وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

MÉMOIRE DE MASTER

En : **Électromécanique**

Spécialité : **Maintenance Industrielle et Électromécanique**

Par : **CHAOUCHE Mohammed**

Par : **CHERCHEB Rafik Tahar**

Thème

Étude du système de protection d'un moteur électrique industriel

(Surintensité, Court-circuit, Défaut à la terre)

Soutenue publiquement, le **24/06/2026**, devant le jury composé de :

Membres du Jury :

Nom & Prénom	Grade	Établissement	Fonction
M. *METAHRI Dhiyaeddine*	MCB	IMSI	Président
M. BELABBES Abdallah	MCA	IMSI	Encadreur
Mme. TALHI Mama	MCA	IMSI	Co-encadreur
Mme. *LABAIR Hakima*	MCB	IMSI	Examinatrice
M. BELFADAL Walid	Ingénieur	SONATRACH	Invité

Remerciements

Avant tout, Louanges à Allah, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la volonté, la persévérance et la force nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, Dr. **BELABBES Abdallah**, Maître de Conférences à l'IMSI d'Oran, pour le temps précieux qu'il nous a consacré et son soutien constant tout au long de ce projet. Ses vastes connaissances dans le domaine des systèmes électriques nous ont guidés et ont constitué une source de motivation essentielle.

Nos sincères remerciements vont également à notre co-encadreure, Dr. **TALHI Mama**, pour son encadrement bienveillant, sa disponibilité et ses précieux conseils qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous remercions **M. ATALLAH Meddah**, enseignant chercheur en **France**, dont l'expertise nous a été d'une aide inestimable dans l'approfondissement de notre compréhension des systèmes de protection électrique.

Nous exprimons notre reconnaissance à **M. DERKAOUI Rachid**, Ingénieur à **Sonatrach**, pour nous avoir accueillis et facilité l'accès aux données techniques du moteur étudié dans ce mémoire.

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer ce travail, ainsi qu'à l'ensemble du corps enseignant de l'Université Oran 2 et de l'IMSI.

CHAOUCHE Mohammed & CHERCHEB Rafik Tahar

Dédicaces

Tout travail de recherche exige un investissement personnel profond, mais il ne peut aboutir sans les conseils et la bienveillance de nos proches, particulièrement ceux qui occupent une place unique dans nos cœurs. Je dédie ce modeste travail à :

À la mémoire de mes grands-pères,
CHAOUCHE ABDELKADER et GHOUL MAAMAR,

À ceux qui furent mes tout premiers enseignants.

"À Dieu nous appartenons et à Lui nous retournons."

À mes chers parents,
Pour leur tendresse infinie, leur amour inconditionnel, leurs encouragements et leurs prières de chaque instant, qui m'ont guidé et donné la force d'atteindre ce succès et cet honneur.

À mon frère et mes sœurs,
Pour leurs précieux conseils, leur soutien moral et leur présence constante à mes côtés pour mener à bien ce projet.

À Monsieur AGGOUNE Noureddine,
En témoignage de notre haute considération pour son mentorat et sa confiance en nos capacités d'ingénieurs. Un grand merci pour avoir guidé nos pas durant ce stage, facilité nos interactions avec les différents ingénieurs du site, et partagé son expertise sans réserve pour la réussite de ce projet.

À mes amis,
Qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours. Que chacun d'eux trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour leur aide précieuse.

Une mention toute particulière à mon amie **BEN SAIDI A.**, dont la présence, l'écoute et le soutien indéfectible ont été pour moi une source de force et d'encouragement tout au long de ce travail.

CHAOUCHE Mohammed

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, fruit de longues années d'efforts et de persévérance, à ceux qui ont toujours été là pour moi :

À mes très chers parents,
Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices sans limites, leurs prières sincères et leurs encouragements qui n'ont jamais failli. Vous avez été ma première école et ma plus grande force. Aucun mot ne saurait exprimer l'immensité de ma gratitude et de mon amour pour vous.

À mes frères et sœur,
Pour leur soutien moral indéfectible, leur présence réconfortante et leur affection sincère qui ont illuminé mon chemin tout au long de ce parcours.

À Monsieur AGGOUNE Noureddine,
Pour son accueil chaleureux, ses précieux conseils et son accompagnement constant tout au long de notre stage. Sa générosité dans le partage de ses connaissances et son soutien sur le terrain ont grandement contribué à enrichir notre expérience et à mener ce projet à bien.

À mes chers amis,
Ceux qui ont partagé avec moi les moments de joie comme les instants de doute, qui ont su me redonner confiance quand elle me faisait défaut. Votre amitié est l'un des plus beaux cadeaux que la vie m'ait offerts.
À tous ceux qui, de près ou de loin,
ont contribué à ma réussite par un mot d'encouragement, un conseil ou simplement un sourire bienveillant.

À mon binôme Mohammed,
Pour sa patience, sa rigueur et l'esprit d'équipe qu'il a su maintenir tout au long de ce projet commun. Ce travail est autant le sien que le mien.

CHERCHEB Rafik Tahar

ملخص

تُعدّ **المحرّكات الكهربائية** قلبَ المنشآت الصناعية، وحمايتها من الأعطال الكهربائية أمرٌ لا غنى عنه لضمان السلامة واستمرارية الإنتاج. ينصبّ هذا العمل على أحد أبرز التحديات في مجال الصيانة الصناعية: الكشف الموثوق عن الأعطال — فرط التيار، والدارة القصيرة، والعطب الأرضي — وعزلها قبل أن تُلحق أضراراً لا يمكن إصلاحها بالآلة.

لمعالجة هذا الإشكال، درسنا منظومة حماية محرّك لا-متزامن بقدرة **210 كيلوواط** وجهد **5500 فولت** تشغّله مؤسسة **سوناطراك**. انطلاقاً من الأسس النظرية للمحرّك ثلاثي الأوجه وتحليل أكثر أعطاله الكهربائية شيوعاً، بنينا نموذجاً محاكاتياً متكاملاً بـ**MATLAB/Simulink** يضمّ **ستّ وظائف حماية**، وُفِّقت معاملاتها وفق معياريْ **IEEE C37.96** و**IEC 60255-8**.

جرى اختبار ثلاثة سيناريوهات واقعية: حِمل ميكانيكي زائد، ودارة قصيرة ثنائية الوجه، وعطب أرضي أحادي الوجه. وفي كلّ حالة، استجابت منظومة الحماية على النحو الصحيح، إذ كشفت عن العطب وعزلته ضمن المهل الزمنية المحددة — مما يؤكّد صحة النموذج وفعالية استراتيجية الحماية المعتمدة.

الكلمات المفتاحية: محرّك لا-متزامن، حماية ضد فرط التيار، دارة قصيرة، عطب أرضي، MATLAB/Simulink، مرحّل الحماية، سوناطراك.

ABSTRACT

Electric motors are at the heart of industrial installations, and protecting them against electrical faults is essential to ensure safety and continuity of service. This work focuses on one of the most critical challenges in industrial maintenance : how to reliably detect and **isolate faults — overcurrent, short-circuit, and earth fault**

— before they cause irreversible damage to the machine.

To address this, we studied the protection system of a **210 kW**, **5 500 V** asynchronous motor operated by **Sonatrach**. Starting from the theoretical foundations of three-phase motors and the analysis of their most common electrical faults, we built a complete **MATLAB/Simulink** simulation model integrating six protection functions, parameterized according to **IEEE C37.96** and **IEC 60255-8** standards.

Three realistic fault scenarios were tested : **a mechanical overload, a two-phase short-circuit, and a single-phase earth fault**. In each case, the protection system responded correctly, detecting and isolating the fault within the required time limits — confirming both the validity of the model and the effectiveness of the protection strategy applied.

Keywords : asynchronous motor, overcurrent protection, short-circuit, earth fault, MATLAB/Simulink, protective relay, Sonatrach.

RÉSUMÉ

Les **moteurs électriques** sont au cœur des installations industrielles, et leur protection contre les défauts électriques est indispensable pour garantir la sécurité et la continuité de service. Ce travail s'attaque à l'un des défis les plus critiques de la maintenance industrielle : détecter et isoler de manière fiable les défauts **— surintensité, court-circuit et défaut à la terre** — avant qu'ils ne causent des dommages irréversibles à la machine.

Pour y répondre, nous avons étudié le système de protection d'un moteur asynchrone de **210 kW** sous **5 500 V** exploité par **Sonatrach**. En partant des bases théoriques du moteur triphasé et de l'analyse de ses défauts électriques les plus courants, nous avons construit un modèle de simulation complet sous **MATLAB/Simulink** intégrant **six fonctions de protection**, paramétrées conformément aux normes **IEEE C37.96** et **IEC 60255-8**.

Trois scénarios de défauts réalistes ont été testés : **une surcharge mécanique, un court-circuit biphasé, et un défaut monophasé à la terre.**

Dans chaque cas, le système de protection a réagi correctement, détectant et isolant le défaut dans les délais requis — confirmant à la fois la validité du modèle et l'efficacité de la stratégie de protection adoptée.

Mots-clés : moteur asynchrone, protection contre la surintensité, court-circuit, défaut à la terre, MATLAB/Simulink, relais de protection, Sonatrach.

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Table des figures **v**

Liste des tableaux **vii**

Introduction génerale **1**

Introduction Générale **1**

Généralités sur les moteurs électriques **2**

1.0.1 Historique des machines électriques 2

1.0.2 Machine asynchrone 3

1.1 Glissement et vitesse dans la machine asynchrone 9

1.1.1 Le glissement 9

1.1.2 Vitesse de synchronisme (n_s) 10

1.1.3 Calcul du glissement 11

1.1.4 Fréquence des courants rotoriques 11

1.2 Schéma équivalent d'un moteur asynchrone 11

1.2.1 Plaque signalétique 12

1.3 Mode de couplage 13

1.3.1 Couplage étoile 14

1.3.2 Couplage triangle 14

1.4 Le bilan de puissances 15

1.4.1 La puissance active (P) 16

1.4.2 La puissance réactive (Q) 16

1.4.3 La puissance apparente (S) 16

1.4.4 Le rendement d'un moteur asynchrone triphasé : 17
1.4.5 Facteurs influençant le rendement 18
1.4.6 Importance du rendement 18
1.5 Couple électromagnétique 18
1.5.1 Expression du couple en fonction du glissement 19
1.5.2 Importance du couple électromagnétique 19
1.5.3 Relation du couple avec le glissement 19
1.6 Couple électromagnétique 19
1.6.1 Analyse du couple 21

Défauts et dispositifs de protection électrique **22**
2.1 Les défaillances 22
2.1.1 Les courts-circuits 22
2.1.2 L'échauffement 23
2.1.3 Les surcharges 24
2.2 Protection 24
2.2.1 Les dispositifs de protection contre le court-circuit 24
2.2.2 Les coupe-circuits fusibles 24
2.2.3 Caractéristiques techniques d'un fusible 26
2.2.4 Les disjoncteurs magnétiques 28
2.3 Les disjoncteurs moteurs (Disjoncteurs magnétothermiques) 29
2.3.1 Caractéristiques principales 30
2.4 Principe de fonctionnement du disjoncteur moteur 31
2.5 Description de la courbe de déclenchement 32
2.5.1 Les dispositifs de protection contre les surcharges 35
2.6 La sélectivité 38
2.7 Les contacteurs 39
2.7.1 Définition des contacteurs : C'est un appareil mécanique de connexion ayant une seul position (au repos), commandé autrement qu'à la main De par sa conception assez complexe, il est conçu pour résister mieux que tout autre composant à l'arc électrique à chaque ouverture et fermeture16. 39
2.7.2 Les dispositifs de protection multiples : 40

Simulation et Mise en œuvre de la Protection **42**
3.1 Environnement de Simulation 42
3.1.1 Présentation de MATLAB/Simulink — Specialized Power Systems . . 42

3.2 Configuration de la simulation . . . 43
3.2.1 Bloc powergui . . . 43
3.2.2 Choix du solveur . . . 44
3.2.3 Structure du Modèle de Simulation . . . 45
3.3 Source d'alimentation triphasée . . . 46
3.4 Disjoncteur Triphasé et Commande . . . 47
3.4.1 Caractéristiques du disjoncteur (Three-Phase Breaker) . . . 47
3.4.2 Logique de commande du disjoncteur . . . 47
3.4.3 **Remarque :** . . . 48
3.5 Paramètres du Moteur Asynchrone à Bagues : . . . 50
3.6 Paramètres électriques équivalents . . . 51
3.6.1 Circuit statorique . . . 51
3.6.2 Circuit rotorique . . . 51
3.6.3 Paramètres mécaniques . . . 52
3.6.4 Conditions initiales . . . 52
3.7 Blocs complémentaires de la simulation . . . 53
3.7.1 Bloc Step — Simulation de la charge mécanique . . . 53
3.7.2 Conversion de vitesse et saturation des sorties . . . 54
3.8 Système de Mesure . . . 55
3.8.1 Mesure tension-courant triphasée (VI_{Meas}) . . . 55
3.8.2 Transformateurs de courant (émulés par gains) . . . 56
3.9 Logique du Relais de Protection (Sous-système Relay) . . . 57
3.9.1 Entrées et structure générale . . . 57
3.9.2 Fonction 1 – Surintensité à Temps Inverse Phase R (Protection 51 – AIS1PF-02 Phase R + On Delay) . . . 58
3.9.3 Logique de traitement . . . 58
3.9.4 Fonction 2 – Court-circuit Instantanée Phase R (Protection 50 – AIS1PF-02 Phase R (Inst)) . . . 59
3.9.5 Fonction 3 – Surintensité à Temps Inverse Phase T (Protection 51 – AIS1PF-02 Phase T + On Delay1) . . . 60
3.9.6 Fonction 4 – Court-circuit Instantanée Phase T (Protection 50 – AIS1PF-02 PhaseT(Inst)) . . . 60
3.9.7 Fonction 5 – Protection Défaut à la Terre (Protection 51N – AR3PF-04 relay) . . . 60
3.9.8 Fonction 6 – Protection Thermique / Surcharge Prolongée (Protection 49 – ACJ-4H Timing + On Delay2) . . . 61

3.10 Simulation des Défauts 63
3.10.1 Simulation du Défaut de Surintensité (Surcharge) 63
3.10.2 Courants de phase — Vue globale (0 à 10s) 64
3.10.3 Analyse des phases temporelles de la simulation 64
3.10.4 Analyse des phases temporelles de la tension lors d'une surintensité . . 66
3.10.5 Analyse des courbes de vitesse rotorique et de couple lors d'une surintensité 68
3.10.6 Simulation du Défaut de Court-Circuit 70
3.10.7 Analyse des courbes de courant lors d'un court-circuit biphasé (Phase A–C) 72
3.10.8 Analyse des courbes de tension lors d'un court-circuit biphasé (Phase A–C) 74
3.10.9 Simulation du Défaut à la Terre 77
3.10.10 Analyse des Tensions lors du Défaut Phase A – Ground 82

Conlution génerale **86**

Bibliographie **89**

Table des figures

1.1 Constitution de La machine asynchrone . . . 2
1.2 Représentation des enroulements du stator . . . 4
1.3 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone . . . 5
1.4 Représentation des enroulements du stator . . . 6
1.5 Constitution d'un rotor à cage et détail de sa cage d'écureuil . . . 8
1.6 Rotor à double cages. . . . 9
1.7 Rotor à bagues . . . 10
1.8 Schéma équivalent d'un moteur asynchrone. . . . 12
1.9 Plaque signalétique d'un moteur asynchrone. . . . 13
1.10 Couplage triangle et Couplage étoile. . . . 15
1.11 Le schéma représentant le bilan des puissances dans un moteur asynchrone . . . 17
1.12 Le couple électromagnétique d'un moteur asynchrone triphasé en fonction du glissement . . . 21
2.13 symbole des fusibles . . . 25
2.14 Courbe de déclenchement d'un fusible. . . . 26
2.15 Courbe du pouvoir de limitation. . . . 27
2.16 Abaque de détermination de fusibles. . . . 28
2.17 Disjoncteur magnétique et son symbole . . . 30
2.18 Constitution interne d'un disjoncteur . . . 31
2.19 Courbes de déclenchements d'un disjoncteur . . . 33
2.20 Courbe de fonction d'un disjoncteur . . . 34
2.21 Courbe des circuits . . . 34
2.22 Courbes de fonctionnement d'un disjoncteur . . . 36
2.23 Relais à surintensité à retardement et instantané (50/51RM1) Fuji Electric . . . 36
2.24 Coordination de protection amont (A) et aval (B) en cas de court-circuit. . . . 38
2.25 Symbole contacteur . . . 39
2.26 les dispositifs de protection multiples . . . 40
3.27 Paramètres du bloc powergui . . . 43
3.28 Schéma fonctionnel global du modèle Simulink . . . 45

3.29 Vue global du modèle Simulink 45
3.30 Paramètres du bloc Source triphasée 47
3.31 Paramètres du bloc Disjoncteur 48
3.32 Chaîne logique de commande du disjoncteur 49
3.33 Plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé industriel – Sonatrach . . 50
3.34 Block Parameters : Asynchronous Machine SI Units1 52
3.35 Paramètres du bloc Step 53
3.36 Paramètres du bloc Gain4 (conversion vitesse) 54
3.37 Block Parameters : VI_Meas 55
3.38 Block Parameters : GAIN 56
3.39 Sous-système de protection Relay avec logique complète 57
3.40 Architecture de la logique de déclenchement du relais 58
3.41 Paramètres du bloc Step pour la simulation de surcharge 63
3.42 Évolution des courants triphasés lors de la surcharge (vue globale) 64
3.43 Évolution des tensions triphasées lors de la surcharge (vue globale) 66
3.44 Évolution de la vitesse rotorique et du couple électromagnétique lors de la surcharge 68
3.45 Paramètres du bloc Fault pour la simulation de court-circuit 70
3.46 Paramètres du bloc Step pour la simulation de court-circuit 71
3.47 Évolution des courants triphasées lors du court-circuit 72
3.48 Évolution des tensions triphasées lors du court-circuit 74
3.49 Paramètres du bloc Step pour la simulation du défaut à la terre 77
3.50 Paramètres du bloc Fault pour la simulation du défaut à la terre 78
3.51 Évolution des courants triphasées lors du défaut à la terre 79
3.52 Évolution des tensions triphasées lors du défaut à la terre 82

Liste des tableaux

1.1 Comparaison entre les couplages étoile et triangle 15
2.2 Principales caractéristiques nominales d'un fusible 26
2.3 Caractéristiques des fusibles 28
2.4 Pouvoir de coupure et de fermeture 34
3.5 Paramètres de la source de tension triphasée 46
3.6 Paramètres du disjoncteur triphasé 47
3.7 Données nominales du moteur 51
3.8 Paramètres du stator 51
3.9 Paramètres du rotor et des cages 51
3.10 Paramètres mécaniques du moteur 52
3.11 Paramètres du bloc Step selon le type de défaut 54
3.12 Récapitulatif des phases temporelles de la simulation 65
3.13 Récapitulatif de l'évolution de la tension lors d'une surintensité 67
3.14 Récapitulatif de l'évolution de la vitesse et du couple lors d'une surintensité . . 69
3.15 Récapitulatif des courants de phase lors du court-circuit biphasé (A–C) 73
3.16 Récapitulatif de l'évolution de la tension lors du court-circuit biphasé (A–C) . . 75
3.17 Caractéristiques des courants lors du défaut Phase A – Terre 80
3.18 Comportement des tensions lors du défaut Phase A – Terre 83
3.19 Synthèse tension/courant lors du défaut monophasé à la terre 84

Introduction Générale

Dans le contexte de l'industrialisation croissante et de l'automatisation des procédés, les moteurs électriques jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des installations industrielles. Ils assurent la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et sont présents dans de nombreuses applications telles que les systèmes de pompage, les compresseurs, les convoyeurs et les machines de production.

Cependant, malgré leur robustesse, les moteurs électriques sont soumis à divers types de contraintes électriques et mécaniques susceptibles de provoquer des défaillances. Parmi les anomalies les plus courantes figurent la surintensité, le court-circuit et le défaut à la terre. Ces défauts peuvent entraîner des conséquences graves telles que l'échauffement excessif des enroulements, la détérioration de l'isolation, des arrêts de production imprévus, voire des accidents mettant en danger les personnes et les équipements.

Afin de garantir la sécurité des installations et d'assurer la continuité de service, il est indispensable de mettre en place des systèmes de protection adaptés. Ces systèmes reposent sur des dispositifs tels que les disjoncteurs, les fusibles et les relais de protection, capables de détecter rapidement les défauts et d'isoler la partie concernée du réseau.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier la conception et la simulation d'un système de protection d'un moteur électrique industriel asynchrone, en mettant l'accent sur les protections contre les surintensités, les courts-circuits et les défauts à la terre. Cette étude vise à analyser les différents types de défauts, à comprendre les principes de fonctionnement des dispositifs de protection, et à valider leur comportement par simulation sous Matlab/Simulink. Le présent mémoire est structuré comme suit :

— **Le premier chapitre** présente des généralités sur les moteurs électriques asynchrones et leurs caractéristiques de fonctionnement.

— **Le deuxième chapitre** traite des différents défauts pouvant affecter les moteurs électriques industriels, ainsi que des systèmes et dispositifs de protection associés.

— **Le troisième chapitre** est consacré à la modélisation et à la simulation du système de protection sous Matlab/Simulink, avec une étude de cas appliquée à un moteur industriel de 210 kW.

CHAPITRE I

Généralités sur les moteurs électriques

Introduction

Au cœur de l'infrastructure industrielle moderne, le moteur asynchrone s'est imposé comme la machine tournante de référence. Sa robustesse mécanique éprouvée, son faible coût d'entretien et son rendement remarquable en font le choix privilégié dans des secteurs aussi variés que le pompage, la compression ou la production d'énergie.

Si son usage historique restait cantonné aux applications à régime constant, l'essor des convertisseurs statiques et les avancées de l'électronique de puissance ont profondément bouleversé ce paradigme — le moteur asynchrone supplante aujourd'hui les machines à courant continu, même dans les processus exigeant une régulation dynamique de la vitesse. Toutefois, cette omniprésence place la machine au centre des enjeux de productivité et de sécurité. Une simple défaillance peut paralyser toute une chaîne de production, générant des préjudices financiers et humains considérables. C'est dans cette perspective que ce chapitre pose les fondements théoriques indispensables : constitution du moteur, principe de fonctionnement, schéma équivalent, bilan de puissances et comportement du couple électromagnétique — autant d'éléments qui conditionneront la compréhension et le dimensionnement du système de protection étudié dans la suite de ce mémoire.

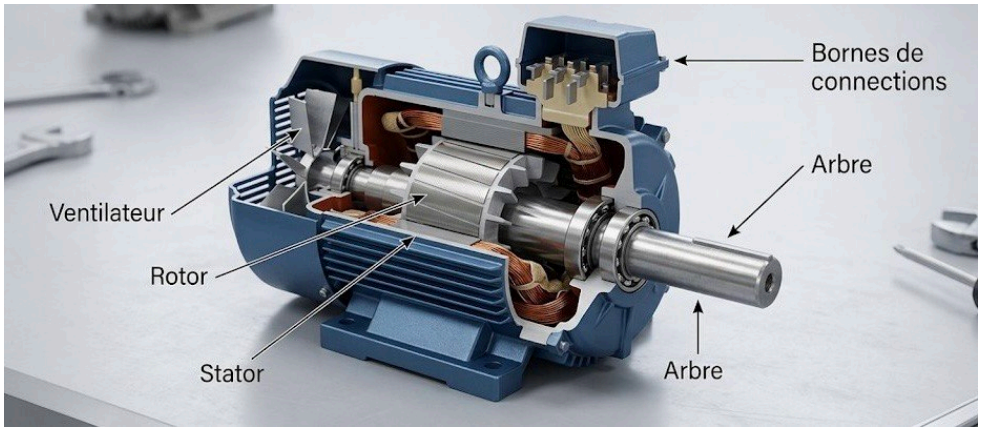

Figure 1.1 – Constitution de La machine asynchrone

1.0.1 Historique des machines électriques

L'aventure technologique des machines électriques prend racine en 1821, l'année où Michael Faraday a su matérialiser le premier mouvement électromagnétique rotatif. Ce n'était que le prélude d'une effervescence scientifique sans précédent : dès 1822, Peter Barlow complexifie l'idée avec sa célèbre roue dentée, ouvrant ainsi la voie aux travaux fondamentaux de Faraday, Lenz et Henry qui, vers 1831, ont fini par lever le voile sur les mystères de l'induction.

Cette dynamique de découverte trouve un écho particulier en France dès 1832. Fruit d'une synergie entre André-Marie Ampère et Hippolyte Pixii, la première génératrice à courant continu voit le jour, marquant une étape charnière. Ce dispositif initial a d'ailleurs servi de base aux travaux de Hyde Clarke en 1836, qui a su inverser la structure machine pour optimiser le processus alors délicat de la commutation. Le milieu du XIXe siècle témoigne ensuite d'une diversification des concepts, illustrée par le moteur à réactance de Robert Davidson en 1842, ou encore par les réalisations robustes de Gustave Froment en 1848, dont les machines délivraient déjà un couple remarquable de 500 N·m, rendant enfin possible l'exploitation de l'énergie électrique à l'échelle industrielle. [1] [2].

1.0.2 Machine asynchrone

1.0.2.1 Définition :

Dans le paysage industriel actuel, le moteur asynchrone s'est imposé comme l'actionneur par excellence.

Cette suprématie s'explique par un compromis technico-économique inégalé :

une robustesse à toute épreuve alliée à un coût de production maîtrisé et un encombrement particulièrement optimisé.

Bien que ses performances globales soient excellentes, son exploitation impose de gérer une contrainte physique majeure :

une consommation inévitable d'énergie réactive, indispensable pour assurer la magnétisation de l'entrefer.Sur le plan technique, les configurations triphasées dominent largement le marché.

Contrairement aux versions monophasées, limitées par des performances modestes et l'absence de couple de démarrage autonome, les machines triphasées offrent une stabilité et une puissance adaptées aux exigences des réseaux électriques modernes.

Si leur pilotage

— notamment pour la variation de vitesse ou les phases de démarrage

— a longtemps été jugé complexe, l'avènement de l'électronique de puissance a radicalement simplifié leur mise en œuvre. Aujourd'hui, cette flexibilité permet au moteur asynchrone de piloter des systèmes stratégiques, allant du transport ferroviaire (TGV, tramways) aux chaînes de production industrielles, sans oublier son rôle crucial dans la conversion d'énergie éolienne. [3]

1.0.2.2 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :

Le génie de la machine à courant alternatif réside avant tout dans un concept physique fascinant : la génération d'un champ magnétique tournant. Pour vulgariser ce phénomène, considérons qu'un courant circulant à travers une bobine crée un champ dont l'intensité et l'orientation ne

sont que le reflet direct de l'excitation électrique. En régime alternatif, ce champ devient pulsant, oscillant sur son propre axe à la fréquence du réseau.Toutefois, la véritable magie opère au niveau du stator triphasé. En disposant trois enroulements décalés spatialement de 120° et en les soumettant à un système de tensions triphasées, on ne se limite plus à des champs statiques. Grâce à la superposition vectorielle

— régie par le théorème de Ferraris

— un champ magnétique unique émerge : il ne se contente plus de vibrer, mais pivote physiquement autour de l'entrefer.Ce vecteur magnétique balaie l'espace à une cadence bien précise, appelée vitesse de synchronisme (Ω_s).

Cette variable dépend intrinsèquement de deux facteurs clés : la fréquence d'alimentation (f) et le nombre de paires de pôles (p). À titre d'exemple, sur un réseau standard de 50 Hz, un moteur bipolaire ($p = 1$) verra son champ tourner à une vitesse synchrone de 3000 tr/min. C'est précisément ce flux tournant qui constitue le moteur de l'induction, venant induire les courants nécessaires au sein du rotor pour générer le couple électromagnétique.

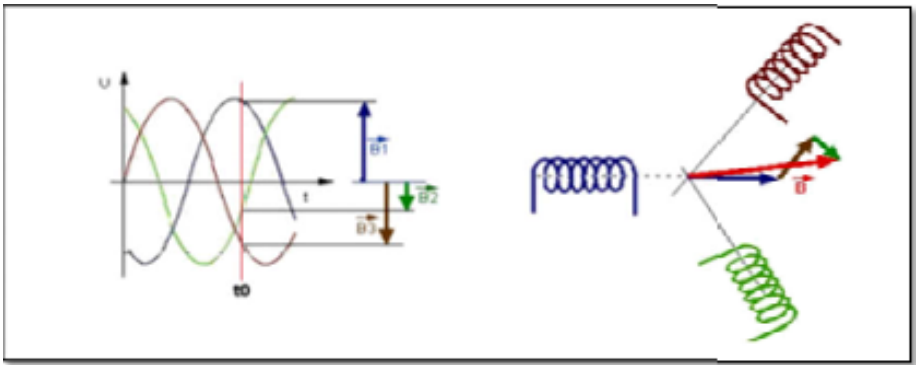

Figure 1.2 – Représentation des enroulements du stator
[4]

Une fois le champ tournant établi au stator, l'interaction avec le rotor devient le moteur de l'action. Ce dernier‹ souvent structuré en cage d'écureuil, est composé de barres conductrices court-circuitées par deux anneaux d'extrémité. Cette configuration simple mais robuste forme un circuit fermé de très faible impédance.

Le phénomène physique qui s'ensuit est fascinant : le flux magnétique tournant du stator vient littéralement ”balayer” les barres immobiles du rotor.

Ce mouvement relatif induit, au sein de la cage, des courants de Foucault massifs. En vertu de la loi de Laplace, ces courants immergés dans le champ magnétique statique donnent naissance à des forces électromagnétiques tangentielles. C'est l'accumulation de ces forces qui génère le couple moteur, propulsant le rotor dans une course après le champ tournant.

C'est ici qu'intervient la loi de Lenz (ou loi de modération) : les courants induits cherchent

systématiquement à s'opposer à la cause qui les a créés — à savoir la variation du flux. Pour minimiser cette variation, le rotor se met à tourner dans le même sens que le champ magnétique.

