-DP, DeviceNet, CANopen, ControlNet, et Ethernet pour une intégration facile dans les systèmes d'automatisation existants.
- Outils logiciels pour la programmation, la maintenance et la surveillance à distance.

### **Fonctionnalités Avancées**

a) **Assistance à la Mise en Service**

- Assistant de démarrage intégré pour une configuration rapide et intuitive.
- Macros préprogrammées pour les paramètres les plus fréquents, simplifiant la mise en service sans modifications individuelles des paramètres.

b) **Programmation Adaptative**

- Programmation adaptative avec des blocs fonctionnels pour personnaliser les fonctions selon les besoins spécifiques de l'application.
- Outil PC DriveWindow Light pour créer, documenter, éditer et télécharger des programmes adaptatifs.

c) **Protection et Sécurité**

- Protection contre les surcharges, les courts-circuits, et les surchauffes.
- Fonctions de diagnostic avancées pour une détection rapide des fautes et une maintenance efficace..

## **2.9 Problématiques et maintenance de l'installation**

L'entretien régulier des équipements industriels est essentiel pour garantir leur bon fonctionnement et prolonger leur durée de vie. Dans le contexte de la cimenterie de Metidja (SCMI) du groupe GICA, plusieurs gammes de maintenance sont mises en œuvre pour assurer la fiabilité des installations. Cependant, certains défis et problématiques doivent être adressés pour améliorer l'efficacité et la durabilité de l'infrastructure.



### 2.9.1 Problématiques de Maintenance

#### a) Disponibilité des Pièces de Rechange

- Un des principaux problèmes rencontrés est la difficulté à trouver les pièces de rechange pour le moteur LAK 4280B. Ce moteur spécifique nécessite des composants qui ne sont pas toujours facilement disponibles sur le marché, ce qui peut entraîner des retards significatifs dans les réparations et la maintenance préventive.

#### b) Coût de la Maintenance

- Le coût de la maintenance est également un défi majeur. La maintenance régulière des moteurs et des équipements associés implique des dépenses considérables en termes de pièces de rechange, de main-d'œuvre spécialisée, et de temps d'arrêt de l'équipement. La gestion de ces coûts tout en assurant une maintenance de haute qualité est un équilibre délicat à maintenir.

#### c) Fiabilité des Équipements

- Les équipements, bien qu'entretenus régulièrement, peuvent présenter des problèmes de fiabilité en raison de l'usure naturelle et des conditions de fonctionnement difficiles. Cela inclut des problèmes tels que des pannes de moteur, des défaillances de composants électriques, et des problèmes de refroidissement.

### Gammes de Maintenance

Les gammes de maintenance actuellement en place pour assurer le bon fonctionnement des équipements :

#### a) Gamme MTIFSE055

- Vérification visuelle du stator et rotor enroulements (propreté, connexions, etc.)
- Nettoyage du joint de l'échangeur de chaleur d'air et remplacement si nécessaire
- Vérification visuelle et mesure du glissement des bagues excentriques (0,01 mm pour 100 mm)
- Vérification de l'état d'isolation des têtes de bobines du stator
- Vérification de l'état d'isolation du support de la bobine du stator

- Vérification de l'état général et du bon serrage des raccords du rotor
- Vérification de l'état général et du bon serrage des raccords du stator
- Vérification des paliers pour fuite d'huile à l'intérieur du moteur
- Vérification de la propreté et de l'usure du bobinage du rotor
- Contrôle des capteurs et émetteurs d'instrumentation et de la mise en protection des relais

**b) Gamme MTIFRE050**

- Vérification des bornes de terre et des connexions
- Contrôle des boîtes à bornes pour assurer qu'elles sont bien fermées
- Vérification de la température d'eau de refroidissement à l'entrée et à la sortie du moteur
- Inspection visuelle du refroidisseur d'air et vérification de sa température
- Vérification de la propreté du moteur

**c) Gamme MTISSE054**

- Mesure de la résistance d'isolement et du IP pour le stator et le rotor, et rédaction d'un compte rendu.
- Mesure de l'isolation du bobinage du stator avec un mégohmmètre et rédaction d'un compte rendu.
- Mesure de la résistance des PT100 du bobinage du stator et comparaison avec la mesure réelle.
- Mesure de l'isolation du bobinage du rotor avec un mégohmmètre et rédaction d'un compte rendu.

**d) Gamme MTISRE051**

- Vérification du bruit, des odeurs et des vibrations.
- Mesure de la température des roulements et des enroulements, et rédaction d'un compte rendu.

**e) Gamme MTISRE070**

- Réalisation d'une analyse spectrale.

## 2.9.2 Problématique de Performance

### a) La Limite des Moteurs Actuels

Notre usine opère actuellement avec des moteurs de 235 kW qui alimentent les fours rotatifs. Dans le cadre de nos objectifs d'augmentation de la production, il est devenu essentiel d'accroître la capacité de production de l'usine en élevant la vitesse de rotation de four.

Cependant, les moteurs actuels s'avèrent inadéquats pour répondre à ces nouvelles exigences opérationnelles.

Les moteurs de 235 kW utilisés présentement atteignent leur limite de performance sous les contraintes de charge actuelles, et ne disposent pas de la puissance supplémentaire nécessaire pour supporter une augmentation de la vitesse de rotation de 2.2 tr/min à 2.5 tr/min.

Cette augmentation de vitesse est critique car elle est directement liée à l'augmentation de la puissance nécessaire et souhaitée de la production quotidienne de ciment.

### b) Conséquences et Enjeux :

La principale problématique réside donc dans le fait que, sans une puissance suffisante, nous ne pouvons ni accroître la production ni optimiser le fonctionnement du four, ce qui est nécessaire pour répondre à la demande croissante de notre production.

La limitation des moteurs actuels pose un défi majeur, rendant impératif un remplacement ou une mise à niveau des moteurs pour non seulement atteindre mais aussi maintenir la production à un niveau compétitif.

## 2.10 Conclusion

Le chapitre a fourni une description détaillée de l'installation industrielle actuelle, en mettant l'accent sur les équipements critiques tels que les fours rotatifs, les réducteurs, les moteurs à courant continu et les variateurs de vitesse. Les spécificités techniques de chaque composant ont été examinées pour mettre en évidence leur rôle essentiel dans le processus de production de ciment.

Le chapitre a également mis en lumière certaines problématiques de maintenance, notamment la difficulté à trouver des pièces de rechange pour les moteurs LAK 4280B et les

coûts élevés associés à la maintenance des équipements. Ces défis nécessitent une attention particulière pour garantir la continuité de la production et la réduction des temps d'arrêt.

En conclusion, bien que l'installation actuelle soit performante et bien équipée, il existe des opportunités significatives pour améliorer l'efficacité et réduire les coûts. En mettant en œuvre les recommandations proposées, l'installation peut non seulement maintenir sa performance actuelle mais aussi atteindre de nouveaux niveaux d'efficacité et de fiabilité.

Dans le chapitre suivant, nous allons proposer des solutions et présenter le matériel nécessaire pour atteindre un bon fonctionnement.

## **Chapitre 3**

### **Solutions Proposées et Étude d'Ingénierie**

### 3.1 Introduction

L'évolution technologique et les exigences croissantes de l'industrie nécessitent des systèmes motorisés plus performants, plus efficaces et plus flexibles.

Face à ces défis, il devient essentiel de reconsidérer et de moderniser les installations existantes pour répondre aux nouvelles normes de production et d'efficacité énergétique.

Ce chapitre explore les solutions proposées pour améliorer notre installation industrielle en se concentrant sur les moteurs asynchrones et les variateurs de vitesse pour courant alternatif.

### 3.2 Généralités sur les moteurs asynchrones

Les moteurs asynchrones, également connus sous le nom de moteurs à induction, sont extrêmement répandus dans les applications industrielles en raison de leur simplicité de construction, de leur coût abordable, de leur robustesse et de leur facilité d'entretien. Ces moteurs sont disponibles dans une large gamme de puissances, allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts.

#### Définition et Constitution

Un moteur asynchrone est une machine électrique dont la vitesse peut varier et qui fonctionne avec un courant alternatif. Les parties principales du moteur asynchrone comprennent :

- a) **Le stator** : La partie fixe du moteur, constituée de bobinages disposés dans des encoches autour d'un noyau ferromagnétique. Le stator est alimenté directement par le réseau électrique triphasé, ce qui génère un champ magnétique tournant.
- b) **Le rotor** : La partie mobile du moteur, qui peut être court-circuité ou équipé d'une cage d'écureuil (rotor en cage d'écureuil). Le rotor est placé à l'intérieur du stator et tourne sous l'effet du champ magnétique généré par le stator.[14]

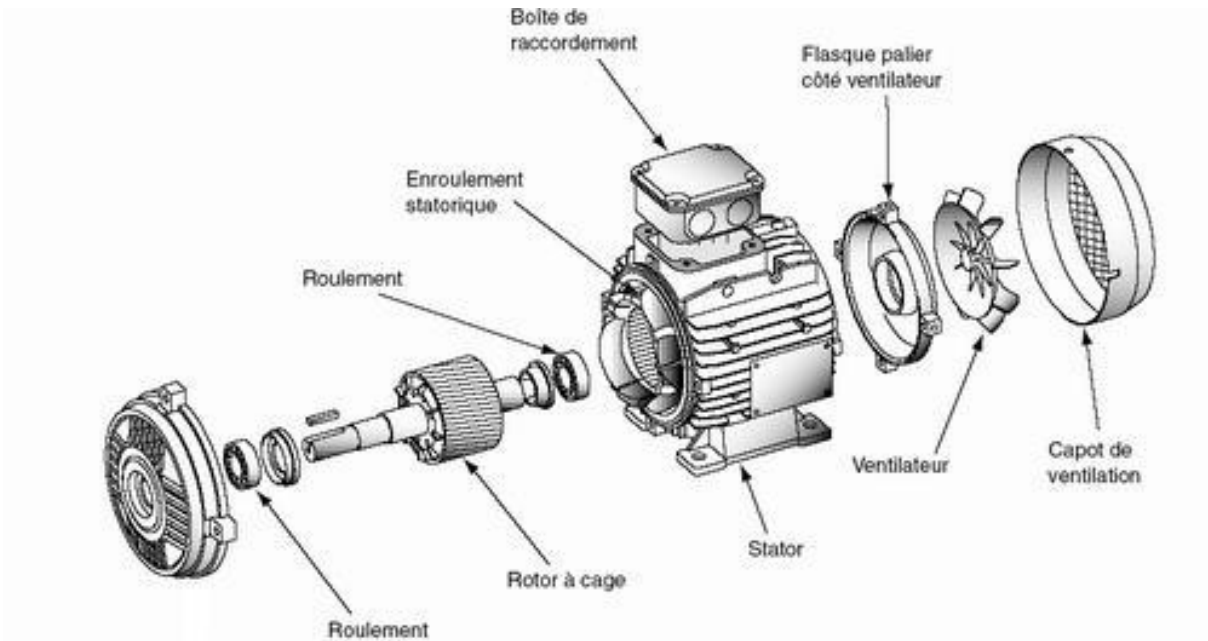


Figure 3-1 : Vue Éclatée d'un Moteur Électrique Asynchrone

### Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des moteurs asynchrones repose sur l'interaction électromagnétique entre le champ magnétique tournant du stator et les courants induits dans le rotor. Ce processus est semblable à celui d'un transformateur, avec le stator agissant comme l'enroulement primaire et le rotor comme l'enroulement secondaire.

- a) **Champ magnétique tournant** : Le courant triphasé qui traverse les bobinages du stator crée un champ magnétique tournant. Ce champ coupe les conducteurs du rotor et induit des courants dans le rotor.
- b) **Courants induits et couple électromagnétique** : Les courants induits dans le rotor génèrent leur propre champ magnétique, qui interagit avec le champ du stator. Cette interaction produit un couple électromagnétique qui fait tourner le rotor.
- c) **Glissement** : La vitesse du rotor est toujours inférieure à celle du champ magnétique du stator. Cette différence de vitesse est supprimée et est essentielle pour l'induction du courant dans le rotor.

### Avantages

Les moteurs asynchrones offrent plusieurs avantages significatifs :

- a) **Relativement bas** : Leur construction simple et leur grande utilisation permettent des coûts d'économies d'échelle, rendant ces moteurs économiques.

- b) **Robustesse** : Ils sont conçus pour être durables et peuvent fonctionner dans des environnements industriels difficiles sans nécessiter de maintenance fréquente.
- c) **Faible entretien** : Contrairement aux moteurs à courant continu, les moteurs asynchrones n'ont ni commutateurs ni balais, ce qui réduit les besoins en entretien et augmente leur fiabilité.

### Applications

Les moteurs asynchrones sont utilisés dans une multitude d'applications industrielles en raison de leur capacité à fournir une vitesse de rotation quasi constante sous une charge variable.

Voici quelques exemples :

- **Pompes** : Utilisées pour pomper des liquides dans des systèmes de traitement de l'eau, des installations industrielles, etc.
- **Ventilateurs** : Employés dans les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) pour déplacer l'air.
- **Convoyeurs** : Utilisés pour transporter des matériaux dans des usines et des entrepôts.

Avec l'avancement de la technologie des variateurs de vitesse, les moteurs asynchrones peuvent désormais offrir des performances de vitesse variable, tout en leur adaptabilité à diverses applications industrielles.

En résumé, les moteurs asynchrones, grâce à leur conception simple, leur robustesse et leur faible coût de maintenance, continuent de jouer un rôle crucial dans les applications industrielles modernes, offrant des solutions efficaces et fiables pour une variété de besoins opérationnels

### 3.3 Généralités sur les variateurs de vitesse pour courant alternatif

Les variateurs de vitesse pour courant alternatif (CA), également appelés convertisseurs de fréquence ou variateurs de fréquence, sont des dispositifs électroniques utilisés pour contrôler la vitesse de rotation des moteurs à courant alternatif. Leur utilisation est essentielle dans de nombreuses applications industrielles où il est nécessaire d'ajuster la vitesse des moteurs pour améliorer la performance, l'efficacité énergétique et la flexibilité opérationnelle.



