

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Relizane

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département :Electrotechnique & Automatique



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Electrotechnique industrielle

Intitulé

Analyse du danger d'éclair d'arc et la coordination des dispositifs
de protection sur un réseau électrique

Présenté par :

Melle HALIMI Djihane

Melle SALAHE Nessrine

Devant les membres de jury :

Président : Mr BELABBES ADDA

Maître de conférences (B) (U. Relizane)

Encadrant : Mr AIT SAID HAKIM

Maître de conférences (A) (U. Relizane)

Examineur : Mr KHODJA MOHAMED

Professeur (U. Relizane)

Année universitaire : 2024/2025

ملخص

يُعد تقييم مخاطر القوس الكهربائي جزءاً من تحليل كهربائي شامل تقتضيه اللوائح. يُحدد هذا التقييم طاقة الحادثة التي قد يتعرض لها العامل، وكيفية حمايته من الحرارة والضوء والانفجارات المرتبطة بحادث القوس الكهربائي. يُجرى تقييم مخاطر القوس الكهربائي بهدف: تحديد الأجهزة الكهربائية المُحمّلة بشكل زائد، وتحديد معدات الوقاية الشخصية المناسبة لحماية العامل، وضمان الامتثال الكامل لقوانين ومعايير القوس الكهربائي، وتسهيل ظروف العمل، وتحديد ضعف تنسيق أجهزة الحماية من التيار الزائد. يتضمن التنسيق بين أجهزة الحماية من التيار الزائد تنسيق خصائص أجهزة الحماية المتعددة الموضوعة على التوالي لتحقيق هدفين مختلفين.

كلمات مفتاحية: القوس الكهربائي، الطاقة الساقطة، الأجهزة الكهربائية، معدات الحماية سلامة التركيبات الكهربائية.

Résumé

L'évaluation du risque d'arc électrique fait partie d'une analyse électrique complète exigée par les réglementations. Elle détermine l'énergie incidente à laquelle un travailleur peut être exposé et la manière de le protéger contre la chaleur, la lumière et le souffle associés à un accident d'arc électrique. Une évaluation du risque d'arc électrique est effectuée pour :

Déterminer les dispositifs électriques en surcharge, déterminer l'équipement de protection individuelle (EPI) approprié pour protéger le travailleur, garantir la conformité totale avec les codes et les normes relatifs à l'arc électrique, faciliter les conditions de travail et déterminer la mauvaise coordination des dispositifs de protection contre les surintensités. La coordination entre les dispositifs de protection contre les surintensités consiste à coordonner les caractéristiques de plusieurs dispositifs de protection placés en série avec deux objectifs distincts.

Mots clés : Arc électrique, Energie incidente, Dispositifs électriques, Equipement de protection .

Abstract

An arc flash hazard assessment is part of a comprehensive electrical analysis required by regulations. It determines the incident energy to which a worker may be exposed and how to protect them from the heat, light, and blast associated with an arc flash accident. An arc flash hazard assessment is performed to: Identify overloaded electrical devices, determine the appropriate personal protective equipment (PPE) to protect the worker, ensure full compliance with arc flash codes and standards, facilitate working conditions, and identify poor coordination of overcurrent protective devices. Coordination between overcurrent protective devices involves coordinating the characteristics of multiple protective devices placed in series with two distinct objectives.

Keywords : Electric arc, Incident energy, Electrical devices, Protective equipment, CYME simulation, Safety of electrical installations.

Remerciements

Al Hamdou-li-Allah, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé le privilège et la chance de poursuivre la voie du savoir et de la science.

La réalisation de cette thèse a été rendue possible grâce aux précieuses contributions de nombreuses personnes, à qui nous exprimons notre sincère gratitude.

Nous tenons tout d'abord à exprimer nos plus sincères remerciements à notre directeur de thèse, M. HAKIM AIT SAID. Sa patience, sa disponibilité et ses conseils avisés ont joué un rôle déterminant dans l'élaboration de notre réflexion et la qualité de ce travail.

Nos remerciements vont également aux membres du jury, M. BELABBES ADDA et M. MOHAMED KHODJA, pour avoir aimablement accepté d'évaluer notre travail. Leur présence est indéniablement une plus-value pour nos efforts.

Nous ne pouvons oublier notre famille, nos chers parents et frères et sœurs, dont le soutien indéfectible a été une source constante de motivation. Leurs encouragements et leur amour inconditionnel nous ont permis de surmonter les obstacles et d'atteindre nos objectifs.

Enfin, nous remercions sincèrement nos amis, qui ont été d'un soutien inestimable. Leur présence, leurs encouragements et leur précieuse amitié ont rendu cette aventure si enrichissante.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, nous adressons nos plus sincères remerciements, accompagnés de notre profond respect et de notre gratitude.

Dédicace

Rien n'est plus beau à offrir que le fruit d'un travail dévoué du fond du cœur à ceux que nous aimons et remercions en exprimant notre gratitude et notre reconnaissance tout au long de notre existence.

Ce travail est dédié aux personnes les plus chères à nos cœurs,
nos parents, car c'est grâce à leur soutien que nous avons pu atteindre ce stade.
Nous espérons que ce travail sera à la hauteur de tout ce qu'ils ont pu faire pour nous.

Sans exception, toutes les familles HALIMI, SALAHE et MANSOURI.

À nos mères malades, que Dieu vous bénisse, nous vous aimons.

À nos très chers frères et sœurs, sans oublier toutes les personnes qui nous connaissent de près ou de loin, en particulier nos amies AISSA Younes, LABADIA Fatima, HARIGUI Fatima, DAHMANE Radia, HABCHAOUI Marwa, Asma, LARBAOUI Khadija et BENDIMA Aymen.

À tous nos enseignants de l'Université Ahmad Zabana de Relizane.

Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralité sur les réseaux électrique	
1.1. Introduction	3
1.2. Structure des lignes de réseaux électriques	3
1.3. Définition d'un réseau électrique	4
1.4. Les éléments constitutifs d'un réseau électrique	4
1.4.1. Les générateurs	4
1.4.2. Les lignes électriques	5
1.4.3. Les postes de transformation	5
1.4.4. Les postes d'interconnexion, d'alimentation et de distribution :	6
1.5. Les classifications des tensions du réseau électrique :	6
1.6. Organisation d'un réseau électrique	7
1.7. Les types des réseaux électriques	8
1.7.1. En terme de connexion	8
1.7.1.1. Protection	8
1.7.1.2. Réseaux d'interconnexion et de transport	9
1.7.1.3. Le réseau de répartition	9
1.7.1.4. Réseaux de distribution	9
1.7.1.4.1. Les réseaux de distribution a moyenne tension	9
1.7.1.4.2. Les réseaux de distribution a base tension	10
1.7.2. En terme de tension	10
1.8. Classification suivant la structure topologique	11
1.8.1. Structure radiaux	11
1.8.2. Structure bouclés	13
1.8.3. Structure maillée	13
1.9. Les postes électriques	14
1.9.1. Types de postes	14
1.9.1.1. Les postes à fonction d'interconnexion	15
1.9.1.2. Les postes de transformation	15
1.9.1.3. Les postes mixtes	15
1.9.2. Objectifs des postes électriques	16

1.9.3. Les différents éléments de poste électrique	16
1.10. Conclusion	17

Chapitre II : Étude théorique du danger d'éclair d'arc électrique

2.1. Introduction	18
2.2. Généralité sur l'arc électrique	18
2.3. Historique et principes physiques.....	18
2.4. Causes de l'apparition d'un arc électrique	19
2.4.1. Défaits d'isolement	19
2.4.2. Surtensions et manœuvres	19
2.4.3. Environnement (poussière, humidité)	20
2.4.4. Facteurs humains.....	20
2.5. Conséquences des arcs électriques	20
2.6. Guide IEEE pour la réalisation de calculs de risques d'arc électrique	20
2.6.1 Définition.....	20
2.6.2. Présentation de la norme IEEE 1584	21
2.6.3. Objectifs principaux	21
2.7. Modèle pour le calcul de l'énergie incidente.....	21
2.7.1. Plages de modèles	22
2.7.2. Courant d'arc	22
2.7.3. Énergie incidente.....	23
2.7.4. Méthode Lee	25
2.7.5. Limite de protection contre les éclairs	25
2.7.6. Fusibles limiteurs de courant	26
2.7.6.1. Équations pour les fusibles de classe L de 1 601 A-2 000 A.....	26
2.7.6.2. Équations pour les fusibles de classe L de 1 201 A-1 600 A.....	26
2.7.6.3. Équations pour les fusibles de classe L 801 A-1200 A.....	27
2.7.6.4. Équations pour les fusibles de classe L 601 A-800 A.....	27
2.7.6.5. Équations pour les fusibles de classe RK1 de 401 A-800 A	27
2.7.6.6. Équations pour les fusibles de classe RK1 de 201 A-400 A	28
2.7.6.7. Équations pour les fusibles de classe RK1 101A-200 A	28
2.7.7. Disjoncteurs basse tension.....	29

2.8. Conclusion	31
-----------------------	----

Chapitre III : Coordination des dispositifs de protections

3.1. Introduction.....	32
3.1.1.Constitution.....	32
3.1.2.Types de dispositifs de protection.....	33
3.1.2.1. Les sectionneurs.....	33
3.1.2.2. Interrupteur	34
3.1.2.3. Disjoncteur.....	34
3.1.2.4. Les fusibles	35
3.1.2.1. Relai de protection	35
3.2. Coordination des protections Sélectivité et filiation.....	36
3.2.1.But de la coordination	36
3.2.2.La sélectivité	36
3.2.2.1. Définition.....	36
3.2.2.2. Types de sélectivité	37
3.2.2.2.1. Sélectivité totale.....	37
3.2.2.2.2. Sélectivité partielle.....	37
3.2.2.3. Sélectivité ampérométrique	38
3.2.2.4. Sélectivité chronométrique	40
3.2.2.5. Sélectivité logique.....	42
3.2.2.6. Sélectivité par protection différentielle	44
3.2.2.7. Sélectivité directionnelle	45
3.2.2.8. Sélectivité combinée	46
3.2.2.9. Sélectivité logique + chronométrique	47
3.2.2.10. Sélectivité fusible – disjoncteur	48
3.2.2.11.Vérification de la limité de sélectivité entre deux disjoncteurs C60 /N /H et C60/N/H par les courbe de déclenchement.....	51
3.2.3.Avantage de sélectivité.....	53
3.2.4.Filiation.....	53
3.2.4.1. Définition.....	53
3.2.4.2. Avantages.....	55

3.3. Conclusion	56
-----------------------	----

Chapitre IV : Résultats et interprétations

4.1. Introduction.....	57
4.2. Description générale du schéma.....	57
4.3. Résultats et interprétations	60
4.3.1.L'équipement connecté à ciel ouvert	60
4.3.2.L'équipement connecté à commutateur à haute tension	61
4.3.3.L'équipement connecté à câble.....	62
4.3.4.Les figures	63
4.3.4.1. L'équipement connecté à ciel ouvert.....	63
4.3.4.2. L'équipement connecté à ciel ouvert (la densité de l'énergie (cal /cm ²) en fonction du temps (s)).....	64
4.4. Description complète du schéma électrique.....	67
4.5. Résultats et interprétations	69
4.5.1.L'équipement connecté à ciel ouvert	69
4.5.2.Résultat d'Analyse du danger d'éclair d'arc	70
4.5.3.Les paramètres physiques utilisés pour l'évaluation du risque d'arc électrique sur des circuits fixes en plein air.	71
4.5.4.Les critères de protection contre l'arc électrique dans différents sites à l'aide de dispositifs variés (disjoncteur, fusibles)	73
4.6. Les nœuds N1 N2 N3 N4 :.....	74
4.7. Résultats de la coordination des dispositifs de protection	77
4.7.1.Analyse des dispositifs de protection	78
4.7.2.Une absence de coordination entre les dispositifs F1/CB1 et CB2/F1	81
4.7.3.Coordination des dispositifs de la branche.	82
4.7.4.Rapport de vérification court-circuit	85
4.8. Conclusion	86
Conclusion Générale	86