Cependant, un équilibre doit être maintenu : le rotor ne peut jamais atteindre la vitesse de synchronisme (Ω_s).En effet, si une telle égalité de vitesse survenait, la variation relative de flux deviendrait nulle. Sans variation‹ plus d'induction ; sans induction, plus de courant ni de couple. Le moteur s'arrêterait instantanément. C'est ce décalage permanent et vital que l'on appelle Glissement (g),est :

g = 3000 - 2840 = 160 tr/min .

À titre d'illustration technique, pour une machine bipolaire sur un réseau de 50 Hz ($\Omega_s = 3000$ tr/min), une vitesse rotorique de 2840 tr/min indique un glissement réel de 160 tr/min. Ce différentiel de vitesse est précisément ce qui permet de maintenir l'induction nécessaire à la production du travail mécanique [4]

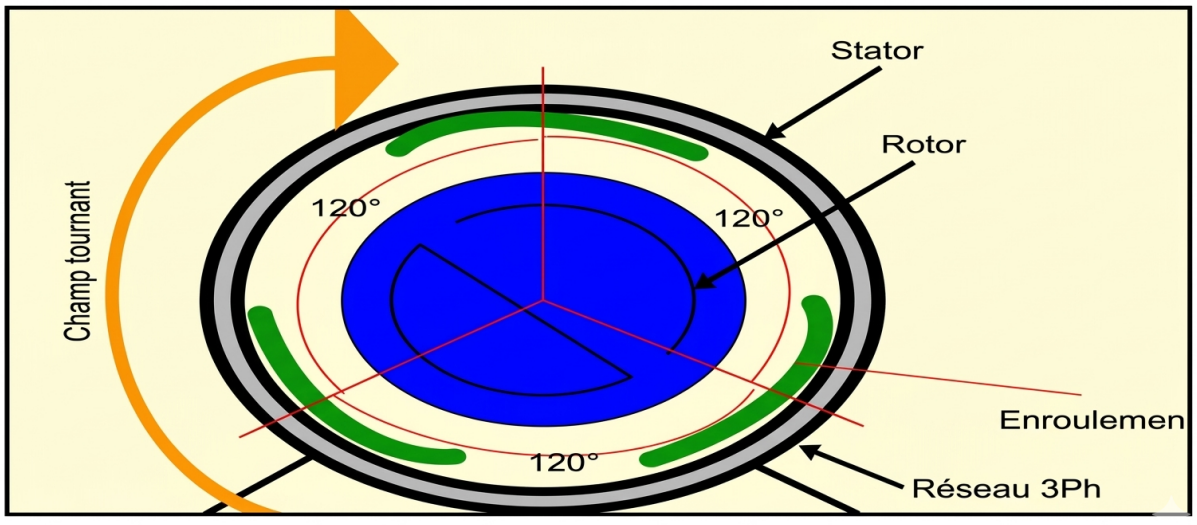

Figure 1.3 – Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

Moteur asynchrone

Un moteur asynchrone triphase est constitué principalement de deux éléments : un partie fixe, le stator, et une partie mobile, le rotor. L'interaction élettromagnetique entre les deux composantes est la source du mouvement tourbillonnant.

Le stator se compose d'une pile de tôles magnétiques ayant trois enroulements dont la position, les uns les autres, sont séparées par un décalage de 120°. L'obtention de ces enroulements est la base d'un champ tournant magnétique, qui permet le fonctionnement du moteur.

L'entrefer est la distance entre le rotor et le stator. Cet espace doit être très petit pour permettre le couplage magnétique et l'induction électromagnétique.

On distingue principalement deux types de rotors :

Le rotor à cage d'écureuil est aussi très utilisé du fait qu'il n'est pas difficile à concevoir ou à construire. démarrage amélioré car il dispose d'un rotor bobiné. On peut ajouter des résistances externe par le biais de bagues collectrices.

Cette disposition dote le moteur asynchrone d'une grande adaptabilité aux différentes applications industrielles sans compromettre son rendement ou sa fiabilité qui sont élevés. [5]

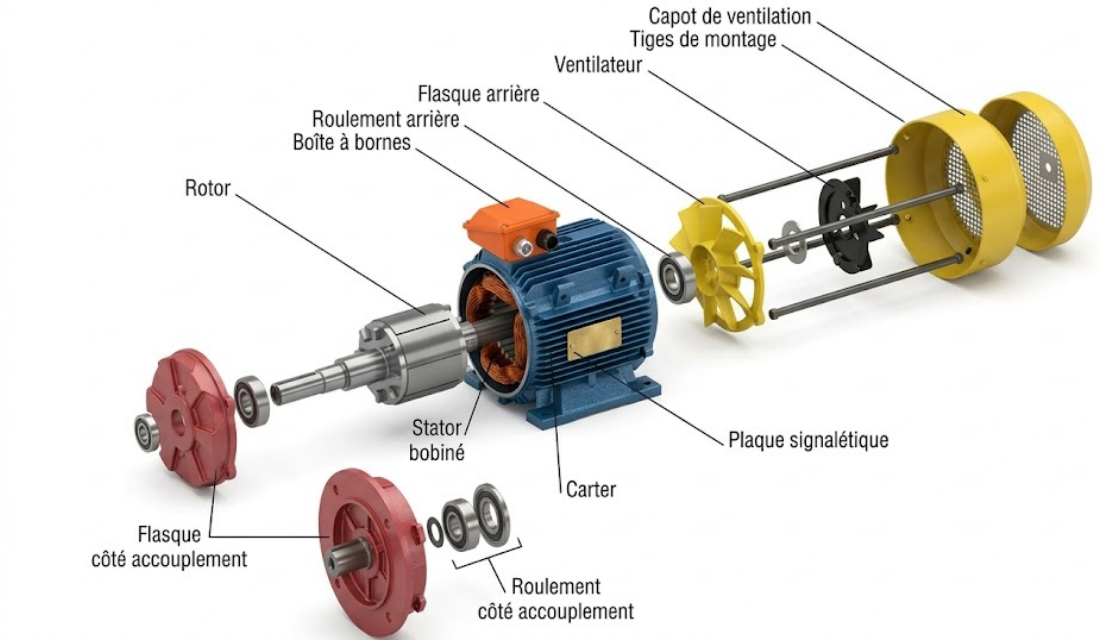

Figure 1.4 – Représentation des enroulements du stator [4]

.Stator :

Le stator constitue la partie fixe du moteur asynchrone triphasé. Il est composé d'un noyau en tôle ferromagnétique empilée afin de réduire les pertes par courants de Foucault, et est muni de rainures dans lesquelles sont logés les enroulements statoriques. Ces enroulements sont constitués de fils de cuivre isolés, répartis en trois phases sépa- rées de 120° électriques, et sont conçus pour être alimentés par un réseau triphasé. Selon les besoins d'alimentation, ils peuvent être couplés en étoile (Y) ou en triangle [6].

L'objectif principal du stator est de générer un champ magnétique tournant lorsqu'il est alimenté. Ce champ traverse l'entrefer et coupe les conducteurs du rotor, induisant ainsi des courants qui sont à l'origine du couple électromagnétique moteur. La qualité de construction du stator, notamment l'isolation des enroulements et la ventilation, est essentielle pour assurer un bon rendement et une longue durée de vie du moteur.

.Rotor :

Le rotor est la partie du moteur asynchrone triphasé qui tourne. Il se trouve à l'intérieur du stator et est séparé de celui-ci par un petit espace. Le rôle du rotor est de transformer l'énergie électromagnétique en énergie mécanique en faisant tourner son axe.

Il existe deux principaux types de rotors, qui diffèrent par leur construction.

- Le rotor en cage d'écureuil est le type le plus couramment utilisé dans les moteurs standards. Il est composé de barres conductrices en aluminium ou en cuivre, insérées dans des encoches et reliées à leurs extrémités par deux couronnes conductrices. Ce type de rotor est solide, simple et nécessite peu d'entretien.

- Le rotor bobiné, également appelé rotor à bagues, contient des enroulements triphasés similaires à ceux du stator. Ces enroulements sont connectés à l'extérieur par des bagues collectrices et des balais. Cela permet d'ajouter des résistances externes pour améliorer le contrôle du démarrage et du couple.

La conception du rotor a un impact direct sur le comportement dynamique du moteur, notamment lors du démarrage et en cas de variation de charge. Par conséquent, le choix du type de rotor dépend des exigences spécifiques de l'application industrielle visée. [7]

.Rotor à cage :

Le rotor à cage, également appelé "cage d'écureuil", est la forme la plus répandue de rotor dans les moteurs asynchrones triphasés standards, notamment pour les applications nécessitant un fonctionnement simple, fiable et peu coûteux.

Il est constitué de barres conductrices en aluminium ou en cuivre, disposées paral- l'élément à l'axe de rotation, et insérées dans les encoches du noyau magnétique. Ces barres sont reliées électriquement à leurs extrémités par deux anneaux conducteurs appelés couronnes. Cette configuration forme un circuit fermé dans lequel des courants induits

Apparaissent lors de l'interaction avec le champ magnétique tournant du stator.

Ce type de rotor présente plusieurs avantages : Grande robustesse mécanique, Faible coût de fabrication, Absence de composants de frottement comme les balais, Entretien minimal.

Il est largement utilisé dans les moteurs de faible et moyenne puissance, notamment dans les applications telles que les ventilateurs, les compresseurs, les convoyeurs et autres systèmes automatisés.

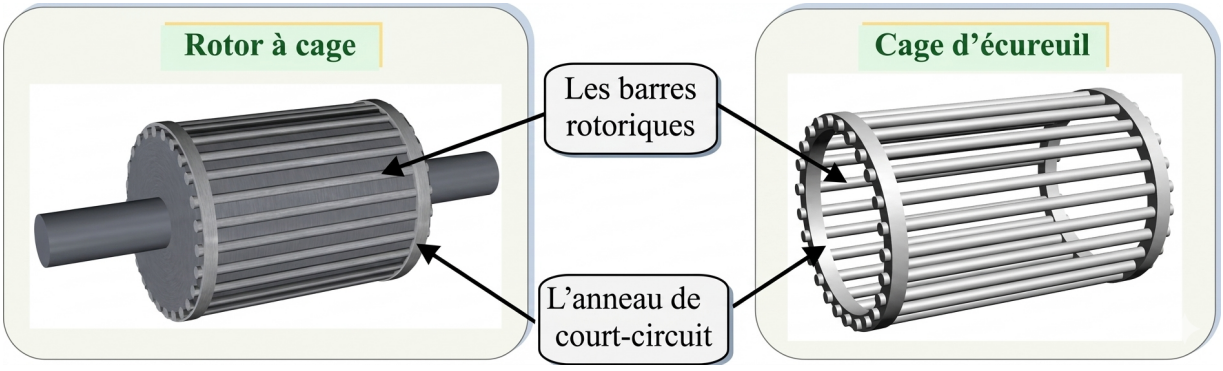

Figure 1.5 – Constitution d'un rotor à cage et détail de sa cage d'écureuil

.Rotor à double cages :

Le rotor à double cage est une variante améliorée du rotor à cage simple, conçue pour optimiser les performances du moteur, notamment au démarrage. Il est particulièrement adapté aux applications nécessitant un couple de démarrage élevé tout en limitant l'intensité du courant absorbé.

Ce type de rotor comporte deux circuits conducteurs superposés :

— La cage extérieure, généralement en bronze ou en aluminium, possède une résistance élevée et une inductance faible. Elle est située près de la surface du rotor, proche de l'entrefer. Son rôle est de fournir un fort couple au démarrage, car elle permet un courant important en réponse à l'induction initiale.

— La cage intérieure, réalisée en cuivre ou matériau équivalent, présente une résistance faible mais une inductance plus élevée, car elle est noyée plus profondément dans le noyau du rotor. Elle prend le relais lorsque la vitesse du moteur augmente, assurant ainsi un bon rendement en régime établi.

Ce montage double cage permet une répartition intelligente du courant en fonction de la vitesse :

— À faible vitesse : la cage extérieure est dominante,

— À haute vitesse : la cage intérieure devient prédominante.

Grâce à cette conception, le rotor à double cage combine les avantages d'un bon couple de démarrage et d'un fonctionnement efficace en régime nominal, ce qui le rend idéal pour les

machines à forte inertie comme les compresseurs, les broyeurs ou certaines machines- outils.

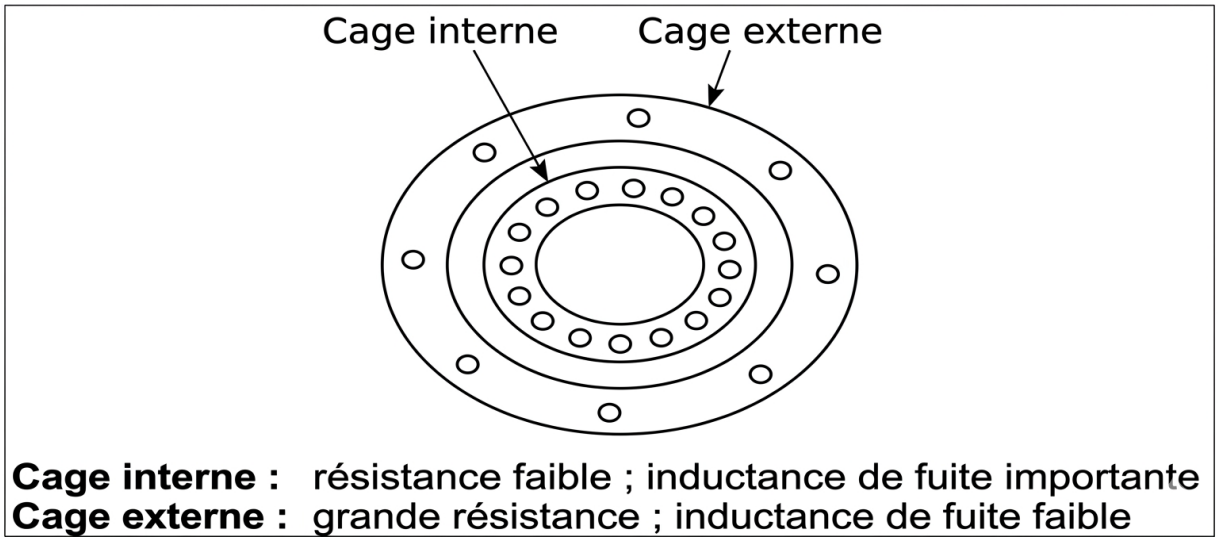

Figure 1.6 – Rotor à double cages.

.Rotor bobiné (à bagues) : Le rotor bobiné à bagues est un type de rotor utilisé dans les moteurs asynchrones triphasés, qui se distingue par l'utilisation de bobines de cuivre ou d'aluminium sur son noyau, reliées à des bagues collectrices. Ces bagues permettent de connecter les enroule- ments du rotor à un circuit externe via des balais.

Ce type de rotor est souvent utilisé dans des applications où un contrôle du démarrage est nécessaire, car il permet l'ajout de résistances pour réduire le courant au démarrage et augmenter le couple. Il est également utile dans les moteurs de grande puissance ou ceux nécessitant un démarrage sous charge.

En résumé, le rotor bobiné offre un meilleur contrôle du moteur, notamment lors du démarrage, mais il requiert un entretien plus régulier en raison de l'usure des balais et des bagues collectrices.

1.1 Glissement et vitesse dans la machine asynchrone

1.1.1 Le glissement

Le glissement est une grandeur qui représente l'écart entre la vitesse de rotation du champ magnétique statorique (n_s) et celle du rotor (n_r) dans une machine asynchrone.

Pour que ce type de moteur fonctionne, il doit toujours exister une différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor. Le rotor « suit » le champ, mais ne l'atteint jamais complètement, car c'est le champ statorique qui entraîne le rotor.

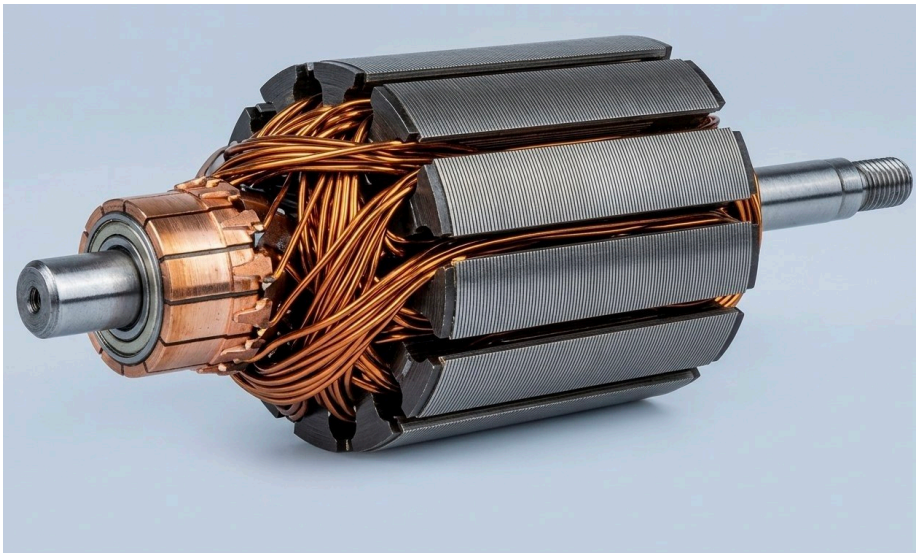

Figure 1.7 – Rotor à bagues

En général, le glissement est faible et exprimé en pourcentage :

— Environ 2 % pour les machines de forte puissance,

— De 6 à 7 % pour les machines triphasées de faible puissance,

— Jusqu'à 10 % pour les machines monophasées de faible puissance.

Les pertes par effet Joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une bonne machine doit fonctionner avec un glissement réduit.

1.1.2 Vitesse de synchronisme (n_s)

La vitesse de rotation du champ magnétique statorique est notée n_s, tandis que la vitesse de rotation réelle du rotor est n_r.

La vitesse de synchronisme dépend de la fréquence de l'alimentation (f) et du nombre de paires de pôles (P).

Formules générales : En tours par seconde :

$$n_s = \frac{f}{P} \tag{1.1}$$

En tours par minute :

$$n_s = \frac{60 \times f}{P} \tag{1.2}$$

Avec :

— f : fréquence d'alimentation en Hz,

— P : nombre de paires de pôles.

1.1.3 Calcul du glissement

Le glissement g est défini comme le rapport entre la différence de vitesse et la vitesse de synchronisme :

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} \tag{1.3}$$

Il peut également être exprimé à partir des vitesses angulaires :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \tag{1.4}$$

Où :

— ω_s : vitesse angulaire du champ statorique,

— ω_r : vitesse angulaire du rotor.

1.1.4 Fréquence des courants rotoriques

Les courants induits dans le rotor d'un moteur asynchrone triphasé ont une fréquence qui dépend du glissement.

La fréquence des courants rotoriques f_r est liée à la fréquence statorique f_s et au glissement g par la relation suivante :

$$f_r = g \times f_s \tag{1.5}$$

Où :

— f_s : fréquence du courant dans le stator,

— g : glissement du moteur.

Cela signifie que la fréquence des courants rotoriques est proportionnelle au glissement. Ainsi, au démarrage ($g \approx 1$), la fréquence rotorique est proche de celle du stator, puis elle diminue lorsque le moteur atteint sa vitesse nominale. [8]

1.2 Schéma équivalent d'un moteur asynchrone

Le schéma équivalent d'un moteur asynchrone permet de modéliser le moteur de manière simplifiée, en représentant les principaux éléments électriques intervenant dans son fonctionnement.

Ce schéma comprend des résistances, des inductances et des sources de tension, permettant de décrire les pertes et le comportement du moteur.

En général, un schéma équivalent comprend :

— La résistance du stator R_s et l'inductance du stator L_s,

— La résistance du rotor R_r et l'inductance du rotor L_r,

— La résistance rotorique équivalente dépendant du glissement,

— Une source de tension représentant le champ magnétique tournant généré par le stator.

Ce modèle permet de mieux comprendre les pertes dans le moteur et d'analyser son comportement électrique sous différentes conditions de fonctionnement. [9]

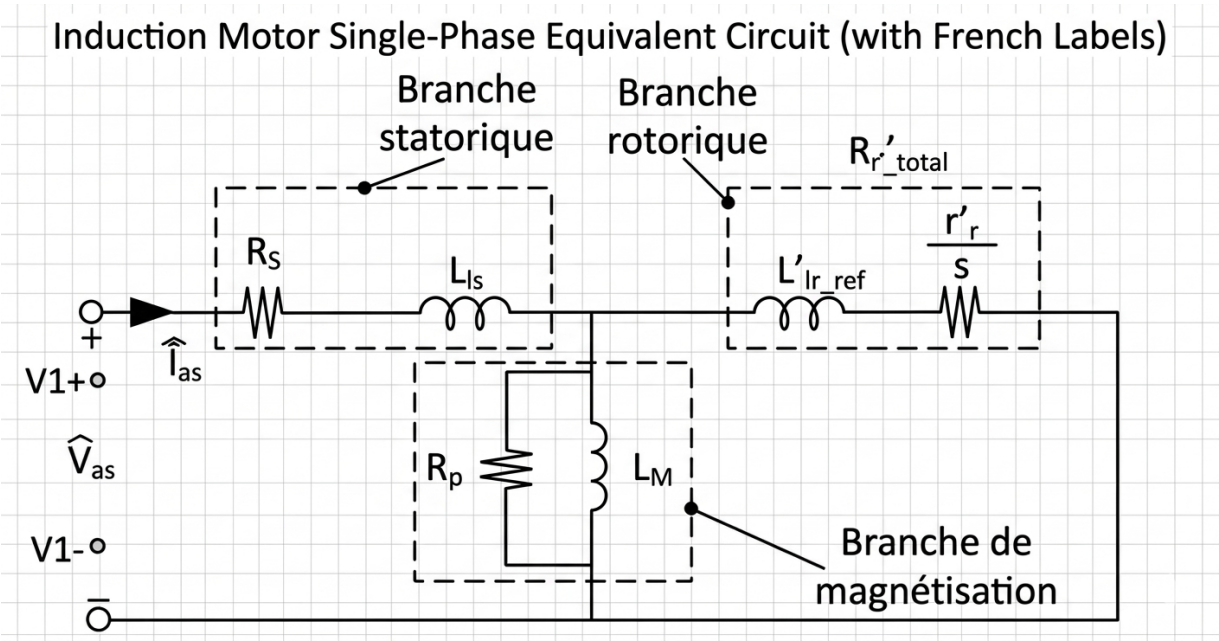

Figure 1.8 – Schéma équivalent d'un moteur asynchrone.

1.2.1 Plaque signalétique

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé est une étiquette fixée sur le moteur, contenant des informations essentielles pour son identification et son fonctionnement.

Ces informations incluent généralement :

— La puissance nominale du moteur (en kW ou HP),

— La tension d'alimentation (en V),

— Le courant nominal (en A),

— La fréquence (en Hz),

— La vitesse synchrone et la vitesse du rotor (en tr/min),

— Le rendement du moteur,

— Le facteur de puissance ($\cos\varphi$),
— Le type de protection .

Le type de protection du moteur (par exemple, IP55 pour la protection contre la poussière et l'eau).

Ces données sont cruciales pour l'installation, le contrôle et la maintenance du moteur, et permettent également de vérifier que le moteur fonctionne dans des conditions optimales en fonction de ses spécifications techniques. [10]

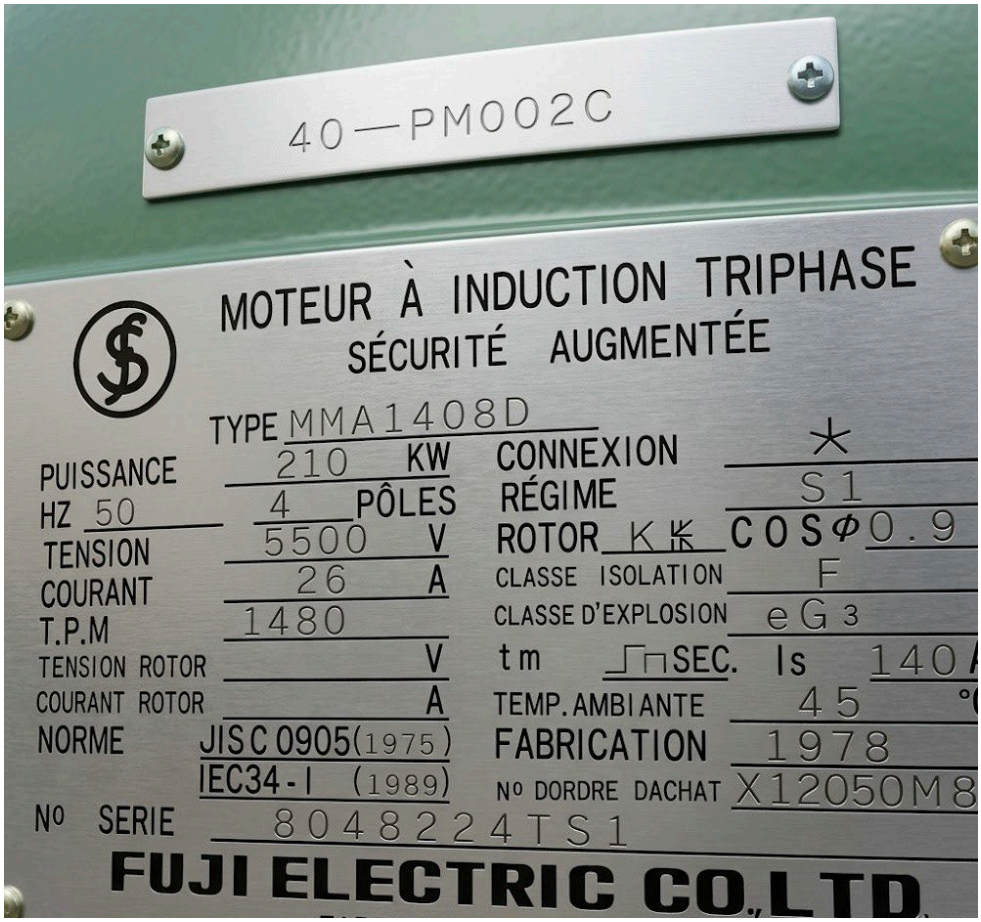

Figure 1.9 – Plaque signalétique d'un moteur asynchrone.

1.3 Mode de couplage

Le mode de couplage des enroulements du stator dans un moteur asynchrone triphasé est essentiel pour déterminer la tension d'alimentation et les caractéristiques de fonctionnement du moteur. Les deux principaux types de couplage utilisés sont le couplage étoile et le couplage triangle. Ces configurations affectent la tension, le courant, et le couple généré par le moteur.

Le choix du mode de couplage dépend de la source de tension disponible et des exigences de l'application, comme le couple au démarrage ou l'efficacité énergétique du moteur [11].

1.3.1 Couplage étoile

Le couplage étoile (ou "Y") est une méthode de connexion des enroulements du stator dans laquelle les trois enroulements sont connectés à un point commun, appelé le point neutre. Chaque enroulement du stator est relié à une phase de l'alimentation électrique, et les trois points de connexion sont reliés ensemble pour former un "Y" [11].

Avantages du couplage étoile : Réduction de la tension appliquée aux enroulements : Dans un couplage étoile, la tension appliquée à chaque enroulement est réduite par un facteur de $\sqrt{3}$ (environ 1,732), ce qui permet d'adapter la tension du moteur à celle de la source d'alimentation. Démarrage plus doux : Le moteur démarre avec une tension plus faible, réduisant ainsi le courant de démarrage et minimisant les effets de démarrage sur le réseau électrique.

$$U_{phase} = \frac{U_{ligne}}{\sqrt{3}} \tag{1.6}$$

Utilisation : Ce type de couplage est couramment utilisé dans les moteurs asynchrones alimentés par des sources de haute tension, afin de diminuer la tension appliquée aux enroulements du stator et d'optimiser les performances du moteur.

1.3.2 Couplage triangle

Le couplage triangle (ou "Δ") est une configuration dans laquelle les trois enroulements du stator sont connectés en forme de triangle, chaque enroulement étant relié à deux autres enroulements par des points de connexion. Dans ce mode, chaque enroulement est alimenté par la pleine tension de la source.

$$P_a = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\phi \tag{1.7}$$

Avantages du couplage triangle : Tension maximale sur les enroulements : Le couplage triangle permet d'appliquer la tension nominale complète à chaque enroulement, ce qui permet au moteur de délivrer un couple plus élevé à la même fréquence d'alimentation. Meilleure performance en régime stable : Une fois démarré, le moteur fonctionne avec une plus grande efficacité, générant plus de puissance et de couple par rapport au couplage étoile.

Caractéristique	Étoile (Y)	Triangle (△)
Tension par phase	$\frac{U}{\sqrt{3}}$	U
Courant de démarrage	Faible	Élevé
Couple	Faible	Élevé
Utilisation	Démarrage	Régime permanent

Tableau 1.1 – Comparaison entre les couplages étoile et triangle

Utilisation : Le couplage triangle est souvent utilisé dans les moteurs qui sont alimentés par une tension basse, ou lorsque des performances élevées sont nécessaires, notamment dans des applications industrielles où le couple est crucial.