## Principe de fonctionnement

Les variateurs de vitesse pour courant alternatif fonctionnent en modifiant la fréquence et l'amplitude de la tension d'alimentation fournie au moteur. Leur principe de fonctionnement peut être divisé en trois étapes principales :

- Redressement** : Le courant alternatif (CA) de l'alimentation est converti en courant continu (CC) à l'aide d'un redresseur. Ce processus permet de stabiliser la tension et de préparer le courant pour la modulation.
- Intermédiaire CC** : La tension continue obtenue est lissée par des condensateurs pour éliminer les fluctuations et obtenir une alimentation CC stable.
- Inversion** : La tension continue est reconvertie en courant alternatif à la fréquence souhaitée par un onduleur. Cet onduleur utilise des composants de commutation (tels que des IGBT) pour générer une onde CA à fréquence et amplitude variables, contrôlant ainsi la vitesse et le couple du moteur.

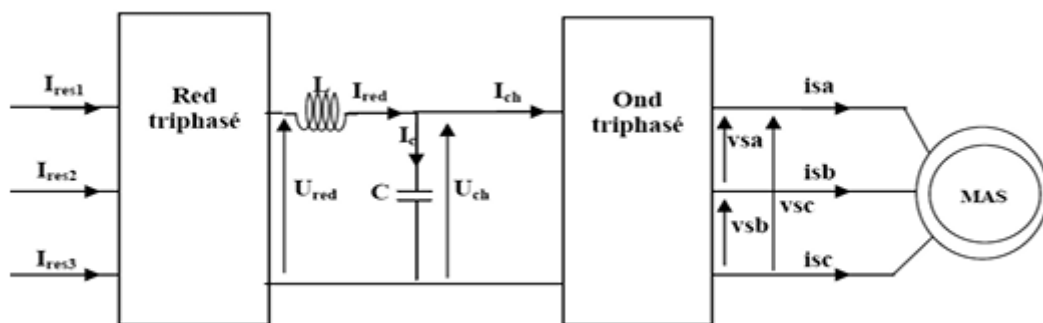


Figure 3-2 : Schéma Électrique d'un Variateur de Vitesse

## Avantages des variateurs de vitesse

Les variateurs de vitesse pour CA offrent plusieurs avantages importants :

- Contrôle précis de la vitesse** : Ils permettent un réglage fin de la vitesse de rotation du moteur, offrant une flexibilité opérationnelle pour diverses applications industrielles.
- Efficacité énergétique** : En ajustant la vitesse du moteur en fonction des besoins réels de l'application, les variateurs de vitesse réduisent la consommation d'énergie et les coûts opérationnels.
- Démarrage progressif et protection du moteur** : Les variateurs de vitesse permettent un démarrage progressif du moteur, notamment les courants de démarrage élevés et les chocs mécaniques, ce qui prolonge la durée de vie du moteur.

- d) **Optimisation du couple** : Ils offrent une optimisation du couple moteur, améliorant ainsi la performance des machines et des équipements entraînés.
- e) **Réduction du bruit et des vibrations** : En contrôlant la vitesse du moteur, les variateurs de vitesse contribuent à réduire le bruit et les vibrations, améliorant ainsi le confort et la sécurité dans l'environnement de travail.

Moteur asynchrone	En usage normal	Avec un variateur de vitesse
<b>Courant de démarrage</b>	Très élevé, de l'ordre de 6 à 8 fois le courant nominal	Limité dans le moteur (en générale de 1.5 fois $I_N$ ).
<b>Couple de démarrage <math>C_d</math></b>	Élever et non contrôlé, de l'ordre de 2 à 3 $C_N$	De 1.5 fois le $C_N$ , Contrôlé pendant toute l'accélération
<b>Démarrage</b>	Brutal ; la durée n'est fonction que des caractéristiques du moteur et de la charge entraînée	Progressif sans à-coup et contrôlé
<b>Vitesse</b>	Varié légèrement selon la charge (proche de $N_s$ )	Variation possible de 0 jusqu'à une valeur supérieure à $N_s$
<b>Couple maximal <math>C_M</math></b>	Elevé, de l'ordre de 2 à 3 le couple nominal	Elevé disponible sur toute la plage de vitesse (de 1.5 $C_N$ )
<b>Freinage électrique</b>	Relativement complexe	Facile
<b>Inversion du sens de marche</b>	Facile seulement après arrêt moteur	Facile
<b>Risque de décrochage</b>	Oui, en cas de sur couple, ou en cas de baisse de tension	Non

Tableau 1-1 : comparaison d'un moteur asynchrone avec variateur et dans usage normal

### Applications des variateurs de vitesse

Les variateurs de vitesse pour courant alternatif sont utilisés dans une large gamme d'applications industrielles et commerciales, notamment :

- a) **Four rotatif** : Utilisé dans les cimenteries pour la production de clinker, les variateurs permettent de contrôler la vitesse de rotation du four, optimisant ainsi la température et la qualité du produit final

- b) **Compresseurs** : Ajustement de la vitesse pour répondre à la demande de pression en temps réel, économisant ainsi de l'énergie et améliorant la durée de vie de l'équipement.
- c) **Broyeurs** : Utilisés dans les industries minières et de traitement des minéraux, les variateurs permettent un contrôle précis de la vitesse pour optimiser la production et réduire l'usure
- d) **Systèmes de pompage** : Régulation de la vitesse des pompes pour ajuster le débit en fonction de la demande, améliorant l'efficacité énergétique et la précision du contrôle de processus

### 3.4 Critères de choix des moteurs et variateurs

#### Critères de Choix pour un Moteur Asynchrone :

Lors du choix d'un moteur asynchrone pour remplacer les moteurs existants, il est crucial de considérer plusieurs critères techniques et opérationnels. Ces critères assurent non seulement que le moteur répondra aux besoins spécifiques de l'application, mais aussi qu'il fonctionnera de manière fiable et efficace sur le long terme.

Les principaux critères à évaluer incluent la puissance, le couple, la classe d'isolation, le type de fixation, l'efficacité énergétique, et les spécifications de démarrage.

Chacun de ces éléments joue un rôle essentiel dans la sélection d'un moteur adapté aux exigences de l'usine, en particulier dans le contexte de l'optimisation de la production et de l'augmentation de la vitesse de rotation des fours rotatifs.

#### a) Types de services de fonctionnement (Duty types) :

Les moteurs électriques peuvent fonctionner sous différents types de services (duty types) définis par la norme IEC 60034-1. Voici les principaux types:

- **S1 (Service continu)** : Le moteur fonctionne à charge constante et en régime permanent pendant une durée suffisante pour atteindre l'équilibre thermique.
- **S2 (Service à durée déterminée)** : Le moteur fonctionne à charge constante pendant une période de temps spécifiée, trop courte pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un arrêt suffisant pour revenir à la température ambiante.
- **S3 (Service intermittent périodique)** : Séquence de périodes identiques de fonctionnement à charge constante et de repos, sans que la période de fonctionnement soit suffisante pour atteindre l'équilibre thermique.

- **S4 (Service intermittent périodique avec démarrages)** : Similaire au S3, mais avec des périodes de démarrage importantes pendant chaque cycle de fonctionnement.
- **S5 (Service intermittent périodique avec freinage électrique)** : Similaire au S4, mais avec freinage électrique pendant chaque cycle de fonctionnement.
- **S6 (Service continu périodique)** : Séquence de périodes identiques de fonctionnement à charge constante et de fonctionnement à vide, sans période de repos.
- **S7 (Service continu périodique avec démarrages et freinage électrique)** : Séquence de périodes identiques de fonctionnement à charge constante incluant des démarrages et des freinages électriques.
- **S8 (Service continu périodique avec variations de charge et de vitesse)** : Séquence de périodes identiques de fonctionnement à différentes charges et vitesses, incluant des démarrages et des freinages.

Dans ce contexte, le mode de fonctionnement approprié pour notre moteur est le **S1 (service continu)**. Ce choix est justifié par les besoins de fonctionnement continu de notre installation industrielle, où le moteur doit fonctionner sans interruption et à une charge constante. Le service S1 garantit que le moteur peut atteindre et maintenir son équilibre thermique tout en offrant une fiabilité et une disponibilité maximales pour répondre aux exigences de production de la cimenterie [18]

## b) Calcul de la puissance du moteur

### 1. Analyse du Premier Graphe

Le premier graphe montre la relation entre la puissance consommée et la vitesse de rotation du four en régime transitoire. En analysant ce graphe, on observe que la puissance est proportionnelle à la vitesse de rotation du four. Plus précisément :

- La vitesse de rotation (en noir) et la puissance consommée (en bleu) augmentent de manière corrélée.
- Cette relation linéaire indique que toute variation de la vitesse de rotation entraîne une variation proportionnelle de la puissance consommée.

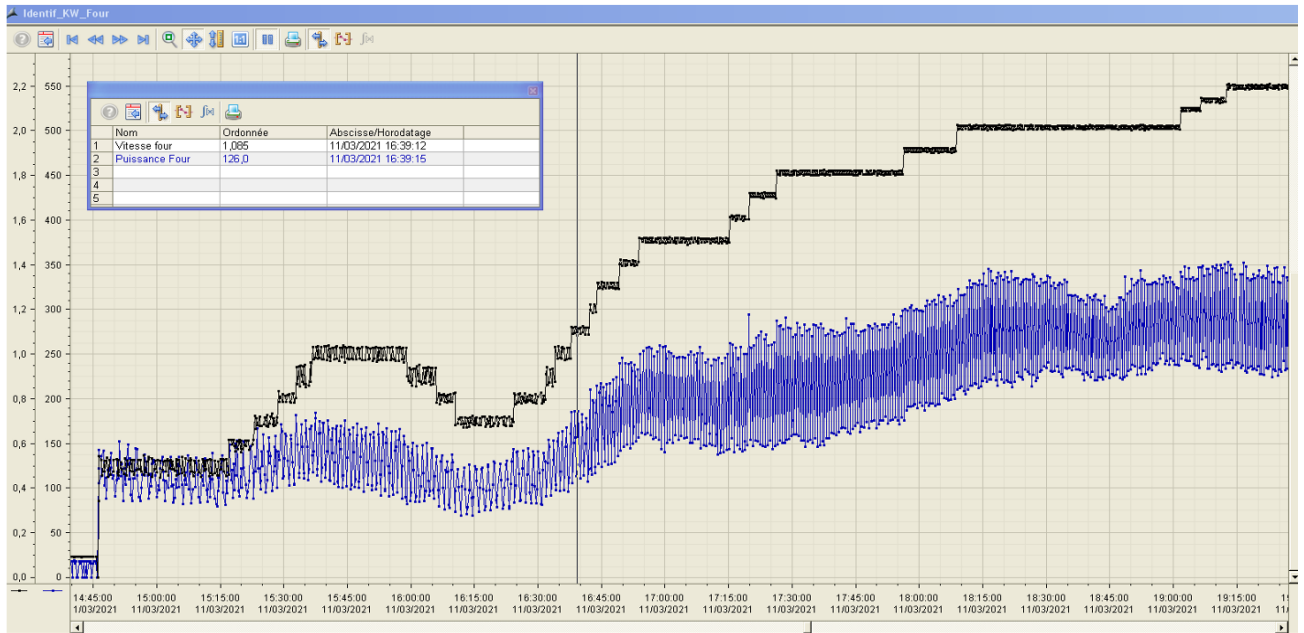


Figure 3-3 : graphes de puissance et de vitesse dans régime transitoire

## 2. Analyse du Deuxième Graphe

Le deuxième graphe montre la puissance consommée par le four en régime permanent.

À partir de ce graphe, nous pouvons déterminer que :

- En régime permanent, la puissance consommée par le four se stabilise autour de 450 kW.
- Cette puissance est la somme de la consommation de deux moteurs, chacun contribuant à l'entraînement du four.

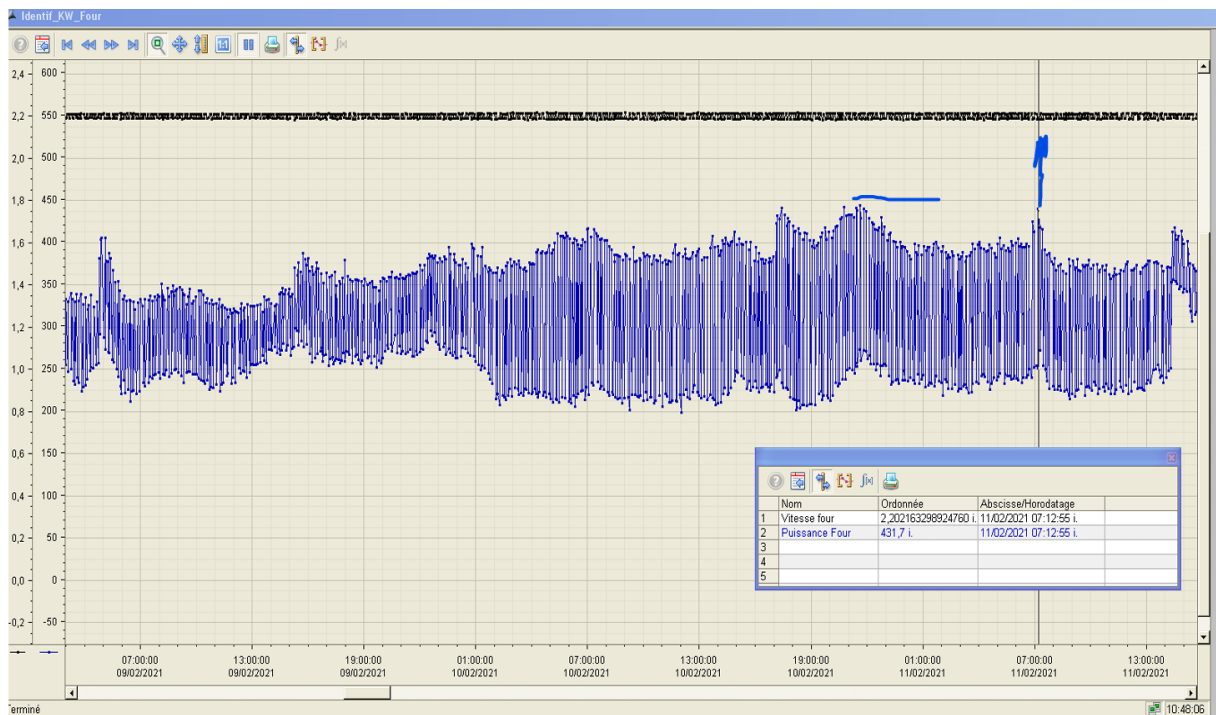


Figure 3-4 : graphes de puissance et de vitesse dans régime permanents

- La vitesse de rotation est stable, ce qui montre que les moteurs maintiennent efficacement la vitesse du four avec une puissance constante.