Figure 1. 1: Les lignes électriques.	4
Figure 1.2: Structure générale des réseaux électriques.	4
Figure 1.3: Les lignes électriques.	5
Figure 1.4: Les postes de transformation.	6
Figure 1.5: Niveaux de tension normalisés.	7
Figure 1.6: Organisation des réseaux électriques.	8
Figure 1.7: Les types de réseau électriques.	10
Figure 1.8: Structure topologique des réseaux électriques.	11
Figure 1.9: Structure radiale des réseaux électrique.	12
Figure 1.10: Schéma de principe d'un réseau radial.	12
Figure 1.11: Structure bouclée des réseaux électrique.	13
Figure 1.12: Structure maillée des réseaux électrique.	13
Figure 1.13: schéma unifilaire de poste de transformation.	15
Figure 1.14: Les différents éléments du poste.	17
Figure 2.1: Arc électrique contrôlé.	19
Figure 2. 2: Caractéristique temps-courant typique d'un disjoncteur.	31
Figure 3. 1 : Constitution d'un système de protection.	32
Figure 3. 2 : Les sectionneurs.	33
Figure 3. 3: Sectionneurs intérieur et extérieur HTA.	34
Figure 3. 4: schéma électrique de l'interrupteur différentiel.	34
Figure 3. 5: schéma électrique du disjoncteur.	35
Figure 3. 6: constituants d'un fusible MT.	35
Figure 3. 7: Différents types des relais.	36
Figure 3. 8: Représentation de la sélectivité totale.	37
Figure 3. 9: Sélectivité totale entre les disjoncteurs D1 et D2.	37
Figure 3. 10: Représentation de la sélectivité partielle.	38
Figure 3. 11: Sélectivité partielle entre les disjoncteurs D1 et D2.	38
Figure 3. 12: Principe de la sélectivité ampérométrique.	38
Figure 3. 13: sélectivité ampère métrique.	39

Figure 3. 14:Principe de sélectivité chronométrique.	40
Figure 3. 15:Sélectivité chronométrique avec relais à temps indépendant.	41
Figure 3. 16:Sélectivité chronométrique avec relais à temps dépendant.	41
Figure 3. 17:Exemple d'utilisation de la sélectivité logique.	43
Figure 3. 18:Principe de la protection différentielle.	44
Figure 3. 19:Sélectivité directionnelle pour les défauts entre phases d'un réseau à deux.	45
Figure 3. 20:Sélectivités ampérométrique + chronométrique.	46
Figure 3. 21:Courbes de la sélectivité ampérométrique + chronométrique	46
Figure 3. 22: Courbes de la sélectivité logique + chronométrique	47
Figure 3. 23:Sélectivité logique + chronométrique.....	47
Figure 3. 24:Comparaison des temps de déclenchement entre la sélectivité chronométrique.	48
Figure 3. 25:Sélectivité entre un fusible et une protection à temps indépendant.	49
Figure 3. 26:Sélectivité entre un fusible et une protection à temps dépendant.	49
Figure 3. 27:Sélectivité entre un fusible HTA amont et un disjoncteur BT aval.	50
Figure 3. 28: Disjoncteur C60N aval 20A.	51
Figure 3. 29: Disjoncteur C60/N/H amont 40A.....	51
Figure 3. 30: La limite de sélectivité entre deux disjoncteurs C60N et C60/N/H.	52
Figure 3. 31:filiation à 2 niveaux.....	53
Figure 3. 32: Courbes de limitation en courant.	54
Figure 4. 1:Schéma unifilaire représentant une distribution d'un réseau électrique	57
Figure 4. 3: Courbe de couple mécanique du moteur M_0.48KV.	58
Figure 4. 2: Courbe de couple mécanique du moteur M_13.2KV.	58
Figure 4. 4: Courbe de couple mécanique du moteur M_1.5KV.	59
Figure 4. 5: L'équipement connecté à ciel ouvert.....	63
Figure 4. 6: La densité de l'énergie (cal /cm ²) en fonction du temps(s).	64
Figure 4. 7:le périmètre de protection l'éclair (pouces) en fonction du temps (seconde).....	66
Figure 4. 8:Schéma unifilaire de protection et de démarrage du moteur triphasé.	67
Figure 4. 9:Courbe de couple mécanique.	68
Figure 4. 10:la coordination des dispositifs de protection.....	77
Figure 4. 11:Courbes caractéristiques temps-courant de l'artère.....	78

Figure 4. 12:le disjoncteur CB1 fonctionne avec un taux de charge.	79
Figure 4. 13 :Absence de coordination entre les dispositifs F1/CB1 et CB2/F1.....	81
Figure 4. 14: Caractéristiques temps-courant.	82
Figure 4. 15:Courbes caractéristiques temps-courant de l'artère.	84

Tableau 1. 1:Les réseaux électriques selon le niveau de tension.	11
Tableau 2. 1:Facteurs pour les équipements et les classes de tension.	24
Tableau 2. 2:Équations pour l'énergie incidente et la limite de protection contre les éclairs par type et calibre de disjoncteur	29
Tableau 3. 1:Tableaux de filiation.	55
Tableau 4. 1: L'équipement connecté à ciel ouvert.....	60
Tableau 4. 2: L'équipement connecté à commutateur à haute tension.....	61
Tableau 4. 3 : L'équipement connecté à câble	62
Tableau 4. 4: L'équipement connecté à ciel ouvert (partie 02).	69
Tableau 4. 5: Résultat d'Analyse du danger d'éclair d'arc (partie 02).	70
Tableau 4. 6:les paramètres physiques utilisés pour l'évaluation du risque d'arc électrique sur des circuits fixes en plein air.	72
Tableau 4. 7: Les critères de protection contre l'arc électrique dans différents sites à l'aide de dispositifs variés (disjoncteur, fusibles)	73
Tableau 4. 8:présentés montrent l'évolution de la densité d'énergie en unités de (J/cm ²)	74
Tableau 4.9: Collant d'avertissement N1.	75
Tableau 4.10: Collant d'avertissement N2.	75
Tableau 4.11: Collant d'avertissement N3.	76
Tableau 4.12: Collant d'avertissement N4.	76
Tableau 4. 13:Rapport de charge.....	83
Tableau 4.14:Rapport de coordination des dispositifs amont.	83
Tableau 4.15:Rapport de coordination des dispositifs aval.	83
Tableau 4. 16:les valeurs de court-circuit (disjoncteur CB1 au tronçon CB1).	85
Tableau 4. 17:Les valeurs de courant (fusible F1 au tronçon F1).	86
Tableau 4. 18:Les valeurs de courant (relais de surintensité R1 au tronçon CB2).	86

Introduction Générale

Introduction Générale

L'énergie électrique est aujourd'hui au cœur du développement industriel, économique et social. Sa disponibilité, sa qualité et surtout sa sécurité sont des enjeux majeurs pour les entreprises et les particuliers. Cependant, le fonctionnement des réseaux électriques s'accompagne de divers risques, dont l'un des plus redoutables est l'éclair d'arc électrique, phénomène pouvant provoquer de graves dommages matériels et humains. Sa survenue, souvent imprévisible, est liée à des défauts d'isolement, des surtensions ou des erreurs humaines, et engendre une libération massive d'énergie thermique, acoustique et lumineuse.[10]

Ce mémoire se propose d'analyser en profondeur ce danger spécifique dans les systèmes électriques industriels, avec pour objectif principal de comprendre les mécanismes physiques de l'arc électrique, d'identifier ses causes et ses conséquences, puis de proposer des solutions efficaces de prévention et de protection. Cette analyse théorique est complétée par une étude normative basée sur la norme IEEE 1584, permettant d'évaluer le risque d'arc en termes d'énergie incidente et de distance de sécurité (Arc Flash Boundary).

Dans ce cadre, la coordination des dispositifs de protection joue un rôle fondamental. En effet, il ne suffit pas de disposer de protections ; celles-ci doivent être correctement choisies, paramétrées et coordonnées entre elles, afin de garantir une détection rapide et sélective des défauts. Une mauvaise coordination peut, au contraire, aggraver les risques en retardant l'ouverture des circuits ou en provoquant l'arrêt inutile de tout un système. Ainsi, ce mémoire consacre un chapitre entier à l'analyse de la sélectivité, de la filiation et des principes de coordination des relais, disjoncteurs et fusibles.

La complexité des réseaux électriques modernes, marqués par une multitude de sources, de charges et de topologies, impose l'utilisation d'outils de simulation avancés. C'est dans ce contexte que nous avons eu recours au logiciel CYME, reconnu pour ses capacités de modélisation et d'analyse des réseaux électriques. Nous avons réalisé des simulations détaillées permettant de visualiser les points critiques, de calculer l'énergie incidente et de tester différentes stratégies de protection.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres principaux :

- Le premier présente les généralités sur les réseaux électriques, leurs structures et les types de tensions.

- Le second est consacré à l'étude théorique de l'arc électrique : ses causes, ses conséquences, ainsi que les méthodes de calcul de l'énergie dégagée.
- Le troisième traite de la coordination des dispositifs de protection, en intégrant les aspects techniques et normatifs.
- Enfin, le quatrième chapitre regroupe les résultats issus de l'analyse et de la simulation sur **CYME**, et propose des recommandations pratiques pour améliorer la sécurité du réseau étudié.

À travers ce travail, nous espérons apporter une contribution significative à la compréhension du phénomène d'éclair d'arc électrique et à la conception de réseaux plus sûrs et plus fiables. La prévention du risque électrique ne doit pas être perçue comme une contrainte, mais comme un levier d'amélioration continue des performances et de la sûreté des installations électriques.

Chapitre I

Généralités sur les réseaux électriques

1.1.Introduction

On appelle réseau électrique, l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de productions vers les consommateurs d'électricité. Le réseau est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tensions, connectées entre elles dans des postes électriques, qui permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs. Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production-transport-consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

1.2.Structure des lignes de réseaux électriques

Les réseaux électriques constituent un ensemble d'infrastructures permettant de transporter l'électricité des sites de production vers les utilisateurs. Les entreprises responsables de la production et de la distribution de l'énergie se fixent plusieurs objectifs principaux, parmi lesquels :

- Garantir à chaque client la puissance nécessaire à ses besoins.
- Fournir une tension électrique stable.
- Assurer une fréquence stable.
- Offrir de l'énergie à un tarif raisonnable.
- Respecter des normes strictes de sécurité.
- Promouvoir la protection de l'environnement.
- Livrer les puissances actives et réactives demandées par les consommateurs.
- Prendre des mesures pour empêcher que les perturbations causées par un utilisateur n'affectent les autres, en choisissant des dispositifs de protection appropriés.

Ces critères sont indispensables tant pour le bon fonctionnement du réseau que pour le maintien de la qualité de service.

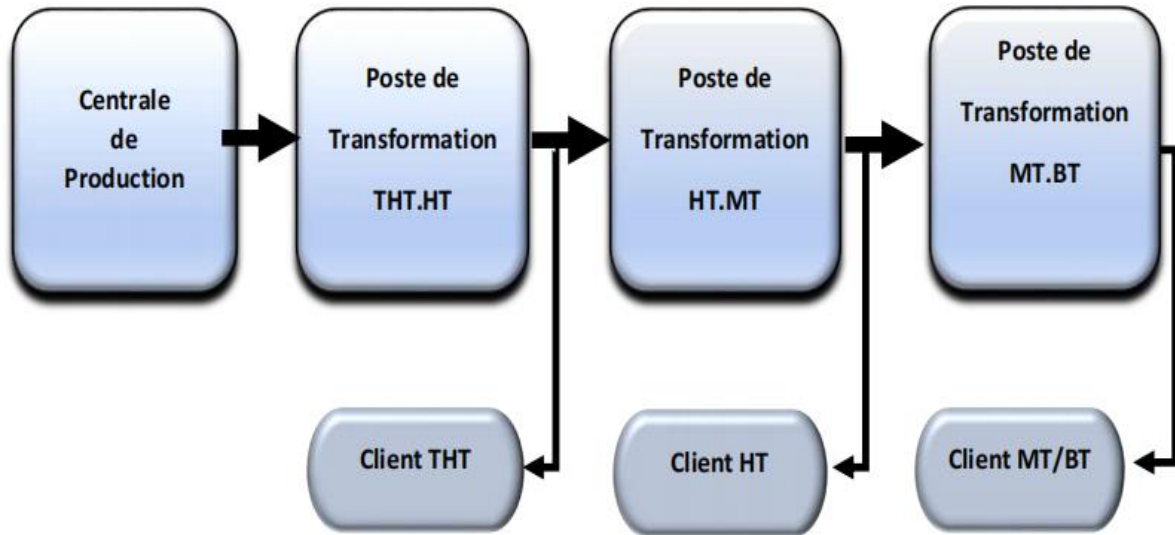


Figure 1. 1: Les lignes électriques.

1.3. Définition d'un réseau électrique

Un réseau électrique est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'un niveau tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique est dissocié en quatre grandes parties (production, transport, Répartition et distribution). **Figure I.2**



Figure 1.2: Structure générale des réseaux électriques.

1.4. Les éléments constitutifs d'un réseau électrique

1.4.1. Les générateurs

La source ou le générateur est un élément de base du réseau électrique. Il constitue le cœur de l'ensemble, sa fonction est de transformer l'énergie d'origine (hydraulique ou thermique ...) en énergie électrique.

Ils sont insérés en divers points du réseau et sont destinés à fournir une puissance assignée sous une tension fixée à l'avance. [1]

1.4.2. Les lignes électriques

Une ligne électrique est une structure composée de conducteurs, d'isolants et d'autres éléments auxiliaires, conçue pour acheminer l'énergie électrique du producteur (centrale électrique) vers l'utilisateur (ville, quartier, maison ou complexe industriel). Généralement, les conducteurs sont fabriqués à partir d'aluminium, de cuivre ou de bronze. Les isolants sont constitués d'une partie solide (porcelaine, verre papier, matière plastique) associée à un gaz (air, SF₆) ou un liquide (huile).