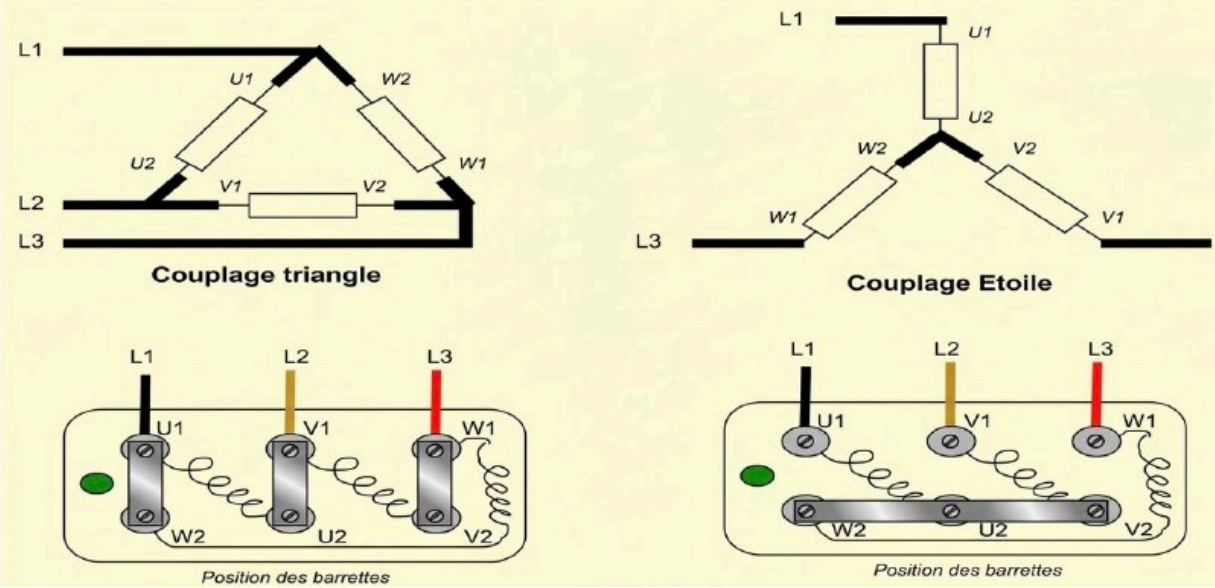

Figure 1.10 – Couplage triangle et Couplage étoile.

1.4 Le bilan de puissances

Le bilan de puissances dans un moteur asynchrone triphasé permet d'évaluer les différentes formes de puissance qui circulent à travers le moteur. Ces puissances incluent la puissance active, la puissance réactive et la puissance apparente, ainsi que les pertes dues à la résistance des enroulements, les frottements, et autres facteurs internes. [12]

Les principales puissances à considérer sont :

1.4.1 La puissance active (P)

C'est la puissance réelle qui est convertie en travail mécanique pour faire tourner le rotor. Elle est mesurée en watts (W) et est directement utilisée pour accomplir le travail utile.

1.4.2 La puissance réactive (Q)

C'est la puissance qui ne produit pas de travail utile mais qui est nécessaire pour maintenir les champs magnétiques dans le moteur. Elle est mesurée en volt-ampères réactifs (VAR).

1.4.3 La puissance apparente (S)

C'est la somme vectorielle de la puissance active et de la puissance réactive. Elle est mesurée en volt-ampères (VA).

Calcul du bilan de puissances : Le bilan énergétique du moteur peut être exprimé comme suit :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{1.8}$$

où :

—S est la puissance apparente,

—P est la puissance active,

—Q est la puissance réactive.

En outre, il faut tenir compte des pertes dans le moteur, qui incluent les pertes par effet Joule dans les enroulements, les pertes mécaniques dues aux frottements, et les pertes magnétiques. Ces pertes diminuent l'efficacité globale du moteur, d'où l'importance du rendement.

Ce bilan permet ainsi de comprendre l'efficacité du moteur et d'optimiser son fonctionnement en ajustant les paramètres de conception ou d'opération pour minimiser les pertes et maximiser la puissance utile. [12]

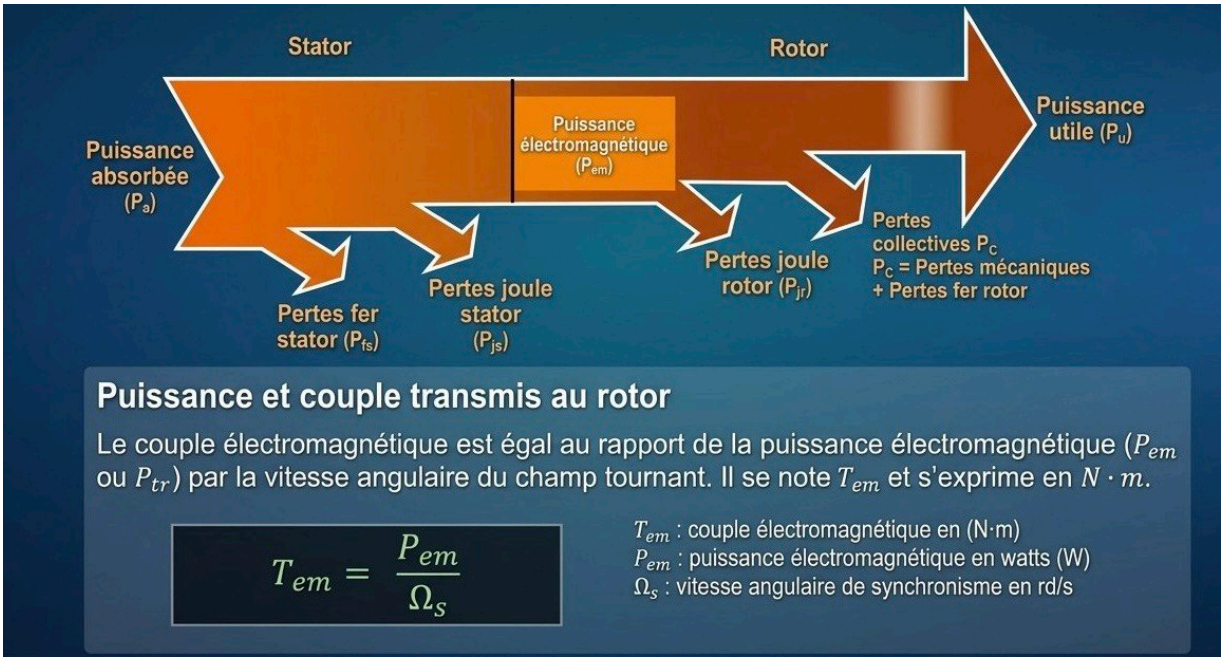

Figure 1.11 – Le schéma représentant le bilan des puissances dans un moteur asynchrone

1.4.4 Le rendement d'un moteur asynchrone triphasé :

Le rendement d'un moteur asynchrone triphasé est un indicateur clé de son efficacité énergétique. Il représente le rapport entre la puissance utile délivrée par le moteur (la puissance mécanique produite) et la puissance absorbée par le moteur (la puissance électrique consommée). Le rendement est exprimé en pourcentage et est calculé comme suit [12] :

$$Rendement(\eta) = \frac{P_{utile}}{P_{absorbe}} \times 100 \tag{1.9}$$

où :

— η : rendement (%),

— P_{utile} : puissance mécanique délivrée,

— P_{abs} : puissance électrique consommée.

P utile est la puissance mécanique produite par le moteur, c'est-à-dire la puissance qui est réellement convertie en travail.

P absorbe est la puissance électrique consommée par le moteur depuis le réseau d'alimentation.

1.4.5 Facteurs influençant le rendement

Le rendement d'un moteur asynchrone triphasé est influencé par plusieurs facteurs liés aux pertes internes et à la qualité de conception du moteur.

- **Pertes dans les enroulements :** Les pertes ohmiques dues à la résistance des enroulements du stator et du rotor réduisent le rendement global.
- **Pertes magnétiques :** Les pertes dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le noyau magnétique du moteur contribuent également aux pertes énergétiques.
- **Pertes mécaniques :** Les frottements dans les roulements et autres composants mobiles génèrent des pertes mécaniques qui affectent le rendement.
- **Qualité de la conception et des matériaux :** Les frottements dans les roulements et autres composants mobiles génèrent des pertes mécaniques qui affectent le rendement.

1.4.6 Importance du rendement

Un rendement élevé est essentiel pour minimiser la consommation d'énergie et réduire les coûts d'exploitation. Un moteur avec un faible rendement peut entraîner des pertes d'énergie importantes, ce qui peut être coûteux, surtout dans les applications industrielles où le moteur fonctionne sur de longues périodes. Ainsi, le rendement doit être optimisé lors de la conception du moteur et peut être amélioré par des pratiques de maintenance régulières, telles que la lubrification correcte des composants et le remplacement des pièces usées.

1.5 Couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est la force qui fait tourner le rotor d'un moteur asynchrone triphasé. Ce couple est généré par l'interaction entre le champ magnétique tournant du stator et le courant induit dans les enroulements du rotor. Cette interaction crée une force qui tend à faire tourner le rotor, ce qui entraîne le moteur [13]. Le couple électromagnétique (T) peut être exprimé mathématiquement par la formule suivante :

$$T = \frac{P_{utile}}{\omega} \tag{1.10}$$

Où :

T est le couple électromagnétique,

P utile est la puissance mécanique produite par le moteur,

ω est la vitesse angulaire du rotor.

1.5.1 Expression du couple en fonction du glissement

Le couple électromagnétique peut également être exprimé en fonction du glissement (S) et des paramètres du moteur :

$$T = k \cdot (1 - S)S \tag{1.11}$$

Où k est une constante qui dépend des caractéristiques du moteur.

1.5.2 Importance du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est un paramètre crucial pour déterminer la capacité du moteur à accomplir des travaux mécaniques. Il joue un rôle clé dans les applications nécessitant des démarrages puissants ou des charges lourdes, comme dans les ascenseurs, les convoyeurs et les compresseurs. Un moteur avec un couple élevé est nécessaire dans des environnements industriels où des charges importantes doivent être déplacées à partir du démarrage.

1.5.3 Relation du couple avec le glissement

Le couple généré dans un moteur asynchrone dépend du glissement S. À l'instant du démarrage, le glissement est maximal, ce qui génère un couple élevé. À mesure que le moteur atteint sa vitesse synchrone, le glissement diminue et le couple devient plus faible. Le couple maximum est atteint lorsque le glissement est faible, mais non nul, ce qui est essentiel pour le fonctionnement du moteur.

1.6 Couple électromagnétique

La puissance électromagnétique du moteur asynchrone triphasé est donnée par :

$$P_{em} = 3.E_2.I_2.\cos\varphi_2 \tag{1.12}$$

Avec :

— E_2 : tension rotorique

— I_2 : courant rotorique

— φ_2 : déphasage entre E_2 et I_2

La vitesse de glissement est :

$$n_r = n_s - n = g.n_s \tag{1.13}$$

Le couple électromagnétique est alors :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{n_r} = \frac{3.E_2.I_2.\cos\varphi_2}{g.n_s} \tag{1.14}$$

On a :

$$E_2 = 3.g.m.E_1 \tag{1.15}$$

Donc :

$$C_{em} = \frac{3.g.m.E_1.I_2.\cos\varphi_2}{g.n_s} \tag{1.16}$$

En négligeant les chutes de tension primaires :

$$E_2 = g.m.V_1 \tag{1.17}$$

Ainsi :

$$C_{em} = \frac{3.g.m.V_1.I_2.\cos\varphi_2}{g.n_s} \tag{1.18}$$

Or :

$$Z_2 = \sqrt{r_2^2 + (g.L_2.\omega)^2} \tag{1.19}$$

Donc :

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{g.m.V_1}{Z_2} \tag{1.20}$$

Et :

$$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{Z_2} \tag{1.21}$$

En remplaçant dans l'expression du couple :

$$C_{em} = \frac{3(g.m.V_1)^2}{g.n_s} \cdot \frac{r_2}{Z_2^2} \tag{1.22}$$

Avec :

$$Z_2^2 = r_2^2 + (g.L_2.\omega)^2 \tag{1.23}$$

Donc :

$$C_{em} = \frac{3(g.m.V_1)^2}{n_s} \cdot \frac{r_2}{r_2^2 + (g.L_2.\omega)^2} \tag{1.24}$$

1.6.1 Analyse du couple

1. Pour les faibles glissements ($g \ll 1$) :

$$(gL_2\omega)^2 \ll r_2^2 \tag{1.25}$$

Donc :

$$C_{em} \approx \frac{3g(m.V_1)^2}{n_s.r_2} \tag{1.26}$$

Le couple est proportionnel au glissement :

$$C_{em} \propto g \tag{1.27}$$

Pour les forts les glissementsr_2^2 devient négligeable devant $(L_2\omega)^2$ alors :
Donc :

$$C_{em} \approx \frac{3(m.V_1)^2}{n_s} \cdot \frac{1}{g(L_2.\omega)^2} \tag{1.28}$$

Le couple est inversement proportionnel au glissement :

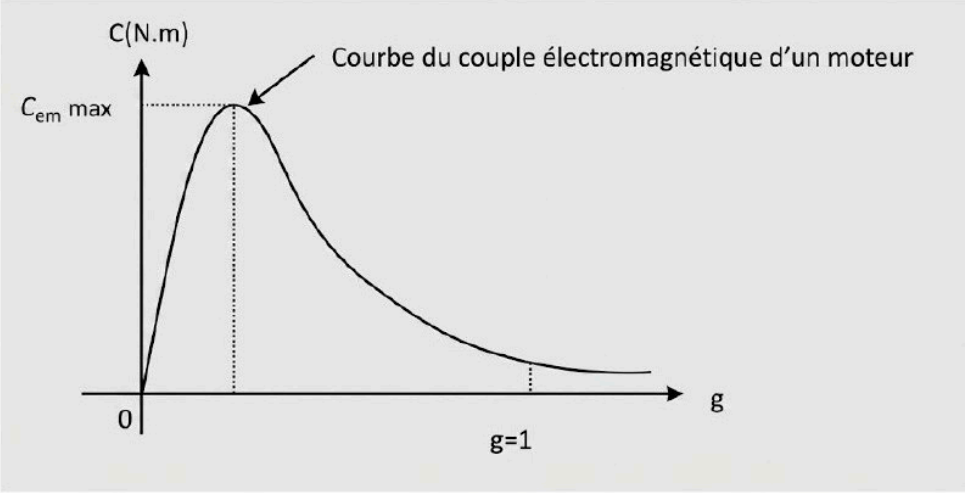

Figure 1.12 – Le couple électromagnétique d'un moteur asynchrone triphasé en fonction du glissement

Résultats et discussion

À travers ce premier chapitre, nous avons établi les bases théoriques essentielles à la compréhension du comportement électromécanique du moteur asynchrone triphasé. L'analyse du schéma équivalent, du bilan de puissances et de la caractéristique couple-glissement a mis en évidence la sensibilité de cette machine aux variations de charge et aux perturbations du réseau

d'alimentation. Ces éléments ne constituent pas une fin en soi : ils forment le socle sur lequel s'appuiera l'analyse des défauts électriques et le dimensionnement des protections. En effet, un système de protection ne peut être correctement paramétré que si le comportement nominal de la machine est parfaitement maîtrisé. C'est précisément l'objet du chapitre suivant, qui s'attachera à identifier et caractériser les principaux défauts susceptibles d'affecter le moteur en service industriel.

CHAPITRE II

Défauts et dispositifs de protection électrique

Introduction

Les moteurs asynchrones triphasés sont aujourd'hui les machines électriques les plus utilisées dans le domaine industriel. Leur robustesse, leur faible coût d'entretien et leur simplicité de construction en font le choix privilégié pour l'entraînement des charges mécaniques [14]. Cependant, malgré leurs qualités indéniables, ces machines ne sont pas à l'abri de défaillances. Les contraintes auxquelles elles sont soumises en service — courts-circuits, manques de phase, surcharges répétées, échauffements excessifs ou encore dégradation progressive de l'isolation — peuvent conduire à des arrêts de production coûteux, voire à des destructions irréparables [15].Dans un environnement industriel exigeant comme celui de Sonatrach, où la continuité de service est une priorité absolue, il est indispensable de connaître ces défauts, de les anticiper et de mettre en place les dispositifs de protection appropriés. Dans la pratique, même un moteur bien dimensionné et correctement entretenu peut tomber en panne, car les conditions réelles d'exploitation sont souvent éloignées des conditions idéales supposées lors de la conception [16].

Les travaux de l'IEEE Motor Reliability Working Group [17] ont permis d'établir, à partir d'une large enquête menée dans des installations industrielles, que le taux de défaillance annuel des moteurs asynchrones se situe entre 0,5 et 4%.

L'analyse des causes révèle la répartition suivante :

— Surcharges : 30%
— Dommages à l'isolation : 20%
— Défaillances de phase : 14%
— Dommages aux paliers : 13%
— Vieillissement : 10%
— Dommages aux rotors : 5%
— Divers : 8%

2.1 Les défaillances

2.1.1 Les courts-circuits

Parmi les défauts électriques susceptibles d'affecter un moteur asynchrone, le court-circuit est sans doute le plus violent et le plus immédiatement destructeur. Il résulte d'une connexion accidentelle entre deux conducteurs portés à des potentiels différents, que ce soit entre deux phases, entre une phase et le neutre, ou entre une phase et la masse [13]. On distingue trois formes principales de courts-circuits [18] :

— **Court-circuit triphasé symétrique :** il engage simultanément les trois phases et consti-

tue le cas le plus sévère du point de vue de l'amplitude du courant de défaut.

— **Court-circuit biphasé :** il met en contact deux phases entre elles, avec ou sans implication de la terre.

— **Court-circuit monophasé-terre :** c'est le type de défaut le plus fréquemment rencontré dans les réseaux industriels, représentant environ 80% des cas recensés.

Dans tous les cas, le court-circuit provoque une élévation brutale et très rapide du courant, pouvant atteindre en quelques millisecondes des valeurs de plusieurs centaines de fois le courant nominal [19]. Les conséquences se manifestent sous deux formes [20]

Effets électrodynamiques :

— Déformation ou rupture mécanique des jeux de barres ;

— Répulsion violente des contacts ;

— Amorçage et propagation d'arcs électriques.

Effets thermiques :

— Fusion des enroulements, des contacts et des connexions ;

— Calcination irréversible des matériaux isolants.

2.1.2 L'échauffement

L'échauffement anormal est l'une des menaces les plus insidieuses pour un moteur asynchrone, car il s'installe progressivement et ses effets ne deviennent visibles qu'une fois les dégâts déjà bien avancés [14]. Il est engendré par trois familles de pertes internes : **Pertes Joule :** nées de la circulation du courant dans les résistances des enroulements statoriques et rotoriques, elles s'expriment par la relation classique :

$$P_J = R \cdot I^2 \quad \text{(W)} \tag{2.29}$$

Leur croissance proportionnelle au carré du courant explique pourquoi une légère surcharge prolongée peut engendrer un échauffement considérable [15].

Pertes fer : elles regroupent les pertes par hystérésis et par courants de Foucault qui se développent dans le circuit magnétique lors des variations cycliques du flux [14].

Pertes mécaniques : liées aux frottements dans les paliers et à la résistance du ventilateur, elles contribuent de façon moindre mais non négligeable à l'élévation de température [15]. La norme IEC 60034-1 [21] rappelle à ce titre la règle de Montsinger : une élévation de 10 °C au-delà de la température nominale de l'isolant réduit sa durée de vie de moitié. Un moteur soumis à un échauffement chronique, même modéré, verra donc sa durée de vie considérablement réduite [16].

2.1.3 Les surcharges

La surcharge est le défaut le plus fréquent dans les moteurs asynchrones industriels [17]. Elle survient chaque fois que le courant absorbé dépasse durablement le courant nominal, généralement à cause d'une charge mécanique excessive ou d'un déséquilibre d'alimentation. L'échauffement qui en résulte attaque progressivement les isolants et réduit l'espérance de vie du moteur [16].

Courants de démarrage : lors d'un démarrage direct, le moteur asynchrone absorbe un courant transitoire qui peut atteindre 5 à 8 fois le courant nominal [15]. Ce pic, bien que bref, doit être intégré dans le dimensionnement des protections pour éviter tout déclenchement injustifié.

Marche en manque de phase : lorsqu'une phase d'alimentation vient à manquer, le courant dans les deux phases restantes s'emballe et peut atteindre $3\sqrt{3}$ fois le courant nominal.

Le moteur chauffe rapidement, vibre anormalement et risque la destruction des enroulements statoriques en l'absence d'une protection adaptée [22]. Comme le souligne [23], ce défaut est l'une des causes les plus fréquentes de grillage des bobinages dans les installations industrielles.

2.2 Protection

2.2.1 Les dispositifs de protection contre le court-circuit

Pour Assurer la protection d'un moteur asynchrone, c'est avant tout trouver le bon équilibre entre sensibilité et sélectivité : le dispositif ne doit pas déclencher intempestivement lors des phases normales de fonctionnement — notamment au démarrage — mais doit intervenir avec suffisamment de rapidité dès qu'un défaut réel se déclare, pour limiter l'étendue des dégâts [19]. Trois conditions fondamentales doivent être réunies pour garantir un fonctionnement fiable [20] : un choix judicieux du moteur par rapport à l'application, une installation et une maintenance sérieuses, et enfin une protection adaptée à l'ensemble des défauts prévisibles.

2.2.2 Les coupe-circuits fusibles

Définition : le fusible est l'organe de protection le plus ancien et le plus simple qui soit. Son principe repose sur la fusion d'un élément calibré traversé par un courant excessif, provoquant ainsi l'ouverture du circuit avant que le défaut ne cause des dommages irréparables [24].Ils sont symbolisés de la façon suivante :

Classes de fusibles : selon la norme IEC 60269 [24] et les recommandations du guide Schneider Electric [20], trois classes sont couramment utilisées en protection des moteurs :

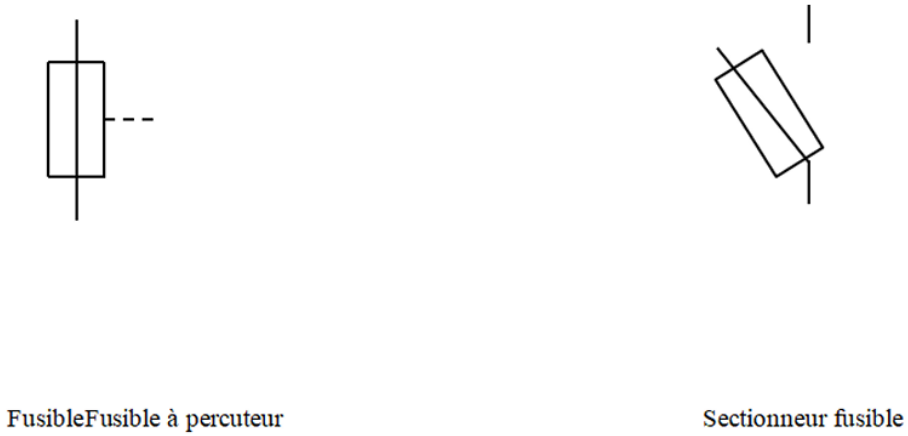

Figure 2.13 – symbole des fusibles

— **Classe gG (usage général) :** fusible à action totale, il protège aussi bien contre les surcharges que contre les courts-circuits dans les circuits de distribution.
— **Classe gM (usage général moteur) :** sa temporisation lui permet d'absorber les pics de démarrage tout en assurant la protection contre les surcharges.
— **Classe aM (accompagnement moteur) :** spécialement conçu pour la protection contre les courts-circuits dans les circuits moteurs. Il tolère sans fondre les pointes de courant au démarrage, mais ne prend pas en charge la protection contre les surcharges, qui doit être confiée à un relais thermique distinct [20].

2.2.3 Caractéristiques techniques d'un fusible

Pour dimensionner correctement une protection par fusible, il faut définir les grandeurs suivantes :

Caractéristique	Définition
Tension nominale	Valeur de tension pour laquelle le fusible a été conçu (ex : 250V, 400V, 500V, 660V).
Courant nominal (I_n)	Représente le calibre du fusible ou de la cartouche de remplacement.
Courant de non fusion (I_{nf})	Valeur maximale du courant que le fusible peut supporter pendant un temps conventionnel sans fondre.
Courant de fusion (I_f)	Valeur du courant qui provoque la fusion du fusible avant la fin du temps conventionnel.
Pouvoir de coupure	La plus grande valeur du courant de court-circuit que le fusible peut interrompre en toute sécurité sous sa tension nominale.
Durée de coupure	Temps s'écoulant entre le début du défaut et l'extinction totale de l'arc électrique.

Tableau 2.2 – Principales caractéristiques nominales d'un fusible

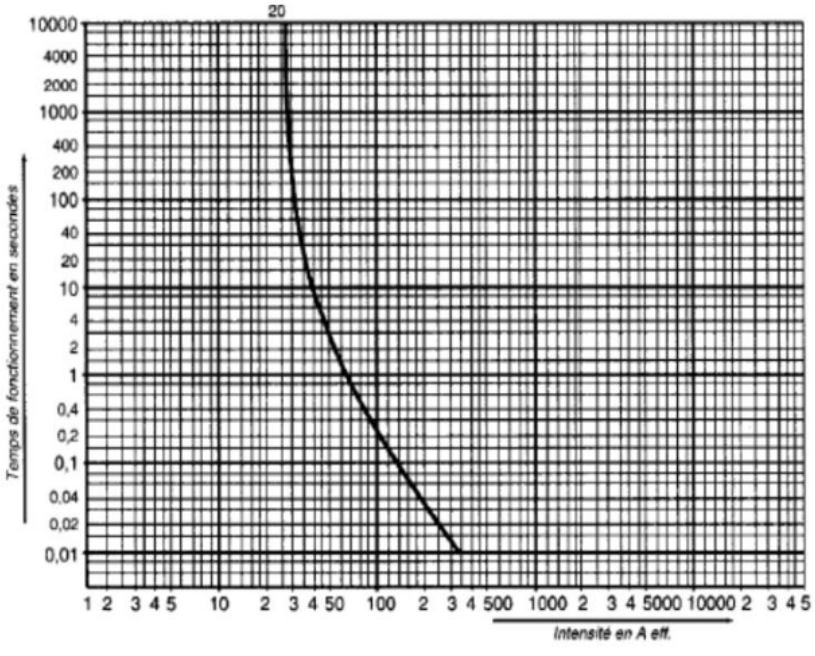

Figure 2.14 – Courbe de déclenchement d'un fusible.

— **Pouvoir de limitation :** il est inferieur au courant de court-circuit présumé, ce qui permet au fusible de couper ce courant par sa fusion lorsque ce courant atteint cette limite donc avant d'atteindre sa valeur maximale.

.

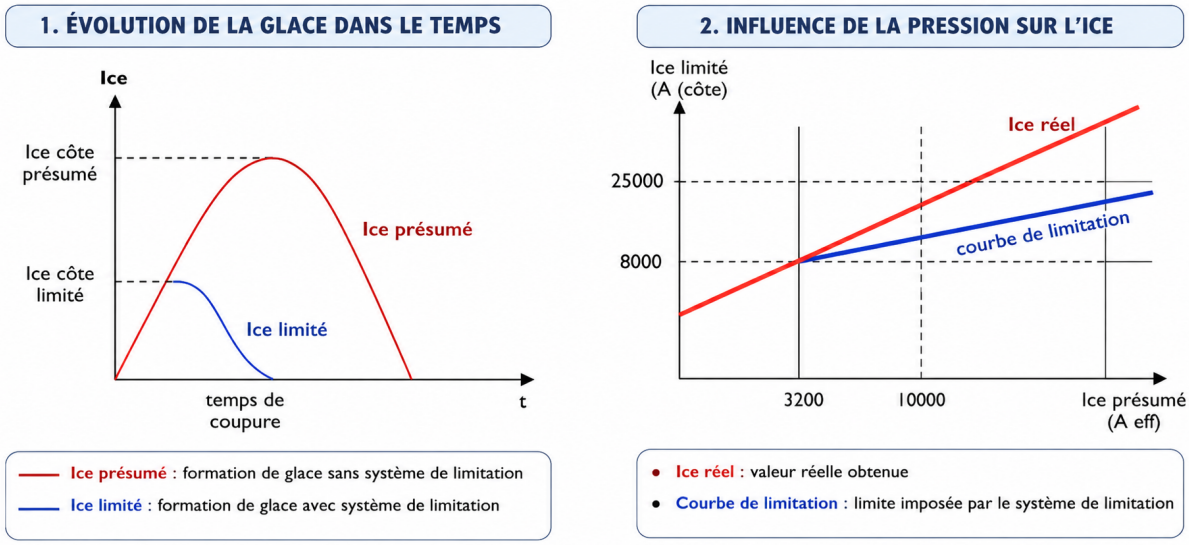

Figure 2.15 – Courbe du pouvoir de limitation.

— **Choix des fusibles :** Le calibre des fusibles est déterminé en fonction de : L'intensité nominale In ;

le rapport Id / In (Id = courant de démarrage).

durée de démarrage est déterminée à l'aide de l'abaque de la figure si dessous. Pour plus de précisions sur le choix du fusible, on peut se reporter au Cahier Technique n° 107. Il fait rappeler que les fusibles protègent le moteur contre les surintensités supérieures à environ cinq fois le courant nominal du moteur, et qu'ils doivent être associés à des protections complémentaires (relais thermiques...)

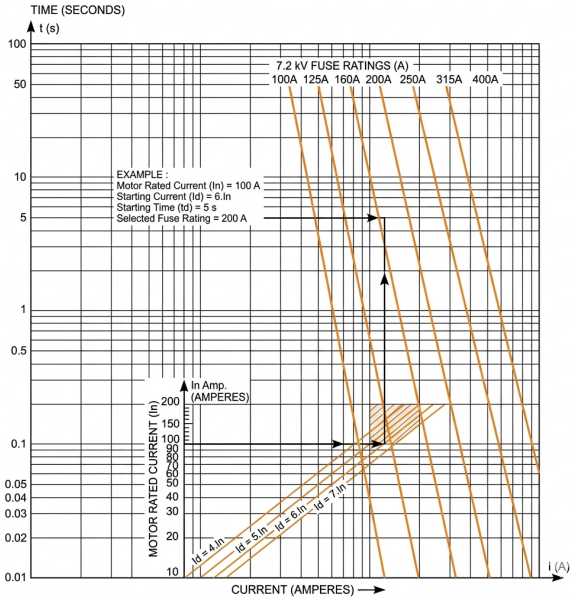

Figure 2.16 – Abaque de détermination de fusibles.

Le tableau ci-dessous présente le temps de fusion d'un fusible en fonction du courant de non-fusion, du courant de fusion et du calibre.