### 3. Calcul de la Puissance Nécessaire

Pour déterminer la puissance nécessaire lorsque la vitesse de rotation est de 2.5 tr/min, nous utilisons la proportion suivante :

$$\text{Puissance à 2.5 tr/min} = (2.5 \times 450 \text{ kW}) / 2.2 = 511.36 \text{ kW}$$

Puisque le four est entraîné par deux moteurs, la puissance par moteur est :

$$\text{Puissance par moteur} = 511.36 \text{ kW} / 2 = 255.68 \text{ kW}$$

### 4. Ajouter des Corrections

Pour ajuster la puissance mécanique en tenant compte des facteurs de correction (température, altitude, fréquence) :

- Correction pour la température ( $K_t$ ) :

$$K_t = 1.1$$

- Correction pour l'altitude ( $K_a$ ) :

$$K_a = 0.95$$

- Correction pour la fréquence ( $K_f$ ) :

$$K_f = 1.05$$

La puissance corrigée ( $P_m$ ) est donc calculée comme suit :

$$P_m \geq P_{mec} \times K_t \times K_a \times K_f$$

Avec

$$P_{mec} = 255.68 \text{ kW}$$

$$P_m \geq 255.68 \times 1.1 \times 0.95 \times 1.05 = 280.54 \text{ kW}$$

### 5. La sélection des Moteurs

En nous basant sur les calculs précédents, nous devons choisir des moteurs qui peuvent fournir une puissance corrigée de **280.54 kW**. En consultant les catalogues de ABB et Siemens, nous avons choisi des moteurs avec une puissance normalisée de **315 kW** pour la nouvelle installation.

Ces moteurs assurent une performance optimale et une efficacité énergétique, garantissant que le four fonctionne correctement et de manière fiable dans les conditions opérationnelles spécifiques. [19]

### c) Calcul du Couple Nécessaire

Le moteur électrique doit vaincre le couple résistant de la machine entraînée et mettre en vitesse l'inertie de celle-ci. Il est important de connaître le couple nécessaire du moteur utilisé, qui dépend de la puissance et de la vitesse de ce moteur.

#### Vitesse de rotation du moteur

Pour une vitesse de rotation de 2.5 tr/min du four, et avec un réducteur ayant un rapport de réduction  $k=518.8$ , la vitesse de rotation du moteur est calculée comme suit :

$$N = \text{Vitesse du moteur} = 2.5 \times 518.8 = 1297 \text{ tr/min}$$

#### Vitesse de rotation du moteur

La vitesse de synchronisme du moteur est calculée en radians par seconde ( $\Omega$ ) :

$$\Omega = (2\pi \times N) / 60 = 135.75 \text{ rad/s}$$

#### Calcul du couple

Le couple nécessaire ( $C$ ) est déterminé en utilisant la puissance mécanique ( $P_{mec}$ ) et la vitesse de synchronisme ( $\Omega$ ) :

$$C = P_{mec} / \Omega$$

Avec

$$P_{mec} = 255.68$$

$$C = 255680 / 135.75 = 1883.31 \text{ N.m}$$

Ce calcul montre que le couple nécessaire pour entraîner la machine avec le moteur est de 1883.31 N.m. Ce couple doit être fourni par le moteur pour garantir une opération efficace et stable du four dans la cimenterie.

#### Couple de Démarrage (CD)

- **Rapport** :  $CD/CN = 1.6$
- **Couple nécessaire (CN)** : 1883.3 Nm
- **Couple de démarrage** :  $1883.3 \text{ Nm} \times 1.6 = 3013.28$
- **Temps** : 30 secondes

#### Couple de Décollage (CD)

- **Rapport** :  $CD/CN = 2.0$
- **Couple nécessaire (CN)** : 1883.3 Nm
- **Couple de décollage** :  $1883.3 \text{ Nm} \times 2 = 3766.6$
- **Temps** : 3 secondes

### Couple de Surcharge (CS)

- **Rapport** :  $CS/CN = 1.2$
- **Couple nécessaire (CN)** : 1883.3 Nm
- **Surcharge** :  $1883.3 \text{ Nm} \times 1.2 = 2259.96 \text{ Nm}$
- **Temps** : 1 heure

Condition	Rapport	Couple nécessaire (Nm)	Couple calculé (Nm)	Temps
Couple de Démarrage	1.6	1883.3	3013.28	30 secondes
Couple de Décollage	2.0	1883.3	3766.6	3 secondes
Surcharge	1.2	1883.3	2259.96	1 heure

### d) Types de Fixation des Moteurs :

- **Fixation par Bride (B3)** : Le moteur est monté sur une surface plane à l'aide de pieds.
- **Fixation à Flasque (B5)** : Combinaison de la fixation par bride et par flasque.
- **Fixation par Pattes avec Brides (B14)** : Le moteur est monté sur une surface plane avec des pattes, mais il est également équipé d'une bride pour des applications spéciales.
- **Fixation par Pattes et Flasque à Bride (B34)** : Combinaison de la fixation par pattes et flasque.
- **Fixation par Bride Arrière (V1)** : Le moteur est monté verticalement avec une bride située à l'extrémité arrière.
- **Fixation par Bride Frontale (V3)** : Le moteur est monté verticalement avec une bride située à l'extrémité avant.

Pour garantir une installation stable et fiable de notre moteur ABB M3BP 355 SMC 4, nous avons choisi la fixation de type B3. Ce type de fixation utilise des pieds pour monter le moteur sur une surface plane, offrant une grande stabilité et facilitant l'alignement précis du moteur. La fixation B3 est idéale pour notre application,

### e) Types de Protection par Indice IP

L'indice de protection IP (International Protection) est défini par la norme CEI 60529 et comprend deux chiffres :

- **Premier Chiffre** (Protection contre les Solides (poussière, particules)).

IPOX : Aucune protection particulière.



IP1X : Protection contre les objets solides de plus de 50 mm de diamètre.

IP2X : Protection contre les objets solides de plus de 12,5 mm de diamètre.

IP3X : Protection contre les objets solides de plus de 2,5 mm de diamètre.

IP4X : Protection contre les objets solides de plus de 1 mm de diamètre.

IP5X : Protection limitée contre la poussière.

IP6X : Étanche à la poussière (aucune pénétration de poussière).

- **Deuxième chiffre** : Protection contre les liquides (eau).

IPX0 : Aucune protection particulière.

IPX1 : Protection contre les gouttes d'eau verticales.

IPX2 : Protection contre les gouttes d'eau lorsqu'elles sont inclinées jusqu'à 15°.

IPX3 : Protection contre la pluie.

IPX4 : Protection contre les éclaboussures d'eau.

IPX5 : Protection contre les jets d'eau à basse pression de toutes directions.

IPX6 : Protection contre les jets d'eau à haute pression de toutes directions.

IPX7 : Protection contre les effets de l'immersion temporaire.

IPX8 : Protection contre les effets de l'immersion continue sous pression

Pour assurer la protection adéquate de notre moteur ABB M3BP 355 SMC 4, nous avons choisi un indice de protection IP 55. Ce niveau de protection garantit que le moteur est protégé contre les dépôts de poussière en quantité suffisante pour interférer avec son fonctionnement normal, ainsi que contre les jets d'eau projetés de toutes directions. Cette protection est essentielle pour assurer la durabilité et la fiabilité du moteur dans des environnements industriels exigeants, où il peut être exposé à la poussière et à l'humidité .[20]

## f) La Classe d'Isolation pour le Moteur

### 1) Importance de la Classe d'Isolation :

- La classe d'isolation d'un moteur détermine la température maximale que l'isolant peut supporter sans se dégrader. Une bonne classe d'isolation protège le moteur, en particulier les enroulements, contre les surchauffes et prolonge ainsi la durée de vie du moteur.
- Utiliser un moteur à une température inférieure à celle permise par la classe d'isolation peut doubler la durée de vie de l'isolant et, par conséquent, du moteur.

- 2) **Classes d'Isolation selon la CEI 85:** Les moteurs asynchrones sont dotés de différentes classes d'isolation, identifiées par les lettres A, E, B, F, H, et C. Chaque classe correspond à une température maximale supportée par les enroulements du moteur, selon le tableau suivant

Classe	Valeur Maxi (°C)	Marge thermique (°C)	Échauffement permis (°C)	Température ambiante (°C)
A	105	5	60	40
E	120	5	75	40
B	130	5	80	40
F	155	10	105	40
H	180	15	125	40
C	220	20	150	40

**Indications Clés :**

- **Valeur maximale :** Température maximale supportée pour l'isolation du moteur.
- **Marge thermique :** Différence entre la température maximale et l'échauffement permis.
- **Échauffement permis :** Échauffement maximum conseillé, variable selon l'application.
- **Température ambiante :** Considérée standard à 40°C pour les valeurs données.

**Remarques:**

- Les moteurs sont généralement conçus pour fonctionner à une température ambiante de 40°C et une altitude maximale de 1000 m.
- Si les conditions d'utilisation diffèrent, les valeurs doivent être ajustées.
- L'échauffement réel varie selon l'utilisation du moteur. Pour des applications exigeantes, il peut être nécessaire de choisir une classe d'isolation supérieure.

**3) Choix de la Classe d'Isolation F :**

Pour notre application, nous choisirons une classe d'isolation F, car elle correspond aux applications industrielles les plus courantes et offre une bonne marge de sécurité thermique avec une température maximale de 155°C et un échauffement permis de 105°C. Cette classe d'isolation permet de protéger efficacement le moteur contre les surchauffes et d'assurer une longue durée de vie même en conditions d'utilisation intense.

### f) Types d'Efficacité des Moteurs (IE1, IE2, IE3, IE4, IE5) :

Les classes d'efficacité des moteurs électriques sont définies par les normes internationales pour encourager l'utilisation de moteurs plus efficaces, réduisant ainsi la consommation d'énergie et les coûts d'exploitation.

Nous avons choisi un moteur classé IE4 – Super Premium Efficiency. Cette classe d'efficacité offre une consommation d'énergie réduite et une performance supérieure, avec une efficacité de 97.2% à pleine charge. Le choix d'un moteur de type IE3 garantit non seulement des économies d'énergie significatives mais aussi une réduction de l'impact environnemental, tout en maintenant une fiabilité et une durabilité exceptionnelles pour des applications industrielles exigeantes. [21]

Classe IE	Description	Application	Exigence
IE1	Standard Efficiency	Applications à faibles exigences d'efficacité	Conformes aux anciennes normes
IE2	High Efficiency	Environnements industriels	Souvent requis par les réglementations
IE3	Premium Efficiency	Applications industrielles	Requis par les normes internationales
IE4	Super Premium Efficiency	Environnements industriels avancés	Adoptées pour améliorer l'efficacité énergétique
IE5	Ultra Premium Efficiency	Applications de pointe	Norme émergente pour l'efficacité maximale

Tableau 1-2 : comparaison entre efficacités des moteurs

### Critères de choix des variateurs de vitesse

Pour sélectionner un variateur de vitesse adapté, il faut considérer :

a) **Compatibilité avec le moteur** : Le variateur doit être compatible avec les spécifications électriques du moteur (tension, courant, puissance).

- **Puissance : 315 KW**
- **Tension : 400V**
- **Courant : 550A**
- **Constructeur : ABB ou SIEMENS**

b) **Plage de vitesse** : Le variateur doit permettre une plage de réglage de la vitesse adaptée aux besoins de l'application il est 1000tr/min – 1500tr/min

c) **Type de contrôle** : Les types de contrôle soit :

- le **contrôle vectoriel**
- le **contrôle direct du couple (DTC)**.

d) **Protection et fonctionnalités** : Les variateurs doivent offrir des protections contre les surcharges, les sursensions, les courts-circuits, et inclure des fonctionnalités avancées comme la régulation PID, les interfaces de communication, et les capacités de diagnostic.

e) **Efficacité énergétique** : Comme pour les moteurs, les variateurs efficaces permettent de réduire la consommation d'énergie et les coûts opérationnels. IE4 ou IE3

f) **Protection par Indice IP** : IP20 ou IP21

### 3.5 Installation Siemens

Siemens AG est une entreprise technologique multinationale fondée en 1847, reconnue mondialement pour ses solutions innovantes dans divers secteurs industriels. Avec environ 320,000 employés dans le monde, Siemens est un leader dans les domaines de l'automatisation industrielle, de l'infrastructure intelligente, de la mobilité, et des technologies médicales. [22]



Figure 3-5 : Siemens AG LOGO

#### Variateurs SINAMICS G 120X

a) **Caractéristiques Techniques** :

- Puissance Nominale : 315 kW
- Tension d'Entrée : 380 V à 480 V AC
- Fréquence d'Entrée : 47 Hz à 63 Hz
- Courant de Sortie Nominal : 330 A à 600 V et 350 A à 690 V
- Protection : IP20 / UL Open Type, avec ou sans filtre intégré

SINAMICS G120X converters · Degree of protection IP20/UL Open Type · 380 ... 480 V 3 AC ⇒ Configuration with line-side components (see right page)											
Rated power <sup>1)</sup>		Rated output current <sup>2)</sup>		Base-load current <sup>3)</sup> $I_H$		Rated input current <sup>4)</sup>	Frame size	SINAMICS G120X Degree of protection IP20/UL Open Type without integrated line filter		SINAMICS G120X Degree of protection IP20/UL Open Type with integrated line filter	
400 V	480 V	400 V	480 V	400 V	480 V	400 V		Converters up to 132 kW delivery ex stock	Converters up to 132 kW delivery ex stock		
kW	hp	A	A	A	A	A		10 ... 48	10 ... 48		
								Article No.	↓ ↓	Article No.	↓ ↓
380 ... 480 V 3 AC · Rated pulse frequency 4 kHz ≤ 90 kW, 2 kHz for 110 kW to 250 kW and 4 kHz > 250 kW · Input frequency 47 ... 63 Hz											
315	400	570	477	468	390	585	FSH	-			6SL32 2 0- YE56- C 0

Figure 3-6 : Caractéristiques des Variateurs SINAMICS G120X

**b) Fonctionnalités Avancées :**

**4) Contrôle Vectoriel Avancé :**

Les variateurs SINAMICS G120 x utilisent des techniques de contrôle vectoriel qui permettent une régulation précise de la vitesse et du couple. Cela optimise les performances du moteur et améliore l'efficacité énergétique.