Figure 1.3: Les lignes électriques.

1.4.3. Les postes de transformation

Un poste de transformation est une structure qui intègre des transformateurs, des dispositifs de protection (disjoncteurs, sectionneurs, parafoudres, etc.), ainsi que des instruments de mesure et de contrôle...

À la sortie des centrales, les postes de transformation convertissent la moyenne tension générée en haute ou très haute tension, indispensable pour un acheminement de l'énergie électrique dans les conditions économiques souhaitées. La tension élevée pour le transport, doit être de nouveau abaissée au niveau d'autres postes de transformation successifs pour alimenter les réseaux de répartition puis les réseaux de distribution en basse tension.



Figure 1.4: Les postes de transformation.

1.4.4. Les postes d'interconnexion, d'alimentation et de distribution :

L'interconnexion des réseaux de transport d'électricité permet de transférer l'énergie d'une région à une autre et vice versa. Leur mission principale est de garantir l'approvisionnement en énergie électrique bilatéral entre les systèmes électriques, qui présentent des autonomies distinctes en cas de panne subite sur l'un ou l'autre.

L'interconnexion des réseaux facilite la solidarité entre les pays voisins et la diversification des sources de production. Cette abondance renforce l'approvisionnement sécurisé et réduit le danger d'une défaillance à grande échelle.

- Les infrastructures existantes doivent être adaptées afin d'acheminer l'énergie produite par les nouvelles sources renouvelables.
- Les infrastructures énergétiques doivent permettre, en augmentant les échanges interrégionaux, de favoriser la concurrence et d'améliorer le fonctionnement du marché.

1.5. Les classifications des tensions du réseau électrique :

On peut classer la tension d'un réseau de [2] :

Environnements très humides, généralement à une tension de 30 volts ou moins, mais aussi pour des tensions inférieures à 50 volts.

-Les basses tensions (BT) : Ces tensions de 50 à 1000 volts sont utilisées pour les équipements ménagers et la majorité des équipements industriels.

-Les **moyennes tensions (MT)** : tensions comprises entre 1 et 35 kV, elles sont utilisées pour le transport d'énergie à moyenne distance et les réseaux industriels.

-Les **hautes tensions (HT)** : tensions de 35 à 275 kV, elles sont utilisées pour le transport d'énergie à long distance et au transit élevées.

-Les **réseaux très hautes tensions (THT)** : tensions égales ou supérieure à 300kV. Ils ont été rendus nécessaires par l'accroissement des puissances à transporter.

- Les tensions normalisées selon la CEI : Figure I.5.

HTB : pour une tension composée supérieure à 50 kV.

HTA : pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV.

BTB : pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV.

BTA : pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V.

TBT : pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V

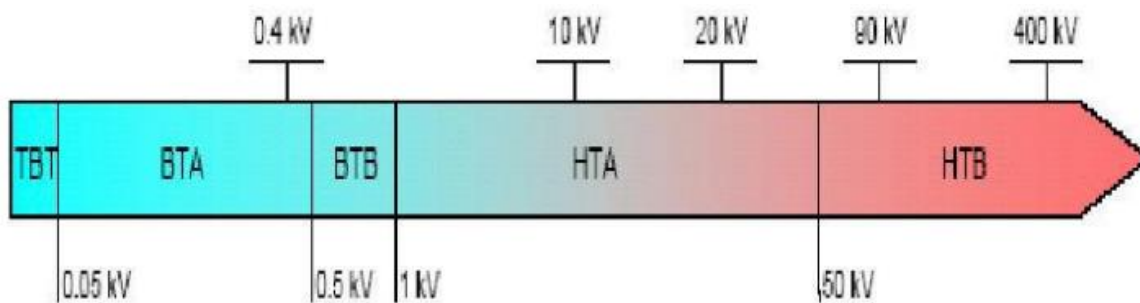


Figure 1.5: Niveaux de tension normalisés.

1.6. Organisation d'un réseau électrique

Pour que l'énergie électrique soit utilisable, le réseau doit satisfaire les exigences suivantes :

- ✓ Assurer au client la puissance dont il a besoin.
- ✓ Fournir une tension stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 10\%$ pour le réseau aérien et $\pm 6\%$ pour le réseau souterrain, de la tension nominale.
- ✓ Fournir une fréquence stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 0.1\text{Hz}$.
- ✓ Fournir l'énergie à un prix acceptable.
- ✓ Maintenir des normes de sécurité rigoureuses.
- ✓ Veiller à la protection de l'environnement.

Pour se faire, les réseaux électriques sont organisés de manière à y faciliter l'accès et les manipulations aux planificateurs et gestionnaires de ceux-ci. Le schéma général d'un réseau électrique est illustré sur la figure I.6. [3]

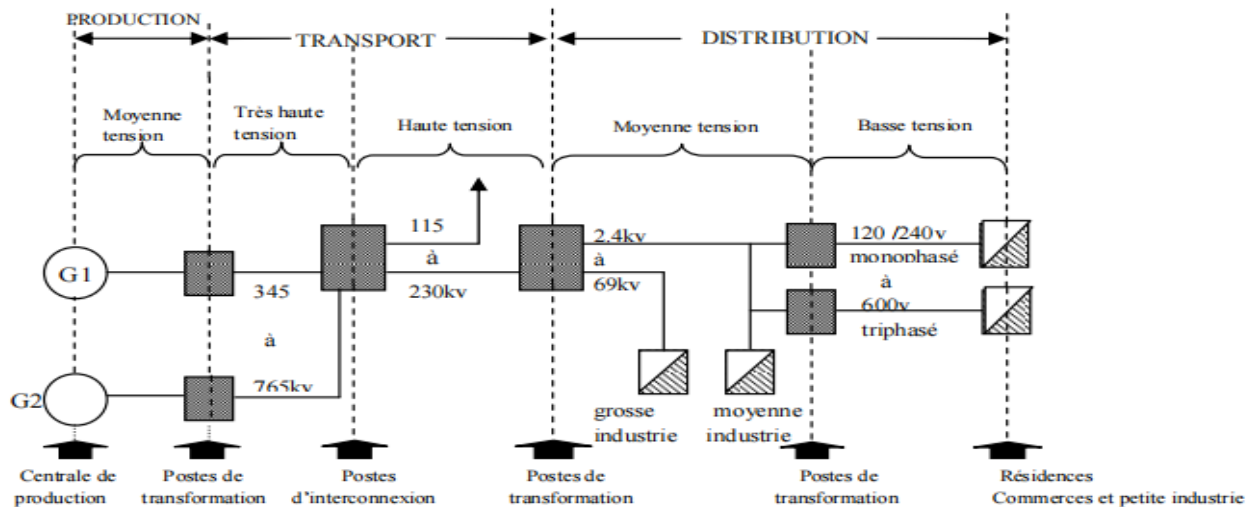


Figure 1.6: Organisation des réseaux électriques.

1.7. Les types des réseaux électriques

1.7.1. En terme de connexion

1.7.1.1. Protection

La production qui sert à produire l'énergie électrique grâce à des turbo-alternateurs qui transforme l'énergie mécanique des turbines en énergie électrique à partir d'une source primaire (gaz, pétrole, hydraulique...). Les sources primaires varient d'un pays à l'autre.

Exemple en Algérie le gaz naturel couvre plus de 70% de la production, en France, 75% d'électricité est d'origine nucléaire. En générale, chaque source de production (centrale électrique) regroupe plusieurs groupes turbo-alternateurs pour assurer la disponibilité pendant les périodes de maintenance.

Par ailleurs, on trouve dans les pays industrialisés des puissances installées de plus en plus élevées pour répondre à la demande croissante en énergie électrique, exemple la centrale nucléaire de Gravelines en France 6×900 MW, la central hydro- électrique des Trois-Gorges en Chine 34×700 MW et 2×50 MW (devenue la plus grande central dans le monde en 2014 [8]).

1.7.1.2. Réseaux d'interconnexion et de transport

Ces réseaux assurent le transport et l'interconnexion de l'énergie électrique en très haute tension et en haute tension vers les points de consommation et de répartition. Ces réseaux comprennent les centrales de production ainsi que les lignes et les postes de transformation, leurs rôles sont :

- Collecter l'énergie électrique produite par les centrales et de transporté vers les zones de consommation (fonction transport).

-Permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production, et assurer une compensation des différents alias (fonction interconnexion). Les tensions de ces dernières sont comprises entre **(60 à 400 KV)**.

1.7.1.3. Le réseau de répartition

Le réseau de répartition (63kV, 90kV) assure le transport des réserves en électricité composées de l'énergie puisée au réseau de transport et de productions de plus petites échelles vers les zones de consommations ; c'est-à-dire, ces réseaux ont pour fonction de faire la liaison entre le réseau de transport et les réseaux de distribution. Ils assurent cette fonction en permanence ; même lors de la défaillance de certaines lignes de transport à structure topologique bouclée ; ce qui permet sans aller jusqu'à un maillage aussi dense que celui du réseau de transport, d'assurer l'acheminement de l'énergie dans des conditions de sécurité raisonnablement garanties.

1.7.1.4. Réseaux de distribution

Il comprend les lignes et les postes de transformation servant à alimenter les clients. Ce réseau est composé de deux parties :

- Le réseau de distribution à moyenne tension **(2.4 kV à 69 kV)**,
- Le réseau de distribution à basse tension **(120 V à 600 V)**

1.7.1.4.1. Les réseaux de distribution a moyenne tension

On appelle réseaux MT les réseaux couvrants la plage de 1 à 36 kV, selon (CIE) les réseaux MT se distinguent fortement des réseaux HT par le principe de distribution.

1.7.1.4.2. Les réseaux de distribution a base tension

Permet d'acheminer l'énergie électrique du réseau de distribution MT aux points de faible, consommation inférieure de 250 kVA. Ce réseau alimente un nombre très élevé de consommateurs du domaine domestique. La structure de ce réseau est de type aérien ou x paramètres [8].

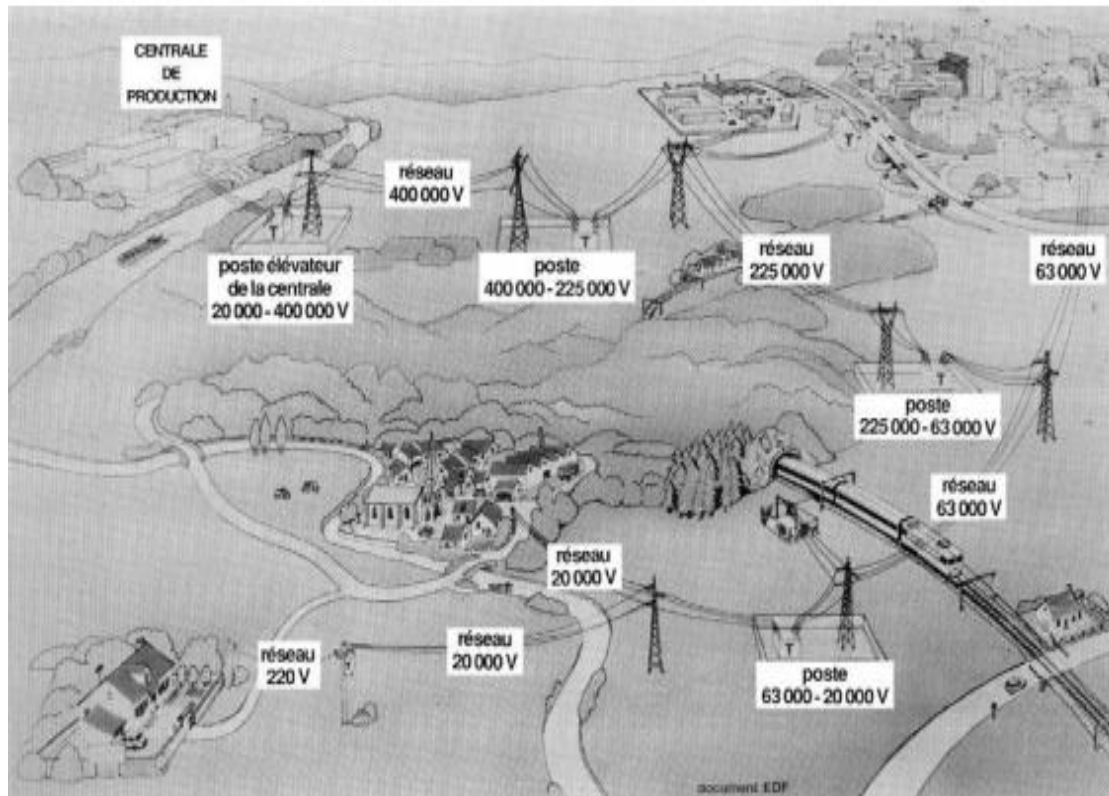


Figure 1.7: Les types de réseau électriques.