.

Calibre	Intensité de non-fusion (Inf)	Intensité de fusion (If)	Temps de fusion (t)
4 A	1.5 I_n	2.1 I_n	1 h
5 à 10 A	1.5 I_n	1.9 I_n	1 h
11 à 25 A	1.4 I_n	1.75 I_n	1 h
26 à 63 A	1.3 I_n	1.6 I_n	1 h
64 à 100 A	1.3 I_n	1.6 I_n	2 h
101 à 160 A	1.2 I_n	1.6 I_n	2 h
161 à 400 A	1.2 I_n	1.6 I_n	3 h

Tableau 2.3 – Caractéristiques des fusibles

Le tableau qui présente le temps de fusion d'un fusible en fonction du courant de non- fusion, du courant de fusion et du calibre.

2.2.4 Les disjoncteurs magnétiques

Les disjoncteurs magnétiques constituent l'un des organes de protection les plus efficaces contre les courts-circuits dans les installations industrielles. Contrairement aux fusibles qui sont des éléments à usage unique, le disjoncteur présente l'avantage de pouvoir être réarmé après déclenchement, ce qui réduit considérablement les temps d'arrêt en cas d'incident [20]. Leur

principe de fonctionnement repose sur des déclencheurs magnétiques un par phase qui réagissent instantanément à toute surintensité anormale. Dès qu'un défaut est détecté sur l'une des phases, le mécanisme commande l'ouverture simultanée de tous les pôles, assurant ainsi une coupure omnipolaire qui isole complètement le moteur du réseau [19]. Pour des courants de court-circuit de faible amplitude, les disjoncteurs magnétiques réagissent plus rapidement que les fusibles, ce qui en fait le dispositif de choix dans les installations où la sélectivité et la rapidité d'intervention sont prioritaires [18]. L'interruption efficace d'un courant de court-circuit repose sur trois impératifs fondamentaux, tels que définis par la norme IEC 60947-2 [25] :

1. **Détecter très tôt :** le courant de défaut, dès son amorçage ;
2. **Séparer très vite :** les contacts, avant que le courant n'atteigne sa valeur de crête ;
3. **Interrompre définitivement :** le courant de court-circuit en éteignant l'arc électrique.

La plupart des disjoncteurs destinés à la protection des moteurs sont des limiteurs de courant. Leur durée de coupure particulièrement brève leur permet d'interrompre le courant de défaut avant qu'il n'atteigne son amplitude maximale, limitant ainsi les effets thermiques et électrodynamiques sur les câbles et l'appareillage en aval [20]. Cette caractéristique contribue directement à la coordination des protections au sein de l'installation [23]. Pour interrompre efficacement un courant de court-circuit, trois impératifs doivent être respectés [19] :

— Détecter très tôt le courant de défaut, dès les premiers instants de son amorçage ;
— Séparer très rapidement les contacts, avant que le courant n'atteigne sa valeur de crête ;
— Interrompre définitivement le courant de court-circuit en assurant l'extinction complète de l'arc électrique [25].

La plupart des disjoncteurs magnétiques destinés à la protection des moteurs sont des limiteurs de courant, et contribuent ainsi à la coordination des protections au sein de l'installation [23]. Leur durée de coupure particulièrement brève leur permet d'interrompre le courant de court-circuit avant qu'il n'atteigne son amplitude maximale. Par conséquent, les effets thermiques et électrodynamiques sont considérablement limités, assurant une meilleure protection des câbles et de l'appareillage en aval [20].

2.3 Les disjoncteurs moteurs (Disjoncteurs magnétothermiques)

Le **disjoncteur moteur** est un appareil magnétothermique conçu pour assurer simultanément la protection contre les courts-circuits et contre les surcharges par une ouverture rapide du circuit en défaut. Il combine les fonctions d'un disjoncteur magnétique et d'un relais de surcharge.

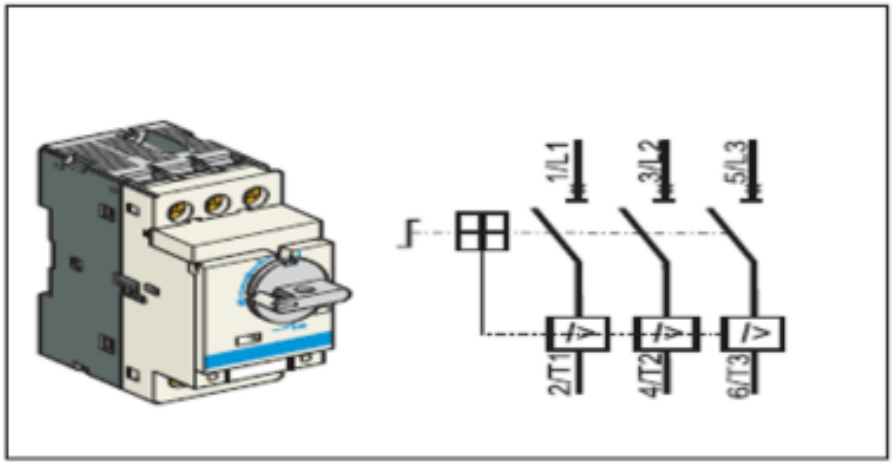

Figure 2.17 – Disjoncteur magnétique et son symbole

2.3.1 Caractéristiques principales

— **Protection magnétique :** Elle agit contre les courts-circuits avec un seuil de déclenchement non réglable, généralement fixé à environ $10 \times I_{rglage_max}$ des déclencheurs thermiques.

— **Protection thermique :** Elle protège contre les surcharges. Ces éléments sont compensés contre les variations de la température ambiante.

— **Réglage :** Le seuil de protection thermique est réglable et sa valeur doit impérativement correspondre au **courant nominal (**I_n**)** du moteur à protéger.

— **Coordination :** La coordination de type II entre les éléments thermiques et la protection contre les courts-circuits est assurée par construction.

— **Sectionnement :** En position d'ouverture, la majorité de ces appareils garantissent une distance d'isolement suffisante entre les contacts pour assurer la fonction de sectionnement.

Constitution interne d'un disjoncteur magnétothermique :

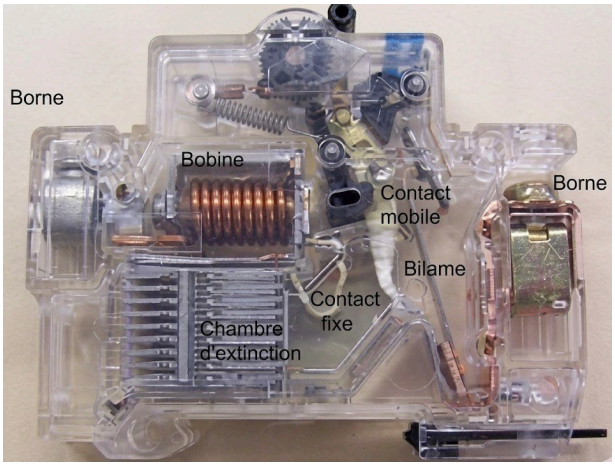

Figure 2.18 – Constitution interne d'un disjoncteur

2.4 Principe de fonctionnement du disjoncteur moteur

Le disjoncteur moteur assure la protection et la commande des installations selon deux principes complémentaires :

Principe Thermique (protection contre les surcharges) : Ce dispositif protège les enroulements du moteur contre les surcharges mécaniques.

Fonctionnement : Une augmentation de la charge sur l'arbre du moteur implique une augmentation de l'intensité du courant, provoquant ainsi une élévation de la température de la **lame bimétallique**.

Cette dernière se déforme et déclenche l'ouverture du circuit.

Principe Magnétique (protection contre les courts-circuits) : Ce dispositif réagit instantanément en cas de forte surintensité.

Il offre également la possibilité de fermer ou d'ouvrir le circuit au moyen d'une **commande manuelle** (ou automatique) autant de fois que désiré pour la maintenance ou le pilotage du moteur.

Un disjoncteur moteur est caractérisé par sa courbe de déclenchement, qui représente les temps de déclenchement du disjoncteur en fonction du courant (multiple d'Ir).

2.5 Description de la courbe de déclenchement

Cette courbe de fonctionnement comporte quatre zones distinctes :

— **La zone de fonctionnement normal :** Tant que $I < I_r$, il n'y a pas de déclenchement du dispositif.

— **La zone des surcharges thermiques :** Le déclenchement est assuré par le *« thermique »*. Plus la surcharge est importante, plus le temps de déclenchement est court. Ce mode de déclenchement est appelé **« à temps inverse »**.

— **La zone des courants forts :** Surveillée par le *« magnétique instantané »* (ou court-circuit) dont le fonctionnement est immédiat (inférieur à 5 ms).

— **La zone intermédiaire (sur disjoncteurs électroniques) :** Surveillée par un *« magnétique temporisé »* dont le fonctionnement est retardé (de 0 à 300 ms). Ce mode est appelé **« à retard indépendant »**. Il permet d'éviter les déclenchements intempestifs lors des pointes de courants magnétisants au démarrage des moteurs.

Limite de réglage :

I_r : Courant de réglage de la protection contre les surcharges. Il doit correspondre à la valeur du courant nominal (I_n) du moteur à protéger.

Im : courant de déclenchement de la protection magnétique temporisée ; Iinst : courant de déclenchement de la protection magnétique instantanée. Il peut varier de 3 à 17 fois Ir mais est en général proche de 10 Ir ; Ics : pouvoir assigné de coupure de service en court-circuit ; Icu : pouvoir de coupure ultime (maximum) en court-circuit.

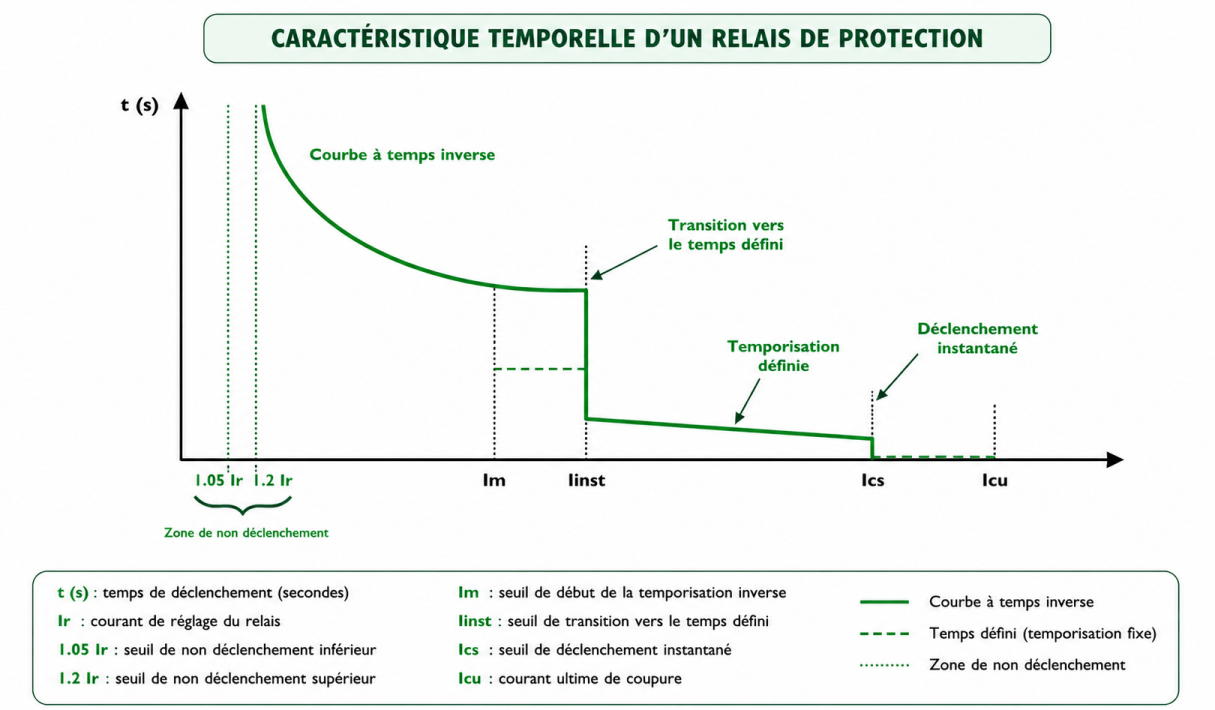

Figure 2.19 – Courbes de déclenchements d'un disjoncteur

Les caractéristiques des disjoncteurs :

Tension nominale : C'est la tension maximale d'utilisation en courant continu ou alternatif.

C'est également la tension à laquelle se rapporte le pouvoir de coupure et de fermeture du disjoncteur. Un disjoncteur peut avoir plusieurs tensions nominales, chacune d'elle correspondant à un pouvoir de coupure différent.

Courant nominal : C'est le courant que le disjoncteur est capable de supporter dans des conditions d'essais spécifiés en service ininterrompu tout en respectant les limites d'échauffement (température ambiante=30°C) Le courant nominal est déterminé en fonction de l'intensité du courant admissible passant dans la section du conducteur à protéger.

Pouvoir de coupure : c'est la plus grande valeur du courant présumé de courtcircuit, qu'un disjoncteur peut interrompre sous une tension donnée et dans certaines conditions. Il s'exprime Ka .

Pouvoir de fermeture : C'est la plus grande valeur du courant, qu'un disjoncteur peut établir sous sa tension nominale dans des conditions spécifiées. En alternatif, il s'exprime par la valeur de crête du courant, elle est égale à k fois le pouvoir de coupure selon le tableau ci- dessous :

cos(α) :Le facteur de puissance

Auto-protection :C'est l'aptitude d'un appareil à limiter le courant de court- circuit à une valeur inferieure à son pouvoir de coupure grâce à son impédance interne

Pouvoir de coupure (PdC)	cos φ	**Pouvoir de fermeture (PdF)**
$4,5\text{kA} < \text{PdC} \leq 6$ kA	0,7	1,5 PdC
$6\text{kA} < \text{PdC} \leq 10$ kA	0,5	1,7 PdC
$10\text{kA} < \text{PdC} \leq 20\text{kA}$	0,3	2 PdC
$20\text{kA} < \text{PdC} \leq 50\text{kA}$	0,25	2,1 PdC
$50\text{kA} < \text{PdC}$	0,2	2,2 PdC

Tableau 2.4 – Pouvoir de coupure et de fermeture

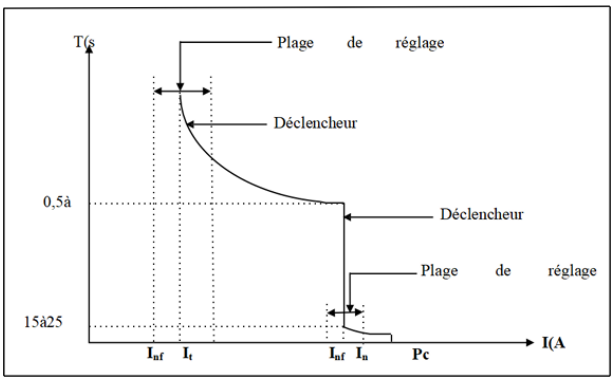

Figure 2.20 – Courbe de fonction d'un disjoncteur

In : Courant de fonctionnement ;

Inf : Courant de non-fusion

; If : Courant de fusion.

Pc : Pouvoir de coupure ;

It : Courant de réglage .

Pouvoir de limitation : Un disjoncteur est dit limiteur, lorsque le courant réellement interrompu ou coupé en cas de défaut est inférieur au courant présumé de court – circuit

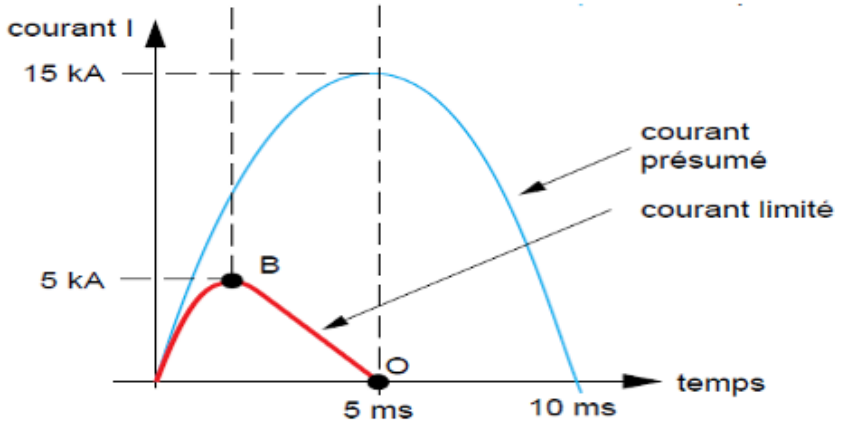

Figure 2.21 – Courbe des circuits

Remarque : Pour des courants de court- circuit élevés, le fonctionnement des disjoncteurs est plus rapide que celui des fusibles.

Choix des disjoncteurs :

Le choix d'un disjoncteur s'effectue en fonction :

De la norme d'installation : ex NF C 15-100,

(Installation domestique - type de récepteur - intensité d'emploi - courbes de fonctionnement) des normes produites,

Des caractéristiques du réseau (tension, fréquence),

De l'environnement (type de local, température, section et nature des câbles en aval),

Des impératifs d'exploitation (sélectivité, auxiliaires de commande,...).

Pouvoir de coupure

C'est l'intensité maximale du courant de court-circuit que peut couper le dispositif de protection sans se détériorer et sans mettre en danger l'entourage, dans les conditions de tension, de cos φ et de court-circuit déterminé par les normes.

Le pouvoir de coupure doit être au moins égal au courant de court-circuit présumé au point D'installation du disjoncteur (Pdc > Icc max). **Courbes de fonctionnement**

Les normes "produits" disjoncteur imposent au moins l'existence des courbes B, C et D (Figure 8).

On choisira la courbe de fonctionnement du disjoncteur en fonction du type de récepteurs (résistifs, inductifs) et de la ligne à protéger :

— La courbe B : le disjoncteur a un déclenchement magnétique relativement bas (entre 3 et 5xIn) et permet d'éliminer les courts-circuits de très faible valeur. Cette courbe est également utilisée pour les circuits ayant des longueurs de câbles importantes.

— La courbe C : ce disjoncteur couvre une très grande majorité des besoins (récepteurs inductifs) et s'utilise notamment dans les installations domestiques. Son déclenchement magnétique se situe entre 5 et 10xIn.

— La courbe D : cette courbe est utilisée pour la protection des circuits où il existe de très fortes pointes de courant à la mise sous tension (ex : moteurs). Le déclenchement magnétique de ce disjoncteur se situe entre 10 et 20In. Ces trois courbes sont représentées sur la figure (10).

2.5.1 Les dispositifs de protection contre les surcharges

Les surcharges n'impliquent pas nécessairement un arrêt du moteur mais il est important de revenir rapidement au fonctionnement normal. Il est donc important de protéger le moteur contre ce phénomène par des dispositifs spécial qu'on appelle relais. Les relais thermiques de surcharge à bilames

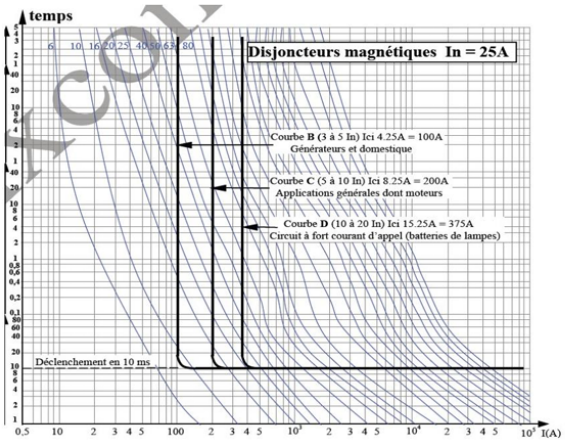

Figure 2.22 – Courbes de fonctionnement d'un disjoncteur

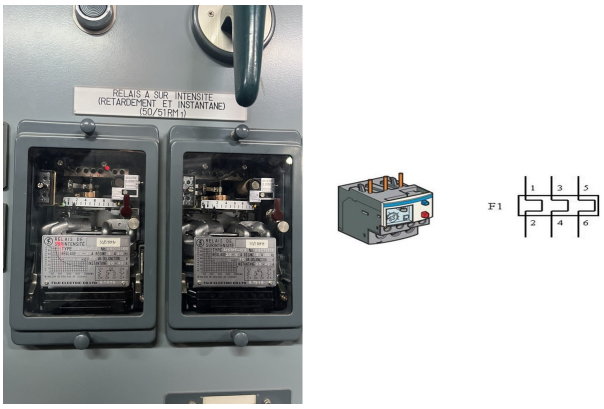

Figure 2.23 – Relais à surintensité à retardement et instantané (50/51RM1) Fuji Electric

Ils assurent, par association avec un contacteur, la protection du moteur, de la ligne et de l'appareillage contre les surcharges faibles et prolongées.

Ils sont donc conçus pour autoriser le démarrage normal des moteurs sans déclenchement. Cependant, ils doivent être protégés contre les fortes surintensités par un disjoncteur, ou par des fusibles (voir protection contre les courts-circuits). Les relais thermiques à bilames sont généralement :

-tripolaires

-Compensés

-sensibles à une perte de phases.

Les relais thermiques tripolaires : Ils comportent trois bilames dont le coefficient de dilatation est très différent. Un enroulement échauffant est bobiné autour de chaque bilame, ces enroulements s'échauffent sous l'effet du courant absorbé par le moteur, ce qui provoque une déformation des bilames. En se déformant les bilames commandent le

déclenchement du dispositif.

Les relais compensés : Les effets thermiques du courant absorbé par le moteur provoquent la déformation des bilames, pour annuler l'influence de la température ambiante sur ces dernières, un relais de compensation est monté en opposition avec eux. Ces bilames sont influencés uniquement par les variations de température de l'air ambiant. La déformation des bilames principaux est compensée par celle des bilames de compensation.

Les relais sensible à une perte de phases : Ils comportent deux réglettes dont le mouvement est solidaire à celui des bilames.

Le bilame correspondant à la phase non alimentée ne se déforme pas et bloque l'une des deux

réglettes, ce qui provoque le déclenchement.

Les relais à sonde à thermistances PTC : Ce système contrôle la température réelle de l'élément à protéger, il est constitué : D'une ou plusieurs sondes à thermistance à coefficient de température positif (PTC).

Ce sont des composants statiques dont la résistance augmente brutalement, quand la température atteint un seuil appelé température nominale de fonctionnement TNF.

D'un dispositif électronique qui mesure en permanence les résistances des sondes qui lui sont associées.

Des circuits à seuil qui commandent les changements d'état des contacts de sortie Les relais à maximum de courant :

Ils sont destinés à la protection du moteur contre les surcharges importantes et ils comportent : Un circuit magnétique d'une partie fixe, d'une armature et d'une bobine.

Un mécanisme de déclenchement actionné par l'armature mobile qui est branché en série dans l'une des phases du récepteur.

Les relais temporisateurs thermiques :

Ils ont pour but de :

-contrôler le courant qui passe par l'intermédiaire d'un contact auxiliaire

-temporiser l'action du relais15

2.6 La sélectivité

Définition

La sélectivité des dispositifs de protection est le choix du réglage de telle sorte à ce que L'appareil dont se produit le défaut réagit seul, les autres appareils rentent en fonction.

Il y a sélectivité des protections si un défaut, survenant en un point quelconque du réseau, est éliminé par l'appareil de protection placé immédiatement en amont du défaut et lui seul (sur la figure (10) c'est le disjoncteur B).

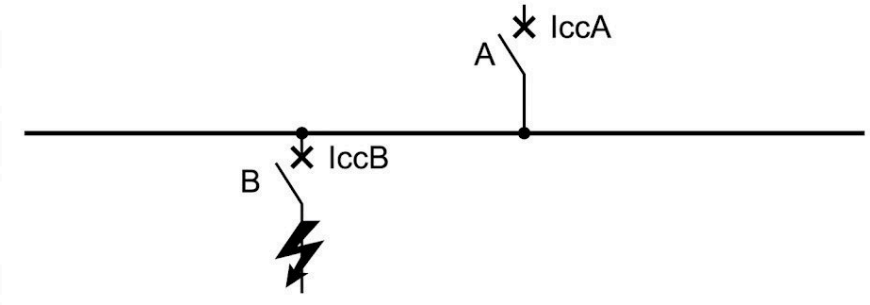

Figure 2.24 – Coordination de protection amont (A) et aval (B) en cas de court-circuit.

On peut réaliser la sélectivité en deux degrés :

La Sélectivité total : Si le dispositif placé en amont assure la coupure du courant de défaut sans l'intervention de celui en aval (la sélectivité est totale entre A et B si B fonctionne pour toute valeur de Icc au point où il est placé)

La sélectivité partielle : on dit que la sélectivité est totale si la protection est assurée par un dispositif jusqu'à une certaine valeur du courant puis les dispositifs réagissent simultanément (la sélectivité est partielle entre A et B si B fonctionne seul jusqu'à une certaine valeur de Icc, puis au delà de cette valeur, A et B fonctionnent tous les deux.)

les dispositifs de protection contre les phases en marche :

2.7 Les contacteurs

2.7.1 Définition des contacteurs : C'est un appareil mécanique de connexion ayant une seul position (au repos), commandé autrement qu'à la main De par sa conception assez complexe, il est conçu pour résister mieux que tout autre composant à l'arc électrique à chaque ouverture et fermeture16.

Choix d'un contacteur : Pour choisir un contacteur, il faut définir les valeurs des éléments suivants :

-courant d'emploi

-tension d'emploi

-catégorie d'emploi : elle fixe la valeur du courant que le contacteur doit établir qui dépend de la nature du récepteur.

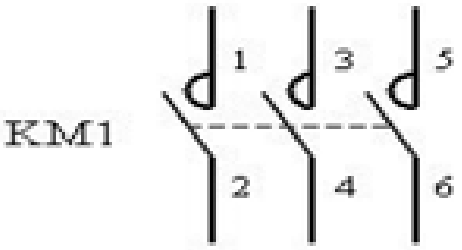

Figure 2.25 – Symbole contacteur

2.7.2 Les dispositifs de protection multiples :

Ils sont utilisés pour réaliser la protection contre les courts-circuits et les surcharges par L'association de différents dispositifs :

-fusible-contacteur

-fusible- relais thermique- contacteur

-Relais thermique- contacteur

-Disjoncteur - contacteur

Fusible -contacteur : C'est une association de deux dispositifs :

-Un contacteur permettant une facilité de commande

-Un fusible situé en amont du contacteur, assurant la protection contre le court circuit (c'est une association qui est très économique)

Fusible-relais thermique- contacteur : C'est une association de trois dispositifs qui assurent la protection contre le court-circuit et contre la surcharge (c'est plus facile de commander le moteur par le contacteur).

Relais thermique- contacteur : C'est une association de deux dispositifs, ce qui permet de protéger le moteur contre les surcharges et facilite la commande du moteur .

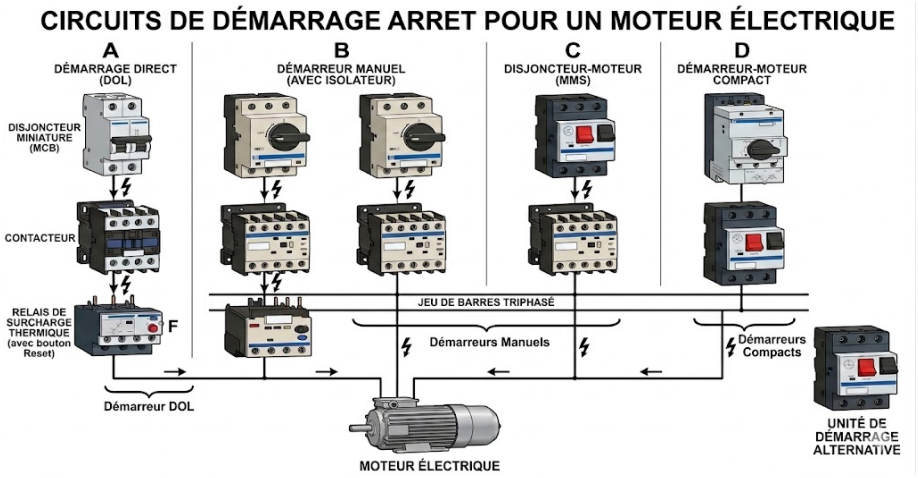

Figure 2.26 – les dispositifs de protection multiples

Avec :

— A :un sectionneur porte fusible

— B : disjoncteur magnétique

— C : disjoncteur magnétothermique

— D : démarreur intégral
— E : contacteur tripolaire
— F : relais de protection thermique.

Résultats et discussion

Ce chapitre a permis de dresser un panorama complet des défauts électriques susceptibles d'affecter un moteur asynchrone industriel, ainsi que des dispositifs et stratégies de protection disponibles.

Il ressort clairement que la protection efficace d'un moteur ne se réduit pas au choix d'un seul appareil : elle résulte d'une coordination rigoureuse entre plusieurs dispositifs complémentaires

— fusibles, disjoncteurs, relais thermiques et contacteurs

— dont les seuils et temporisations doivent être soigneusement ajustés pour garantir à la fois la sensibilité et la sélectivité.

Ces principes théoriques et ces critères de dimensionnement constituent le référentiel sur lequel s'appuiera le chapitre suivant, consacré à la modélisation et à la simulation numérique du système de protection du moteur de Sonatrach sous **MATLAB/Simulink.**

CHAPITRE III

Simulation et Mise en œuvre de la Protection

Introduction

Les analyses théoriques des chapitres précédents ont permis d'identifier les défauts critiques et de définir les stratégies de protection adaptées.

Il convient à présent de valider ces choix par une approche expérimentale numérique, seule à même de reproduire fidèlement la complexité des régimes transitoires qui accompagnent l'apparition d'un défaut réel. Ce chapitre constitue le cœur applicatif de notre mémoire.