**2) Diagnostics et Surveillance :**

Les outils de diagnostic intégrés permettent de surveiller les performances du système en temps réel, détectant et résolvant rapidement les anomalies pour minimiser les temps d'arrêt et les coûts de maintenance.

**3) Interfaces de Communication :**

Les variateurs SINAMICS sont équipés de multiples interfaces de communication, facilitant l'intégration avec les systèmes de contrôle industriels existants et les automates programmables (PLC).[11]

**c) Avantages :**

**1) Efficacité Énergétique :**

En ajustant la vitesse et le couple en fonction des besoins réels, les variateurs de fréquence SINAMICS optimisent la consommation d'énergie, réduisant ainsi les coûts d'exploitation.

**2) Flexibilité :**

Adaptés à une large gamme d'applications industrielles, les variateurs SINAMICS offrent de nombreuses options de configuration pour répondre aux exigences spécifiques de chaque installation.

**Fiabilité :**

Conçus pour une opération continue dans des environnements industriels sévères, les variateurs SINAMICS assurent une longue durée de vie et une performance fiable.



Figure 0-7 : SINAMICS G120X

### Moteur SIMOTICS SD 315 kW

#### a). Caractéristiques Techniques :

- Puissance Nominale : 315 kW
- Tension Nominale : 400 V / 500 V / 690 V AC
- Efficacité : Classe d'efficacité IE4 (Super Premium Efficiency)
- Vitesse de Rotation : 1500 tr/min à 50 Hz
- Courant Nominal : 570 A
- Facteur de Puissance ( $\cos\phi$ ) : 0.86
- Moment d'Inertie : 7.20 kg·m<sup>2</sup>
- Classe de Protection : IP55
- Niveau Sonore : 74 dB(A)

SIMOTICS SD 1LE5 standard motors																		
Motors with IE4 Super Premium Efficiency																		
Self-ventilated motors, cast-iron series 1LE5604 Performance Line																		
Selection and ordering data																		
Operating values at rated power																		
$P_{rated}$	Frame size	$n_{rated}$	$T_{rated}$	IE class	$\eta_{rated, 4/4}$	$\eta_{rated, 3/4}$	$\eta_{rated, 2/4}$	$\cos\phi_{rated, 4/4}$	$I_{rated}$	$T_{LR}/T_{rated}$	$I_{R}/I_{rated}$	$T_B/T_{rated}$	$L_{pIA}$	$L_{WA}$	Cast-iron series 1LE5604 -Performance Line IE4 version acc. to IEC 60034-30-1 Article No.	$m_{MB3}$	$J$	Torque class
kW	FS	rpm	Nm		%	%	%		A				dB(A)	dB(A)	▲ New	kg	kgm <sup>2</sup>	CL
315	315 L	1490	2019	IE4	96.7	96.7	96.3	0.83	570	3.2	8.5	3.5	75	90	▲ 1LE5604-3AB7	1560	5.4	16

Figure 3-8 : Caractéristiques SIMOTICS SD

**b) Fonctionnalités Avancées :**

**1) Refroidissement Autoventilé :**

Utilisant un système de refroidissement IC 411, les moteurs SIMOTICS assurent une dissipation efficace de la chaleur, ce qui prolonge leur durée de vie et maintient des performances optimales.

**2) Conception Robuste :**

La construction en fonte des moteurs SIMOTICS les rend extrêmement durables et résistants aux environnements industriels difficiles.

**Maintenance Simplifiée :**

Les moteurs sont conçus pour faciliter l'accès aux composants, ce qui réduit les temps de maintenance et les coûts associés.

**c) Avantages :**

**1) Efficacité Énergétique :**

Les moteurs SIMOTICS IE4 offrent une efficacité énergétique supérieure, contribuant à des économies significatives sur la consommation d'énergie.

**2) Fiabilité et Durabilité :**

Conçus pour une utilisation dans des environnements industriels exigeants, ces moteurs garantissent une performance fiable et continue, minimisant les interruptions de production.

**3) Performance Optimale :**

Associés aux variateurs de fréquence SINAMICS, les moteurs SIMOTICS permettent

un contrôle précis de la vitesse et du couple, optimisant ainsi les processus de production. [13]

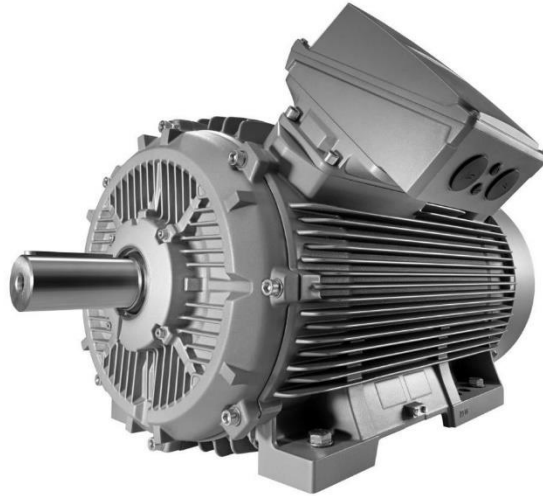


Figure 0-9 : SIMOTICS SD 315 kW

### 3.6 Installation ABB

ABB est une entreprise multinationale suédo-suisse fondée en 1988, suite à la fusion de l'entreprise suédoise ASEA (fondée en 1883) et de l'entreprise suisse Brown, Boveri & Cie (fondée en 1891). ABB est reconnue mondialement pour ses technologies de pointe dans les domaines de l'automatisation, de la robotique, et des solutions d'électrification. Avec environ 105,000 employés à travers le monde, ABB se positionne comme un leader dans l'innovation technologique industrielle. [22]



Figure 0-10 : LOGO ABB



## Variateur de Vitesse ACS880 et Moteur ABB 315 kW

### a) Caractéristiques Techniques :

- -Puissance Nominale : Jusqu'à 315 kW
- Tension d'Entrée : 380 V à 315 V AC
- Fréquence d'Entrée : 50 Hz
- Courant de Sortie Nominal : 585 A
- Protection : IP21 / IP55
- Fréquence de Pulsation : 4 à 16 kHz

$U_n = 400 \text{ V}$ (plage 380 à 415 V). Valeurs de puissance valables à tension nominale de 400 V (45 à 1400 kW).											
Type de variateur	Taille	Valeurs nominales			Utilisation faible surcharge		Utilisation intensive		Niveau sonore (dB(A))	Dissipation thermique (W)	Débit d'air (m <sup>3</sup> /h)
		$I_N$ (A)	$I_{MAX}$ (A)	$P_N$ (kW)	$I_{fs}$ (A)	$P_{fs}$ (kW)	$I_{int}$ (A)	$P_{int}$ (kW)			
<b>Diode 6 pulses</b>											
ACS880-07-0585A-3	R10	585	730	315	575	315	429	250	72	6909	2950

Figure 0-11 : Caractéristiques variateur AC880

### b) Fonctionnalités Avancées

#### 1) Contrôle Vectoriel Direct (DTC) :

Les variateurs ACS880 utilisent la technologie DTC pour une régulation ultra-précise de la vitesse et du couple, améliorant les performances des moteurs.

#### 2) Diagnostics et Surveillance :

Les outils de diagnostic intégrés permettent de surveiller les performances du système en temps réel, détectant et résolvant rapidement les anomalies pour minimiser les temps d'arrêt et les coûts de maintenance.

#### 3) Interfaces de Communication :

Les variateurs ACS880 sont équipés de multiples interfaces de communication, facilitant l'intégration avec les systèmes de contrôle industriels existants et les automates programmables (PLC).

### c) Avantages :

**1) Efficacité Énergétique :** En ajustant la vitesse et le couple en fonction des besoins réels, les variateurs de fréquence ACS880 optimisent la consommation d'énergie, réduisant ainsi les coûts d'exploitation.

**2) Flexibilité :** Adaptés à une large gamme d'applications industrielles, les variateurs ACS880 offrent de nombreuses options de configuration pour répondre aux exigences spécifiques de chaque installation.

3) **Fiabilité** : Conçus pour une opération continue dans des environnements industriels sévères, les variateurs ACS880 assurent une longue durée de vie et une performance fiable.



Figure 0-12 : ABB ACS 880

#### d) Filtres dans les Variateurs ACS880 d'ABB

Les variateurs ACS880 d'ABB sont équipés de plusieurs types de filtres pour réduire les harmoniques, notamment :

1) **Filtres Actifs** : Ces filtres fournissent une compensation dynamique des harmoniques sur une large gamme de fréquences, améliorant ainsi la qualité de l'alimentation électrique.

2) **Filtres Passifs** : Conçus pour cibler les harmoniques spécifiques comme les 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques, ces filtres réduisent les distorsions et protègent les équipements connectés.

#### e) Performances

THDi (Total Harmonic Distortion - current): Typiquement inférieur à 3% en conditions nominales.

Ces filtres permettent aux variateurs ACS880 de fournir une alimentation de haute qualité et de garantir la fiabilité des systèmes industriels.

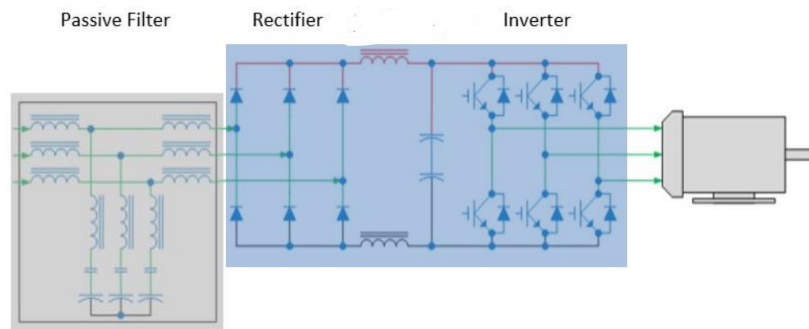


Figure 0-13 : Circuit d'un Filtre passive

### Moteur ABB 315 kW

#### a) Caractéristiques Techniques

- Puissance Nominale ;315 kW
- Tension Nominale : 400 V / 500 V / 690 V AC
- Efficacité : Classe d'efficacité IE4 (Super Premium Efficiency)
- Vitesse de Rotation : 1500 tr/min à 50 Hz
- Courant Nominal : 550 A
- Facteur de Puissance (cosφ) : 0.85
- Moment d'Inertie : 7.20 kg·m<sup>2</sup>
- Classe de Protection : IP55

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency IEC 60034-30-1; 2014			Power factor Cos φ	Current		Torque			Moment of inertia J = 1/4 GD <sup>2</sup> kgm <sup>2</sup>	Weight kg	Sound pressure level L <sub>pk</sub> dB
				Full load 100%	3/4 load 75%	1/2 load 50%		I <sub>N</sub> A	I <sub>g</sub> /I <sub>N</sub>	T <sub>N</sub> Nm	T <sub>r</sub> /T <sub>N</sub>	T <sub>v</sub> /T <sub>N</sub>			
315	M3BP 355 SMC 4	3GBP352230-••M	1491	97.2	97.2	96.9	0.85	550	7.4	2017	2.8	2.9	7.20	1820	74

Figure 0-14 : caractéristique moteur ABB M3BP 315 KW

#### b) Fonctionnalités Avancées

1) **Refroidissement Avancé** : Utilisant un système de refroidissement IC 411, les moteurs ABB assurent une dissipation efficace de la chaleur, prolongeant ainsi leur durée de vie et maintenant des performances optimales.

2) **Conception Robuste** : La construction en fonte des moteurs ABB les rend extrêmement durables et résistants aux environnements industriels difficiles.

**3) Maintenance Simplifiée :** Les moteurs sont conçus pour faciliter l'accès aux composants, ce qui réduit les temps de maintenance et les coûts associés.

**c) Avantages :**

**1) Efficacité Énergétique :** Les moteurs ABB IE4 offrent une efficacité énergétique supérieure, contribuant à des économies significatives sur la consommation d'énergie.

**2) Fiabilité et Durabilité :** Conçus pour une utilisation dans des environnements industriels exigeants, ces moteurs garantissent une performance fiable et continue, minimisant les interruptions de production.

**3) Performance Optimale :** Associés aux variateurs de fréquence ACS880, les moteurs ABB permettent un contrôle précis de la vitesse et du couple, optimisant ainsi les processus de production.[13]



Figure 0-15 : moteur ABB M3BP

### 3.7 Comparaison entre l'Installation ABB et SIEMENS

#### Introduction

La sélection de la technologie adéquate pour les moteurs et variateurs de fréquence est cruciale pour garantir l'efficacité, la fiabilité et la rentabilité des opérations industrielles. Dans ce contexte, deux des principaux acteurs mondiaux, Siemens et ABB, proposent des solutions robustes et avancées pour répondre aux besoins spécifiques de l'industrie du ciment.

Dans cette analyse comparative, nous examinerons les deux configurations de manière détaillée, en tenant compte de critères tels que l'efficacité énergétique, la robustesse et la durabilité, la flexibilité et la modularité, la facilité de maintenance, et les coûts d'exploitation.

## Comparaison entre les deux Installation

Après une analyse détaillée des deux options proposées pour notre installation, nous avons comparé les moteurs et variateurs de fréquence de Siemens et ABB selon plusieurs critères clés : efficacité énergétique, robustesse et durabilité, flexibilité et modularité, facilité de maintenance, et coûts d'exploitation. Voici les principales conclusions de cette comparaison

### 1) Efficacité Énergétique :

Les deux solutions offrent une efficacité énergétique élevée avec des moteurs classés IE4 et des variateurs avancés. Ce critère est donc considéré comme une égalité.

### 2) Robustesse et Durabilité :

Les moteurs et variateurs des deux marques sont conçus pour fonctionner dans des environnements industriels sévères avec une construction robuste en fonte. Ce critère est également considéré comme une égalité.