1.7.2. En terme de tension

Le système électrique est constitué de plusieurs niveaux de tension, correspondant à divers types de réseaux. L'échelle des tensions varie considérablement, allant de quelques dizaines à presque un million de volts, ce qui permet de classer les réseaux selon leur tension :

Classe de tension	Tension nominale	Exemple d'application
Très Basse tension TBT	+50V	Réseau BT de sécurité
Base tension BT	120,220, 380, 660V	Réseau de distribution BT
Moyenne tension MT	3, 6, 10, 20, 35, 60KV	Réseau de distribution MT

Haut tension HT	110, 150, 220KV	Réseau de transport
Très Haut tension THT	330, 500, 750KV	Réseau de transport Réseau d'interconnexion
Ultra haut tension UHT	+750 KV	Réseau d'interconnexion

Tableau 1. 1: Les réseaux électriques selon le niveau de tension.

1.8. Classification suivant la structure topologique

Si les réseaux doivent assurer le transit d'une certaine puissance, ils doivent le faire avec une sécurité suffisante. Or, les appareils qui les composent sont sujets à des avaries, et les lignes et postes sont soumis à toute sorte d'agressions externes, telles que la pluie, la pollution, la foudre, le choc d'engins divers. On augmente la sécurité d'alimentation :

- Par les lignes aux appareillages plus solides.
- Par des circuits plus nombreux.

Alors il y'a donc un compromis à réaliser entre le coût des investissements supplémentaires et la valeur de ce qu'ils permettent de sauver ce qui conduit à des topologies de réseaux différents .

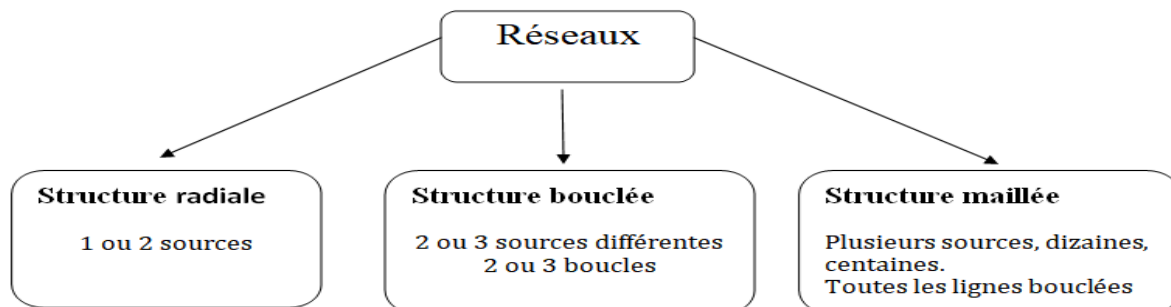


Figure 1.8: Structure topologique des réseaux électriques.

1.8.1. Structure radiaux

Les réseaux de type radial, qui partent d'un poste de distribution HT/MT, comprennent de nombreuses voies qui se divisent à chaque intersection, sans toutefois offrir un point de convergence commun. On parle d'une structure qualifiée d'arborescente.

La structure radiale peut être [3]:

1. Une structure radiale simple

Cette structure est simple et économique, elle est utilisée dans les réseaux aériens ou la durée de réparation à la suite d'un incident sur une ligne est faible.

2. Une structure radiale double

On assure à chaque poste une double alimentation, au moyen de deux lignes dont l'une est en service d'une façon normale et l'autre non raccordée mais maintenue sous tension c'est la ligne de réserve en cas d'avarie de la première.

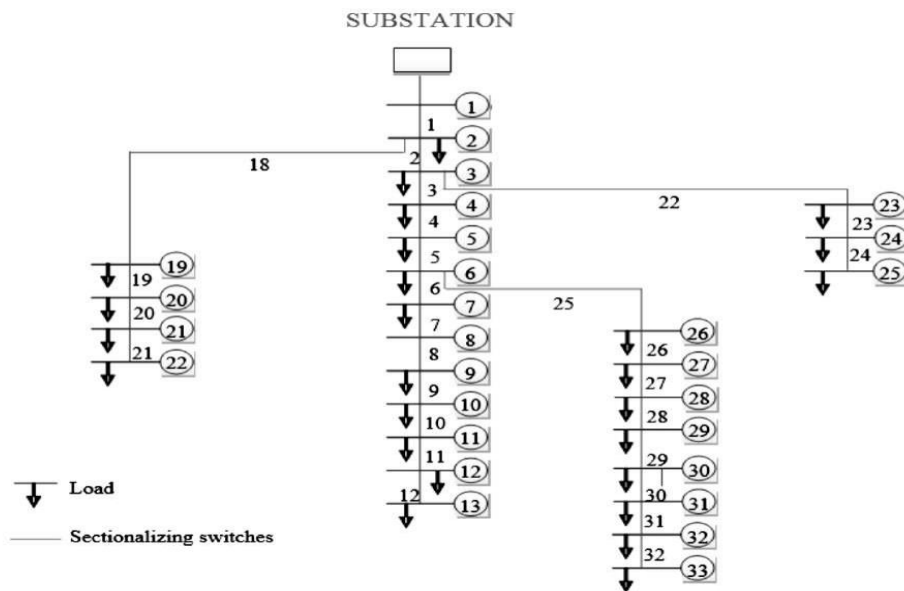


Figure 1.9: Structure radiale des réseaux électrique.

La **Figure 1.10** représente le schéma de principe d'un réseau radial :

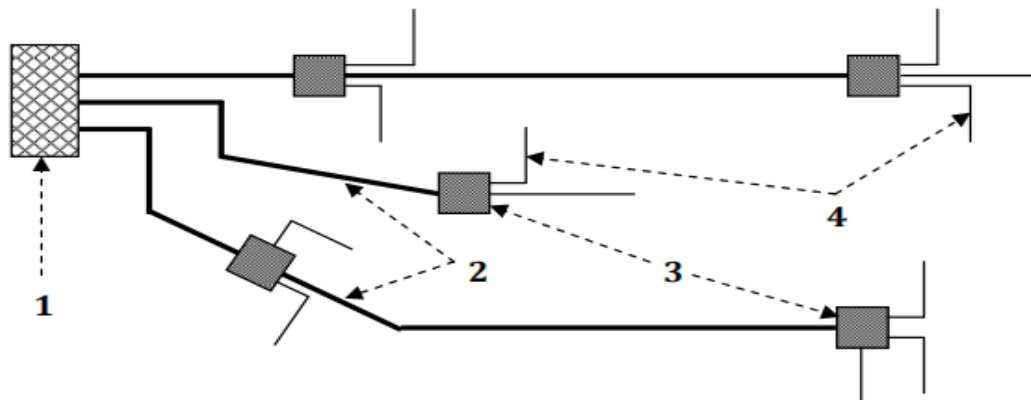


Figure 1.10: Schéma de principe d'un réseau radial.

1- Poste HT/MT 2- Lignes MT 3- Poste MT/BT 4- Lignes BT

1.8.2. Structure bouclés

Chaque ligne fournit en série à plusieurs stations, ces dernières sont équipées à l'entrée et à la sortie d'un dispositif isolant la section entre deux stations :

- Meilleure sécurité d'alimentation.
- Cout du réseau plus grand.
- Souvent utilisée pour les réseaux de répartition.

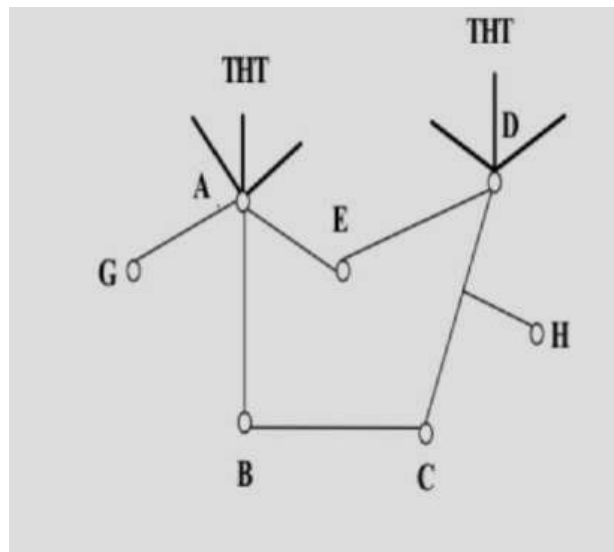


Figure 1.11: Structure bouclée des réseaux électrique.

1.8.3. Structure maillée

Sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées. Cette structure (figure I.12) nécessite que tous les tronçons de lignes soient capables de surcharges permanentes, et qu'il soit muni, a leurs deux extrémités, d'appareils de coupure. On obtient ainsi la meilleure sécurité, mais au prix le plus élevé.

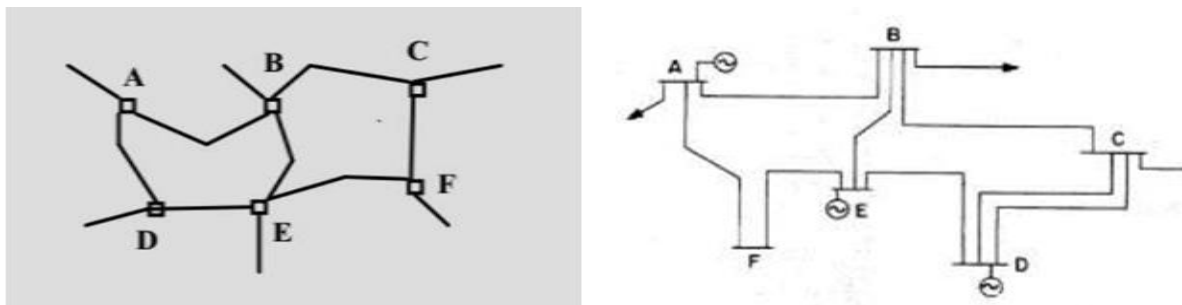


Figure 1.12: Structure maillée des réseaux électrique.

1.9. Les postes électriques

Selon la définition de la Commission Électrotechnique Internationale (CEI), un poste électrique est la partie d'un réseau électrique, située en un même lieu, comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, de l'appareillage électrique, des bâtiments, et éventuellement des transformateurs. Un poste électrique est donc un élément du réseau électrique servant à la fois à la transmission et à la distribution d'électricité. Il permet d'élever la tension électrique pour sa transmission, puis de la redescendre en vue de sa consommation par les utilisateurs (particuliers ou industriels). Les postes électriques se trouvent donc aux extrémités des lignes de transmission ou de distribution. On parle généralement de sous-station. Il existe plusieurs types de postes électriques :

- Postes de sortie de centrale : l'objectif de ces installations est de connecter une centrale d'énergie au réseau,
- Postes d'interconnexion : l'objectif est de relier plusieurs lignes électriques HTB,
- Postes élévateurs: l'objectif est d'augmenter la tension grâce à un transformateur,
- Postes de distribution: le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels,

1.9.1. Types de postes

Le poste électrique était un nœud du réseau électrique ; un réseau électrique est un système dont le poste constitue une pièce majeure dans la mesure où c'est le lieu (le nœud) d'où le réseau est:

- Organisé (configuration de la topologie)
- Surveillé (fonction de monitoring)
- Protégé (action des protections)

On peut envisager le poste comme une barre (ou des barres) à laquelle sont reliées des dérivations (feeder), que l'on distribue en termes de réseau électrique selon les critères suivants :

- Groupes de production générant de l'énergie ;
- Charges consommant de l'énergie active et réactive ;
- Des lignes aériennes (ou souterraines) garantissent la connexion entre les divers points de liaison.

On distingue, suivant les fonctions qu'ils assurent, plusieurs types de postes :

1.9.1.1. Les postes à fonction d'interconnexion

Qui comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs, etc.) de même tension peuvent être aiguillés.

1.9.1.2. Les postes de transformation

Dans lesquels il existe au moins deux jeux de barres à des tensions différentes liés par un ou plusieurs transformateurs.

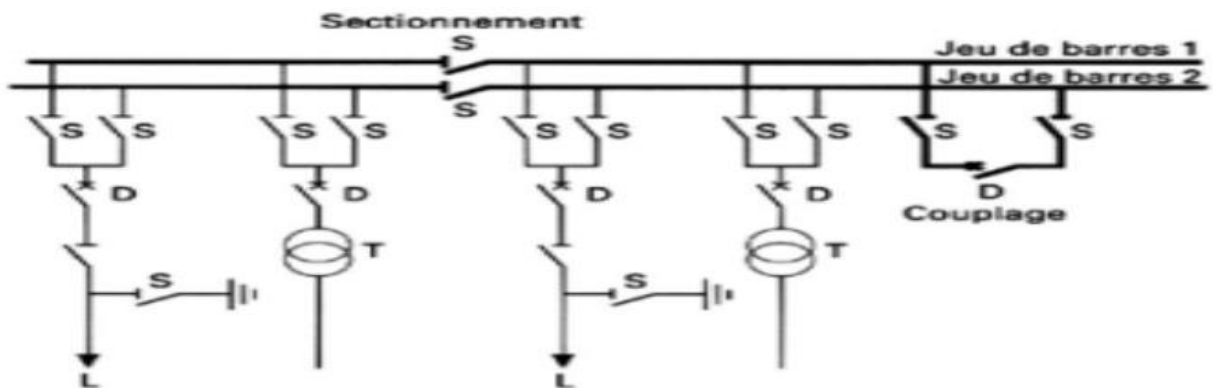


Figure 1.13: schéma unifilaire de poste de transformation.