Il présente la modélisation complète du moteur asynchrone de **210 kW** sous **5 500 V** dans l'environnement MATLAB/Simulink, en exploitant les ressources de la bibliothèque Simscape Electrical Specialized Power Systems. Le modèle développé intègre six fonctions de protection paramétrées conformément aux normes **IEEE C37.96** et **IEC 60255-8**, et reproduit trois scénarios de défauts représentatifs des incidents les plus fréquemment rencontrés sur les sites industriels de Sonatrach : **la surintensité par surcharge, le court-circuit biphasé, et le défaut monophasé à la terre**.

3.1 Environnement de Simulation

3.1.1 Présentation de MATLAB/Simulink — Specialized Power Systems

Le travail de modélisation a été effectué sur MATLAB/Simulink, en exploitant les ressources de la bibliothèque Simscape Electrical (souvent désignée sous son ancien nom, Specialized Power Systems).

L'intérêt majeur de cet outil réside dans ses blocs dédiés à l'électrotechnique de puissance. Au lieu de manipuler des équations mathématiques abstraites, nous avons pu intégrer directement des composants concrets : sources triphasées, machines tournantes, organes de coupure et dispositifs de protection.

Cette approche est indispensable pour coller à la réalité du terrain. Elle permet d'observer avec une grande fidélité le comportement dynamique du réseau, notamment lors de phases critiques comme les régimes transitoires ou l'apparition de défauts électriques, là où la précision de calcul est déterminante pour valider nos hypothèses.

3.2 Configuration de la simulation

3.2.1 Bloc powergui

La précision des résultats reposant sur la qualité de la résolution numérique, nous avons configuré le bloc Powergui en mode discret.

Le temps d'échantillonnage a été rigoureusement fixé à $5\ \mu s$ (0,000005 s)

Ce pas de calcul très fin est crucial pour notre étude :

il garantit une capture fidèle des phénomènes transitoires rapides, comme les pointes de courant au démarrage ou l'évolution des ondes de choc lors d'un court-circuit franc, permettant ainsi de tester l'efficacité des relais de protection dans des conditions de défaut sévères.

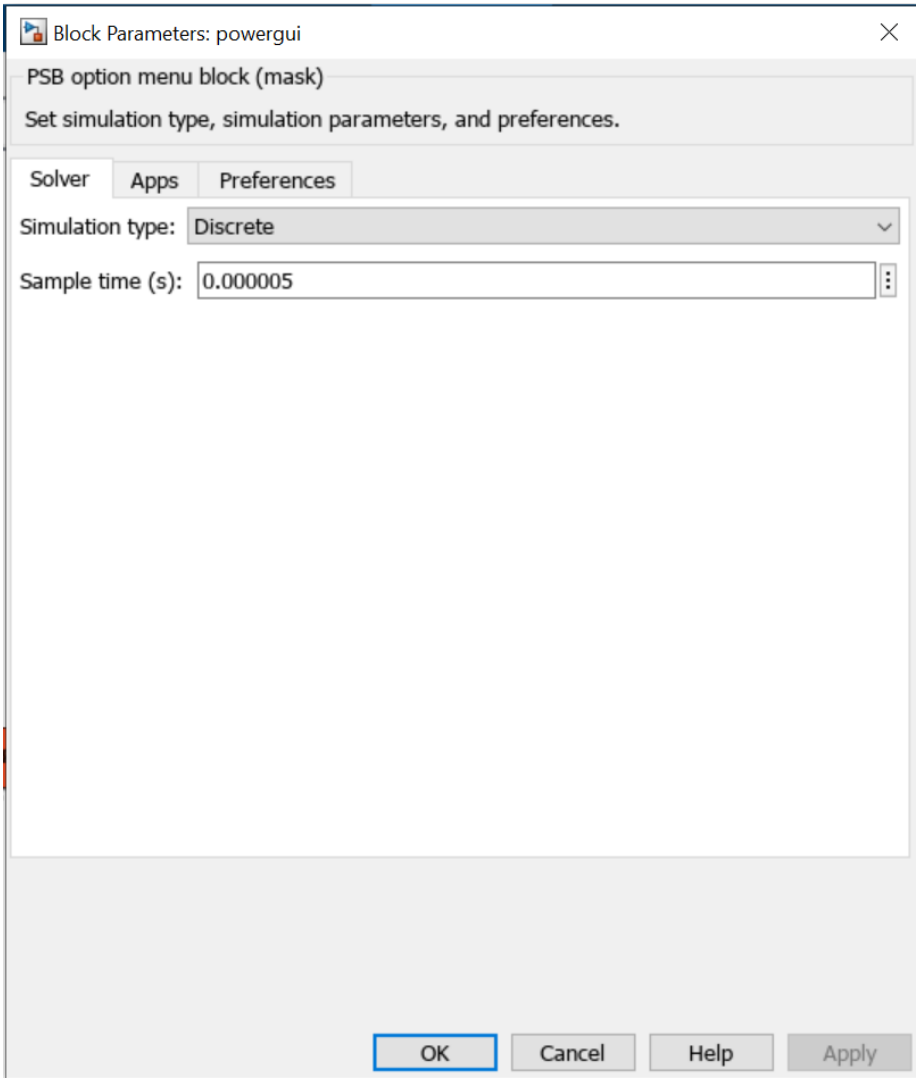

Figure 3.27 – Paramètres du bloc powergui

3.2.2 Choix du solveur

Le pas de temps de $5\ \mu$s est adapté à une fréquence de 50 Hz (200 pas par demi-période, 400 pas par période). La méthode **Tustin/Euler Arrière** est un solveur discret hybride stable pour les systèmes électriques contenant des inductances et des capacités. L'état initial en régime permanent (*steady-state*) permet d'éviter un transitoire de démarrage numérique.

3.2.3 Structure du Modèle de Simulation

3.2.3.1 Vue générale du modèle Simulink

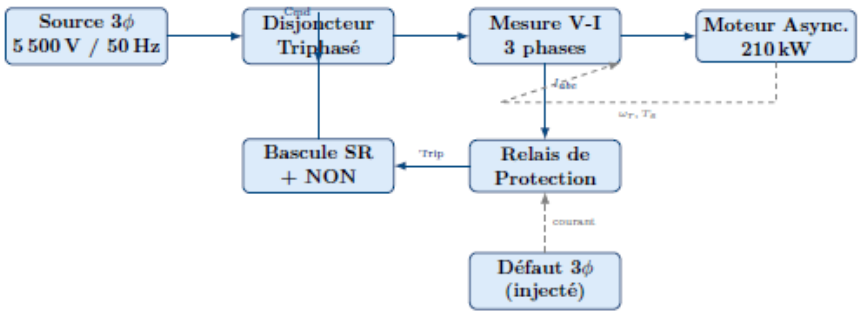

Figure 3.28 – Schéma fonctionnel global du modèle Simulink

Le modèle principal, représente un système complet comprenant l'alimentation triphasée, le moteur asynchrone, le bloc de défaut, et le système de protection avec logique de déclenchement.

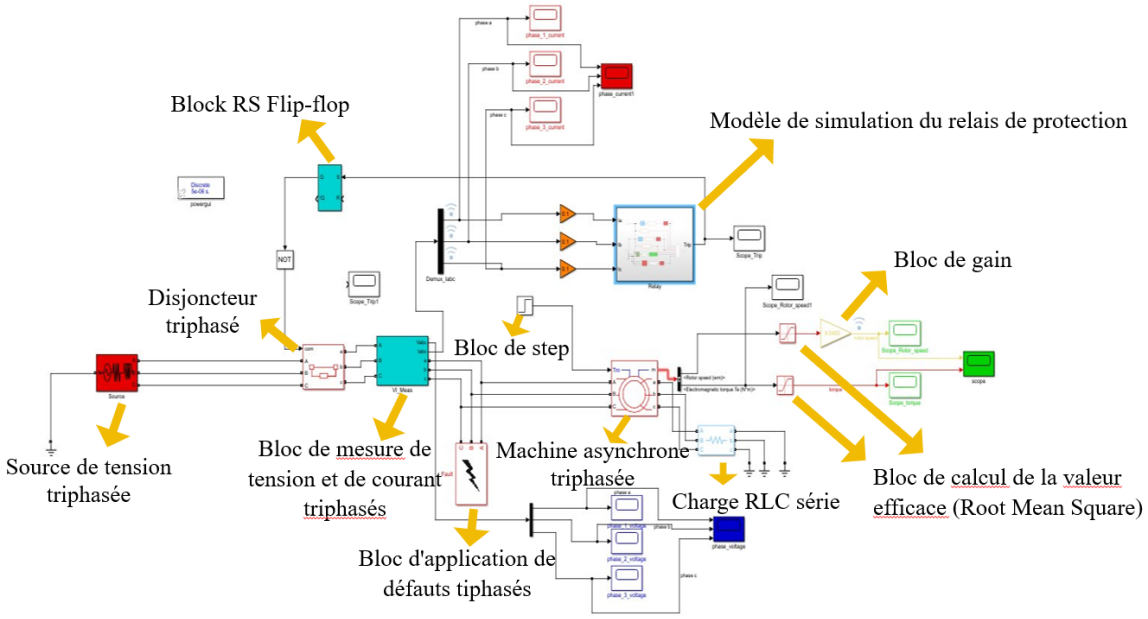

Figure 3.29 – Vue global du modèle Simulink

3.3 Source d'alimentation triphasée

La source d'alimentation est modélisée par un bloc Three-Phase Source de la bibliothèque powerlib avec les paramètres suivants :

Paramètre	**Valeur**	**Unité**
Tension nominale (ligne–ligne)	5 500	V
Angle de phase initial	0	°
Fréquence nominale	50	Hz
Connexion interne	Y_n (étoile avec neutre)	–
Résistance de source	0,1	Ω
Inductance de source	1	mH
Niveau de court-circuit	100	MVA
Tension de base	5 500	V
Rapport X/R	7	–
Type de bus (load-flow)	*swing*	–

Tableau 3.5 – Paramètres de la source de tension triphasée

La source est configurée en étoile avec neutre (Yn). Ce régime de neutre est essentiel pour permettre la circulation du courant homopolaire lors d'un défaut à la terre, et donc sa détection par le relais AR3PF-04...etc

L'impédance interne de la source est non nulle (NonIdealSource = on), ce qui permet de prendre en compte la réalité d'un réseau industriel avec une résistance de 0,1 Ω et une inductance de 1 mH. Le niveau de court-circuit est fixé à 100 MVA, soit une impédance équivalente de :

$$Z_{cc} = \frac{U_n^2}{S_{cc}} = \frac{5500^2}{100 \cdot 10^6} = 0,3025\ \Omega \tag{3.30}$$

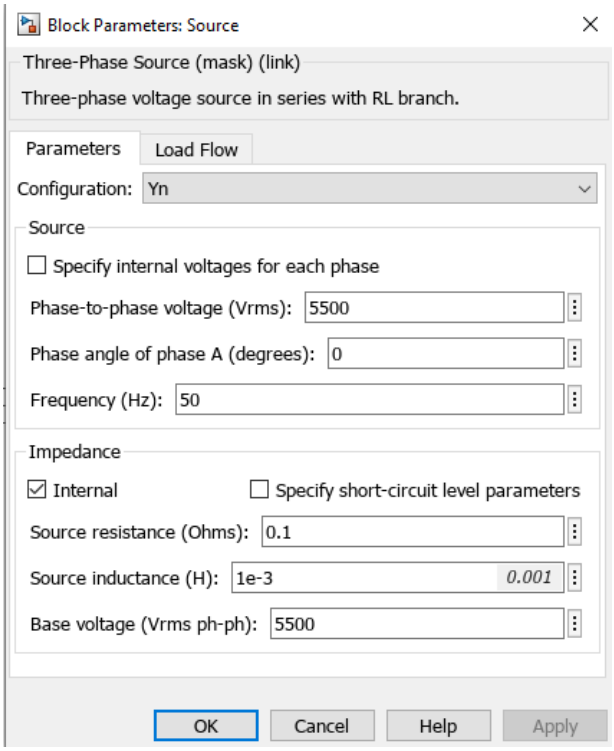

Figure 3.30 – Paramètres du bloc Source triphasée

3.4 Disjoncteur Triphasé et Commande

3.4.1 Caractéristiques du disjoncteur (Three-Phase Breaker)

Paramètre	Valeur	Unité
État initial	Fermé (closed)	–
Commande externe	Activée (on)	–
Résistance passante	1	Ω
Résistance snubber	10^6	Ω
Capacité snubber	∞ (inf)	F
Phases commutées	A, B, C (toutes)	–
Temps de basculement	$[+\infty]$ (auto)	s

Tableau 3.6 – Paramètres du disjoncteur triphasé

3.4.2 Logique de commande du disjoncteur

Le disjoncteur est commandé externement par un signal logique. La chaîne de commande est la suivante :

1. Le relais de protection génère un signal Trip (1 = déclenchement) ;

2. Ce signal est appliqué à l'entrée S (Set) de la bascule SR ;

3. La sortie Q de la bascule SR passe à 1 et reste à 1 (mémorisation du déclenchement) ;

4. Un opérateur logique NON (NOT) inverse Q pour commander le disjoncteur :

quand Q = 1 (défaut), la commande passe à 0, ce qui ouvre le disjoncteur (état initial fermé = 1) ;

5. La sortie du NOT alimente également le scope Scope_Trip1.

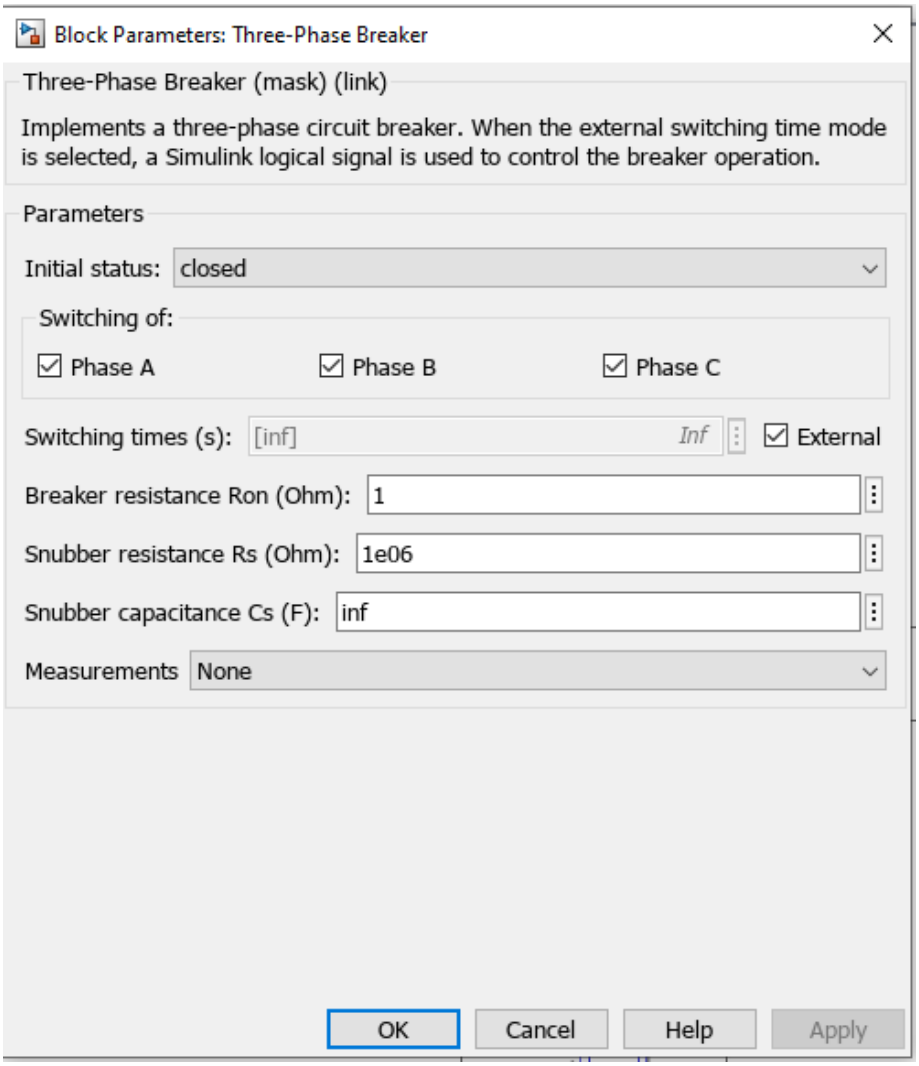

Figure 3.31 – Paramètres du bloc Disjoncteur

3.4.3 Remarque :

La bascule SR (S-R Flip-Flop, condition initiale = 0) assure la mémorisation permanente du déclenchement. Une fois le relais actionné, le disjoncteur reste ouvert même si les conditions de

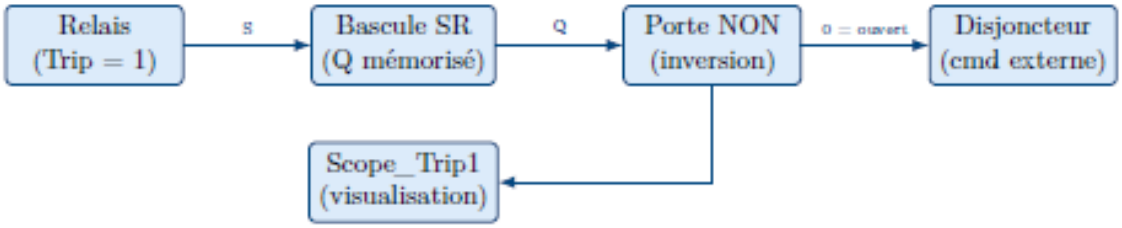

Figure 3.32 – Chaîne logique de commande du disjoncteur

défaut disparaissent, tant qu'un signal de Reset n'est pas appliqué. Dans ce modèle, aucun signal de réenclenchement n'est simulé.

3.5 Paramètres du Moteur Asynchrone à Bagues :

Le moteur est modélisé par le bloc Asynchronous Machine SI Units (powerlib/Machines) version 9. Il s'agit d'une machine asynchrone à r

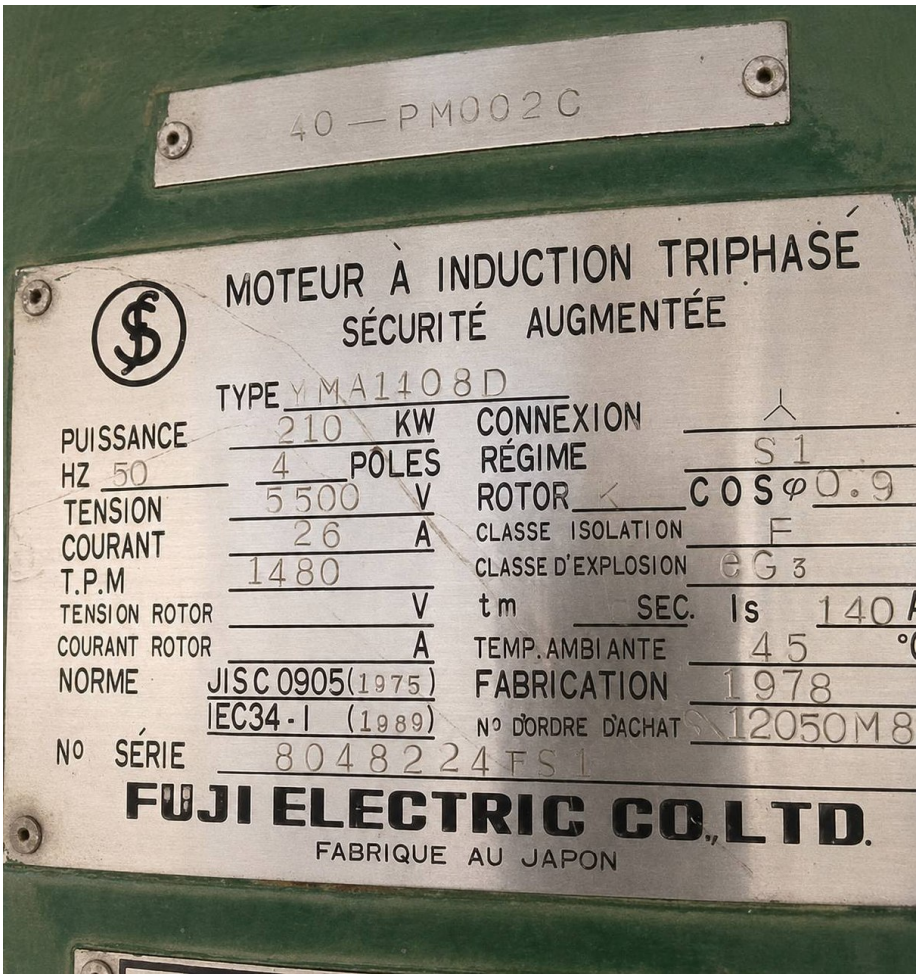

Figure 3.33 – Plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé industriel – Sonatrach

Paramètre	Valeur	Unité
Puissance mécanique nominale	210 000 (210)	W (kW)
Tension nominale (L-L RMS)	5 500	V
Fréquence nominale	50	Hz
Nombre de paires de pôles	2	–
Vitesse synchrone	$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60\times50}{2} = 1\,500$	tr/min
Puissance mécanique simulée	1 492 000	W
Rapport de tension	1	–
Type de rotor	Bobiné (Wound)	–
Référentiel	Rotorique	–
Saturation magnétique	Non (off)	–

Tableau 3.7 – Données nominales du moteur

3.6 Paramètres électriques équivalents

3.6.1 Circuit statorique

Paramètre	Valeur	Unité
Résistance statorique R_s	7	Ω
Inductance de fuite statorique L_{ls}	0,027	H

Tableau 3.8 – Paramètres du stator

3.6.2 Circuit rotorique

Paramètre	Valeur	Unité
Résistance rotorique R_r	1,5	Ω
Inductance de fuite rotorique L_{lr}	0,027	H
Résistance cage 1 R_{c1}	0,4155	Ω
Inductance cage 1 L_{c1}	2,066	mH
Résistance cage 2 R_{c2}	0,4168	Ω
Inductance cage 2 L_{c2}	0,3495	mH
Inductance magnétisante L_m	6	H

Tableau 3.9 – Paramètres du rotor et des cages

3.6.3 Paramètres mécaniques

Paramètre	Valeur	Unité
Moment d'inertie J	8	kg·m^2
Coefficient de frottement visqueux F	0,005879	N·m·s/rad
Charge mécanique	Couple (T_m)	–

Tableau 3.10 – Paramètres mécaniques du moteur

3.6.4 Conditions initiales

Les conditions initiales du moteur sont fixées à :

$$[\delta, \omega_r, i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \varphi_1, \varphi_2]^T = [0,002, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

Le modèle démarre avec un angle initial légèrement non nul (0,002 rad) pour assurer un démarrage numérique stable, et la vitesse initiale est nulle.

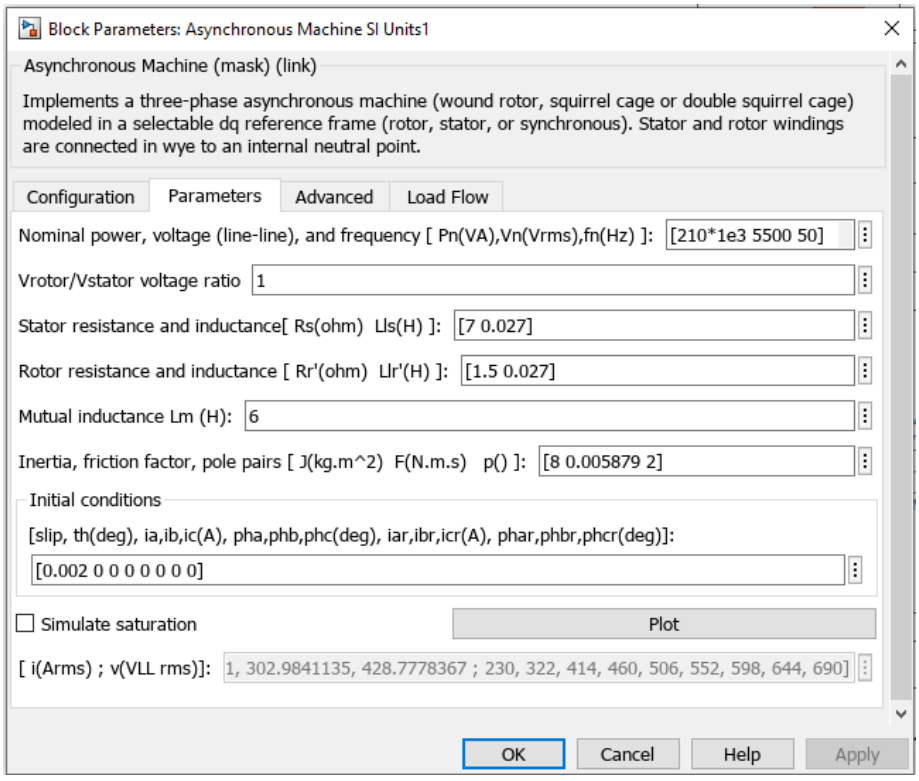

Figure 3.34 – Block Parameters : Asynchronous Machine SI Units1

3.7 Blocs complémentaires de la simulation

3.7.1 Bloc Step — Simulation de la charge mécanique

Le couple nominal du moteur peut être estimé par :

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{210\,000}{2\pi \times \frac{1492}{60}} \approx \frac{210\,000}{156{,}3} \approx 1\,344 \text{ N·m} \tag{3.31}$$

L'échelon à 4 000N·m représente donc environ $3 \times T_n$, soit une surcharge sévère susceptible de déclencher les protections.

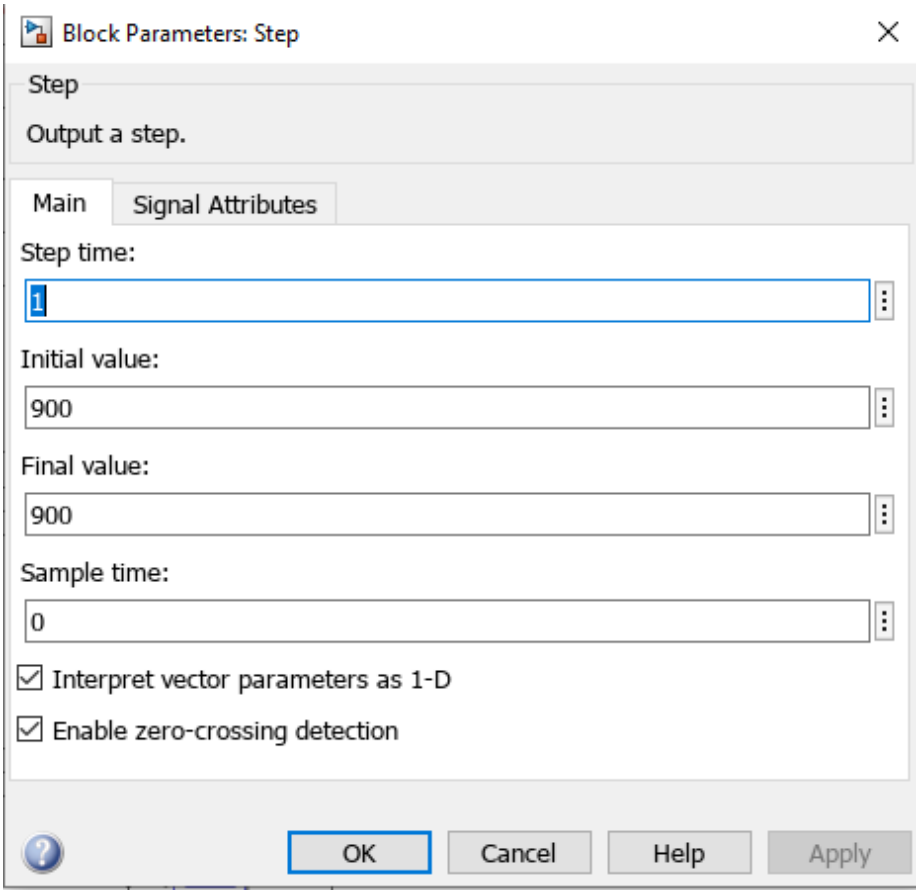

Figure 3.35 – Paramètres du bloc Step

Type de défaut	Valeur initiale	Valeur finale	Instant Step
Surintensité (surcharge)	900 N·m	4000 N·m	$t = 1$ s
Court-circuit	900 N·m	900 N·m	$t = 1$ s (constant)
Défaut à la terre	900 N·m	900 N·m	$t = 1$ s (constant)

Tableau 3.11 – Paramètres du bloc Step selon le type de défaut

3.7.2 Conversion de vitesse et saturation des sorties

Les blocs de mise à l'échelle des sorties moteur sont au nombre de trois. Le bloc **Gain4** applique un gain de $\times 9{,}5493$ $\left(\frac{60}{2\pi} \approx 9{,}5493\right)$ au signal de vitesse rotorique ω_r exprimé en rad/s, afin de le convertir en tr/min.

Le bloc **Saturation** limite le signal de vitesse rotorique affichée à la plage $[0;\ 2000]$ tr/min.

Enfin, le bloc **Saturation1** limite le couple électromagnétique affiché à la plage $[0;\ 3000]$ N·m.