### 3) Flexibilité et Modularité :

Les solutions de Siemens et ABB offrent une grande modularité et des options de configuration variées, permettant une adaptation facile aux besoins spécifiques. Ce critère est une égalité.

### 4) Facilité de Maintenance :

Les deux configurations facilitent la maintenance grâce à des conceptions accessibles et des diagnostics avancés. Ce critère est une égalité.

### 5) Coûts d'Exploitation :

Les coûts d'exploitation sont réduits pour les deux options grâce à leur haute efficacité énergétique. Ce critère est une égalité.

### 6) Support Technique :

ABB dispose d'un réseau de support technique global et local plus étendu, ce qui facilite la résolution rapide des problèmes. ABB est donc préféré pour ce critère.

### 7) Disponibilité des Pièces de Rechange :

ABB offre une disponibilité supérieure des pièces de rechange, ce qui est crucial pour minimiser les temps d'arrêt et assurer une continuité de production sans interruption. ABB est préféré pour ce critère.

### 9) Technologie de Contrôle :

Le variateur ACS880 d'ABB utilise la technologie de contrôle vectoriel direct (DTC), permettant une régulation plus précise de la vitesse et du couple, ce qui améliore la performance opérationnelle. ABB est préféré pour ce critère.

**10) Coût d'Installation :**

ABB propose un coût d'installation inférieur grâce à la disponibilité locale des composants et à des options de configuration flexibles, ce qui permet de réduire les coûts initiaux. ABB est préféré pour ce critère.

Sur la base de cette analyse, ABB présente des avantages distincts en termes de support technique, disponibilité des pièces de rechange, technologie de contrôle et coût d'installation. Par conséquent, le choix final pour notre installation se porte sur la solution proposée par ABB.

**3.8 Le choix de l'installation**

Le choix de l'installation ABB pour notre projet se justifie par plusieurs facteurs clés. Tout d'abord, ABB offre une meilleure disponibilité des pièces de rechange et un support technique plus étendu, ce qui garantit une maintenance plus aisée et une réactivité accrue en cas de besoin. De plus, la technologie de contrôle vectoriel direct (DTC) utilisée par les variateurs ACS880 permet une régulation plus précise et une performance opérationnelle améliorée.

En termes de coûts, ABB propose un coût d'installation inférieur, ce qui est un avantage significatif pour notre budget. Cette réduction des coûts initiaux, combinée à une efficacité énergétique élevée et à une réduction des coûts d'exploitation, fait de l'installation ABB une solution économiquement avantageuse à long terme.

**En conclusion**, l'installation ABB avec les moteurs de 315 kW et le variateur de fréquence ACS880 répond non seulement aux exigences techniques et opérationnelles de notre projet, mais offre également des avantages financiers et pratiques significatifs. En optant pour ABB, nous garantissons une performance optimale, une fiabilité accrue et des économies sur le long terme, contribuant ainsi à la réussite et à la durabilité de notre installation industrielle.

Critère	Siemens	ABB	Choix
Efficacité Énergétique	Moteur SIMOTICS SD IE4, variateur SINAMICS G120 avec contrôle vectoriel avancé	Moteur ABB 315 kW IE4, variateur ACS880 avec DTC	Égalité
Robustesse et Durabilité	Construction en fonte, systèmes adaptés aux environnements industriels sévères	Construction en fonte, haute durabilité pour les environnements difficiles	Égalité
Flexibilité et Modularité	Modularité exceptionnelle, options de configuration variées	Modularité et options de configuration variées	Égalité
Facilité de Maintenance	Accès facile aux composants, diagnostics avancés	Conception facilitant l'accès, outils de surveillance et diagnostics avancés	Égalité
Coûts d'Exploitation	Réduction des coûts grâce à l'efficacité énergétique	Réduction des coûts grâce à l'efficacité énergétique	Égalité
Support Technique	Support technique global robuste	Support technique global et local étendu	ABB
Disponibilité des Pièces de Rechange	Bonne disponibilité des pièces	Disponibilité supérieure des pièces	ABB
Technologie de Contrôle	Contrôle vectoriel avancé	DTC (Direct Torque Control) plus précis	ABB
Coût d'Installation	Plus élevé en raison des composants spécifiques et des configurations complexes	Coût d'installation inférieur en raison de la disponibilité locale et des options de configuration flexibles	ABB

**Tableau 1-3 : comparaison entre installation ABB et installation Siemens**

### 3.9 Les Types de Commande de Variateur de Vitesse

Les variateurs de vitesse peuvent utiliser différents types de commandes pour contrôler les moteurs.

les méthodes les plus couramment utilisées sont la commande directe du couple (DTC - Direct Torque Control) et la commande vectorielle (FOC - Field Oriented Control).

## Commande Directe du Couple (DTC)

La DTC est une méthode avancée de contrôle des moteurs qui permet une réponse rapide et précise. Elle fonctionne en contrôlant directement le couple et le flux magnétique du moteur, sans nécessiter de modulation de largeur d'impulsion (PWM) ni de transformation de coordonnées complexes.

### a) Caractéristiques :

- **Réponse Dynamique Rapide** : La DTC offre une réponse très rapide aux variations de couple, ce qui est idéal pour les applications nécessitant des changements rapides de charge.
- **Contrôle Précis du Couple et du Flux** : En contrôlant directement le couple et le flux, la DTC permet une précision élevée dans les performances du moteur.
- **Réduction des Ondulations de Couple** : Cette méthode réduit les oscillations du couple, ce qui améliore la stabilité du moteur.
- **Simplicité de Mise en Œuvre** : Elle ne nécessite pas de capteurs de position ou de vitesse, simplifiant ainsi le système de contrôle.

### b) Applications :

- Applications nécessitant une dynamique élevée, comme les machines-outils, les grues, et les ascenseurs.
- Situations où la précision du couple est essentielle, comme dans les applications de bobinage.

## Commande Vectorielle (FOC)

La FOC est une technique de contrôle qui sépare le courant du moteur en deux composantes : une pour le flux et l'autre pour le couple. Elle utilise des transformations de coordonnées pour convertir les variables statoriques en variables rotoriques, facilitant ainsi un contrôle précis du flux et du couple.

### a) Caractéristiques :

- **Contrôle Décentralisé** : En séparant les composantes de flux et de couple, la FOC permet un contrôle plus précis et indépendant de ces deux aspects.



- **Excellente Régulation de la Vitesse** : La FOC est réputée pour sa capacité à maintenir une vitesse constante, même en présence de perturbations.
- **Adaptabilité aux Charges Variables** : Elle s'adapte bien aux variations de charge, offrant une performance stable et fiable.
- **Complexité** : La mise en œuvre de la FOC est plus complexe que la DTC, nécessitant des capteurs de position ou de vitesse et des transformations mathématiques.

#### b) Applications :

- Applications industrielles générales, telles que les convoyeurs, les pompes et les ventilateurs.
- Situations nécessitant un contrôle précis de la vitesse et du couple, comme les systèmes de traction électrique et les servomoteurs.

Le choix entre la commande DTC et FOC dépend des exigences spécifiques de l'application. La DTC est idéale pour les applications nécessitant une réponse rapide et une précision élevée du couple, tandis que la FOC convient mieux aux applications nécessitant une régulation précise de la vitesse et une adaptabilité aux charges variables. En comprenant les avantages et les inconvénients de chaque méthode, on peut sélectionner le type de commande le plus approprié pour optimiser les performances du système de motorisation.

Critère	DTC (Direct Torque Control)	FOC (Field Oriented Control)
Réponse Dynamique	Très rapide	Rapide, mais moins que DTC
Précision du Contrôle	Haute précision du couple et du flux	Haute précision de la vitesse et du couple
Simplicité de Mise en Œuvre	Relativement simple, pas de capteurs requis	Plus complexe, nécessite des capteurs de position ou de vitesse
Ondulations de Couple	Réduites	Peut avoir plus d'ondulations par rapport à DTC
Applications	Applications dynamiques et à haute performance	Applications industrielles générales et de précision

### 3.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé de remplacer les moteurs à courant continu par des moteurs asynchrones, motivés par l'amélioration de l'efficacité énergétique, la réduction des coûts de maintenance et l'augmentation de la fiabilité.

Nous avons établi des critères de choix rigoureux et comparé deux configurations principales : Siemens et ABB.

La comparaison a porté sur l'efficacité énergétique, la robustesse, la flexibilité, la maintenance, les coûts d'exploitation, le support technique, la disponibilité des pièces de rechange, la technologie de contrôle et le coût d'installation.

Finalement, l'installation ABB a été retenue pour ses avantages en termes de support technique, disponibilité des pièces, technologie de contrôle avancée et coût d'installation inférieur.

Cette nouvelle installation permettra d'améliorer la performance opérationnelle et de réaliser des économies à long terme, tout en répondant aux exigences de durabilité.

## **Chapitre 4**

# **Mise en service et Comparaison**

## 4.1 Introduction :

Ce chapitre explore la mise en service de la nouvelle installation de moteurs et variateurs dans l'usine de ciment de SCMI, en comparaison avec l'ancienne installation. L'ancienne installation utilise des moteurs à courant continu LAK 4280 et des variateurs ABB DCS800, tandis que la nouvelle installation est équipée de moteurs asynchrones ABB M3BP et de variateurs ACS880. Cette transition vise à améliorer l'efficacité énergétique, réduire les coûts de maintenance et augmenter la flexibilité opérationnelle. Nous détaillerons le schéma de la nouvelle installation, les simulations de performance, les études de réseaux et de câblage, suivis d'une comparaison exhaustive entre les deux configurations.

## 4.2 Mise en service de la nouvelle installation

### Transformateur Double Secondaire

#### a) Utilisation pour la Réduction des Harmoniques

Le transformateur double secondaire est un composant clé dans la nouvelle installation, principalement utilisé pour atténuer les harmoniques de 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> ordre.

Ces harmoniques sont souvent générées par les variateurs de vitesse et peuvent causer des distorsions dans le réseau électrique, les avantages et le fonctionnement du transformateur double secondaire

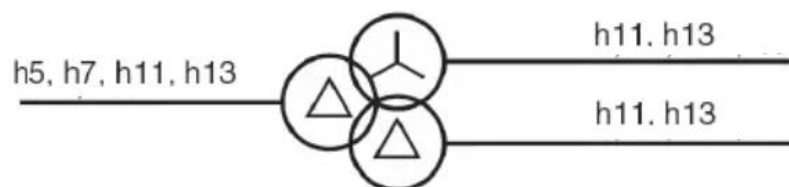


Figure 4-1 : couplage transfo double secondaire

#### Atténuation des Harmoniques

- Les harmoniques de 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> ordre peuvent entraîner des pertes supplémentaires et des interférences avec d'autres équipements électriques.
- L'utilisation d'un transformateur avec un couplage Dyd permet supprimer les harmoniques de rangs 5 et 7, comme illustré dans la Figure.
- Cela se traduit par une amélioration significative de la qualité de l'alimentation électrique en stoppant la propagation de ces harmoniques.

### Amélioration de la Qualité de l'Alimentation

- En réduisant les harmoniques, le transformateur aide à maintenir une forme d'onde de tension plus propre et plus stable.
- Cela se traduit par une diminution des pertes dans le système et une meilleure performance des autres équipements connectés au réseau.

### Protection et Fiabilité

- Le transformateur double secondaire protège les équipements sensibles contre les perturbations causées par les harmoniques.
- Il contribue également à la fiabilité globale du système en minimisant les risques de dysfonctionnements liés à une alimentation de mauvaise qualité.

### Spécifications du Transformateur

- **Type de Transformateur:**
  - Transformateur sec, assurant une sécurité accrue contre les risques d'incendie et de pollution.
- **Tensions de Service:**
  - Le transformateur est spécifié pour des tensions de 5500V/400V, ce qui permet une adaptation optimale aux besoins de l'installation.



Figure 4-2 : transformateur double sec

## Installation en Configuration Master-Slave des Variateurs ACS880

### a) Synchronisation des Variateurs

- La configuration master-slave permet de synchroniser plusieurs variateurs de vitesse ACS880 pour un fonctionnement cohérent. Le variateur maître contrôle les paramètres principaux tels que la vitesse et le couple, tandis que les variateurs esclaves suivent ces commandes pour assurer une coordination parfaite.
- Cette configuration est particulièrement utile dans les applications nécessitant la synchronisation de plusieurs moteurs pour une opération complexe, garantissant une répartition uniforme de la charge et une meilleure efficacité globale du système.

### b) Avantages de la Configuration Master-Slave

- **Coordination Optimale:** La configuration master-slave assure une coordination optimale entre les moteurs, ce qui est essentiel pour les applications industrielles complexes où la synchronisation est cruciale.
- **Réduction des Perturbations:** En synchronisant les variateurs, on réduit les risques de perturbations et de conflits entre les moteurs, améliorant ainsi la stabilité et la fiabilité de l'ensemble du système.
- **Gestion Efficace des Ressources:** La configuration permet une gestion plus efficace des ressources énergétiques, car les variateurs esclaves ajustent automatiquement leur fonctionnement en fonction des commandes du variateur maître, optimisant ainsi la consommation d'énergie.

Le schéma montre une configuration maître-esclave pour des moteurs et des variateurs dans un système de contrôle de processus.

**Moteur maître :** Contrôle la vitesse de l'ensemble du système (vitesse de référence).

**Moteur esclave :** Suit les commandes du maître en ajustant sa vitesse ou son couple en conséquence.

**Lien DDCS (Direct Drive Control System) :** Assure la communication entre les variateurs du maître et de l'esclave, transmettant les références de vitesse et de couple ainsi que les mots de statut.

**Contrôle par bus de terrain :** Permet l'intégration avec un système de contrôle externe comme un PLC, ajoutant des capacités de commande et de surveillance supplémentaires.

Cette configuration assure une synchronisation précise et une coordination optimale entre les moteurs pour des applications industrielles complexes.