1.9.1.3. Les postes mixtes

Sont les plus fréquents, qui assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation.

Les actions élémentaires inhérents aux fonctions à rempliront réalisées par l'appareillage à haute et très haute tension installé dans le poste et qui permet :

- D'établir ou d'interrompre le passage du courant, grâce aux disjoncteurs.
- D'assurer la conduite ou l'isolement d'un circuit électrique, grâce aux sectionneurs.
- De modifier la tension de l'énergie électrique, grâce aux transformateurs de puissance.

Un ensemble de protections et d'automates contrôle les grandeurs électriques réduites, élaborées par des réducteurs de mesure (tension et courant principalement) et agit sur l'appareillage à haute tension afin d'assurer les conditions d'exploitation pour lesquelles le réseau a été conçu.

Il est donc important de noter que, selon la définition, les dispositifs de coupure et l'équipement de mesure et de protection spécifique à un départ sont rassemblés au sein d'une cellule.

En outre, les jeux de barres sont susceptibles de constituer plusieurs nœuds électriques par l'ouverture de disjoncteurs ; on appelle alors sommet le jeu de barres ou le tronçon de jeu de barres ainsi constitué. Le nombre de sommets d'un poste caractérise ainsi son aptitude à former des nœuds électriques.

1.9.2. Objectifs des postes électriques

Les postes électriques ont 3 fonctions principales :

- ✓ Le raccordement de plusieurs réseaux d'électricité ;
- ✓ L'interconnexion entre les différentes lignes électriques ;
- ✓ La transformation de l'énergie en différents niveaux de tension.

1.9.3. Les différents éléments de poste électrique

On distingue parfois les éléments d'un poste en « éléments primaires » (les équipements haute tension) et « éléments secondaires » (équipements basse tension). [2]

Parmi les équipements primaires, on peut citer :

- Transformateur électrique ;
- Autotransformateur électrique ;
- Disjoncteur à haute tension ;
- Sectionneur ;
- Sectionneur de mise à la terre ;
- Parafoudre ;
- Transformateur de courant ;
- Transformateur de tension ;
- Combiné de mesure (courant + tension) ;
- Jeux de barres.

Parmi les éléments secondaires on peut citer :

- Relais de protection ;

- Équipements de surveillance ;
- Équipements de contrôle ;
- Système de télé conduite ;
- Équipements de télécommunication ;
- Comptage d'énergie.

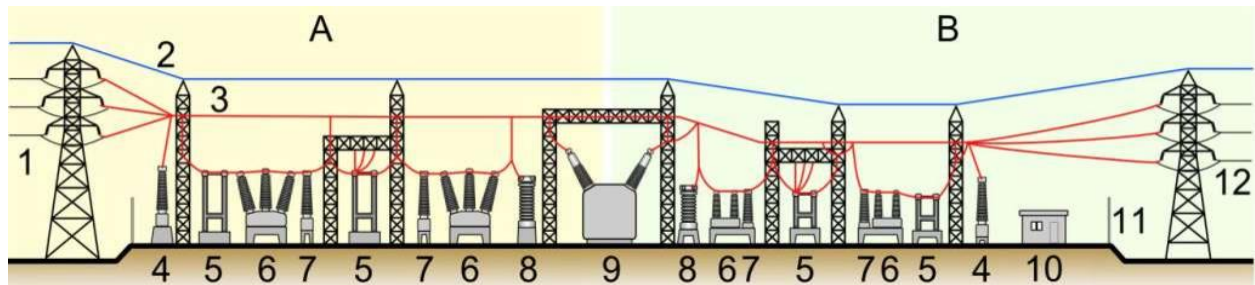


Figure 1.14: Les différents éléments du poste.

1. Ligne électrique primaire ;
2. Câble de garde ;
3. Ligne électrique ;
4. Transformateur de tension ;
5. Sectionneur ;
6. Disjoncteur ;
7. Transformateur de courant ;
8. Parafoudre ;
9. Transformateur de puissance ;
10. Bâtiment secondaire ;
11. Clôture ;
12. Ligne électrique secondaire.

1.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une vue générale sur les réseaux électriques ainsi que leur intégration dans l'exploitation de l'énergie électrique, où nous avons abordé leurs différentes structures et modes d'acheminement de l'énergie électrique, et les différents modes de distribution. Nous avons aussi parlé du régime du neutre et les types exploités dans les installations industrielles.

Chapitre II

Étude théorique du danger d'éclair d'arc électrique

2.1. Introduction

L'éclair d'arc électrique est un phénomène extrêmement dangereux dans les systèmes électriques, surtout en milieu industriel, en raison de l'énergie considérable libérée (jusqu'à 20 000 °C), pouvant causer des blessures graves. Il résulte généralement d'un défaut d'isolation, d'un court-circuit ou d'une erreur de manipulation.

Pour évaluer ce risque, la norme IEEE 1584 est largement utilisée, car elle permet d'estimer l'énergie incidente en fonction de plusieurs paramètres (type de système, configuration, courant de l'arc, distance, durée). Une autre méthode, plus ancienne, est celle de Ralph Lee, qui offre un calcul simplifié de l'énergie thermique reçue, utile pour les systèmes à haute tension.

Plusieurs facteurs influencent la gravité du phénomène : le courant de court-circuit, le temps de déclenchement, la distance de travail, la configuration de l'équipement, et les équipements de protection individuelle (EPI).

Face à ces dangers, une analyse rigoureuse et normalisée du risque est essentielle pour assurer la sécurité des intervenants et concevoir des systèmes de prévention efficaces.

2.1. Généralité sur l'arc électrique

L'arc électrique représente un danger important dans les systèmes électriques. Il peut provoquer des accidents graves, tant pour les personnes que pour les équipements. La prévention des arcs électriques est donc un enjeu majeur dans la conception, la maintenance et l'exploitation des installations électriques. Ce chapitre a pour but d'étudier les mécanismes de formation des arcs, leurs causes et danger, ainsi que les stratégies les plus efficaces pour les prévenir.

2.2. Historique et principes physiques

L'arc électrique a été observé pour la première fois au début du XIXe siècle par Humphry Davy. Il a rapidement été utilisé dans l'éclairage (lampes à arc) avant de devenir un sujet de préoccupation dans les systèmes électriques modernes. Physiquement, l'arc se développe selon les lois de l'électrodynamique et de la thermodynamique, avec une température pouvant dépasser 20 000 °C, suffisante pour faire fondre la plupart des métaux. L'intensité de l'arc dépend de plusieurs facteurs : la tension appliquée, la distance entre les conducteurs, et les caractéristiques du milieu. a pour but d'étudier les mécanismes de formation des arcs, leurs conséquences, ainsi que les stratégies les plus efficaces pour les prévenir.

Un arc électrique est une décharge électrique continue à travers un gaz, généralement l'air, entre deux conducteurs sous tension. Il se produit lorsque le champ électrique dépasse la rigidité diélectrique de l'air, entraînant une ionisation du gaz et la formation d'un plasma conducteur. Ce phénomène est accompagné d'une forte émission de lumière, de chaleur intense et parfois de bruit.

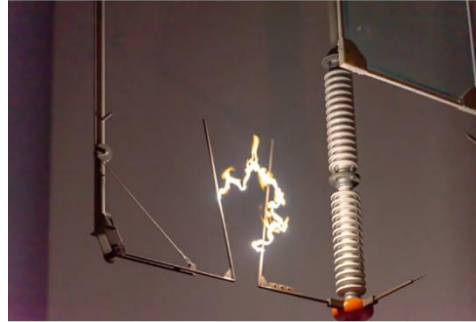


Figure 2.1: Arc électrique contrôlé.

2.3. Causes de l'apparition d'un arc électrique

L'arc électrique peut se produire dans diverses conditions et résulte souvent d'une défaillance dans le système électrique. Voici les principales causes identifiées :

2.3.1. Défauts d'isolement

Les défauts d'isolement sont l'une des causes principales de formation d'arcs électriques. Ils surviennent lorsque les matériaux isolants perdent leur capacité à contenir la tension, souvent en raison du vieillissement, de fissures, ou de détériorations mécaniques. Une dégradation de l'isolant permet alors au courant de circuler anormalement entre deux conducteurs ou entre un conducteur et la terre, ce qui peut initier un arc.

2.3.2. Surtensions et manœuvres

Les surtensions transitoires, provoquées par des manœuvres d'ouverture ou de fermeture de circuits, ou encore par la foudre, peuvent générer des champs électriques très élevés. Ces champs peuvent provoquer l'amorçage d'un arc dans les zones où le champ dépasse la tenue diélectrique de l'air. Les manœuvres brusques et mal contrôlées sont particulièrement à risque.

2.3.3. Environnement (poussière, humidité)

Un environnement sale ou humide réduit la qualité de l'isolation. La poussière conductrice, les Vapeurs corrosives, ou l'humidité excessive peuvent favoriser les décharges partielles et augmenter les risques de formation d'un arc. Les installations en milieux industriels ou extérieurs sont donc plus exposées.

2.3.4. Facteurs humains

Les erreurs humaines comme le non-respect des procédures, équipements inadaptés ou usés, ou encore un entretien négligé, sont également à l'origine de nombreux arcs électriques. Un mauvais serrage de connexions ou une mauvaise manipulation lors d'interventions sous tension peut suffire à créer les conditions propices à l'amorçage d'un arc.

2.4. Conséquences des arcs électriques

Les arcs électriques ont des conséquences graves, tant pour la sécurité des personnes que pour l'intégrité des installations. On peut regrouper ces conséquences en trois grandes catégories :

- Risques pour la santé humaine des brûlures profondes au premier, deuxième ou troisième degré.
- Dommages matériels
- Impacts économiques
- Pour mieux prévenir les risques liés aux arcs électriques, il est essentiel de s'appuyer sur des normes reconnues qui définissent les bonnes pratiques en matière de conception, d'équipement, de formation et d'intervention. Ces normes permettent également d'harmoniser les niveaux de sécurité au niveau mondial ou local.

Elle est largement utilisée dans les études d'ingénierie pour dimensionner les protections et les équipements.

2.5. Guide IEEE pour la réalisation de calculs de risques d'arc électrique

2.5.1. Définition

IEEE 1584 est un guide qui vise à fournir des modèles et des processus analytiques pour calculer les caractéristiques d'un éclair d'arc électrique.

Il est essentiel de connaître ces caractéristiques, car c'est en fonction d'elles que sont choisies les EPI nécessaires et les mesures à prendre pour assurer la sécurité du personnel de maintenance électrique pendant les travaux sous tension.

Il convient de souligner que le guide traite des arcs électriques dans les systèmes à courant alternatif, dont la tension de fonctionnement est comprise entre 208 V et 15 000 V. Les arcs électriques monophasés ou les arcs électriques à courant continu ne sont pas couverts IEEE 1584 est un guide qui vise à fournir des modèles et des processus analytiques par le guide, même si ce dernier fournit encore des lignes directrices à cet égard.

La version actuelle du guide IEEE 1584 a été publiée en 2018 et remplace la version de 2002. Pendant cette période, le modèle analytique a été perfectionné car, entre-temps, des centaines de tests expérimentaux ont été effectués dans des laboratoires spéciaux et, en fait, les différences avec la version précédente sont tout à fait remarquables ; on peut dire que le guide a été complètement revisité.[9]

2.5.2. Présentation de la norme IEEE 1584

La première édition de la norme IEEE 1584 a été publiée en 2002, suivie par une mise à jour majeure en 2018. Cette révision a intégré de nouveaux résultats expérimentaux et des avancées technologiques, ce qui a permis de rendre les calculs plus précis et adaptés à un plus grand nombre de configurations.

2.5.3. Objectifs principaux

- Évaluer l'énergie incidente (cal/cm^2) générée par un arc électrique ;
- Déterminer la distance limite de sécurité (arc flash Boudry);
- Identifier les équipements de protection individuelle (EPI) appropriés

Minimiser l'exposition des travailleurs aux risques d'arc électrique.

2.6. Modèle pour le calcul de l'énergie incidente

Un modèle empirique est fourni pour permettre les calculs. Son développement est décrit à [9]. Les logiciels permettant d'appliquer le modèle sont décrits aussi dans cette référence, ainsi que dans les fichiers auxiliaires. Les équations du modèle sont intégrées dans la feuille de calcul, car il est difficile de les résoudre manuellement.

2.6.1. Plages de modèles

Le modèle empirique (voir 7.5 et article 9), basé sur une analyse statistique et des programmes d'ajustement de courbes, s'applique aux systèmes présentant :

- des tensions comprises entre 208 V et 15 000 V, triphasés ;
- des fréquences de 50 Hz ou 60 Hz ;
- un courant de défaut de 700 A à 106 000 A ;
- des mises à la terre de tous types et sans mise à la terre ;
- des enveloppes d'équipement de dimensions courantes ;
- des écarts entre conducteurs de 13 mm à 152 mm ;
- des défauts triphasés.