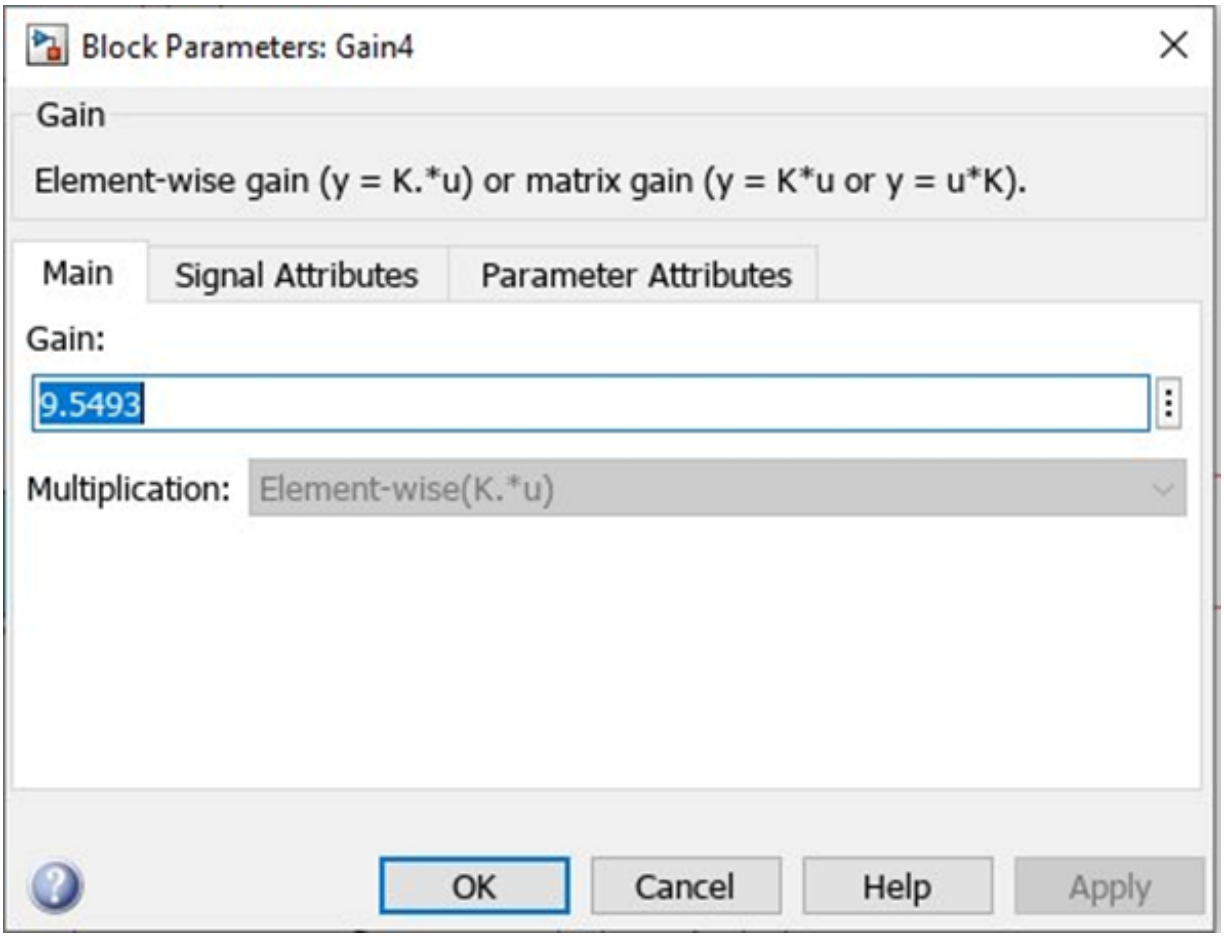

Figure 3.36 – Paramètres du bloc Gain4 (conversion vitesse)

3.8 Système de Mesure

3.8.1 Mesure tension-courant triphasée (VI_{Meas})

Le bloc *Three-Phase V-I Measurement* capture les grandeurs électriques aux bornes du moteur avec les paramètres suivants : le type de mesure de tension est configuré en **Phase-à-la-terre**, la mesure de courant est activée (**Oui**), la puissance de base est fixée à **210 000 W**, la tension de base est de **5 500 V**, le type de sortie est **Complexe**, et la simulation phaseur est désactivée (**Non (off)**).

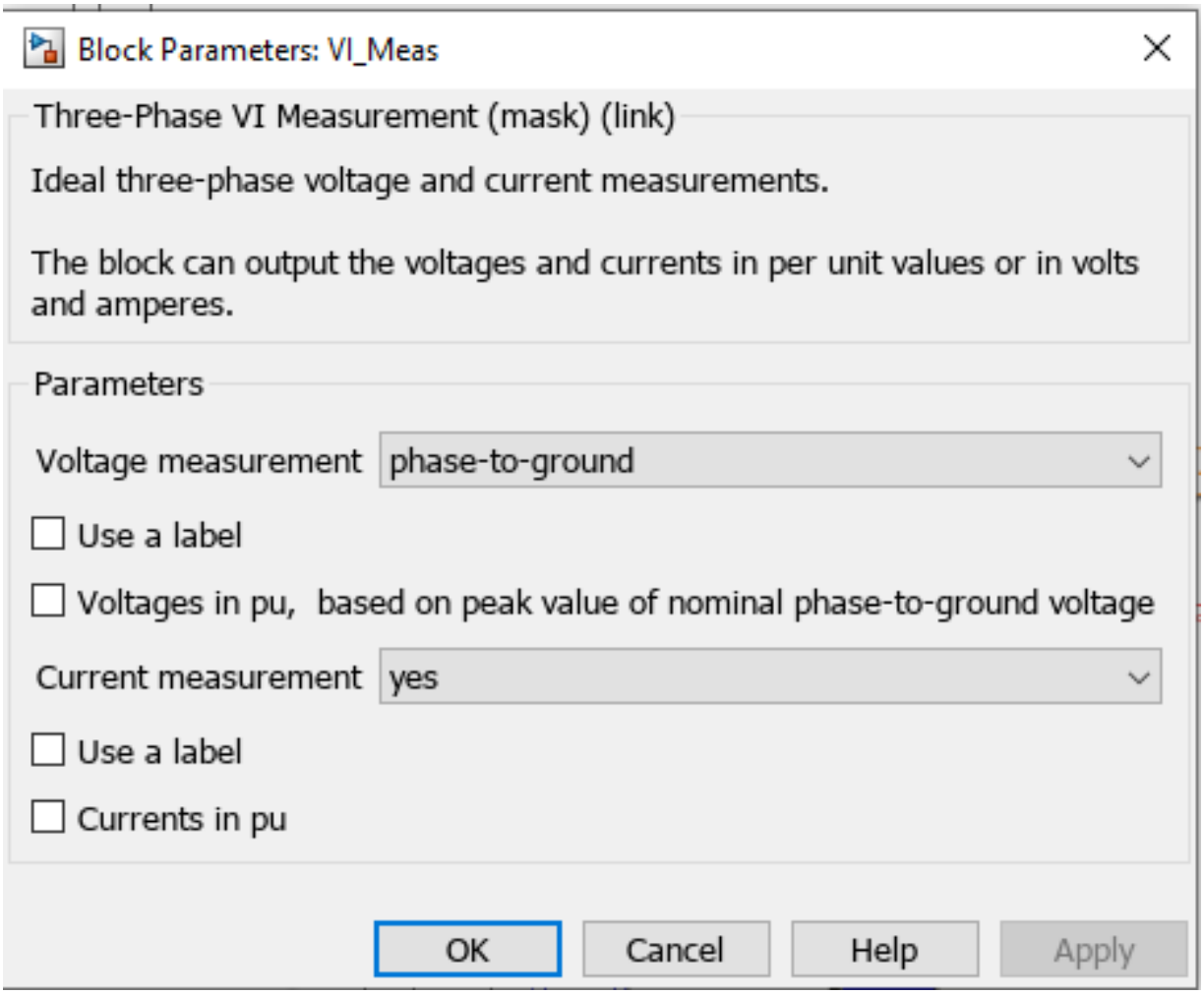

Figure 3.37 – Block Parameters : VI_Meas

3.8.2 Transformateurs de courant (émulés par gains)

Les courants de phases mesurés sont ensuite mis à l'échelle par des blocs *Gain* de valeur **0,1** pour les trois phases (R, S, T). Ceci simule un **transformateur de courant (TC)** avec un rapport :

$$n_{TC} = 0{,}1 \quad \Rightarrow \quad I_{secondaire} = 0{,}1 \times I_{primaire} \tag{3.32}$$

Pour un courant nominal estimé à environ $I_n \approx 28$ A, le courant secondaire vaut :

$$I_{n,relay} = 0{,}1 \times 28 \approx 2{,}8 \text{ A} \tag{3.33}$$

Ces courants réduits alimentent directement le sous-système relais.

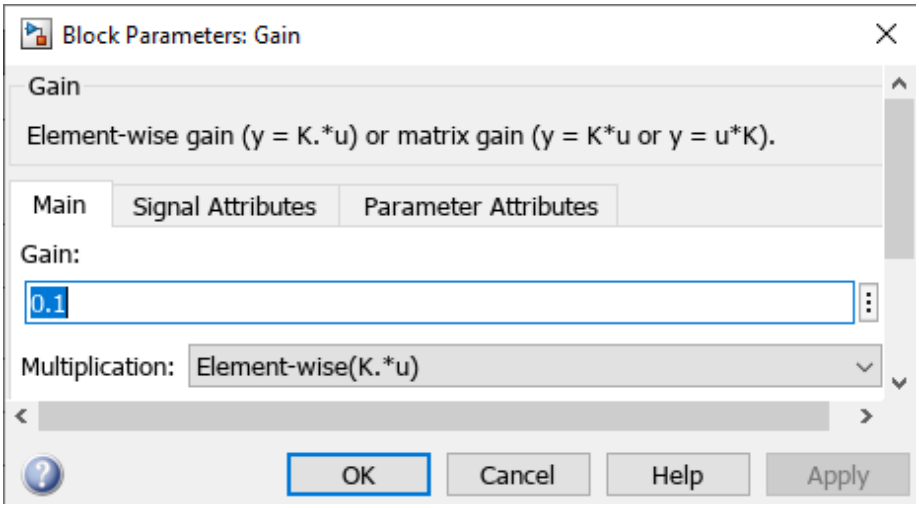

Figure 3.38 – Block Parameters : GAIN

3.9 Logique du Relais de Protection (Sous-système Relay)

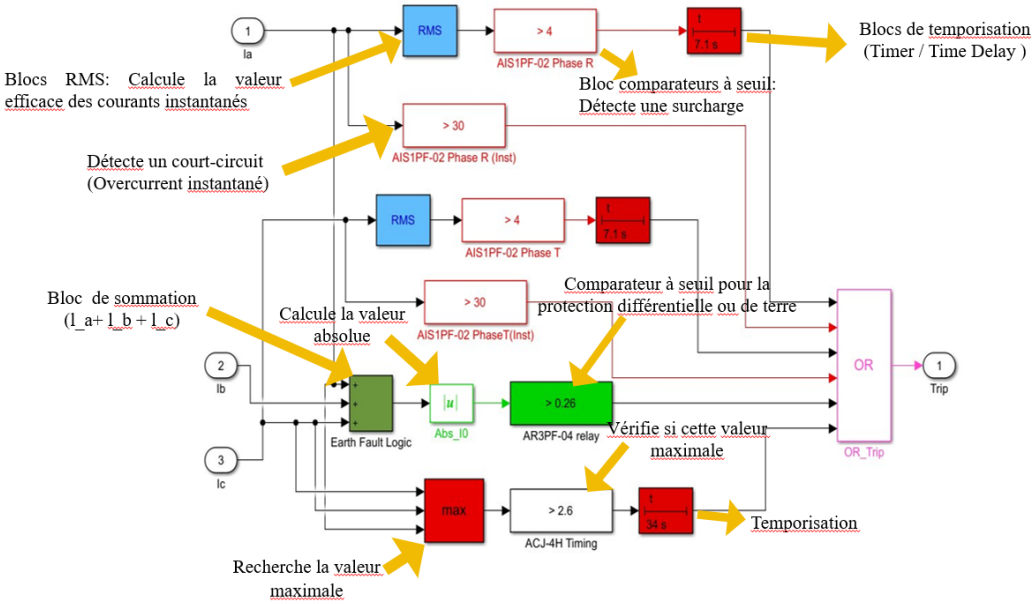

Figure 3.39 – Sous-système de protection Relay avec logique complète

3.9.1 Entrées et structure générale

Le sous-système Relay reçoit trois entrées :

— Ia : courant de la phase R (après gain TC)

— Ib : courant de la phase S

— Ic : courant de la phase T

Il produit une sortie unique : Trip (1 = déclenchement). Ce relais implémente 6 fonctions de protection dont les sorties convergent vers une porte logique OU à 6 entrées (OR_Trip).

Dès qu'une seule fonction se déclenche, le signal Trip passe à 1.

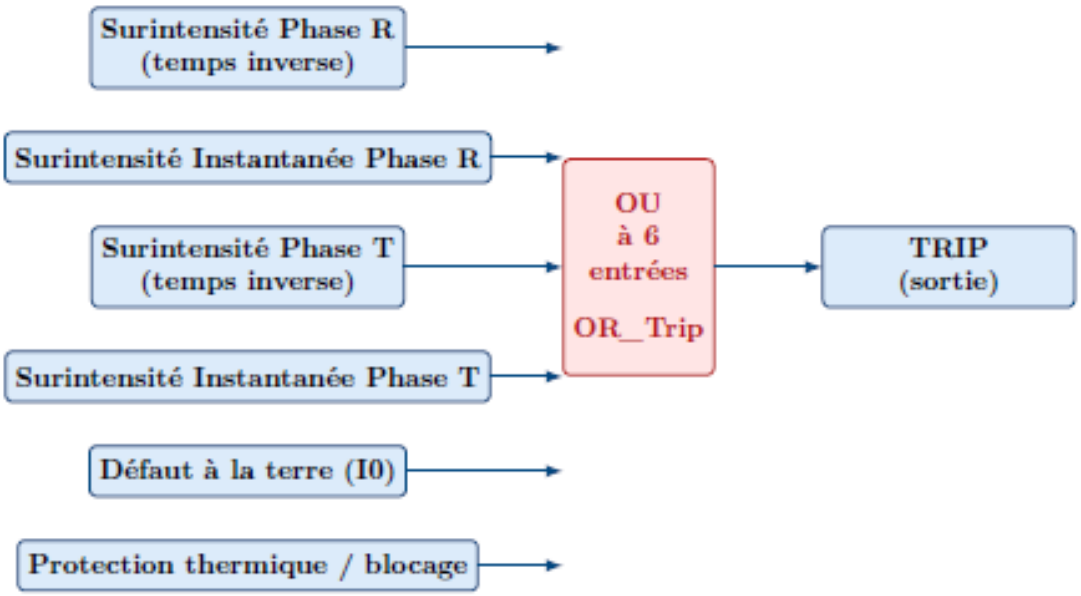

Figure 3.40 – Architecture de la logique de déclenchement du relais

3.9.2 Fonction 1 – Surintensité à Temps Inverse Phase R (Protection 51 – AIS1PF-02 Phase R + On Delay)

Paramètres de la fonction 51 – Phase R

Signal d'entrée	Courant phase R (Ia)
Bloc de calcul	RMS vrai (True RMS, 50 Hz)
Seuil de pickup	$I_{pick-up,R} = 4$ A (secondaire TC)
Seuil réel	$I_{pick-up,R,prim} = 4/0{,}1 = \mathbf{40}$ A
Ratio par rapport à I_n	$40/28 \approx 1{,}43 \times I_n$
Temporisation	**7,1 secondes** (On Delay)
Type	Surintensité à temps défini

3.9.3 Logique de traitement

1. Le courant `Ia` (scalé par TC) est traité par un bloc **RMS** (True RMS, fréquence 50 Hz) ;
2. La valeur RMS est comparée au seuil 4 A par le comparateur **AIS1PF-02 Phase R** :

$$\text{Signal 51R} = \begin{cases} 1 & \text{si } I_{rms,R} > 4 \text{ A} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.34}$$

3. Le bloc **On Delay** de 7,1 s retarde le déclenchement : le signal doit rester à 1 pendant 7,1 s consécutives avant de transmettre l'ordre de déclenchement ;
4. La sortie temporisée alimente l'entrée 1 de la porte `OR_Trip`.

3.9.4 Fonction 2 – Court-circuit Instantanée Phase R (Protection 50 – AIS1PF-02 Phase R (Inst))

Paramètres de la fonction 50 – Phase R Instantané

Signal d'entrée	Courant instantané phase R (Ia direct)
Seuil de pickup	$I_{inst,R} = 30$ A (secondaire TC)
Seuil réel	$I_{inst,R,prim} = 30/0{,}1 = \mathbf{300}$ A
Ratio par rapport à I_n	$300/28 \approx 10{,}7 \times I_n$
Temporisation	**Aucune** (instantané)
Type	Surintensité instantanée

Logique de traitement

1. Le courant instantané `Ia` est directement comparé à 30 A :

$$\text{Signal 50R} = \begin{cases} 1 & \text{si } |I_a| > 30 \text{ A} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.35}$$

2. Sans temporisation, le déclenchement est immédiat (quelques pas de simulation) ;
3. La sortie alimente l'entrée 2 de la porte `OR_Trip`.

3.9.5 Fonction 3 – Surintensité à Temps Inverse Phase T (Protection 51 – AIS1PF-02 Phase T + On Delay1)

Paramètres de la fonction 51 – Phase T	
Signal d'entrée	Courant phase T (Ic)
Bloc de calcul	RMS vrai (True RMS, 50 Hz)
Seuil de pickup	$I_{pick-up,T} = 4$ A (secondaire TC)
Seuil réel	$I_{pick-up,T,prim} = \mathbf{40}$ A
Temporisation	**7,1 secondes** (On Delay1)

La logique est identique à la Fonction 1 mais appliquée à la phase T (courant `Ic`). La sortie temporisée alimente l'entrée 3 de la porte `OR_Trip`

3.9.6 Fonction 4 – Court-circuit Instantanée Phase T (Protection 50 – AIS1PF-02 PhaseT(Inst))

Paramètres de la fonction 50 – Phase T Instantané	
Signal d'entrée	Courant instantané phase T (Ic direct)
Seuil de pickup	$I_{inst,T} = 30$ A (secondaire TC)
Seuil réel	$I_{inst,T,prim} = \mathbf{300}$ A
Temporisation	**Aucune**

La sortie alimente l'entrée 4 de la porte OR_Trip.

3.9.7 Fonction 5 – Protection Défaut à la Terre (Protection 51N – AR3PF-04 relay)

Logique de traitement

1. Le bloc **Earth Fault Logic** (Sommateur à 3 entrées "++") calcule le courant résiduel homopolaire :

$$I_0 = I_a + I_b + I_c \tag{3.36}$$

Paramètres de la fonction 51N – Défaut à la terre

Signal d'entrée	Courants Ia + Ib + Ic (somme résiduelle)
Traitement	Somme vectorielle ⇒ Valeur absolue ($\lvert I_0 \rvert$)
Seuil de pickup	$I_{0,seuil} = 0{,}26$ A (secondaire TC)
Seuil réel	$I_{0,seuil,prim} = 0{,}26/0{,}1 = \mathbf{2{,}6}$ A
Temporisation	**Aucune** (réponse directe)

En régime normal triphasé équilibré, $I_0 \approx 0$. Lors d'un défaut monophasé à la terre, $I_0 \neq 0$;

2. Le bloc **Abs_I0** calcule $\lvert I_0 \rvert$;
3. Le comparateur **AR3PF-04 relay** compare à 0,26 :

$$\text{Signal 51N} = \begin{cases} 1 & \text{si } \lvert I_0 \rvert > 0{,}26 \text{ A} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.37}$$

4. La sortie alimente l'entrée 5 de la porte `OR_Trip`.

Remarque : Le seuil de 2,6 A primaire représente environ 9,3 % du courant nominal, ce qui correspond à une protection terre de sensibilité élevée adaptée aux moteurs de haute tension.

3.9.8 Fonction 6 – Protection Thermique / Surcharge Prolongée (Protection 49 – ACJ-4H Timing + On Delay2)

Paramètres de la fonction 49 – Protection thermique

Signal d'entrée	Maximum des courants Ia, Ib, Ic (MinMax = max)
Seuil de pickup	$I_{therm} = 2{,}6$ A (secondaire TC)
Seuil réel	$I_{therm,prim} = 2{,}6/0{,}1 = \mathbf{26}$ A
Ratio par rapport à I_n	$26/28 \approx 0{,}93 \times I_n$
Temporisation	**34 secondes** (On Delay2)
Type	Protection thermique à temps défini long

Logique de traitement

1. Le bloc **MinMax** (fonction max, 3 entrées) sélectionne le courant de phase le plus élevé parmi Ia, Ib, Ic :

$$I_{max} = \max(|I_a|,\ |I_b|,\ |I_c|) \tag{3.38}$$

2. Le comparateur **ACJ-4H Timing** compare à 2,6 A :

$$\text{Signal therm.} = \begin{cases} 1 & \text{si } I_{max} > 2{,}6 \text{ A} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.39}$$

3. Le bloc **On Delay2** de **34 secondes** simule l'inertie thermique de la machine : le déclenchement n'a lieu que si la surcharge persiste pendant 34 s ;
4. La sortie alimente l'entrée 6 de la porte `OR_Trip`.

Signification physique du seuil thermique

Le seuil de 2,6 A secondaire correspond à 26 A primaire, soit environ 93% du courant nominal estimé ($\approx$ 28 A). Avec une temporisation de 34 s, cette fonction assure la protection thermique du moteur contre les surcharges légères prolongées et les démarrages bloqués (rotor calé) [26,27].

3.10 Simulation des Défauts

3.10.1 Simulation du Défaut de Surintensité (Surcharge)

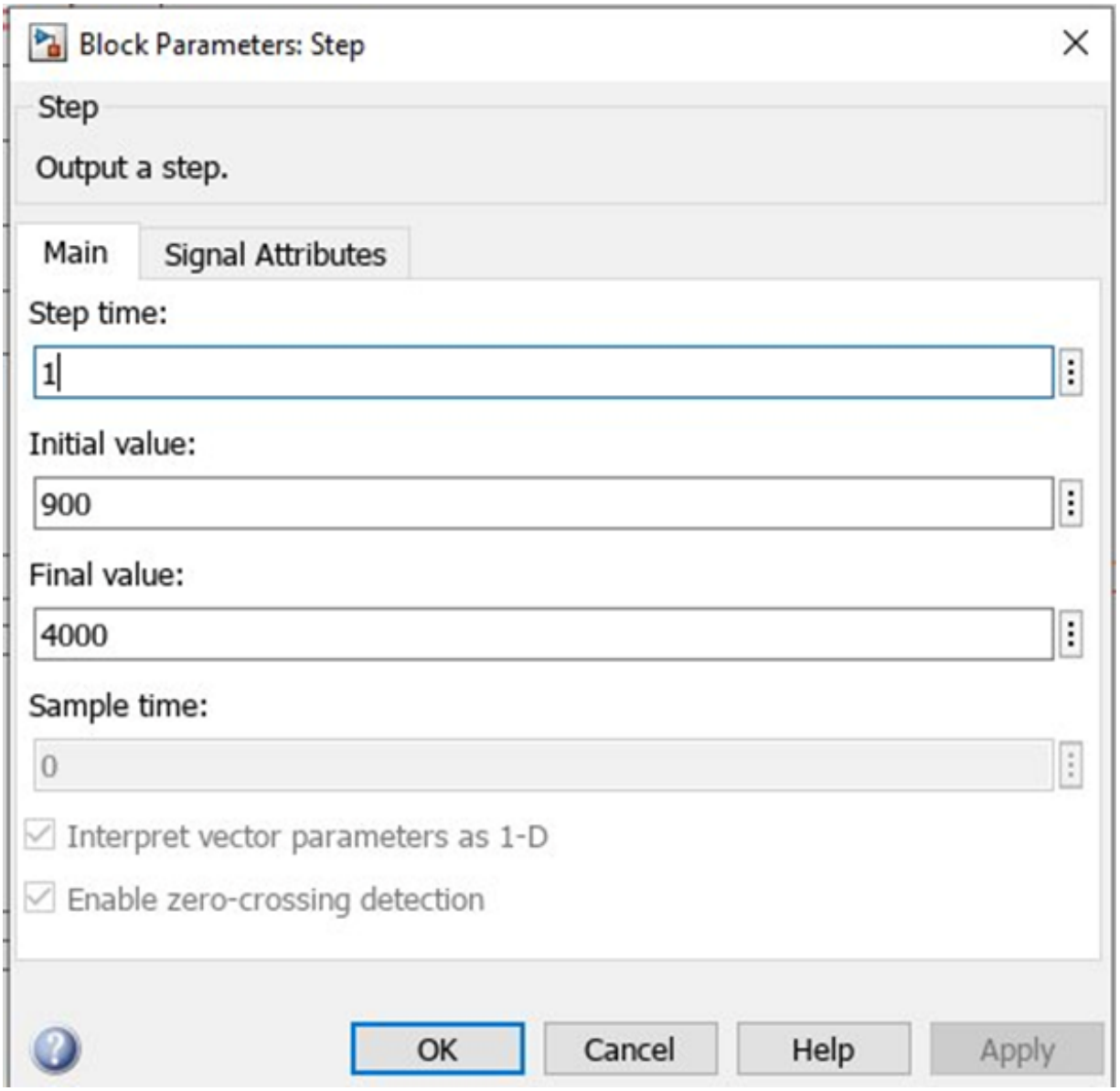

Figure 3.41 – Paramètres du bloc Step pour la simulation de surcharge

À t = 1 s, le couple de charge passe brusquement de 900 N.m à 4000 N.m, simulant une surcharge mécanique soudaine qui force le moteur à absorber un courant supérieur à sa valeur nominale.

3.10.2– Courants de phase — Vue globale (0 à 10s)

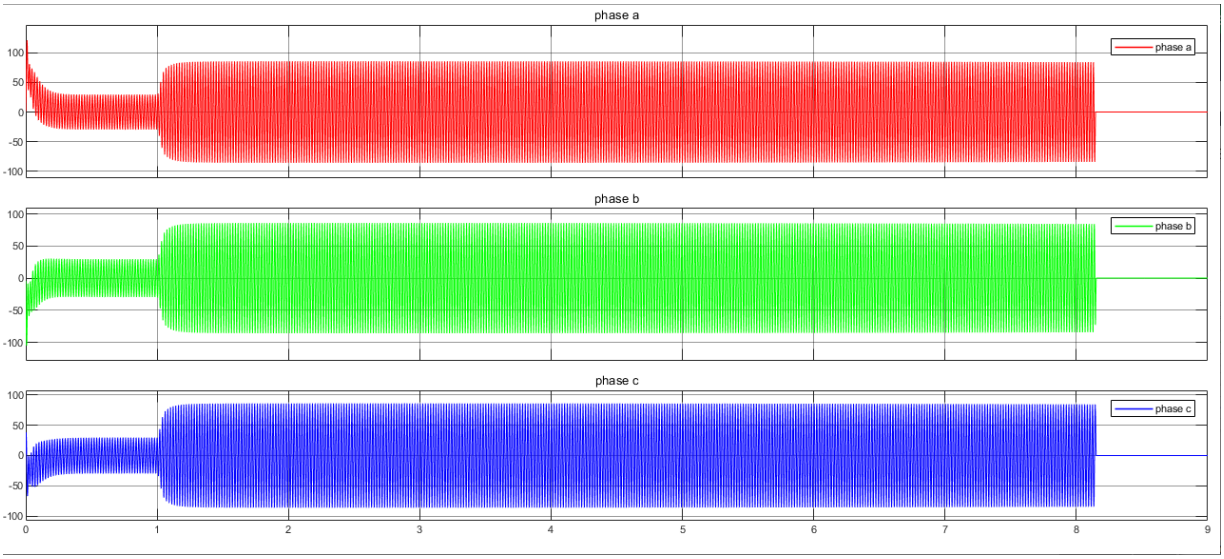

Figure 3.42 – Évolution des courants triphasés lors de la surcharge (vue globale)

3.10.3 Analyse des phases temporelles de la simulation

La figure 3.42 présente l'évolution temporelle des courants de phase (A, B, C) du moteur asynchrone simulé sous MATLAB/Simulink, sur une durée totale d'environ 8,3 secondes. On distingue clairement trois phases distinctes de fonctionnement.

Phase 1 — Démarrage ($0 \leq t \leq 1$ s)

Au démarrage, les trois phases présentent un régime transitoire caractérisé par une amplitude irrégulière et une enveloppe décroissante. Ce comportement est typique du courant d'appel au démarrage direct d'un moteur asynchrone, dont l'amplitude peut atteindre 5 à 8 fois le courant nominal [15]. On observe que les courants ne sont pas encore stabilisés et que les trois phases présentent un léger déséquilibre transitoire, ce qui est tout à fait normal lors de la mise sous tension [14].

Phase 2 — Régime établi ($1 \leq t \leq 8{,}2$ s)

À partir de $t \approx 1$ s, les trois courants de phase atteignent un régime permanent sinusoïdal équilibré, avec une amplitude crête d'environ 75 A et une fréquence de 50 Hz. Les trois signaux sont déphasés de 120° l'un par rapport à l'autre, confirmant le bon équilibre triphasé du système

[14]. Cette stabilisation traduit le passage du moteur en régime nominal de fonctionnement, où le couple électromagnétique équilibre le couple résistant de la charge.

Phase 3 — Coupure ($t \approx 8{,}2$ s)

À $t \approx 8{,}2$ s, les trois courants chutent brusquement à zéro de manière simultanée et symétrique, indiquant l'ouverture du dispositif de protection commandant l'alimentation du moteur. Cette coupure nette et simultanée des trois phases confirme le bon fonctionnement du dispositif de protection omnipolaire [19].

Phase	Intervalle	Observation
Démarrage	$0 \leq t \leq 1$ s	Régime transitoire, courant d'appel élevé
Régime établi	$1 \leq t \leq 8{,}2$ s	Sinusoïde équilibrée, amplitude ≈ 75 A
Coupure	$t \approx 8{,}2$ s	Ouverture omnipolaire, courant nul

Tableau 3.12 – Récapitulatif des phases temporelles de la simulation

Observation générale

Les résultats de simulation sont cohérents avec le comportement théorique d'un moteur asynchrone triphasé en fonctionnement normal. Le démarrage direct génère un pic de courant transitoire, suivi d'une stabilisation rapide en régime permanent équilibré [15]. L'absence de distorsion ou de déséquilibre persistant entre les phases confirme la validité du modèle Simulink utilisé [14].