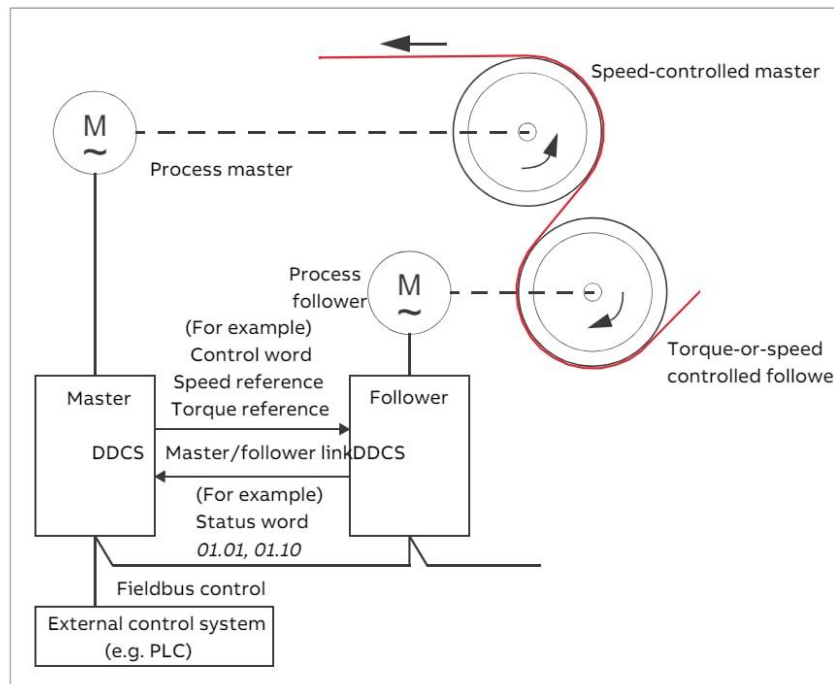


Figure 4-2 : synchronisme de deux moteurs

### Filtres des Variateurs de Vitesse ACS880

Les variateurs ACS880 sont équipés de filtres harmoniques qui réduisent les perturbations électriques et améliorent la qualité de l'alimentation.

Ces filtres jouent un rôle crucial dans la réduction des courants harmoniques injectés dans le réseau, minimisant ainsi les pertes et prolongeant la durée de vie des équipements.

L'utilisation de filtres actifs et passifs dans les variateurs ACS880 contribue à une meilleure efficacité énergétique et à une réduction des coûts de maintenance.

Le schéma ci-dessus illustre la configuration de la nouvelle installation, incluant :

- Les moteurs ABB M3BP.
- Les variateurs ACS880 en configuration master-slave.
- Le transformateur double secondaire pour la réduction des harmoniques.

Ce schéma a été réalisé à l'aide du logiciel Eplan, .

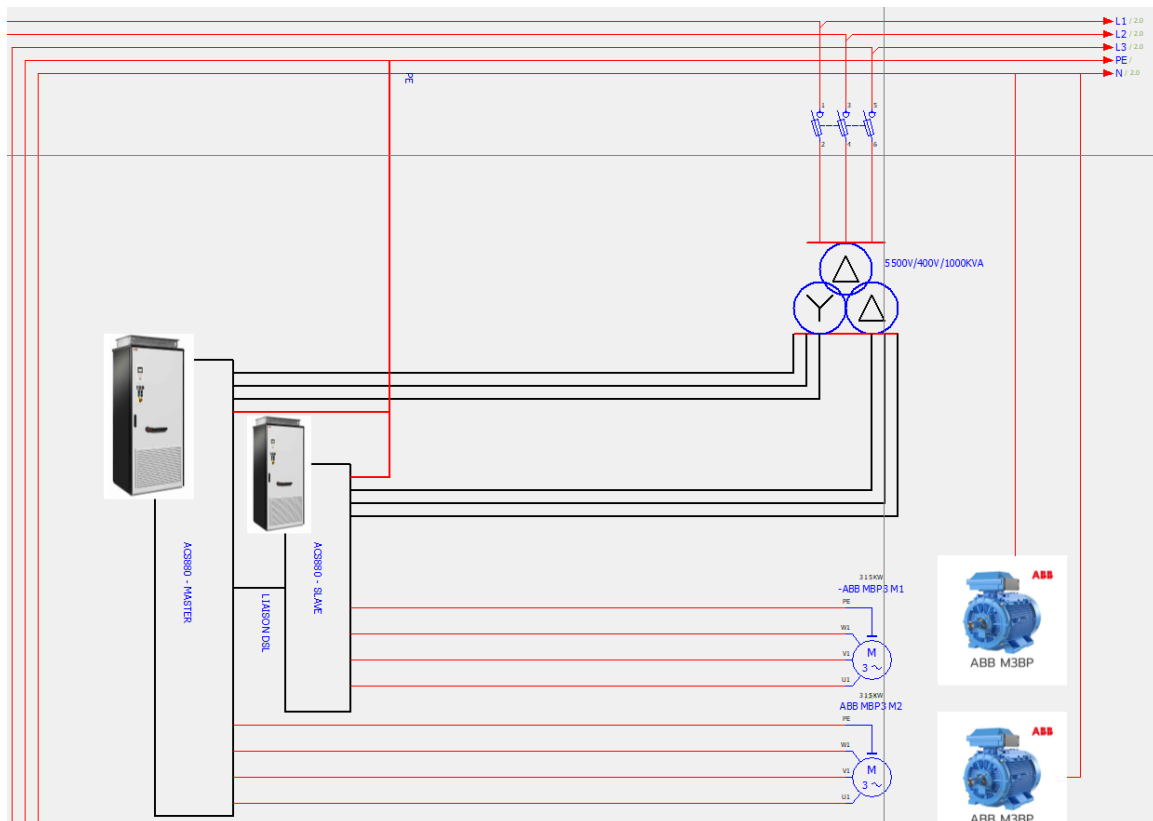


Figure 4-3 : schéma unifilaire de la configuration de la nouvelle installation

## Schéma de Câblage du Variateur de Fréquence ABB ACS880

Le schéma de câblage présenté illustre les connexions électriques pour un variateur de fréquence ABB ACS880, qui contrôle un moteur asynchrone triphasé de 315 kW.

Voici une description détaillée des principaux composants et connexions représentés dans le schéma :

### Composants Principaux

#### 1. Variateur de Fréquence (VFD) ABB ACS880

- Contrôle la vitesse et le fonctionnement du moteur asynchrone.
- Interfaces de communication et de contrôle multiples (Profibus, AI, DI, et relais).

#### 2. Moteur Asynchrone ABB MBP3 M1

- Un moteur triphasé de 315 kW.
- Connexions électriques pour les phases U1, V1, W1 et la mise à la terre (PE).

### Connexions Électriques

#### 1. Alimentation Triphasée

- Les lignes de phase L1, L2 et L3 alimentent le variateur de fréquence.



## 2. Connexions du Moteur

- Les sorties du variateur (U1, V1, W1) sont connectées aux bornes correspondantes du moteur.
- Mise à la terre du moteur via la borne PE.

## 3. Entrées et Sorties Digitales (DI/DO)

- **DI1 et DI2** : Entrées digitales utilisées pour des commandes ou des signaux de contrôle externes.
- **Relais R1C, R1B, R2C, R2A** : Utilisés pour les états de défaut et en service.
  - **R1C, R1B** : Relais de défaut.
  - **R2C, R2A** : Relais en service.
- **COM** : Commun pour les entrées et sorties.

## 4. Entrées Analogiques (AI)

- **AI1** : Entrée analogique connectée à un potentiomètre (10-0V) pour régler la vitesse du moteur.

## 5. Communication

- **Profibus** : Interface de communication pour l'intégration dans un réseau de contrôle industriel.
- **PLC / SCADA** : Connexions vers un automate programmable (PLC) ou un système de contrôle et d'acquisition de données (SCADA).

### Fonctionnement

- **Commande de Vitesse** : Le potentiomètre connecté à l'entrée AI1 permet de régler la vitesse du moteur de manière analogique.
- **Signalisation** : Les relais R1C, R1B et R2C, R2A signalent respectivement les états de défaut et en service du variateur.
- **Communication** : Le Profibus permet la communication et le contrôle à distance via des systèmes PLC ou SCADA, facilitant l'intégration dans un réseau de gestion automatisé.

### Avantages

- **Flexibilité** : Multiples interfaces de communication et de contrôle pour s'adapter à divers besoins industriels.
- **Sécurité et Fiabilité** : Système de relais pour signaler les états de fonctionnement et les défauts, assurant une supervision constante.

- **Contrôle Précis** : Utilisation d'un potentiomètre pour un réglage précis de la vitesse du moteur.

En conclusion, ce schéma de câblage montre une installation typique d'un variateur de fréquence ABB ACS880, avec des connexions détaillées pour l'alimentation, le moteur, les entrées/sorties numériques et analogiques, et les interfaces de communication.

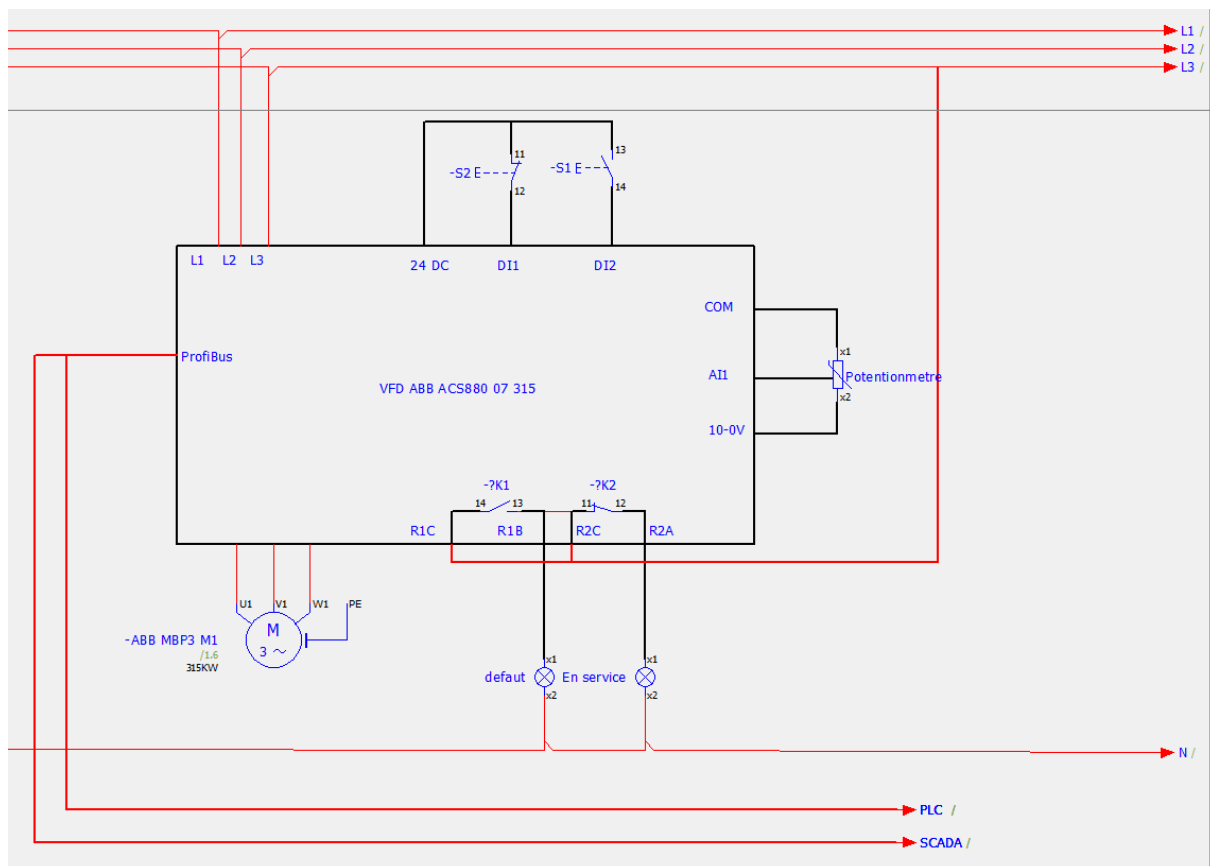


Figure 4-4 : Schéma de Câblage du Variateur de Fréquence ABB

### Mise en Service pour l'Installation avec le Régime TN

Lors de la mise en service d'une installation électrique, le choix du régime de neutre est crucial pour assurer la sécurité et la fiabilité du système.

Deux régimes de neutre couramment utilisés sont le TN-S et le TN-C. Pour notre installation, nous proposons d'utiliser le régime TN-S.

#### Régime TN-S

Dans le régime TN-S, le conducteur neutre (N) et le conducteur de protection (PE) sont séparés sur toute la longueur de l'installation.

Le neutre et la terre sont connectés au même point à la source de l'alimentation, mais ils restent distincts dans tout le système de distribution.

#### **Avantages du Régime TN-S:**

##### **Sécurité Électrique Améliorée :**

La séparation des conducteurs PE et N réduit les risques de retour de courant par des parties métalliques de l'installation, augmentant ainsi la sécurité pour les personnes et les équipements.

##### **Compatibilité Électromagnétique (CEM) :**

En raison de la séparation des conducteurs, le régime TN-S minimise les interférences électromagnétiques, ce qui est particulièrement important pour les installations sensibles comme les systèmes de contrôle automatique.

##### **Facilité de Détection des Défauts :**

Les défauts de terre peuvent être plus facilement détectés et isolés, ce qui permet une maintenance plus rapide et plus efficace.

##### **Stabilité de la Tension :**

La séparation des conducteurs assure une meilleure stabilité de la tension, ce qui est crucial pour le fonctionnement optimal des moteurs et des variateurs.

##### **Réduction des Courants de Fuite :**

La séparation des conducteurs PE et N réduit les courants de fuite, diminuant ainsi les risques d'électrocution et d'incendie.

Le régime TN-S est recommandé en raison de ses nombreux avantages en termes de sécurité, de compatibilité électromagnétique, de facilité de maintenance, de stabilité de la tension et de réduction des courants de fuite.

Ces avantages sont particulièrement pertinents pour une installation industrielle complexe où la fiabilité et la sécurité sont des priorités essentielles.

Le régime TN-S assurera une meilleure protection des équipements et du personnel, tout en optimisant les performances de votre système électrique.