Un modèle théorique, basé sur l'article de Lee, s'applique aux systèmes triphasés dans les postes électriques à ciel ouvert et aux réseaux de transport et de distribution à ciel ouvert. Ce modèle est destiné aux applications où les défauts se transforment en défauts triphasés. Lorsque cela n'est pas possible ou probable, ce modèle donnera un résultat prudent. Lorsque des systèmes monophasés sont rencontrés, ce modèle fournira des résultats conservateurs. [9]

2.6.2. Courant d'arc

Le courant d'arc triphasé prévu doit être déterminé afin de déterminer le temps de fonctionnement des dispositifs de protection.

Pour les applications avec une tension réseau inférieure à 1 000 V, résoudre l'équation (1) : [9]

$$I_g I_a = K + 0.662 I_g I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V (I_g I_{bf}) - 0.00304 G (I_g I_{bf}) \quad (1)$$

Où

I_g est le \log_{10}

I_a est le courant d'arc (kA)

K est $-0,153$ pour les configurations ouvertes et $-0,097$ pour les configurations en coffret

I_{bf} est le courant de défaut boulonné pour les défauts triphasés (valeur efficace symétrique) (kA)

V est la tension du système (kV)

G est l'écartement entre les conducteurs (mm) (voir tableau 2.1)

Pour les applications avec une tension du système de 1 000 V et plus, résoudre l'équation (2) :

$$I_g I_a = 0,00402 + 0,983 I_g I_b \quad (2)$$

Le cas haut tension ne fait aucune distinction entre les configurations ouvertes et en coffret.

Conversion de I_g :

$$I_a = 10^{I_g I_a} \quad (3)$$

Calculer un courant d'arc secondaire égal à 85 % d' I_a , afin de déterminer la durée d'arc secondaire (voir les équations 9, 10,4).

2.6.3. Énergie incidente

Trouver d'abord le \lg de l'énergie incidente normalisée. Cette équation est basée sur des données normalisées pour une durée d'arc de 0,2 seconde et une distance de 610 mm entre le point d'arc potentiel et la personne.

$$\lg E_n = K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \quad (4)$$

Où

E_n est l'énergie incidente (J/cm²) normalisée en fonction du temps et de la distance.

K1 est de -0,792 pour les configurations ouvertes (sans boîtier) et de -0,555 pour les configurations en boîtier (équipements fermés).

K2 est de 0 pour les systèmes non mis à la terre et les systèmes mis à la terre à haute résistance et de -0,113 pour les systèmes mis à la terre.

G est l'écartement entre les conducteurs (mm) (voir Tableau 2.1).

Ensuite :

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (5)$$

Enfin, convertir à partir de la valeur normalisée :

$$E = 4.184 C_F E_n \left(\frac{t}{0.2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (6)$$

Où

E est l'énergie incidente (J/cm²)

C_f est un facteur de calcul 1,0 pour les tensions supérieures à 1 kV et 1,5 pour les tensions égales ou inférieures à 1 kV

E_n est l'énergie incidente normalisée

t est le temps d'arc (secondes)

D est la distance entre le point d'arc potentiel et la personne (mm)

x est l'exposant de distance du tableau (2.1).

Les autres cas sont traités de la même manière [9].

Tension du système (kV)	Type d'équipement	Écart typique entre conducteurs (mm)	Distance x facteur
0.208-1	Air libre	10-40	2.000
	Appareillage de commutation	32	1.473
	CCM et panneaux	25	1.641
	Câble	13	2.000
>1-5	Air libre	102	2.000
	Appareillage de commutation	13-102	0.973
	Câble	13	2.000
>5-15	Air libre	13-153	2.000
	Appareillage de commutation	153	0.973
	Câble	13	2.0000

Tableau 2. 1:Facteurs pour les équipements et les classes de tension

2.6.4. Méthode Lee

Pour les cas où la tension est supérieure à 15 kV ou où l'écartement est hors de portée du modèle, la méthode Lee, dérivée théoriquement, peut être appliquée. Elle est incluse dans les calculateurs d'énergie incidente de la norme IEEE 1584-2002.16 Voir 7,2 et 9, 11,4.

$$E=2.142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2}\right) \quad (7)$$

Où

E est l'énergie incidente (J/cm²) ;

V est la tension du système (kV) ;

t est la durée d'arc (secondes) ;

D est la distance entre le point d'arc potentiel et la personne (mm) ;

I_{bf} Est le courant de défaut de boulonnage.

Pour les tensions supérieures à 15 kV, le courant de défaut d'arc est considéré comme égal au courant de défaut de boulonnage [9].

2.6.5. Limite de protection contre les éclairs

Pour le modèle empirique de la norme IEEE 1584-2002 :

$$D_B = [4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2}\right) \left(\frac{610^x}{E_B}\right)]^{\frac{1}{x}} \quad (8)$$

Pour la méthode de Lee :

$$D_B = \sqrt{2.142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{E_B}\right) V I_{bf} \left(\frac{t}{E_B}\right)} \quad (9)$$

Où

D_B est la distance entre la limite et le point d'arc (mm) ;

C_f est un facteur de calcul 1,0 pour les tensions supérieures à 1 kV et 1,5 pour les tensions égales ou inférieures à 1 kV,

E_n est l'énergie incidente normalisée

E_B est l'énergie incidente en J/cm² à la distance de la limite

t est le temps (secondes)

x est l'exposant de distance du tableau (2.1).

I_{bf} est le courant de défaut boulonné

E_B Peut être fixé à 5,0 J/cm² pour une peau nue (sans cagoule) ou à la valeur nominale de l'EPI proposé.

2.6.6. Fusibles limiteurs de courant

Des formules de calcul des énergies d'arc électrique pour les fusibles limiteurs de courant de classe L et de classe RK1 ont été élaborées. Ces formules ont été élaborées à partir d'essais à 600 V et à une distance de 455 mm avec des fusibles d'un même fabricant. Les variables sont les suivantes :

I_{bf} est le courant de défaut boulonné pour les défauts triphasés (valeur efficace symétrique) (kA)

E est l'énergie incidente (J/cm²)

2.6.6.1. Équations pour les fusibles de classe L de 1 601 A-2 000 A

Pour un courant d'arc $I_{bf} < 22,6$ kA, calculer le courant d'arc et utiliser les courbes temps-courant pour déterminer l'énergie conformément aux points 5.2 et 5.3 :

Pour un courant I_{bf} tel que $22,6 \text{ kA} \leq I_{bf} \leq 65,9 \text{ kA}$,

$$E = 4,184 (-0,1284 I_{bf} + 32,262) \quad (10)$$

Pour un courant I_{bf} tel que $65,9 \text{ kA} < I_{bf} \leq 106 \text{ kA}$,

$$E = 4,184 (-0,5177 I_{bf} + 57,917) \quad (11)$$

Pour un courant $I_{bf} > 106 \text{ kA}$, contacter le fabricant pour plus d'informations.

2.6.6.2. Équations pour les fusibles de classe L de 1 201 A-1 600 A

Pour $I_{bf} < 15,7$ kA, calculer le courant d'arc et utiliser les courbes temps-courant pour déterminer l'énergie conformément aux points 5.2 et 5.3 :

Pour I_{bf} , tel que $15,7 \text{ kA} \leq I_{bf} \leq 31,8 \text{ kA}$,

$$E = 4,184 (-0,1863 I_{bf} + 27,926) \quad (12)$$

Pour une valeur telle que $31,8 \text{ kA} < I_{bf} < 44,1 \text{ kA}$,

$$E = 4,184 (-1,5504 I_{bf} + 71,303) \quad (13)$$

Pour une valeur I_{bf} telle que $44,1 \text{ kA} \leq I_{bf} \leq 65,9 \text{ kA}$, E est de 12,3 J/cm²

Pour une valeur I_{bf} telle que $65,9 \text{ kA} < I_{bf} \leq 106 \text{ kA}$,

$$E = 4,184 (-0,0631 I_{bf} + 7,0878) \quad (14)$$

Pour une valeur $I_{bf} > 106 \text{ kA}$, contacter le fabricant pour plus d'informations.

2.6.6.3. Équations pour les fusibles de classe L 801 A–1200 A

Pour $I_{bf} < 15,7$ kA, calculer le courant d'arc et utiliser les courbes temps-courant pour déterminer l'énergie conformément aux points 5.2 et 5.3 :

$$E = 4,184 (-0,1928 I_{bf} + 14,226) \quad (15)$$

Pour I_{bf} , tel que $22,6 \text{ kA} < I_{bf} \leq 44,1 \text{ kA}$,

$$E = 4,184 (0,0143 I_{bf}^2 - 1,3919 I_{bf} + 34,045) \quad (16)$$

Pour I_{bf} , tel que $44,1 \text{ kA} < I_{bf} \leq 106 \text{ kA}$, $E = 1,63$

Pour $I_{bf} > 106 \text{ kA}$, contacter le fabricant pour plus d'informations.

2.6.6.4. Équations pour les fusibles de classe L 601 A–800 A

Pour $I_{bf} < 15,7$ kA, calculer le courant d'arc et utiliser les courbes temps-courant pour déterminer l'énergie conformément aux points 5.2 et 5.3 :

Pour I_{bf} , tel que $15,7 \text{ kA} \leq I_{bf} \leq 44,1$

$$E = 4,184 (-0,0601 I_{bf} + 2,8992) \quad (17)$$

Pour I_{bf} , tel que $44,1 \text{ kA} < I_{bf} \leq 106 \text{ kA}$, $E = 1,63$

Pour $I_{bf} > 106 \text{ kA}$, contacter le fabricant pour plus d'informations.

2.6.6.5. Équations pour les fusibles de classe RK1 de 401 A-800 A

Pour $I_{bf} < 8,5$ kA, calculer le courant d'arc et utiliser les courbes temps-courant pour déterminer l'énergie conformément aux points 5.2 et 5.3 :

Pour I_{bf} , tel que $8,5 \text{ kA} \leq I_{bf} \leq 14 \text{ kA}$,

$$E = 4,184 (-3,0545 I_{bf} + 43,364) \quad (18)$$

Pour I_{bf} , tel que $14 \text{ kA} < I_{bf} \leq 15,7 \text{ kA}$, $E = 2,510$

Pour I_{bf} , tel que $15,7 \text{ kA} < I_{bf} \leq 22,6 \text{ kA}$,

$$E = 4,184 (-0,0507 I_{bf} + 1,3964) \quad (19)$$

Pour I_{bf} , tel que $22,6 \text{ kA} < I_{bf} \leq 106 \text{ kA}$, $E = 1,046$

Pour $I_{bf} > 106 \text{ kA}$, contacter le fabricant pour plus d'informations.

2.6.6.6. Équations pour les fusibles de classe RK1 de 201 A-400 A

Pour $I_{bf} < 3,16$ kA, calculer le courant d'arc et utiliser les courbes temps-courant pour déterminer l'énergie conformément aux points 5.2 et 5.3 :

Pour I_{bf} , tel que $3,16 \text{ kA} \leq I_{bf} \leq 5,04 \text{ kA}$,

$$E = 4,184(-19,053 I_{bf} + 96,808) \quad (20)$$

Pour I_{bf} , tel que $5,04 \text{ kA} < I_{bf} \leq 22,6 \text{ kA}$,

$$E = 4,184(-0,0302 I_{bf} + 0,9321) \quad (21)$$

Pour I_{bf+} , tel que $22,6 \text{ kA} < I_{bf+} \leq 106 \text{ kA}$, $E = 1,046$

Pour $I_{bf+} > 106 \text{ kA}$, contactez le fabricant pour plus d'informations.

2.6.6.7. Équations pour les fusibles de classe RK1 101A-200 A

Pour $I_{bf+} < 1,16$ kA, calculer le courant d'arc et utiliser les courbes temps-courant pour déterminer l'énergie conformément aux points 5.2 et 5.3 :

Pour I_{bf+} , tel que $1,16 \text{ kA} \leq I_{bf+} \leq 1,6 \text{ kA}$,

$$E = 4,184(-18,409 I_{bf+} + 36,355) \quad (22)$$

Pour I_{bf+} , tel que $1,6 \text{ kA} < I_{bf+} \leq 3,16 \text{ kA}$,

$$E = 4,184(-4,2628 I_{bf+} + 13,721) \quad (23)$$

Pour I_{bf+} , tel que $3,16 \text{ kA} < I_{bf+} \leq 106 \text{ kA}$, $E = 1,046$

Pour $I_{bf+} > 106 \text{ kA}$, contacter le fabricant pour plus d'informations.