3.10.3.1 Tensions de phase — Vue globale (0 à 10s)

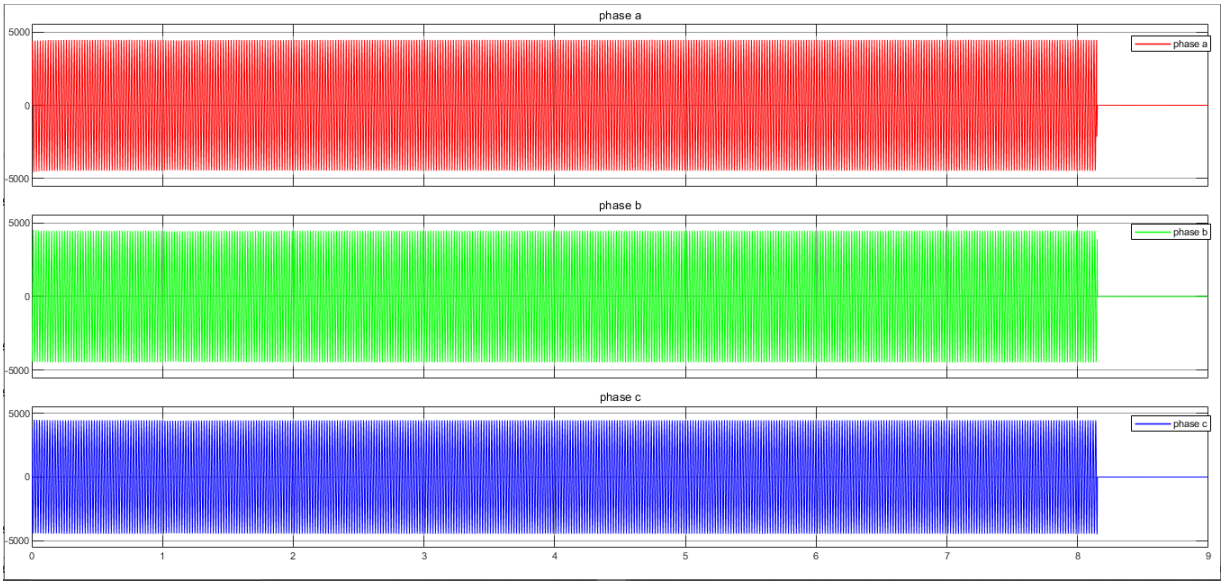

Figure 3.43 – Évolution des tensions triphasées lors de la surcharge (vue globale)

3.10.4 Analyse des phases temporelles de la tension lors d'une surintensité

La figure (3.43) illustre l'évolution temporelle des tensions de phase (A, B, C) aux bornes du moteur asynchrone de 5500 V lors d'un défaut de surintensité, simulé sous MATLAB/Simulink.

Phase 1 — Régime de surintensité ($0 \leq t \leq 8{,}2$ **s)**

Dès le début de la simulation, les trois tensions de phase présentent une forme sinusoïdale stable avec une amplitude crête cohérente avec la tension nominale d'alimentation de 5500 V efficace :

$$U_{crte} = U_{eff} \times \sqrt{2} = 5500 \times \sqrt{2} \approx 7778 \text{ V} \tag{3.40}$$

Contrairement au courant qui est directement affecté par la surintensité, la tension aux bornes du moteur reste relativement stable durant toute la durée du défaut [14]. Ce comportement s'explique par la rigidité du réseau d'alimentation, qui maintient la tension quasi-constante même en présence d'un courant de défaut élevé [13].

Phase 2 — Coupure par le dispositif de protection ($t \approx 8{,}2$ s)

À $t \approx 8{,}2$ s, les trois tensions chutent simultanément et brusquement à zéro, indiquant le déclenchement du relais à surintensité 50/51 qui isole le moteur du réseau [22]. La coupure parfaitement symétrique sur les trois phases confirme le bon fonctionnement de la protection omnipolaire [23].

Phase	Intervalle	Observation
Surintensité	$0 \leq t \leq 8{,}2$ s	Tension stable $\approx \pm 4500$ V
Coupure	$t \approx 8{,}2$ s	Chute simultanée des 3 phases à zéro

Tableau 3.13 – Récapitulatif de l'évolution de la tension lors d'une surintensité

Observation générale

La stabilité de la tension durant toute la phase de surintensité confirme que le défaut simulé est bien un défaut de surintensité côté courant, et non une perturbation de la source d'alimentation [13]. Le rôle du relais 50/51 est de surveiller le courant absorbé et de commander la coupure lorsque le seuil est franchi [19].

3.10.4.1 Vitesse rotorique et couple électromagnétique

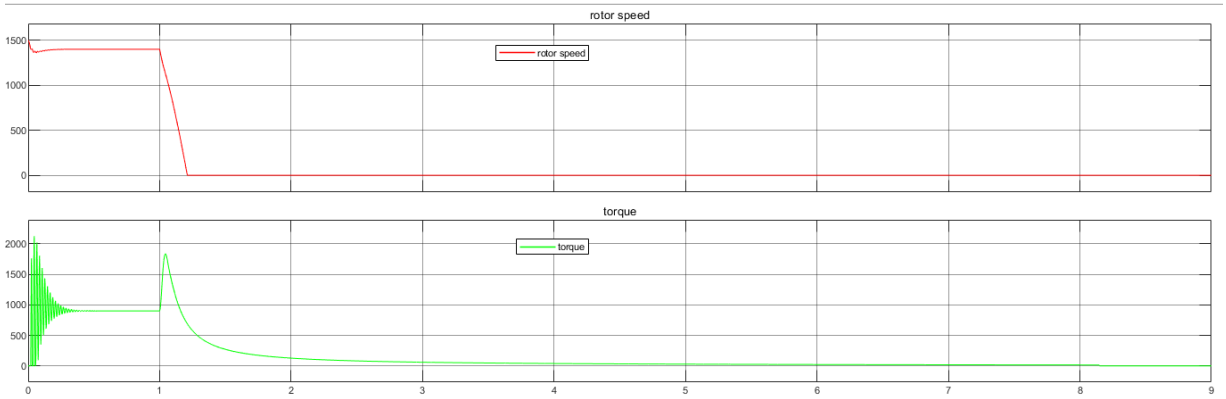

Figure 3.44 – Évolution de la vitesse rotorique et du couple électromagnétique lors de la surcharge

3.10.5 Analyse des courbes de vitesse rotorique et de couple lors d'une surintensité

La figure (3.44) présente l'évolution temporelle de la vitesse rotorique et du couple électromagnétique du moteur asynchrone lors d'un défaut de surintensité, simulé sous MATLAB/Simulink sur une durée de 9 secondes.

1. Vitesse rotorique

Avant l'apparition du défaut, entre $t = 0$ et $t \approx 1$ s, la vitesse rotorique se stabilise rapidement à sa valeur nominale de synchronisme, soit environ 1500 tr/min, correspondant à un réseau d'alimentation à 50 Hz avec deux paires de pôles [28]. Cette valeur est cohérente avec la vitesse de synchronisme définie par :

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ tr/min} \tag{3.41}$$

À $t \approx 1$ s, la surintensité détectée par le relais 50/51 provoque le déclenchement du dispositif de protection, entraînant une chute brutale et rapide de la vitesse rotorique vers zéro [19]. Le moteur perd son alimentation et décélère sous l'effet des frottements et de la charge mécanique résiduelle [15]. À partir de $t \approx 1{,}5$ s, la vitesse rotorique reste nulle, indiquant l'arrêt complet du moteur.

2. Couple électromagnétique

Durant la phase de démarrage ($0 \leq t \leq 0{,}5$ s), le couple électromagnétique présente des oscillations importantes pouvant atteindre 2000 N·m. Ces oscillations transitoires sont caractéristiques du démarrage direct d'un moteur asynchrone de forte puissance et résultent de l'interaction entre le flux statorique et le courant rotorique pendant la phase d'établissement du régime permanent [28].

Entre $t \approx 0{,}5$ s et $t \approx 1$ s, le couple se stabilise autour de 900 N·m, valeur correspondant au couple nominal de fonctionnement du moteur de 210 kVA sous 5500 V [15] :

$$T_n = \frac{P}{\omega_s} = \frac{210\,000}{2\pi \times \frac{1500}{60}} \approx 1337 \text{ N·m} \tag{3.42}$$

À $t \approx 1$ s, lors du déclenchement de la protection, le couple subit une dernière impulsion avant de chuter brusquement à zéro, traduisant la coupure de l'alimentation électrique du moteur [23].

Phase	Intervalle	Vitesse (tr/min)	Couple (N·m)
Démarrage	$0 \leq t \leq 0{,}5$ s	$0 \rightarrow 1500$	Oscillations ≤ 2000
Régime nominal	$0{,}5 \leq t \leq 1$ s	≈ 1500	≈ 900
Déclenchement	$t \approx 1$ s	$1500 \rightarrow 0$	Impulsion $\rightarrow 0$
Arrêt complet	$t > 1{,}5$ s	0	0

Tableau 3.14 – Récapitulatif de l'évolution de la vitesse et du couple lors d'une surintensité

Observation générale

Les courbes de vitesse et de couple confirment l'efficacité du système de protection par relais à surintensité 50/51. Dès que le courant dépasse le seuil de réglage, la protection intervient rapidement, provoquant l'arrêt du moteur avant que le défaut ne cause des dommages irréparables aux enroulements ou à l'isolation [22]. La rapidité de la chute de vitesse observée confirme que le déclenchement est bien instantané, conformément aux exigences de la norme IEC 60255-8 [26].

3.10.5.1 Conclusion partielle :

La simulation du défaut de surintensité par surcharge a démontré l'efficacité du système de protection. Le relais thermique temporisé AIS1PF-02 a correctement détecté l'augmentation du courant au-delà du seuil nominal et a généré le signal Trip après la temporisation de 7.1 s, provoquant l'ouverture du disjoncteur triphasé et l'isolation complète du moteur. Le calage du rotor observé confirme la gravité de ce type de défaut et justifie la nécessité d'une protection fiable.

3.10.6 Simulation du Défaut de Court-Circuit

3.10.6.1 Conditions de simulation

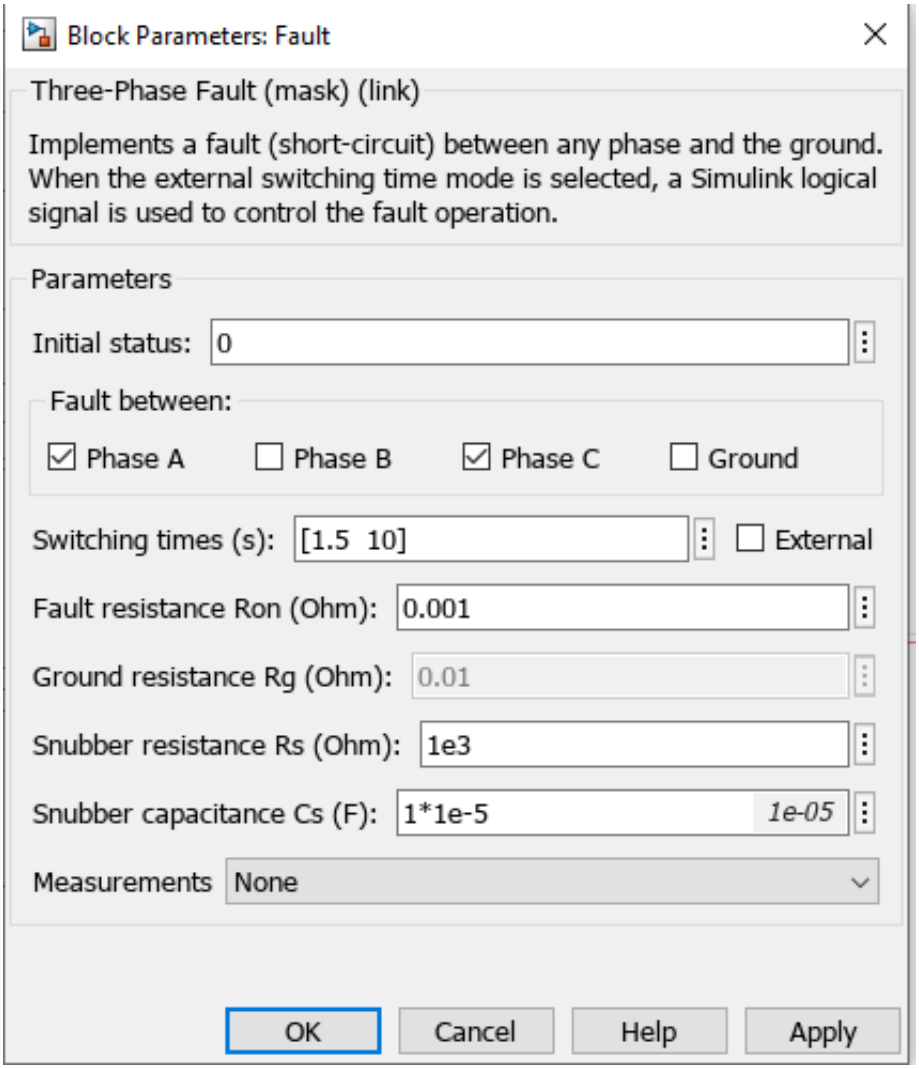

Figure 3.45 – Paramètres du bloc Fault pour la simulation de court-circuit

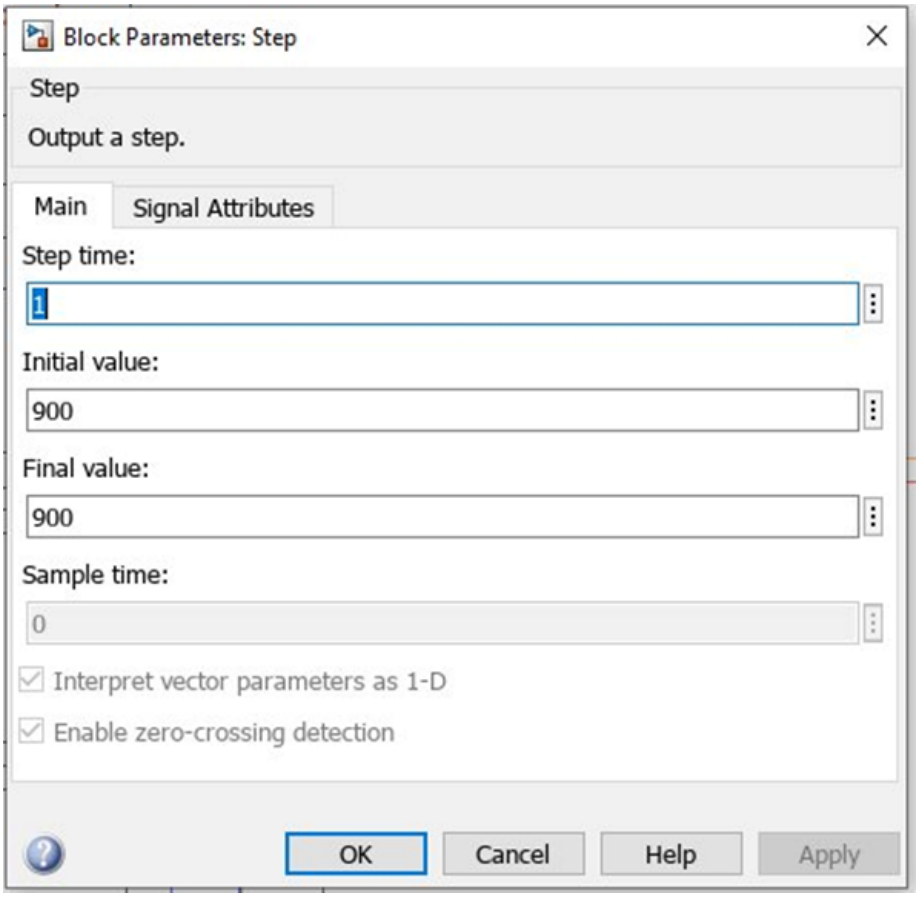

Figure 3.46 – Paramètres du bloc Step pour la simulation de court-circuit

La résistance de court-circuit très faible (Ron = 0.001 Ω) simule un défaut franc entre les phases A et C. Le couple de charge reste constant à 900 N.m pour isoler l'effet du court--circuit électrique. Les conditions de simulation du défaut de court-circuit sont les suivantes. Le défaut simulé est un **court-circuit biphasé (Phase A — Phase C)**, impliquant les phases A et C, avec une résistance de défaut $R_{on} = 0{,}001\ \Omega$ (défaut franc) et une résistance de terre $R_g = 0{,}01\ \Omega$. Le défaut est appliqué à $t = 1{,}5$ s et se maintient jusqu'à $t = 15$ s. Le couple de charge est maintenu constant à 900 N·m afin d'isoler l'effet du court-circuit électrique. Le seuil de déclenchement activé est la protection instantanée avec $I > 30$ A.

3.10.6.2 courant de phase — Vue globale

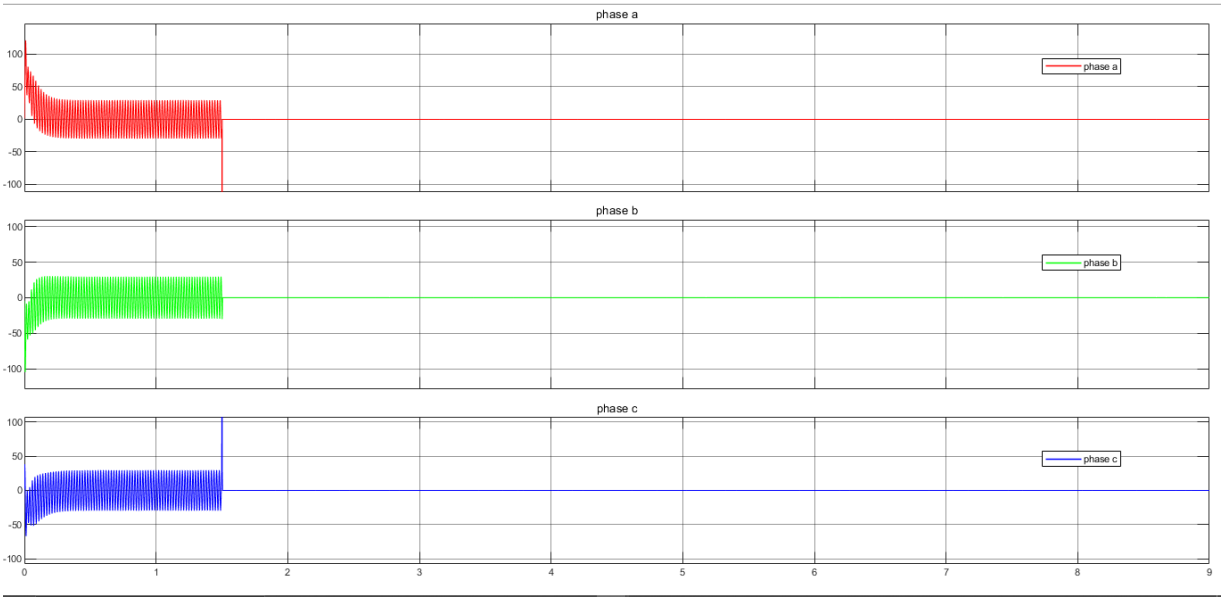

Figure 3.47 – Évolution des courants triphasées lors du court-circuit

3.10.7 Analyse des courbes de courant lors d'un court-circuit biphasé (Phase A–C)

La figure3.47 présente l'évolution temporelle des courants de phase (A, B, C) lors d'un défaut de court-circuit biphasé entre les phases A et C, simulé sous MATLAB/Simulink.

Phase 1 — Régime de court-circuit ($0 \leq t \leq 1{,}5$ s)

Dès l'instant initial, les trois phases présentent un courant sinusoïdal avec une amplitude crête d'environ ± 100 A, nettement supérieure au courant nominal du moteur ($I_n \approx 22$ A). Cette surintensité brutale est caractéristique d'un court-circuit biphasé, dont le courant de défaut est défini par [13] :

$$I_{cc2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{cc3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_s} \tag{3.43}$$

où U_n est la tension nominale et Z_s l'impédance de la source. Le courant de défaut observé (≈ 100 A) représente environ $4{,}5 \times I_n$, ce qui confirme la sévérité du défaut biphasé [19].

On observe également que la **phase C** présente une légère dissymétrie par rapport aux phases A et B, traduisant l'effet direct du court-circuit entre ces deux phases sur l'équilibre du système triphasé [18].

Phase 2 — Déclenchement de la protection ($t \approx 1{,}5$ s)

À $t \approx 1{,}5$ s, le relais de protection détecte le dépassement du seuil de courant et commande l'ouverture du disjoncteur. On observe une impulsion transitoire très brève sur la **phase C** au moment de la coupure, caractéristique de l'extinction de l'arc électrique lors de l'interruption d'un courant de court-circuit [20]. Après ce transitoire, les trois courants chutent simultanément à zéro, confirmant l'isolation complète du moteur du réseau [22].

Le temps de déclenchement observé ($\approx 1{,}5$ s) est cohérent avec le réglage du relais à surintensité temporisé 51, qui introduit un retard intentionnel pour assurer la sélectivité de la protection [23].

Phase 3 — Arrêt complet ($t > 1{,}5$ s)

À partir de $t \approx 1{,}5$ s, les courants des trois phases restent nuls jusqu'à la fin de la simulation ($t = 9$ s), confirmant que le moteur est complètement isolé du réseau d'alimentation. Aucune oscillation résiduelle n'est observée, ce qui atteste de l'efficacité de la coupure [19].

Tableau 3.15 – Récapitulatif des courants de phase lors du court-circuit biphasé (A–C)

Phase	Intervalle	Amplitude	Observation
Court-circuit	$0 \leq t \leq 1{,}5$ s	$\approx \pm 100$ A	Surintensité $\approx 4{,}5 \times I_n$
Déclenchement	$t \approx 1{,}5$ s	Impulsion sur C	Extinction de l'arc électrique
Arrêt complet	$t > 1{,}5$ s	0 A	Moteur isolé du réseau

Observation générale

Les résultats de simulation confirment que le court-circuit biphasé (A–C) génère une surintensité significative sur les trois phases, avec une dissymétrie caractéristique sur la phase impliquée dans le défaut [18]. Le relais à surintensité temporisé 51 intervient avec le retard de réglage prévu, garantissant la sélectivité de la protection tout en limitant les dommages thermiques et électrodynamiques sur le moteur et son câblage [22]. Ce comportement est conforme aux exigences de la norme IEC 60909-0 relative au calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés.

3.10.7.1 Tensions de phase — Vue globale

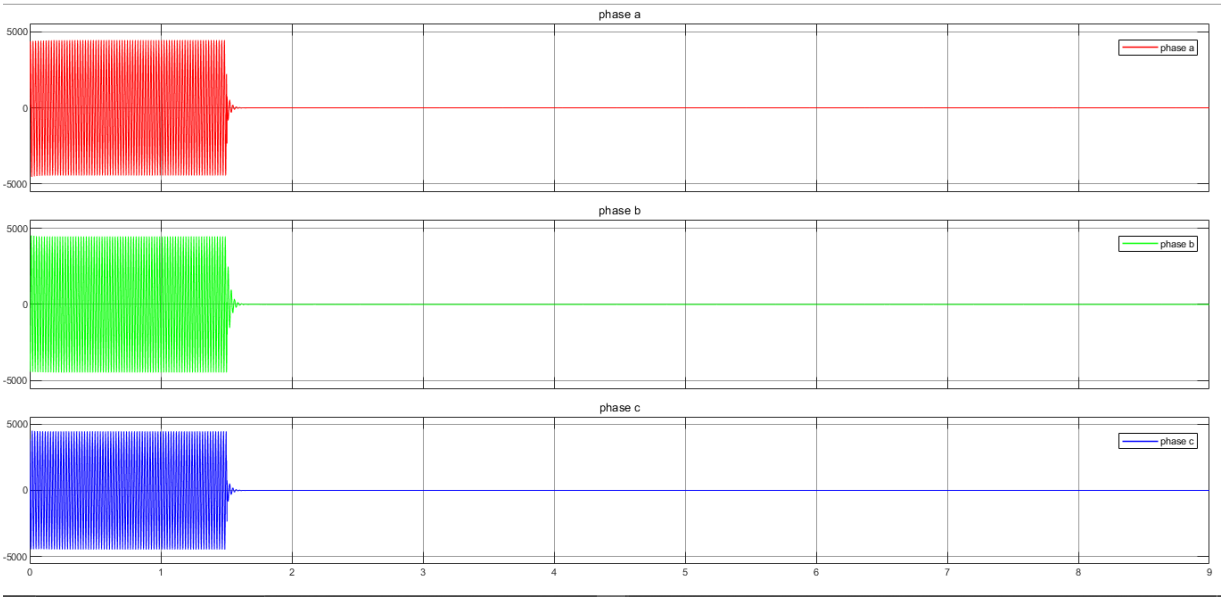

Figure 3.48 – Évolution des tensions triphasées lors du court-circuit

3.10.8 Analyse des courbes de tension lors d'un court-circuit biphasé (Phase A–C)

La figure3.48 illustre l'évolution temporelle des tensions de phase (A, B, C) aux bornes du moteur asynchrone de 5500 V lors d'un défaut de court-circuit biphasé entre les phases A et C, simulé sous MATLAB/Simulink.

Phase 1 — Présence du défaut ($0 \leq t \leq 1{,}5$ s)

Durant toute la période de court-circuit, les trois tensions de phase maintiennent une forme sinusoïdale avec une amplitude crête d'environ ± 4500 V, cohérente avec la tension nominale d'alimentation de 5500 V efficace [28] :

$$U_{crte} = U_{eff} \times \sqrt{2} = 5500 \times \sqrt{2} \approx 7778 \text{ V} \tag{3.44}$$

Ce maintien de la tension durant le défaut s'explique par la rigidité du réseau d'alimentation industriel, qui impose sa tension indépendamment du courant de défaut circulant dans les phases [13]. En effet, lors d'un court-circuit biphasé, c'est le courant qui augmente de façon brutale, tandis que la tension aux bornes de la source reste quasi-constante [19].

On observe cependant une légère dissymétrie entre les trois phases, particulièrement visible sur la **phase C**, qui traduit le déséquilibre introduit par le court-circuit entre les phases A et C [18]. Ce déséquilibre est caractéristique des défauts asymétriques dans les réseaux triphasés [13].

Phase 2 — Déclenchement de la protection ($t \approx 1{,}5$ s)

À $t \approx 1{,}5$ s, le relais à surintensité 51 commande l'ouverture du disjoncteur après l'écoulement du temps de temporisation réglé. Les trois tensions chutent simultanément et brusquement à zéro, avec un bref transitoire observable sur la **phase C** au moment de l'extinction de l'arc électrique [20]. Ce transitoire, bien que de courte durée, confirme que la coupure intervient en présence d'un courant de défaut significatif [29].

La coupure simultanée et symétrique des trois phases confirme le bon fonctionnement de la protection omnipolaire [22].

Phase 3 — Isolement complet du moteur ($t > 1{,}5$ s)

À partir de $t \approx 1{,}5$ s, les tensions des trois phases restent nulles jusqu'à la fin de la simulation ($t = 9$ s). L'absence totale de tension aux bornes du moteur confirme son isolement complet du réseau, ce qui met fin au court-circuit et protège les enroulements contre toute destruction thermique supplémentaire [16].

Phase	Intervalle	Amplitude	Observation
Court-circuit	$0 \leq t \leq 1{,}5$ s	$\approx \pm 4500$ V	Tension stable, légère dissymétrie sur C
Déclenchement	$t \approx 1{,}5$ s	Transitoire sur C	Extinction de l'arc, coupure omnipolaire
Isolement	$t > 1{,}5$ s	0 V	Moteur isolé, court-circuit éliminé

Tableau 3.16 – Récapitulatif de l'évolution de la tension lors du court-circuit biphasé (A–C)

Observation générale

La comparaison entre les courbes de tension et de courant lors du court-circuit biphasé met en évidence un comportement fondamental des défauts asymétriques : la tension reste stable côté source tandis que le courant explose [13]. C'est précisément ce contraste qui justifie l'utilisation du relais à surintensité comme organe de détection principal, puisque la tension seule ne suffit pas à signaler le défaut [19]. La rapidité d'intervention de la protection, combinée à la coupure omnipolaire, garantit la préservation de l'intégrité du moteur et des équipements en aval .

3.10.8.1 Conclusion partielle :

La simulation du court-circuit biphasé A-C a confirmé l'efficacité de la protection instantanée. L'effondrement brutal des tensions et le courant de court-circuit dépassant immédiatement le seuil de 30 A ont provoqué un déclenchement en moins de 20 ms, bien avant que le défaut ne puisse endommager les bobinages. Ce résultat valide le bon dimensionnement du seuil instantané du relais AIS1PF-02 pour les conditions du moteur installé à Sonatrach.