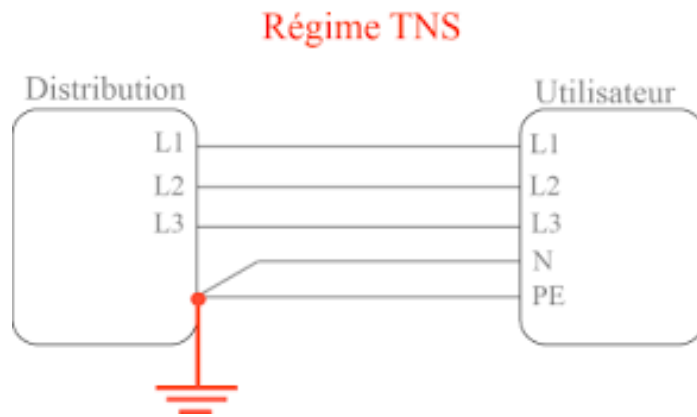


Figure 4-5 : Régime TNS

## Configuration du Variateur de Fréquence ABB ACS880

### Microconsole du VFD ABB ACS880

La microconsole du variateur de fréquence (VFD) ACS880 de ABB, également connue sous le nom de panneau de contrôle, est un dispositif de commande compact et intuitif permettant de surveiller et de configurer les paramètres du variateur.

Cette microconsole est équipée d'un écran et de boutons de navigation qui facilitent l'interaction avec le système.

Pour configurer correctement un variateur de fréquence ABB ACS880, plusieurs paramètres doivent être ajustés afin de correspondre aux spécifications du moteur et aux exigences de l'application. Voici une liste de paramètres essentiels de configuration pour notre installation

Paramètre	Valeur
99.01 MOTOR NOM VOLTAGE	400 V
99.02 MOTOR NOM CURRENT	315 A
99.03 MOTOR NOM FREQUENCY	50 Hz
99.04 MOTOR NOM SPEED	1500 tr/min
99.05 MOTOR NOM POWER	315 kW
99.06 COS PHI	0.85
20.01 CONTROL MODE	DTC
21.01 START FUNCTION	Ramp
21.02 STOP FUNCTION	Ramp
21.04 DIRECTION	Forward
22.02 MAXIMUM SPEED	1500 tr/min
22.03 ACCELERATION TIME 1	20 s
22.04 DECELERATION TIME 1	20 s
50.01 PROTOCOL	ProfiBus



Figure 4-6 : Panneau de contrôle et leur configuration

### 4.3 Outil de Simulation ETAP

Afin de pouvoir dimensionner notre système et vérifier toute la chaîne de production, plusieurs outils de simulation sont disponibles à savoir principalement ETAP et CANECO. Dans ce paragraphe nous nous intéressons à ETAP vu sa disponibilité au niveau de la cimenterie.

#### À propos d'ETAP

ETAP (Electrical Transient and Analysis Program) est un logiciel de simulation et d'analyse de systèmes électriques. Il permet la modélisation, la conception et la vérification des réseaux électriques, en offrant des outils pour l'analyse des flux de charge, les courts-circuits, les transitoires et bien plus encore.

#### Mise en œuvre de la Simulation

Cette simulation réalisée avec ETAP présente un schéma d'un réseau électrique, mettant en évidence plusieurs éléments clés :

##### **Transformateurs et Barres de Distribution :**

Les transformateurs sont représentés avec leurs caractéristiques de tension et de puissance.

Les barres de distribution connectent différents segments du réseau, assurant la distribution de l'électricité.

##### **Câbles et Charges :**

Les câbles sont indiqués avec leurs longueurs et impédances.

Les charges sont détaillées avec leurs puissances respectives, montrant comment l'énergie est distribuée aux différents composants du réseau.

##### **Dispositifs de Protection :**

Les disjoncteurs et fusibles sont intégrés pour protéger les circuits contre les surcharges et les courts-circuits.

##### **Analyse des Flux de Charge :**

Les flèches et valeurs indiquent les flux de courant et de puissance à travers le réseau, permettant d'analyser l'équilibre et la distribution de la charge électrique.

En résumé, cette simulation offre une vue d'ensemble du réseau électrique d'une installation, permettant d'évaluer la performance, la stabilité et la sécurité du système sous différentes conditions de charge.

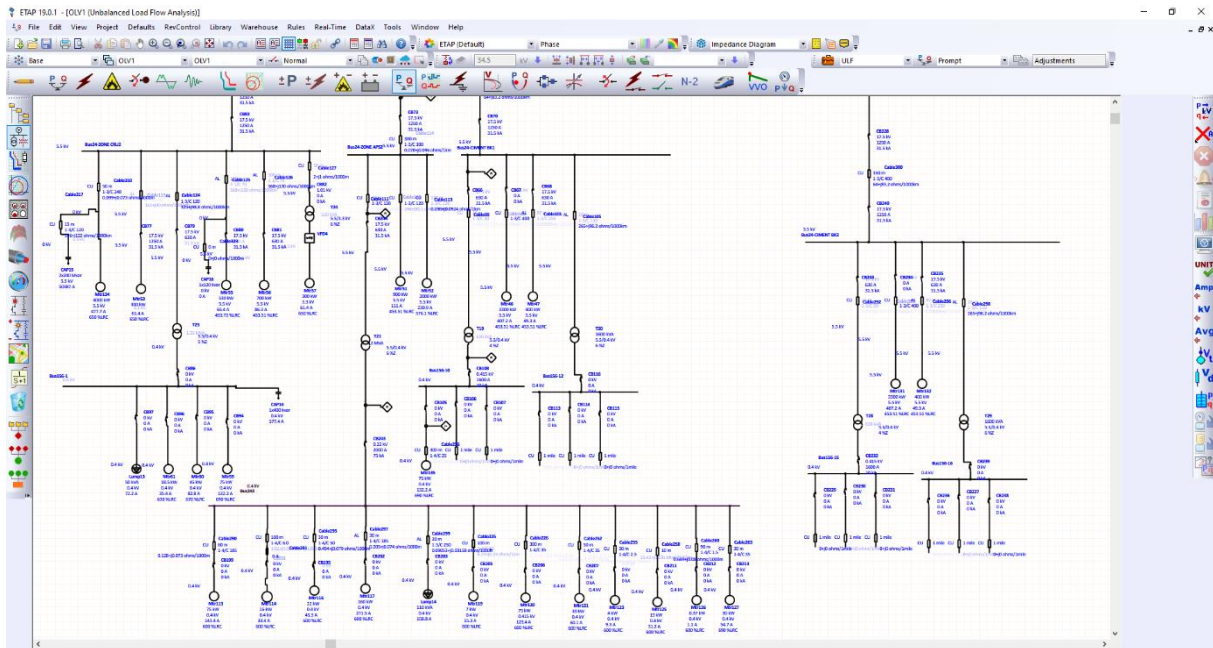


Figure 4.7 présente le schéma d’une partie de l’installation de la zone cuisant sous ETAP

## 4.4 Comparaison entre un système à courant continu et système alternative :

### 4.4.1 Capacité de Production :

La capacité de production se réfère à la quantité maximale de produit qu'un système de production peut produire dans un certain laps de temps. Elle est généralement exprimée en unités de production par jour, par mois ou par an. La qualité du produit se réfère à sa conformité aux normes et spécifications requises, garantissant ainsi la satisfaction des exigences du marché et des clients

#### a) Installation Actuelle

La capacité de production de notre four rotatif actuel est de 3600 tonnes par jour. Cependant, cette installation connaît des arrêts programmés et non programmés qui réduisent le nombre de jours de production effective.

- **Capacité de production** : 3600 tonnes par jour
- **Nombre de jours d'arrêts programmés** : 45 jours
- **Nombre de jours d'arrêts non programmés** : 10 jours
- **Nombre total de jours d'arrêts** : 55 jours
- **Nombre total de jours de fonctionnement** :  $365 - 55 = 310$  jours

La production annuelle effective peut être calculée comme suit :

$$\text{Production annuelle effective} = 3600 \text{ tonnes/jour} \times 310 \text{ jours} = 1\,116\,000 \text{ tonnes}$$

**b) Nouvelle Installation**

La nouvelle installation est conçue pour augmenter la capacité de production à 4100 tonnes par jour, tout en éliminant les arrêts programmés. Seuls les arrêts non programmés de 10 jours par an sont pris en compte.

- **Capacité de production** : 4100 tonnes par jour
- **Nombre de jours d'arrêts programmés** : 45 jours
- **Nombre total de jours de fonctionnement** :  $365 - 45 = 320$  jours

La production annuelle effective de la nouvelle installation est calculée comme suit :

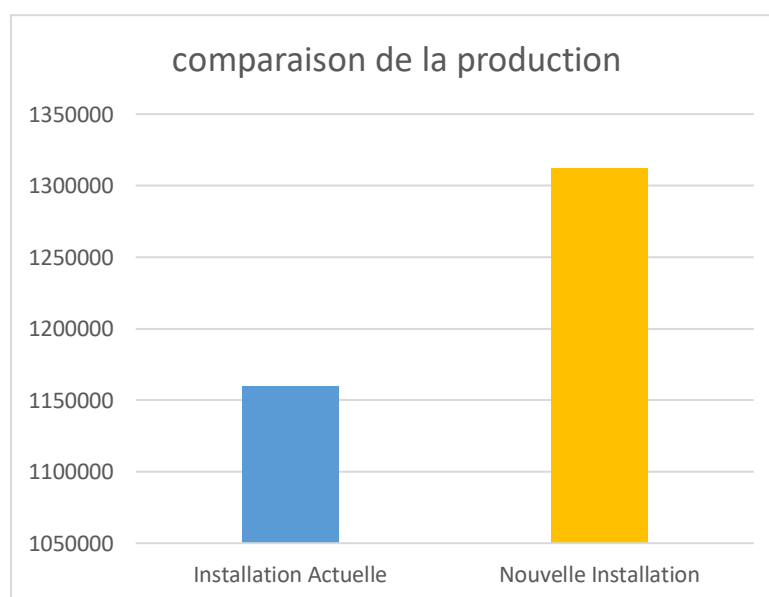
$$\text{Production annuelle effective} = 4100 \text{ tonnes/jour} \times 320 \text{ jours} = 1\,312\,000 \text{ tonnes}$$

**Analyse des Résultats**

La comparaison des deux installations montre une augmentation significative de la production annuelle avec la nouvelle installation :

- **Production annuelle actuelle** : 1,116,000 tonnes
- **Production annuelle nouvelle installation** : 1,312,500 tonnes
- **Augmentation de la production** :  $1,312,500 - 1,116,000 = 196,000$  tonnes

Cette augmentation représente une amélioration de plus de 13% par rapport à la production actuelle. L'élimination des arrêts programmés et l'optimisation des processus de maintenance sont des facteurs clés de cette amélioration.



**Figure 4.8: Production**

## Maintenance

### a) Système à Courant Continu

- 1) **Maintenance** : Les moteurs à courant continu nécessitent une maintenance régulière et coûteuse en raison de la présence de balais et de collecteurs, qui s'usent rapidement.
- 2) **Coût de Maintenance** : Les coûts de maintenance sont élevés en raison de la fréquence des interventions nécessaires et du coût des pièces de rechange.

### b) Système a courant alternative

- 1) **Maintenance** : Les moteurs asynchrones sont plus robustes et nécessitent moins de maintenance car ils n'ont pas de balais ni de collecteurs. Les variateurs de fréquence modernes sont également conçus pour une maintenance minimale.
- 2) **Coût de Maintenance** : Les coûts de maintenance sont réduits grâce à la fiabilité accrue et à la moindre nécessité de remplacements fréquents de pièces.

Critère	Système à Courant Continu (CC)	Système ABB à Courant Alternatif (CA)
Fréquence de Maintenance	Élevée	Faible
Coût de Maintenance	Élevé	Réduit
Temps d'Arrêt	Fréquent	Minimal
Inspection et Remplacement des Balais	Fréquente	N/A
Nettoyage du Collecteur	Fréquent	N/A
Lubrification des Roulements	Nécessaire	Moins fréquent
Vérification des Connexions Électriques	Régulière	Régulière
Mise à Jour du Firmware	N/A	Occasionnelle
Vérification des Systèmes de Refroidissement	Régulière ↓	Régulière

Tableau 4-1 : comparaison de maintenance de deux installation

Analyse La transition vers un système asynchrone avec variateur de fréquence réduit considérablement les besoins de maintenance et les coûts associés. La robustesse des moteurs



asynchrones et la durabilité des variateurs de fréquence modernes contribuent à une réduction des interruptions de service et des dépenses en pièces de rechange.

### Coût

#### c) Système à Courant Continu

- 1) **Coût d'Installation** : Généralement plus bas initialement pour les systèmes simples.
- 2) **Coût Opérationnel** : Élevé en raison de la maintenance fréquente, des pannes possibles et de la consommation énergétique inefficace.

#### d) Système a courant alternative

- 1) **Coût d'Installation** : Plus élevé initialement en raison des coûts des variateurs de fréquence et des moteurs asynchrones.
- 2) **Coût Opérationnel** : Réduit grâce à une meilleure efficacité énergétique, des coûts de maintenance plus faibles et une augmentation de la capacité de production.

Critère	Système à Courant Continu (CC)	Système ABB à Courant Alternatif (CA)
Coût Initial (Moteurs)	Relativement bas	Élevé
Coût Initial (Variateurs)	Élevé	Élevé
Installation	Coûteuse	Coûteuse (mais souvent plus simple)
Coût Énergétique	Élevé	Réduit
Maintenance	Élevé	Réduit
Temps d'Arrêt	Fréquent	Minimal
Coût Total	Globalement élevé	Globalement réduit (à long terme)

Tableau 4-2 : comparaison de cout de deux installation

Analyse Bien que l'installation initiale d'un système asynchrone avec variateur de fréquence soit plus coûteuse, les économies réalisées en termes de maintenance et d'efficacité énergétique compensent largement cet investissement à long terme, réduisant ainsi le coût général du système.