5.6.8 Équations pour les fusibles de classe RK1 jusqu'à 100A

Pour $I_{bf} < 0,65$ kA, calculer le courant d'arc et utiliser les courbes temps-courant pour déterminer l'énergie conformément aux points 5.2 et 5.3 :

Pour I_{bf} , tel que $0,65 \text{ kA} \leq I_{bf} \leq 1,16 \text{ kA}$,

$$E = 4,184(-11,176 I_{bf} + 13,565) \quad (24)$$

Pour I_{bf} , tel que $1,16 \text{ kA} < I_{bf} \leq 1,4 \text{ kA}$,

$$E = 4,184(-1,4583 I_{bf} + 2,2917) \quad (25)$$

Pour I_{bf} , tel que $1,4 \text{ kA} < I_{bf} \leq 106 \text{ kA}$, $E = 1,046$

Pour $I_{bf} > 106 \text{ kA}$, contacter le fabricant pour plus d'informations.

2.6.7. Disjoncteurs basse tension

Des équations ont été développées pour les systèmes utilisant des disjoncteurs basse tension. Ces équations fournissent des valeurs d'énergie incidente et de limite de protection contre les éclairs lorsque le courant de défaut de rupture disponible est connu ou calculable. Ces équations ne nécessitent pas la disponibilité des courbes temps-courant du disjoncteur, mais elles doivent être utilisées dans la plage appropriée indiquée ci-dessous. Voir 9.14 pour plus de détails sur le développement de cette partie du modèle. Pour les conditions de courant de défaut de rupture inférieures à la plage indiquée au Tableau (2.2), les équations de courant d'arc et d'énergie incidente des sections 5.2 et 5.3 doivent être utilisées [9].

Calibre (A)	Type de disjoncteur	Type de déclencheur	480V et moins		576-690V	
			Énergie incidente (J/cm ²) b	La valeur I_{bf} est en kA, la distance de travail est de 460 mm.	Énergie incidente (J/cm ²)	Limite d'éclair (mm)
100-400	MCCB	TM ou M	$0.189 I_{bf} + 0.548$	$9.16 I_{bf} + 194$	$0.27 I_{bf} + 0.180$	$11.8 I_{bf} + 196$
600-1200	MCCB	TM ou M	$0.223 I_{bf} + 1.590$	$8.45 I_{bf} + 364$	$0.335 I_{bf} + 0.380$	$11.4 I_{bf} + 369$
600-1200	MCCB	ÉLI	$0.377 I_{bf} + 1.360$	$12.50 I_{bf} + 428$	$0.468 I_{bf} + 4.600$	$13.4 I_{bf} + 568$
1600-6000	MCCB ou ICCB	TM ou ÉLI	$0.448 I_{bf} + 3.000$	$11.10 I_{bf} + 696$	$0.686 I_{bf} + 0.165$	$16.7 I_{bf} + 606$
800-6300	LVPCB	ÉLI	$0.636 I_{bf} + 3.670$	$14.50 I_{bf} + 786$	$0.958 I_{bf} + 0.292$	$19.1 I_{bf} + 864$
800-6300	LVPCB	ÉLS ^c	$4.560 I_{bf} + 27.230$	$47.20 I_{bf} + 2660$	$6.860 I_{bf} + 2.170$	$62.4 I_{bf} + 2930$

Tableau 2. 2:Équations pour l'énergie incidente et la limite de protection contre les éclairs par type et calibre de disjoncteur

Les types de disjoncteurs sont les suivants :

- MCCB : disjoncteur à boîtier moulé ;
- ICCB : disjoncteur à boîtier isolé ;
- LVPCB : disjoncteurs basse tension.

Les types de déclencheurs sont brièvement définis comme suit :

- TM : déclencheurs magnétothermiques
- M : déclencheurs magnétiques (instantanés uniquement).
- E : Les déclencheurs électroniques présentent trois caractéristiques pouvant être utilisées

Séparément ou combinées :

- (L) longue durée ;
- (S) courte durée e t ;
- (I) instantanée. Un déclencheur peut être désigné LI lorsqu'il présente à la fois des caractéristiques longue durée et instantanée. Les autres désignations courantes sont LS et LSI.

La plage de ces équations est de 700 A à 106 000 A pour les tensions indiquées dans le tableau (2.2). Chaque équation est applicable à la plage $I_1 < I_{bf} < I_2$

. I_2 est le pouvoir de coupure du disjoncteur à la tension considérée.

I_1 est le courant de défaut de rupture minimal auquel cette méthode peut être appliquée. I_1 est le niveau de courant de défaut de rupture le plus faible générant un courant d'arc suffisamment important pour un déclenchement instantané ou, pour les disjoncteurs sans déclenchement instantané, le courant le plus faible pour un déclenchement de courte durée.

Pour trouver I_1 , utilisez la courbe temps-courant du fabricant, si elle est facilement disponible, et prenez la valeur de déclenchement instantané, I_t , à partir de la courbe, comme illustré à la figure 1. Si la courbe n'est pas disponible, mais que le réglage de déclenchement instantané est indiqué sur le disjoncteur, utilisez ce réglage. Lorsque le courant de déclenchement, I_t , est inconnu, utilisez une valeur par défaut de 10 fois le courant nominal permanent du disjoncteur. Sauf pour les disjoncteurs de 100 A et moins, utilisez une valeur par défaut de $I_t = 1\,300$ A. En cas d'utilisation d'un déclencheur LS, I_t est le courant de démarrage de courte durée.

Le courant de défaut de rupture correspondant, I_{bf} , est obtenu en résolvant l'équation du modèle pour le courant d'arc de la section 5.2 pour les configurations de coffret en remplaçant I_t par le

courant d'arc. Le facteur 1,3 de l'équation (26) ajuste le courant au sommet de la plage de déclenchement. [9]

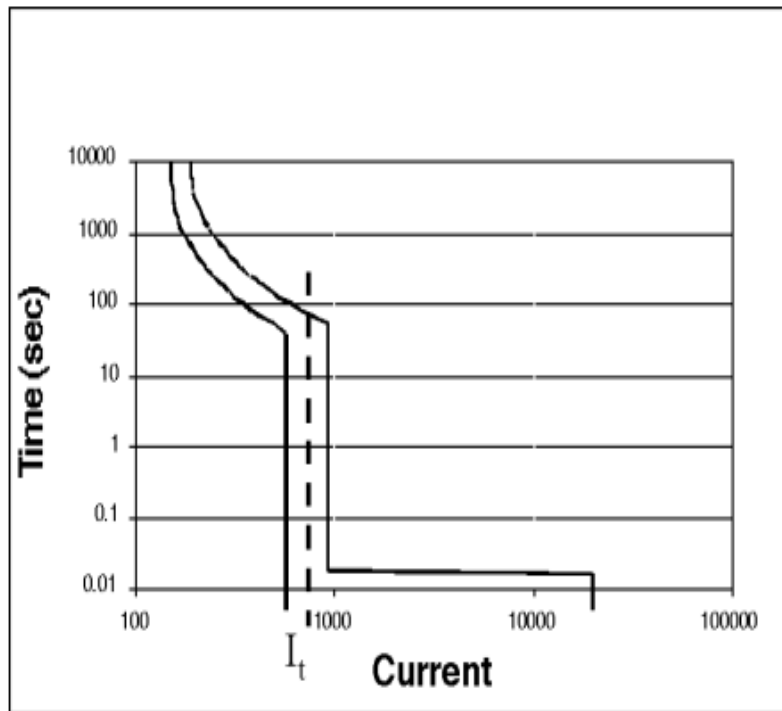


Figure 2. 2:Caractéristique temps-courant typique d'un disjoncteur.

$$\lg (1,3 I_t) = -0,084 + 0,096 V + 0,586 (\lg I_{bf}) + 0,559 V (\lg I_{bf}) \quad (26)$$

Résolution de I_{bf} au point I_1 pour 600 V :

$$\lg I_1 = 0,0281 + 1,09 \lg (1,3I_t) \quad (27)$$

Résolution de I_{bf} au point I_1 pour 480 V et moins :

$$\lg I_1 = 0,0407 + 1,17 \lg (1,3 I_t) \quad (28)$$

$$I_{bf} = I_1 = 10^{lg I_1} \quad (29)$$

2.7.Conclusion

L'étude théorique du danger lié à l'éclair d'arc **électrique** met en évidence la gravité de ce phénomène et la complexité de ses mécanismes. À travers l'analyse de sa formation, de ses

caractéristiques physiques et des effets qu'il peut engendrer, il devient évident que l'arc électrique constitue une menace sérieuse tant sur le plan humain que matériel.

La norme IEEE 1584, par son approche méthodique du calcul de l'énergie incidente, offre un outil fiable pour l'évaluation précise du risque et la mise en place de mesures de protection adaptées, notamment la détermination de l'Arc Flash Boudry et des équipements de protection individuelle requis.

Cette compréhension théorique est indispensable pour toute démarche de prévention efficace, et constitue la base sur laquelle reposent les stratégies de protection à venir. Le chapitre suivant portera donc sur les méthodes de prévention et les solutions techniques visant à réduire les risques liés à l'arc électrique dans les installations électriques industrielles.

Chapitre III

Coordination des dispositifs de protection

3.1.Introduction

La Commission Electrotechnique Internationale (C.E.I) définit la protection comme l'ensemble des dispositions destinées à la détection des défauts et des situations anormales des réseaux afin de commander le déclenchement d'un ou de plusieurs disjoncteurs et, si nécessaire d'élaborer d'autres ordres de signalisations afin de :

- Protection des personnes : contre les chocs électriques et les incendies.
- Protection des équipements : contre les surcharges, courts-circuits et défauts d'isolement.
- Maintien de la continuité de service : en limitant les zones affectées par un défaut.

Pour garantir un fonctionnement fiable du système électrique, il est essentiel de mettre en place une coordination efficace entre ces dispositifs. Cette coordination repose sur deux notions fondamentales : la sélectivité et la filiation.

3.1.1. Constitution

Le rôle fondamental d'un système de protection dans un réseau électrique, est de détecter les défauts possibles et de mettre hors tension la portion du réseau affecté par le défaut. Quelque soit la technologie, le système de protection est composé de trois parties fondamentales :

- Des capteurs ou réducteurs de mesure qui abaissent les valeurs à surveiller à des niveaux utilisables par les protections.
- Un système de relais de protection (Relais).
- Un appareillage de coupure (un ou plusieurs disjoncteurs).

Un exemple d'un système de protection pour une ligne HT est donné par la Figure 3.1.

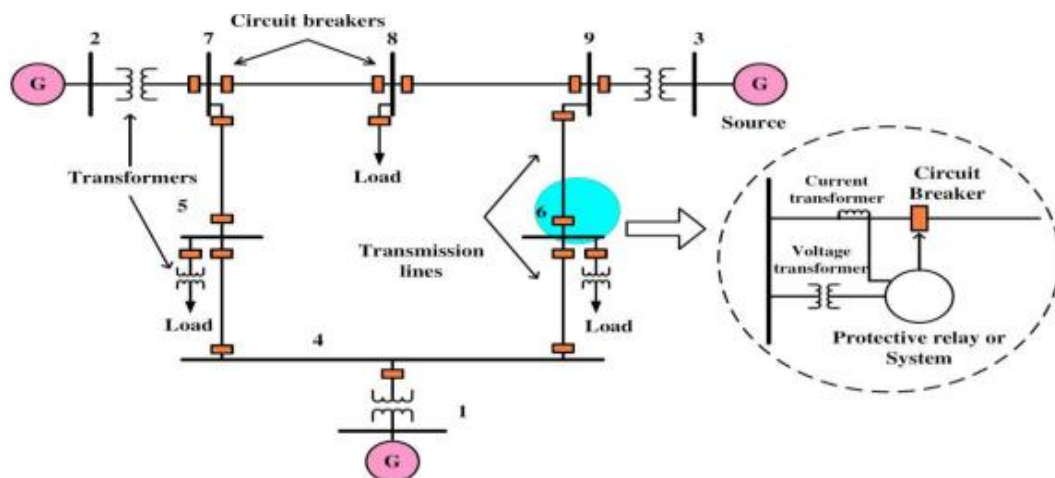


Figure 3. 1 :Constitution d'un système de protection.

L'une extrémité de la ligne a un système de protection similaire qui protège la ligne par l'ouverture du disjoncteur de l'autre extrémité. Dans le cas d'un défaut, les deux relais ont besoin de fonctionner, donc les deux disjoncteurs s'ouvrent et la ligne est mise hors service

Les relais de protection sont branchés aux transformateurs pour capter les signaux d'entrée et aux disjoncteurs pour émettre des instructions d'ouverture ou de fermeture. Ainsi, lorsque survient une anomalie, c'est au disjoncteur qu'incombe la responsabilité de supprimer l'anomalie, tandis que le système de relais de protection a pour mission d'identifier cette anomalie. En HT, les relais sont situés dans des sous stations. Le temps d'élimination de défauts comprend :

- Le temps de fonctionnement des protections (détection du défaut).
- Le temps d'ouverture des disjoncteurs (élimination du défaut).