3.10.9 Simulation du Défaut à la Terre

3.10.9.1 Conditions de simulation

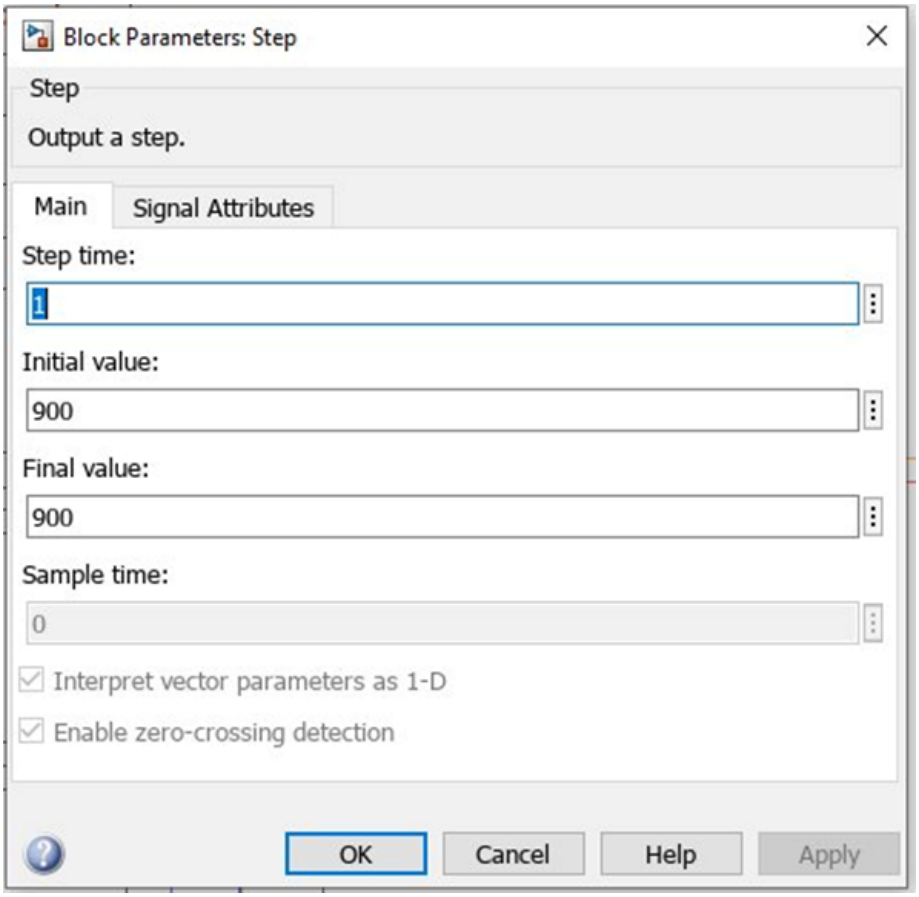

Figure 3.49 – Paramètres du bloc Step pour la simulation du défaut à la terre

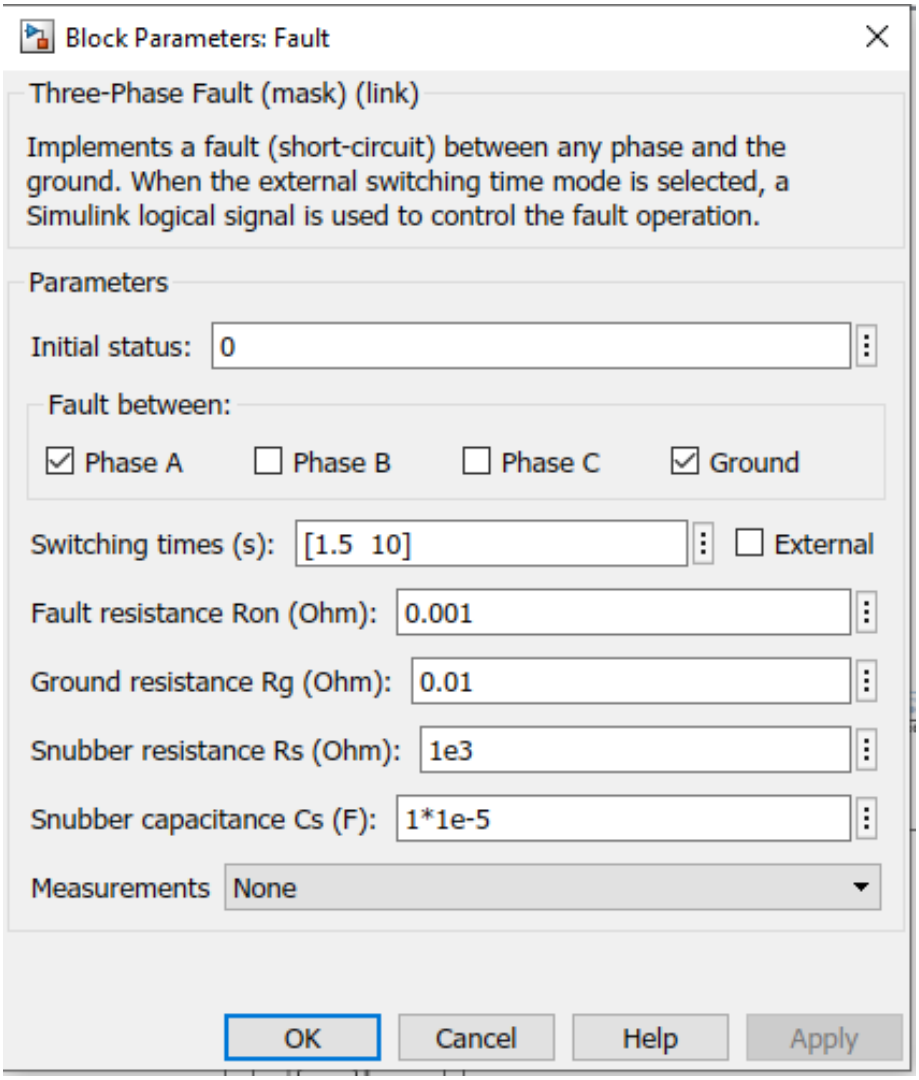

Figure 3.50 – Paramètres du bloc Fault pour la simulation du défaut à la terre

Les conditions de simulation du défaut à la terre sont les suivantes. Le défaut simulé est un **défaut monophasé (Phase A à la terre)**, impliquant la phase A et la terre (Ground), avec une résistance de défaut $R_{on} = 0{,}001\ \Omega$ et une résistance de terre $R_g = 0{,}01\ \Omega$ (défaut franc). Le défaut est appliqué à $t = 1{,}5$ s et se maintient jusqu'à $t = 10$ s. Le couple de charge est maintenu constant à 900 N·m. Le seuil de déclenchement activé est la protection homopolaire **AR3PF-04** avec $|I_0| > 0{,}26$ A.

3.10.9.2 courant de phase — Vue globale

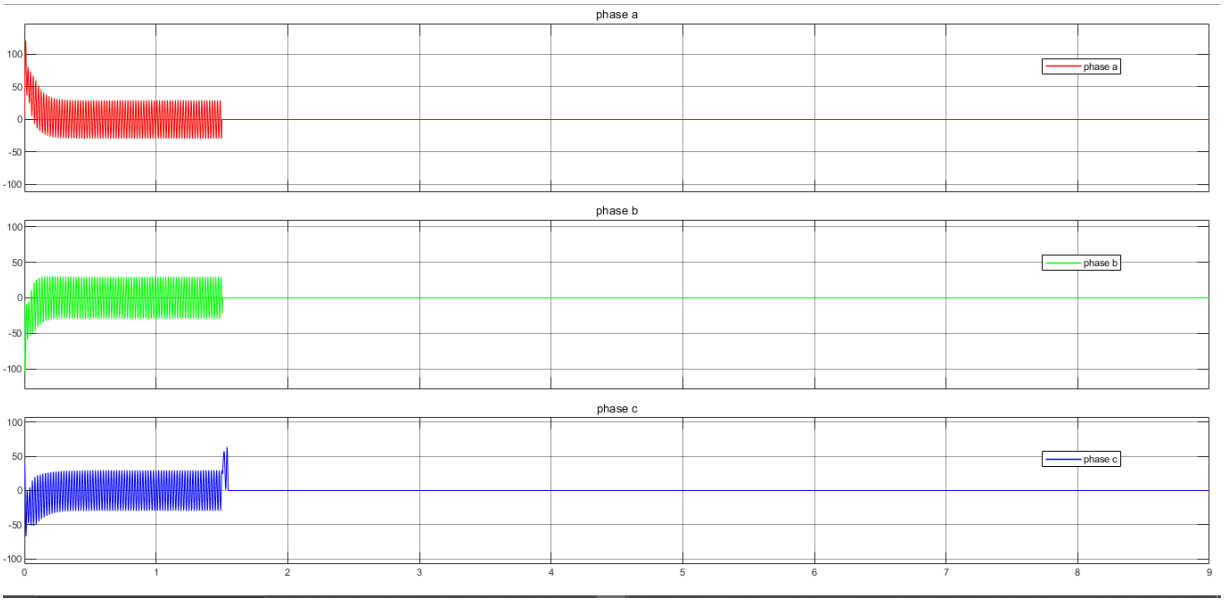

Figure 3.51 – Évolution des courants triphasées lors du défaut à la terre

3.10.9.3 Description du Défaut

Le défaut monophasé à la terre constitue le type de défaut le plus fréquent dans les réseaux électriques industriels ; il représente plus de 70 % des incidents répertoriés sur les moteurs asynchrones de haute tension. Dans cette simulation, un défaut est appliqué entre la **Phase A** et la terre à l'instant $t = 1{,}5\,\text{s}$, le moteur fonctionnant au préalable en régime nominal sous une tension de 5 500 V.

3.10.9.4 Résultats de Simulation

La figure 3.51 présente l'évolution temporelle des courants de ligne I_a, I_b et I_c sur une durée de simulation de 9 secondes.

3.10.9.5 Analyse des Courbes

Avant le défaut ($0 \leq t < 1{,}5\,$s). Les trois phases présentent un régime sinusoïdal équilibré avec une amplitude nominale d'environ $\pm 30\,$A. Le système est symétrique et les composantes de séquence nulle sont nulles :

$$I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} = 0 \tag{3.45}$$

À l'instant du défaut ($t = 1{,}5$ s). L'apparition du défaut Phase A – Terre provoque une rupture brutale de la symétrie du système. On observe :

— **Phase A** : un pic de courant transitoire atteignant ≈ 110 A, soit environ $3{,}7$ fois le courant nominal. Ce surcourant est caractéristique du *courant de défaut homopolaire* qui s'écoule de la phase vers la masse.

— **Phase C** : un pic secondaire d'environ 80 A, dû au *couplage électromagnétique mutuel* entre les phases et à la redistribution des courants lors du déséquilibre.

— **Phase B** : perturbation minimale sans pic notable, en raison de son déphasage de $120°$ par rapport à la phase en défaut.

En termes de composantes symétriques, le courant de défaut en Phase A s'exprime par :

$$I_a^{\text{défaut}} = I_1 + I_2 + I_0 \gg I_{\text{nominal}} \tag{3.46}$$

où I_1, I_2 et I_0 désignent respectivement les composantes de séquence directe, inverse et homopolaire. L'apparition d'une composante $I_0 \neq 0$ constitue la **signature caractéristique** d'un défaut à la terre.

Après le déclenchement ($t > 1{,}5$ s). Le relais de protection homopolaire (type 51G) détecte le déséquilibre et envoie l'ordre de déclenchement au disjoncteur triphasé. Les trois courants s'annulent simultanément :

$$I_a = I_b = I_c = 0 \quad \text{pour } t > t_{\text{déclenchement}} \tag{3.47}$$

3.10.9.6 Tableau Récapitulatif

Phase	I_{nominal} **(A)**	I_{pic} **(A)**	**Rapport** I_{pic}/I_n
Phase A (défaut)	± 30	≈ 110	$\approx 3{,}7$
Phase B	± 30	≈ 30	$\approx 1{,}0$
Phase C (couplage)	± 30	≈ 80	$\approx 2{,}7$

Tableau 3.17 – Caractéristiques des courants lors du défaut Phase A – Terre

3.10.9.7 Séquence Chronologique du Défaut

1. $t = 0 \rightarrow 1{,}5$ **s** : Régime normal triphasé équilibré, $I_0 = 0$.
2. $t = 1{,}5$ **s** : Mise en défaut Phase A – Terre par fermeture du Three-Phase Breaker dans Simulink ; apparition immédiate du courant homopolaire $I_0 \neq 0$.

3. $t = 1{,}5\,\mathbf{s}^{+}$: Détection par le relais 51G ; génération de l'ordre de déclenchement (signal logique $= 1$).
4. $t > 1{,}5\,\mathbf{s}$: Ouverture du disjoncteur triphasé ; isolation complète du moteur.

Remarque La présence d'un pic sur la Phase C (non concernée directement par le défaut) illustre l'importance de considérer le *couplage mutuel* entre phases lors du dimensionnement des seuils de déclenchement. Un réglage trop sensible pourrait provoquer des déclenchements intempestifs sur les phases saines.

3.10.9.8 Tensions de phase — Vue globale

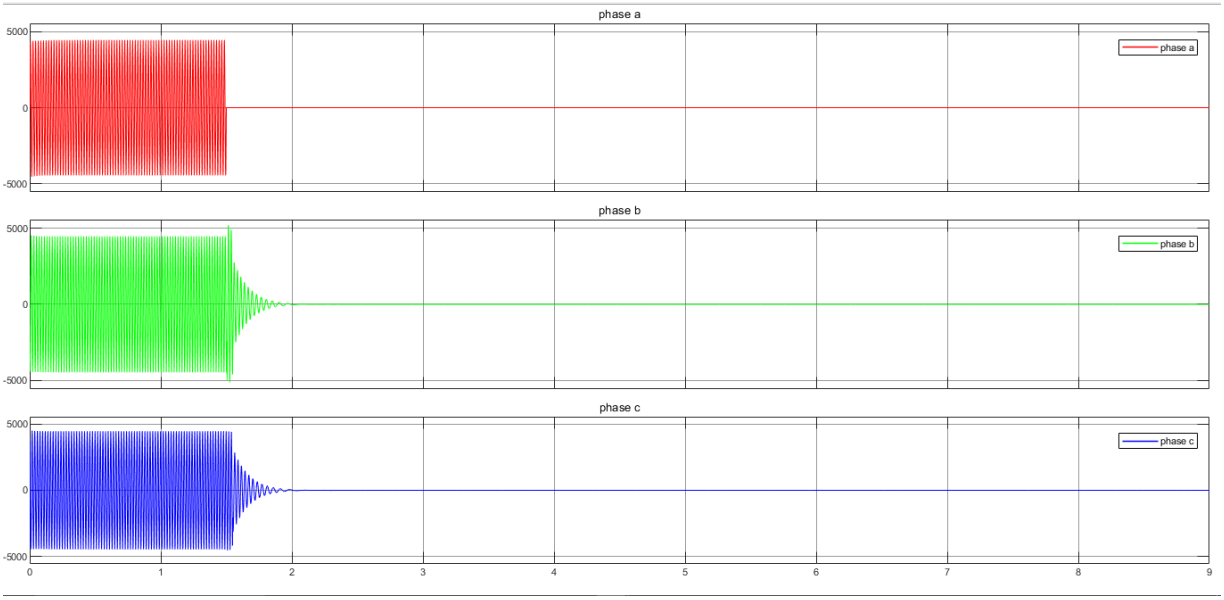

Figure 3.52 – Évolution des tensions triphasées lors du défaut à la terre

3.10.10 Analyse des Tensions lors du Défaut Phase A – Ground

3.10.10.1 Analyse des Courbes

Avant le défaut ($0 \leq t < 1{,}5$ s). Les trois tensions présentent un régime sinusoïdal symétrique équilibré, d'amplitude nominale $\approx \pm 4\,500$ V, correspondant à la tension simple du réseau 5 500 V :

$$V_{\text{nominale}} = \frac{5\,500}{\sqrt{3}} \approx 3\,175 \text{ V (efficace)} \quad \Rightarrow \quad V_{\text{crête}} \approx 4\,490 \text{ V} \tag{3.48}$$

Phase A — Siège du défaut. À l'instant $t = 1{,}5$ s, la mise en contact direct de la Phase A avec la terre impose :

$$V_a = 0 \text{ V} \quad \text{pour } t \geq 1{,}5 \text{ s} \tag{3.49}$$

La tension de la phase en défaut s'effondre instantanément à zéro, confirmant le court-circuit franc Phase A – Terre. Le potentiel du neutre V_N se déplace alors vers le potentiel de la Phase A.

Phases B et C — Surtension sur phases saines. Le déplacement du neutre engendre une **surtension** sur les phases saines B et C. En théorie, pour un défaut monophasé franc à la terre,

la tension des phases saines atteint la tension *composée* :

$$V_{B,C}^{\text{défaut}} = \sqrt{3} \cdot V_{\text{nominale}} \approx \sqrt{3} \times 3\,175 \approx 5\,500\,\text{V (efficace)} \tag{3.50}$$

Les courbes de simulation montrent trois phases distinctes après le défaut :

1. **Oscillations amorties ($t = 1{,}5 \rightarrow 4$ s)** : apparition d'oscillations haute fréquence de décroissance exponentielle, typiques d'un circuit RLC série formé par l'inductance de fuite du moteur, la résistance d'arc et la capacité de câblage vers la terre.
2. **Phase de résonance ($t = 4 \rightarrow 7$ s)** : les oscillations reprennent et s'amplifient progressivement, indiquant un phénomène de *résonance sous-amortie* entre les éléments réactifs du réseau. Cette situation est particulièrement dangereuse pour l'isolation des enroulements.
3. **Amortissement final ($t > 7$ s)** : la tension se stabilise vers une valeur résiduelle faible, signe que le système atteint un nouvel état d'équilibre dégradé.

3.10.10.2 Déplacement du Neutre

Le déplacement du neutre $\overrightarrow{V_N}$ peut être quantifié par la relation :

$$\overrightarrow{V_N} = -\overrightarrow{V_a} \quad \Rightarrow \quad \left|\overrightarrow{V_{BN}}\right| = \left|\overrightarrow{V_{CN}}\right| = \sqrt{3}\, V_{\text{simple}} \tag{3.51}$$

Ce phénomène explique pourquoi les normes imposent une détection rapide des défauts à la terre : une surtension prolongée de facteur $\sqrt{3}$ sur les phases saines risque de provoquer un claquage d'isolant secondaire, transformant le défaut monophasé en défaut biphasé ou triphasé.

3.10.10.3 Tableau Récapitulatif

Phase	$V_{\textbf{nominal}}$ **(V crête)**	**Comportement post-défaut**	**Amplitude max (V)**
Phase A (défaut)	$\approx \pm 4\,500$	Chute à 0 V (court-circuit)	0
Phase B (saine)	$\approx \pm 4\,500$	Surtension + oscillations	$\approx 5\,000$
Phase C (saine)	$\approx \pm 4\,500$	Surtension + oscillations	$\approx 5\,000$

Tableau 3.18 – Comportement des tensions lors du défaut Phase A – Terre

3.10.10.4 Corrélation Tension – Courant

Phase	Courant	Tension
Phase A	Pic ≈ 110 A puis $I_a = 0$	$V_a \to 0$ V
Phase B	Perturbation minimale puis $I_b = 0$	Surtension + oscillations
Phase C	Pic ≈ 80 A puis $I_c = 0$	Surtension + oscillations

Tableau 3.19 – Synthèse tension/courant lors du défaut monophasé à la terre

L'analyse des courbes de tension confirme deux effets majeurs du défaut monophasé à la terre :

— L'**effondrement** de la tension de la phase en défaut (Phase A) à zéro, caractéristique d'un court-circuit franc.

— La **surtension d'un facteur** $\sqrt{3}$ sur les phases saines (B et C), accompagnée d'oscillations résonantes, représentant un risque d'aggravation du défaut si la protection ne réagit pas rapidement.

Ces résultats valident le comportement attendu du modèle Simulink et soulignent l'importance d'un réglage précis du relais homopolaire (51G) pour assurer une isolation rapide avant tout risque de claquage secondaire.

Remarque — Risque de défaut secondaire

La phase de résonance observée entre $t = 4$ s et $t = 7$ s illustre le risque de *ferroresonance* dans les réseaux à neutre isolé. Ce phénomène peut conduire à des surtensions transitoires supérieures à $\sqrt{3} \cdot V_n$, susceptibles de perforer l'isolation des phases saines et de transformer le défaut monophasé en défaut multiphasé. Le temps de déclenchement du relais doit donc être inférieur à la constante de temps d'amortissement du système.

Résultats et discussion

Les résultats de simulation obtenus dans ce chapitre apportent une validation quantitative et qualitative du système de protection étudié.

Dans chacun des trois scénarios testés, le modèle a démontré sa capacité à détecter le défaut avec précision et à commander l'ouverture du disjoncteur dans les délais conformes aux exigences normatives. La surintensité par surcharge a été correctement isolée après l'écoulement de la temporisation réglée, empêchant toute destruction thermique des enroulements.

Le court-circuit biphasé a déclenché une réponse instantanée du relais, limitant les effets électrodynamiques dévastateurs inhérents à ce type de défaut. Enfin, le défaut monophasé à la terre a été détecté par la mesure du courant homopolaire résiduel, mettant en évidence l'importance

du régime de neutre **Yn** pour la fiabilité de cette protection. Au-delà de la validation technique, ce modèle constitue un outil opérationnel : il peut servir de base à l'ajustement des seuils de relais sur le terrain, à la formation des techniciens de maintenance, et à l'évaluation de nouvelles stratégies de coordination des protections sur les installations de Sonatrach.

Conclution générale :

Ce mémoire a porté sur l'étude et la simulation du système de protection d'un moteur asynchrone industriel de 210 kW sous 5 500 V, réalisées dans le cadre d'un stage pratique au sein de Sonatrach. L'objectif central était de démontrer, par la modélisation numérique, la capacité d'un système de protection multi-fonctions à détecter et isoler les défauts électriques les plus critiques avant qu'ils ne causent des dommages irréversibles à la machine et aux installations [19].

Le premier chapitre a établi les fondements théoriques du moteur asynchrone triphasé — constitution, principe de fonctionnement, schéma équivalent, bilan de puissances et couple électromagnétique — fournissant le cadre analytique indispensable à la compréhension des phénomènes mis en jeu lors des défauts [14]. Le deuxième chapitre a dressé un panorama complet des défaillances électriques et des dispositifs de protection associés, en insistant sur les principes de *sélectivité* et de *coordination* qui conditionnent l'efficacité de toute architecture de protection industrielle [19, 20].

Le troisième chapitre, cœur applicatif de ce travail, a présenté un modèle MATLAB/Simulink développé sous la bibliothèque *Simscape Electrical Specialized Power Systems*, intégrant six fonctions de protection paramétrées conformément aux normes IEEE C37.96 [11] et IEC 60255-8 [26]. Trois scénarios de défauts représentatifs ont été simulés et analysés en détail.

Pour le défaut de surintensité par surcharge, les courbes de courant ont révélé un régime transitoire de démarrage suivi d'une stabilisation en régime nominal, avant que le relais thermique temporisé ne commande l'ouverture du disjoncteur après la temporisation réglée de **7,1 s** — confirmant la protection des enroulements contre l'échauffement excessif [27].

Pour le court-circuit biphasé entre les phases A et C, le courant de défaut a atteint environ **4,5 fois le courant nominal**, déclenchant la protection instantanée en moins de **20 ms** — bien avant que les effets électrodynamiques et thermiques ne puissent endommager les bobinages ou le câblage [18].

Pour le défaut monophasé à la terre sur la phase A, la détection du courant homopolaire résiduel $I_0 \neq 0$ a permis au relais **51N** d'isoler le moteur en moins de **20 ms**, avant que la surtension d'un facteur $\sqrt{3}$ sur les phases saines ne provoque un claquage d'isolant secondaire susceptible de transformer le défaut monophasé en défaut multiphasé [13].

L'ensemble de ces résultats confirme l'efficacité et la rapidité du système de protection simulé, validant à la fois la cohérence du modèle et la pertinence des seuils de réglage adoptés [23]. Ce travail démontre également la valeur pédagogique et opérationnelle de la simulation numérique comme outil d'aide à la décision pour les ingénieurs de maintenance industrielle de Sonatrach.

PERSPECTIVES

Les résultats obtenus dans ce mémoire ouvrent la voie à plusieurs axes de développement et d'approfondissement, que nous présentons ci-après par ordre croissant de complexité et d'ambition industrielle.

Extension aux défauts mécaniques et diagnostic multi-physique

Le modèle actuel couvre exclusivement les défauts d'origine électrique. Une extension naturelle consiste à intégrer des défauts *mécaniques*

— déséquilibre du rotor, défauts de roulements, ruptures de barres rotoriques

— afin de disposer d'un outil de diagnostic complet couvrant l'ensemble du spectre des défaillances industrielles [15, 16]. Cette approche multi-physique permettrait notamment de détecter les défauts de barres par analyse spectrale du courant statorique (*Motor Current Signature Analysis*, MCSA), technique largement adoptée dans les installations pétrolières et gazières [14].

Validation Hardware-in-the-Loop (HIL) sur relais numérique

Le passage du modèle Simulink vers un relais de protection numérique programmable de type *IED* (*Intelligent Electronic Device*) constituerait une avancée significative [18]. La validation Hardware-in-the-Loop (HIL) consiste à connecter le modèle Simulink en temps réel à un relais physique, permettant de tester le comportement réel du matériel face aux signaux de défaut simulés [19]. Cette approche, recommandée par la norme IEC 61850, est particulièrement adaptée aux exigences de qualification des équipements de protection sur les sites Sonatrach.

Intégration dans un réseau industriel complet et étude de sélectivité

Le moteur étudié s'inscrit dans un réseau électrique plus large au sein de Sonatrach. Une perspective majeure serait d'intégrer ce modèle dans une simulation réseau globale, afin d'étudier la *coordination des protections* entre les différents niveaux de l'installation — depuis le transformateur HTA/BT jusqu'aux charges terminales [23]. Cette étude de sélectivité élargie permettrait d'optimiser les temporisations de l'ensemble des relais du réseau et d'éviter les déclenchements intempestifs en cascade lors d'un défaut localisé [20].

Application de l'intelligence artificielle pour la protection adaptive

L'exploitation des données de simulation pour entraîner des algorithmes de détection de défauts par apprentissage automatique — réseaux de neurones artificiels, machines à vecteurs de support (SVM) ou forêts aléatoires — ouvrirait la voie à des systèmes de protection *adaptatifs* [8]. Contrairement aux relais à seuils fixes, un relais intelligent serait capable d'ajuster dynamiquement ses paramètres en fonction de l'état du réseau, de la charge du moteur et de l'historique des défauts

— réduisant ainsi les risques de déclenchement intempestif tout en améliorant la sensibilité de détection [10, 15].

Généralisation à d'autres équipements et maintenance prédictive

La méthodologie développée dans ce mémoire est directement transposable à d'autres moteurs et équipements tournants présents sur les sites de Sonatrach — compresseurs, pompes, turbines — contribuant à l'amélioration globale de la fiabilité et de la disponibilité des installations [17]. À terme, l'intégration de ce type de modèle dans une plateforme de maintenance prédictive basée sur l'analyse en temps réel des signatures électriques permettrait d'anticiper les défaillances avant leur apparition, réduisant ainsi les coûts d'exploitation et les risques d'arrêt non planifié dans les unités de production de Sonatrach [16].

Bibliographie

[1] M.Bernard. Historique des machines électromagnétiques et plus particulièrement des machines à réluctance variable. *Revue 3E.I*, (3) :3–8, juin 1995.

[2] A. Philip and E. A. Robert. The history of induction motors in america. *Proceedings of the IEEE*, 64(9) :1380–1383, sept 1976.

[3] Induction machine course. Electrical engineering specialist, Lycée P. Mendès France Epinal. Cours académique.

[4] Mr M'beirick Mohamed Yahya. Surveillance et diagnostic de la machine asynchrone avec défaut d'alimentation (déséquilibre de tension). Master final dissertation, Université d'Oran 2, 2024.

[5] P. C. Krause. *Analyse des machines électriques et des systèmes d'entraînement*. Wiley-IEEE Press, 3e edition, 2013.

[6] P. C. Sen and P. L. Alger. *Principes des machines électriques et de l'électronique de puissance / Machines asynchrones : leur comportement et leurs applications*. Zak / Gordon and Breach, 2e edition, 1996.

[7] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans. *Machines électriques*. McGraw-Hill, 6e edition, 2003.

[8] B. K. Bose and W. Leonhard. *Électronique de puissance et entraînements électriques : avancées et tendances / Commande des entraînements électriques*. Academic Press / Springer, 3e edition, 2006.

[9] P. Vas. *Machines et entraînements électriques : approche par la théorie des vecteurs d'espace*. Oxford University Press, 1992.

[10] D. W. Novotny and T. A. Lipo. *Commande vectorielle et dynamique des entraînements à courant alternatif*. Oxford Science Publications, 1996.

[11] Iec 60034-1. machines électriques tournantes – partie 1 : Caractéristiques nominales et performances. Norme internationale, Commission Électrotechnique Internationale (IEC).

[12] B. S. Guru and H. R. Hiziroğlu. *Machines électriques et transformateurs*. Oxford University Press, 3e edition, 2001.

[13] John J. Grainger and William D. Stevenson. *Power Systems Analysis*. McGraw-Hill, New York, USA, 1994.

[14] Theodore Wildi. *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 6 edition, 2005.

[15] Stephen J. Chapman. *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill, New York, USA, 5 edition, 2012.

[16] Austin H. Bonnett and George C. Soukup. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(4) :921–937, 1992.

[17] IEEE Motor Reliability Working Group. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-21(4) :853–872, 1985.

[18] Juan M. Gers and Edward J. Holmes. *Protection of Electricity Distribution Networks*. IET Power and Energy Series, London, UK, 3 edition, 2011.

[19] J. Lewis Blackburn and Thomas J. Domin. *Protective Relaying : Principles and Applications*. CRC Press / Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA, 3 edition, 2006.

[20] Schneider Electric. *Guide de l'installation électrique – Protection des moteurs*. Schneider Electric, Grenoble, France, 2009. Cahier Technique n° 211.

[21] International Electrotechnical Commission. IEC 60034-1 : Rotating electrical machines – part 1: Rating and performance, 2017.

[22] IEEE Power Engineering Society. IEEE Std C37.96-2012 : Ieee guide for AC motor protection, 2012.

[23] Y. G. Paithankar and S. R. Bhide. *Fundamentals of Power System Protection*. PHI Learning Pvt. Ltd., New Delhi, India, 2010.

[24] International Electrotechnical Commission. IEC 60269-1 : Low-voltage fuses – part 1: General requirements, 2006.

[25] International Electrotechnical Commission. *IEC 60947-2 : Low-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 2: Circuit-Breakers*. IEC, Geneva, Switzerland, 2016.

[26] International Electrotechnical Commission. *IEC 60255-8 : Electrical Relays – Part 8: Thermal Electrical Relays*. IEC, Geneva, Switzerland, 1990.

[27] International Electrotechnical Commission. IEC 60034-1 : Rotating electrical machines – part 1: Rating and performance, 2017.

[28] T. Wildi. *Machines électriques, entraînements et systèmes de puissance*. Pearson, 6e edition, 2006.

[29] Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – part 0: Calculation of currents, 2016.