## Comparaisons des Performances et de l'Efficacité

### Efficacité Énergétique :

- CC : 89.0%
- CA : 97.5% (IE4)

### Contrôle de la Vitesse et du Couple :

- CC : Précision élevée mais composants sujets à usure (balais et collecteur)
- CA : Précision accrue avec technologie de contrôle vectoriel (DTC), moins de composants usés

### Réponse aux Variations de Charge :

- CC : Bonne réponse mais moins flexible
- CA : Réponse rapide et flexible grâce aux variateurs ACS880

## Comparaison de la Consommation Énergétique

Ancien moteur (TT-electric) :

- Puissance nominale : 235 kW
- Efficacité : 0.89
- Heures de fonctionnement par an : 7440 heures

Nouveau moteur (ABB M3BP) :

- Puissance nominale : 233 kW
- Efficacité : 0.975
- Heures de fonctionnement par an : 7440 heures

## Calcul de la Puissance de Sortie Effective

Ancien moteur (TT-electric)

Puissance de sortie effective = Puissance nominale × Efficacité

$$\text{Puissance de sortie effective} = 235 \text{ kW} \times 0.89 = 209.15 \text{ kW}$$

Nouveau moteur (ABB M3BP)

Puissance de sortie effective = Puissance nominale × Efficacité

$$\text{Puissance de sortie effective} = 233 \text{ kW} \times 0.975 = 227.175 \text{ kW}$$

## Calcul de la Consommation Énergétique Annuelle

### Ancien moteur (TT-electric)

Consommation énergétique = (Puissance de sortie effective × Nombre d'heures) / Efficacité

Consommation énergétique = (209.15 kW × 7440 heures) / 0.89

**Consommation énergétique = 1,556,004 kWh / 0.89 ≈ 1,748,878 kWh**

### Nouveau moteur (ABB M3BP)

Consommation énergétique = (Puissance de sortie effective × Nombre d'heures) / Efficacité

Consommation énergétique = (227.175 kW × 7440 heures) / 0.975

**Consommation énergétique = 1,690,302 kWh / 0.975 ≈ 1,733,126 kWh**

## Résumé et Comparaison

Ancien moteur (TT-electric) : 1,748,878 kWh/an

Nouveau moteur (ABB M3BP) : 1,733,126 kWh/an

Économies d'énergie avec le nouveau moteur :

**Économies = 1,748,878 kWh/an - 1,733,126 kWh/an = 15,752 kWh/an**

En remplaçant le moteur TT-electric par le moteur ABB M3BP, vous pouvez économiser environ 15,752 kWh par an. Cette économie représente une amélioration significative de l'efficacité énergétique de votre système.

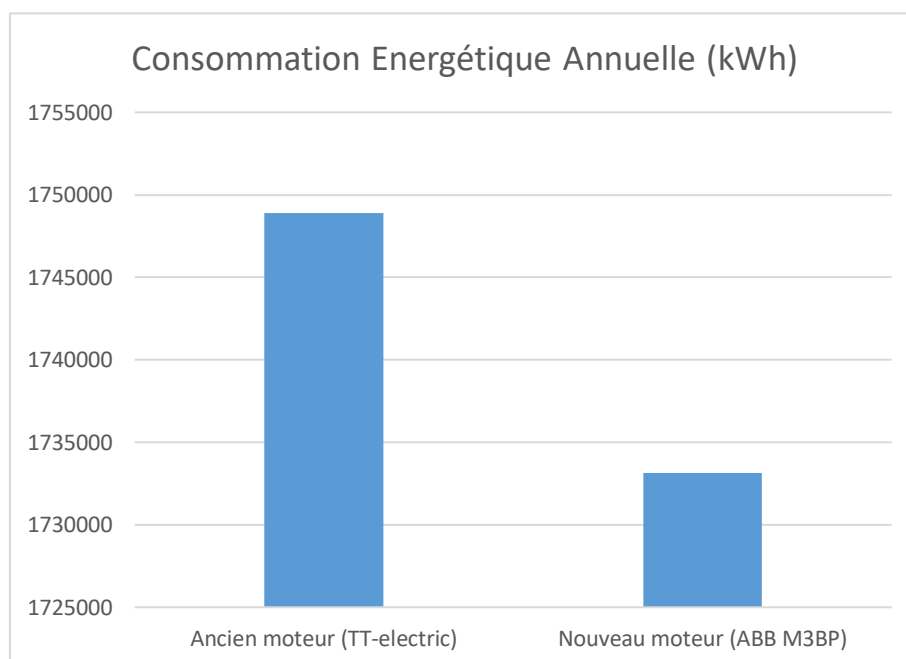


Figure 4-9 : Consommation énergétique

## 4.5 Recommandation de montage :

### 4.5.1 Vérification de l'isolement

Avant la mise en fonctionnement du moteur, il est recommandé de vérifier l'isolement entre phase et masse, et entre phases. Cette vérification est indispensable si le moteur a été stocké pendant plus de 6 mois ou s'il a séjourné dans une atmosphère humide.

Cette mesure s'effectue avec un mégohmmètre sous 500V continu (attention de ne pas utiliser un système à magnéto). Il est préférable d'effectuer un premier essai sous 30 ou 50 volts et si l'isolement est supérieur à 1 mégohm effectuer une deuxième mesure sous 500 volts pendant 60 secondes. La valeur d'isolement doit être au minimum de 10 mégohms à froid.

Dans le cas où cette valeur ne serait pas atteinte, ou d'une manière systématique si le moteur a pu être soumis à des aspersion d'eau, des embruns, à un séjour prolongé dans un endroit à forte hygrométrie ou s'il est recouvert de condensation, il est recommandé de déshydrater le moteur pendant 24 heures dans une étuve à une température de 110° à 120°C.

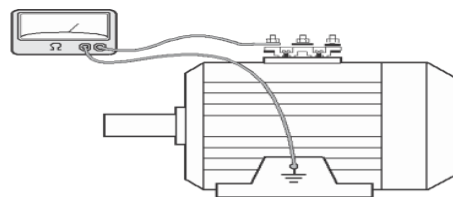


Figure 4-10 : vérification de l'isolement

### 4.5.2 Ventilation des moteurs

Le moteur ABB M3BP 315 KW utilise un type de ventilation forcée, souvent désignée par la norme IC411. Ce type de ventilation implique un ventilateur monté directement sur l'arbre du moteur, ce qui assure un flux d'air constant pour refroidir le moteur pendant son fonctionnement. Cette méthode est couramment utilisée dans les moteurs de performance industrielle pour garantir une dissipation efficace de la chaleur et une performance fiable dans diverses conditions de travail.

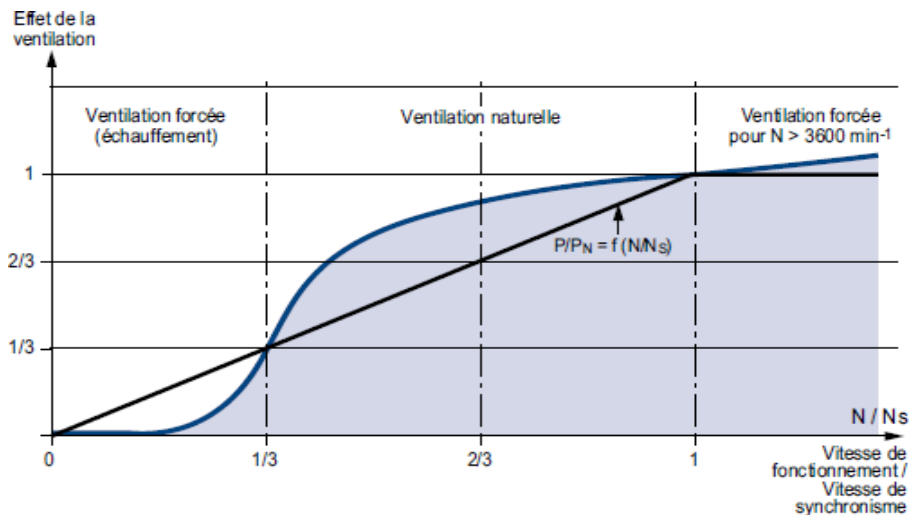


Figure 4-11 : caractéristique du refroidissement

## 4.6 Conclusion

La comparaison entre le système actuel de moteurs à courant continu et la configuration ABB utilisant des moteurs asynchrones montre clairement les avantages du nouveau système proposé.

Les moteurs asynchrones associés aux variateurs de vitesse ABB offrent une meilleure efficacité énergétique, une maintenance réduite, des coûts opérationnels inférieurs, et une plus grande flexibilité. En termes de performance et d'efficacité, le système ABB se distingue par une précision accrue dans le contrôle de la vitesse et du couple, une réponse rapide aux variations de charge, et une consommation énergétique optimisée.

Sur le plan de la maintenance, la fréquence des interventions est significativement réduite grâce à l'absence de composants sujets à une usure rapide, tels que les balais et le collecteur, ce qui diminue les coûts et les temps d'arrêt. Les coûts totaux sur une période de 10 ans sont nettement plus bas pour le système ABB, malgré un investissement initial plus élevé.

De plus, la flexibilité et l'adaptabilité du système ABB permettent une intégration facile avec les technologies modernes de gestion et de contrôle, offrant ainsi une meilleure compatibilité et une évolutivité accrue.

En somme, la transition vers des moteurs asynchrones avec variateurs de vitesse ABB représente une amélioration significative qui assurera la durabilité, la compétitivité et l'efficacité opérationnelle de l'usine de ciment SCMI.

# **Conclusion Générale**

### Conclusion Générale

Ce mémoire de Projet de Fin d'Études a exploré en profondeur les défis et opportunités liés à l'amélioration de l'efficacité opérationnelle d'une installation industrielle dans une cimenterie. À travers une analyse détaillée des composants critiques, notamment les moteurs à courant continu LAK 4280B et les variateurs de vitesse, nous avons identifié des limitations significatives en termes de coûts de maintenance élevés et d'inefficacité énergétique. En réponse à ces défis, une étude comparative a été menée entre les systèmes existants et les configurations alternatives proposées par Siemens et ABB, mettant en lumière les avantages des moteurs asynchrones couplés aux variateurs de vitesse modernes.

La configuration ABB, en particulier, a démontré des bénéfices clairs en termes de performance, de flexibilité, et de réduction des coûts à long terme.

Les analyses de performance et de coûts ont montré que, bien que l'investissement initial dans les systèmes ABB soit plus élevé, les économies réalisées sur l'énergie, la maintenance, et les temps d'arrêt compensent largement ce surcoût initial, assurant une meilleure rentabilité sur le long terme. En outre, la compatibilité et la facilité d'intégration des technologies ABB avec les systèmes modernes de gestion et de contrôle renforcent leur attrait.

Ainsi, la transition vers des moteurs asynchrones avec variateurs de vitesse ABB est non seulement justifiée mais recommandée pour garantir la durabilité, la compétitivité et l'efficacité opérationnelle de la cimenterie SCMI.

Enfin, l'adoption de ces technologies avancées représente un investissement stratégique visant à optimiser les processus de production tout en minimisant les coûts opérationnels, assurant ainsi une performance robuste et durable pour l'usine.

# **Références Bibliographiques**



## Références Bibliographiques

---

- [1] Groupe GICA, « Présentation groupe GICA » <https://www.gica.dz/presentation-de-gica/>
- [2] SCMI, « nous », <https://scmidz.com/#nous>
- [3] Ciment Calcia, « La fabrication du ciment » [La fabrication du ciment | Ciments Calcia \(ciments-calcia.fr\)](https://www.ciments-calcia.fr/)
- [4] « La fabrication du ciment » dans [ressources.unit.eu](https://ressources.unit.eu/cours/RMDI/RMDI6/co/grain3_1.html)  
[https://ressources.unit.eu/cours/RMDI/RMDI6/co/grain3\\_1.html](https://ressources.unit.eu/cours/RMDI/RMDI6/co/grain3_1.html)
- [5] « Camion à Benne Basculante dans la Machinerie Lourde d'Extraction de Calcaire », dans [freepik.com](https://fr.freepik.com/photos-premium/camion-benne-basculante-dans-machinerie-lourde-extraction-calcaire-exploitation-miniere-dans-carriere_26599721.htm),  
[https://fr.freepik.com/photos-premium/camion-benne-basculante-dans-machinerie-lourde-extraction-calcaire-exploitation-miniere-dans-carriere\\_26599721.htm](https://fr.freepik.com/photos-premium/camion-benne-basculante-dans-machinerie-lourde-extraction-calcaire-exploitation-miniere-dans-carriere_26599721.htm)
- [6] « Broyeur à boulets de cimenterie », dans [toutsurlebeton.fr](https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/),  
<https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/>
- [7] Rotary kiln : <https://fr.kindle-tech.com/faqs/what-are-the-applications-of-rotary-kiln>
- [8] Chatterjee, A. K. (2018). *Cement Production Technology: Principles and Practice*. Boca Raton: CRC Press
- [9] Datasheet four rotaif de scmi
- [10]: Reducteurs mécaniques : <https://www.dymatec-industries.com/content/148-types-reducteurs-mecaniques>
- [11] Moteur ABB M3BP Low Voltage : ABB M3BP Low Voltage Motors Datasheet. ABB Motors and Mechanical Inc., consulté en 2024, à partir de [<https://library.abb.com/>].
- [12] Variateur de Vitesse ABB ACS880 : ABB ACS880 Variable Speed Drives Datasheet. ABB Automation Products GmbH, consulté en 2024, à partir de [<https://library.abb.com/>].
- [13] Variateur de Vitesse Siemens G120X : Siemens SINAMICS G120X Variable Frequency Drives Datasheet. Siemens AG, consulté en 2024, à partir de [[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/350/109769350/att\\_991846/v1/G120X\\_op\\_instr\\_0619\\_fr-FR.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/350/109769350/att_991846/v1/G120X_op_instr_0619_fr-FR.pdf)].
- [14] : Moteur Siemens SIMOTICS SD Low Voltage : Siemens SIMOTICS SD Low Voltage Motors Datasheet. Siemens AG, consulté en 2024, à partir de [[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/197/109749197/att\\_955119/v1/simotics-gp-sd-xp-dp-catalogue-d-81-1-en-2018.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/197/109749197/att_955119/v1/simotics-gp-sd-xp-dp-catalogue-d-81-1-en-2018.pdf)].
- [15] Hughes, A., & Drury, B. (2019). "Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications." Newnes.
- [16] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2013). "Electric Machinery." McGraw-Hill Education.

## Références Bibliographiques

---

- [17] Variateur de Vitesse ABB DCS800 : ABB DCS800 Variable Speed Drives Datasheet. ABB Automation Products GmbH, consulté en 2024, à partir de [\[https://library.abb.com/\]](https://library.abb.com/).
- [18] T-T electric LAK 4280B datasheet <https://www.t-telectric.com/pdf/LAK4000-6000FR.pdf>

# **Annexes**