3.1.2. Types de dispositifs de protection

3.1.2.1. Les sectionneurs

Le sectionneur est un appareil mécanique de connexion capable d'ouvrir et de mettre hors tension l'installation en aval pour d'éventuels travaux. Il est pourvu en général d'une condamnation. La coupure doit être visible soit directement par observation de la séparation des contacts, soit par un indicateur de position si les contacts ne sont pas visibles

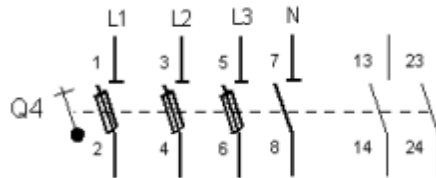


Figure 3. 2 :Les sectionneurs.

Les différents types de sectionneurs :

- Sectionneur unipolaire HTA, pour l'extérieur ;
- Sectionneur bipolaire HTA, pour l'extérieur ;
- Sectionneur tripolaire HTA, pour l'extérieur ;
- Sectionneur rotatif HTB, pour l'extérieur ;
- Sectionneur de mise à la terre.



Figure 3. 3:Sectionneurs intérieur et extérieur HTA

3.1.2.2. Interrupteur

Les interrupteurs sont des appareils destinés à ouvrir ou à fermer un circuit électrique, plus perfectionnés que les sectionneurs. Ils possèdent un certain pouvoir de coupure; en général, ils peuvent couper sous la tension nominale un courant d'une intensité égale à l'intensité nominale.

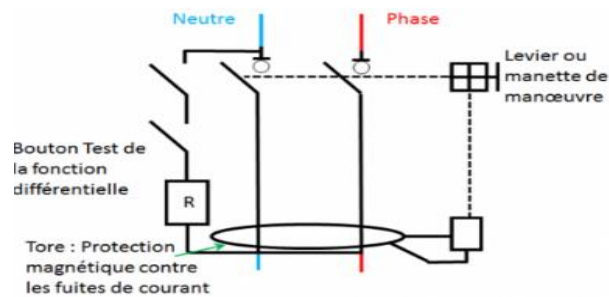


Figure 3. 4:schéma électrique de l'interrupteur différentiel.

3.1.2.3. Disjoncteur

Selon la définition de la Commission Electrotechnique Internationale (C.E.I), un disjoncteur à HTA est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège) à la fois :

- Dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique,
- Dans des conditions anormales spécifiées, en particulier pour éliminer un court-circuit et les conséquences de la foudre.

De par ses caractéristiques, un disjoncteur est l'appareil de protection essentiel des réseaux électriques HTA, car il est le seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc d'éviter que le matériel soit endommagé par ce court-circuit [8].

Les différents types de disjoncteurs :

- Le disjoncteur à faible volume d'huile.
- Le disjoncteur magnétique.
- Le disjoncteur à hexafluorure de soufre.
- Le disjoncteur à vide.
- Le disjoncteur pneumatique ou à air comprimé.

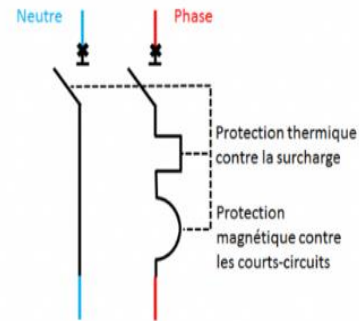


Figure 3. 5:schéma électrique du disjoncteur.

3.1.2.4. Les fusibles

C'est l'appareil de protection le plus répandu dans les réseaux de distribution son rôle est d'ouvrir par fusion, le circuit dans lequel il est inséré et d'interrompre le courant lorsque Celui-ci dépasse pendant un temps déterminé une valeur donnée. Son nom découle du fait qu'il fonctionne par fusion d'un filament.

Un des avantages de l'utilisation est son cout et sa simplicité d'opération, cependant il nécessite une intervention humaine pour être remplacé. Voire figure (3.6) [4].

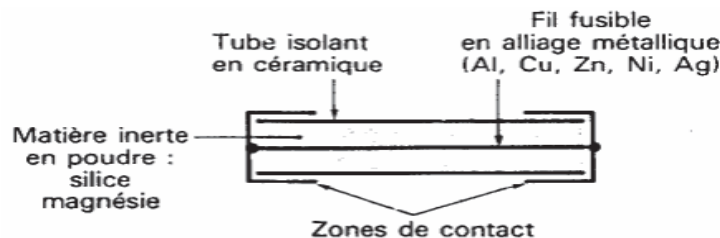


Figure 3. 6:constituants d'un fusible MT.

- **Caractéristiques du fusible :**

Les fusibles sont caractérisés par leur :

1. Tension nominale, qui est la grandeur que peut supporter le fusible en régime nominal.
2. Courant nominal, qui est la grandeur que peut supporter le fusible en régime normal.

3.1.2.1. Relai de protection

Ce sont des dispositifs de surveillance des grandeurs électriques du réseau. Ils sont destinés à donner des ordres de coupure ou de mise hors tension du circuit de ce réseau lorsque les grandeurs qui l'alimentent franchissent un seuil prédéterminé [5].

- Différents types des relais :

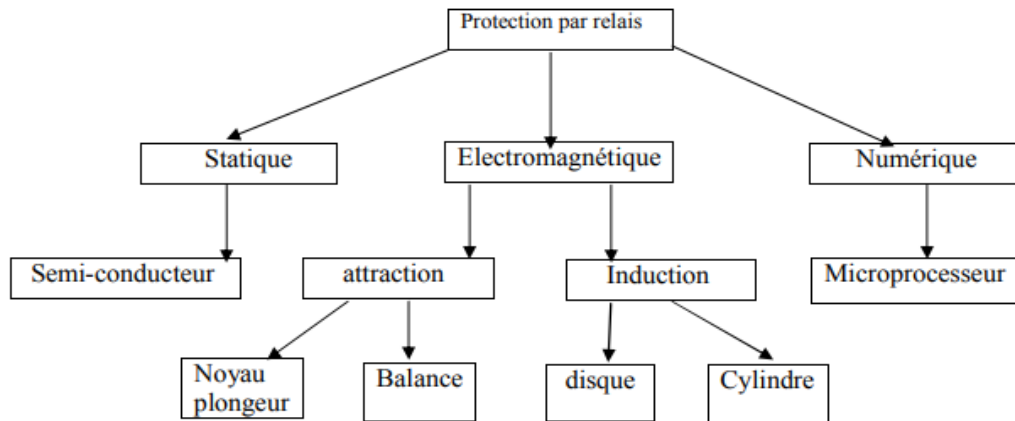


Figure 3. 7: Différents types des relais.

3.2. Coordination des protections Sélectivité et filiation

3.2.1. But de la coordination

Son objectif est d'identifier et de déconnecter au plus vite la section du réseau touchée par une défaillance, et uniquement cette section, tout en maintenant toutes les parties non affectées du réseau sous tension. On dispose de diverses techniques pour garantir une coordination efficace. Elle peut être garantie par :

- Courants
- Temps
- Temps et courant combinés
- Echange d'information
- Relais différentielle

3.2.2. La sélectivité

3.2.2.1. Définition

La sélectivité est une capacité d'un ensemble de protections à faire la distinction entre les conditions pour lesquelles une protection doit fonctionner de celles où elle ne doit pas fonctionner [6].

Les différents moyens qui peuvent être mis en œuvre pour assurer une bonne sélectivité dans la protection d'un réseau électrique, les plus importants sont les trois types suivants:

- Sélectivité ampère métrique par les courants.
- Sélectivité chronométrique par le temps.
- Sélectivité par échange d'informations, dite sélectivité logique.

3.2.2.2. Types de sélectivité

3.2.2.2.1. Sélectivité totale

Pour toute valeur de défauts, allant de la surcharge au court-circuit complet, la distribution est entièrement sélective si D2 est ouvert et D1 reste fermé[7].

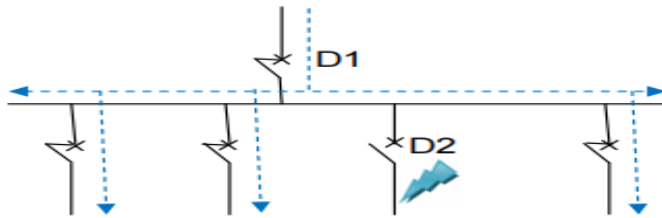


Figure 3. 8.Représentation de la sélectivité totale.

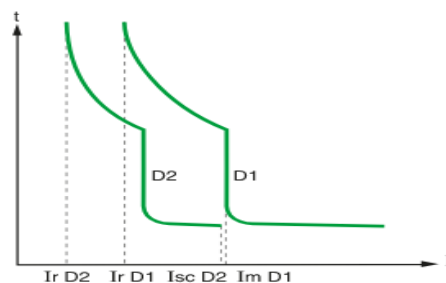


Figure 3. 9:Sélectivité totale entre les disjoncteurs D1 et D2.

3.2.2.2.2. Sélectivité partielle

La sélectivité est dite partielle lorsque l'appareil en aval fonctionne de manière autonome jusqu'à atteindre une valeur de court-circuit inférieure à I_{cc} présumé. Au-delà, le fonctionnement se poursuit tant en amont qu'en aval (D1 et D2 se déclenchent) [7].

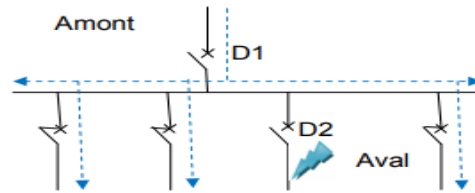


Figure 3. 10: Représentation de la sélectivité partielle.

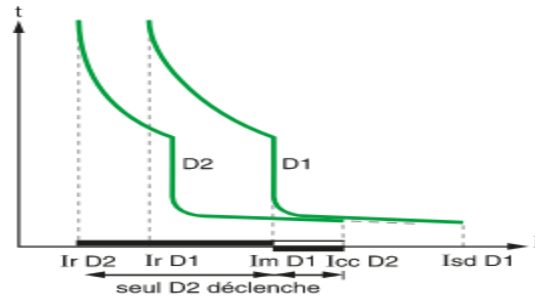


Figure 3. 11: Sélectivité partielle entre les disjoncteurs D1 et D2.

- Pour garantir une sélectivité suffisante dans la protection d'un réseau électrique, trois méthodes principales peuvent être employées.

3.2.2.3. Sélectivité ampérométrique

Une protection à ampères (Figure 3.12) est mise en place au début de chaque segment : son seuil est ajusté à une valeur plus basse que le minimum de défaut causé par un court-circuit sur la section sous surveillance, et supérieure à la valeur maximale du courant causé par un court-circuit situé en aval (au-delà de la zone surveillée).

Ainsi réglée, chaque protection ne fonctionne que pour les courts-circuits situés immédiatement en aval de sa position, à l'intérieur de la zone surveillée, elle est insensible aux court-circuit apparaissant au-delà [6].

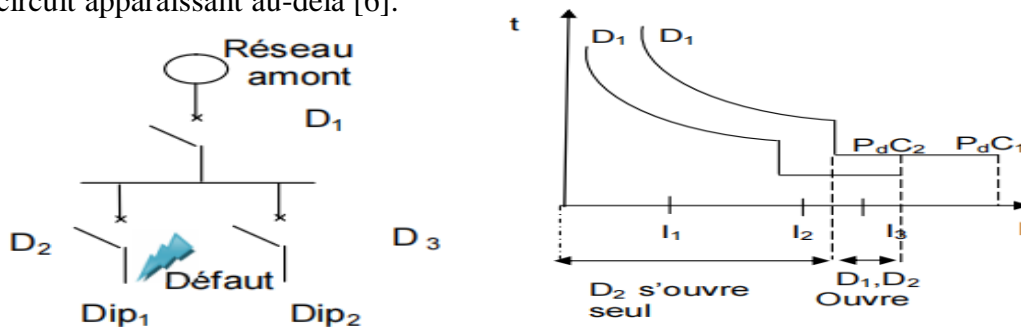


Figure 3. 12: Principe de la sélectivité ampérométrique.

PdC1 : pouvoir de coupure de D1

PdC2 : pouvoir de coupure de D2

I défaut = I1 : seul D2 s'ouvre

I défaut = I2 : seul D2 s'ouvre

I défaut = I3 : D1 et D2 s'ouvrent

la sélectivité est partielle

La sélectivité ampérométrique est d'autant plus grande que l'écart entre les calibres des disjoncteurs D1 et D2 est important (éloignés).

➤ **Avantages de la sélectivité ampérométrique**

Chaque protection ne fonctionne que pour les défauts situés immédiatement en aval de sa position, à l'intérieur de la zone surveillée, elle est insensible aux défauts apparaissant au-delà. Pour des tronçons de lignes séparés par un transformateur, ce système est avantageusement utilisé car il est simple, de coût réduit et rapide.

On considère l'exemple de la Figure 3.13 :

$$I_{ccBmax} < I_{sA} < I_{ccAmin}$$

I_{sA} : intensité de réglage.

I_{ccB} : image du court-circuit maximum au secondaire. Les temporisations T_A et T_B sont indépendantes, et T_A peut être plus courte que T_B .

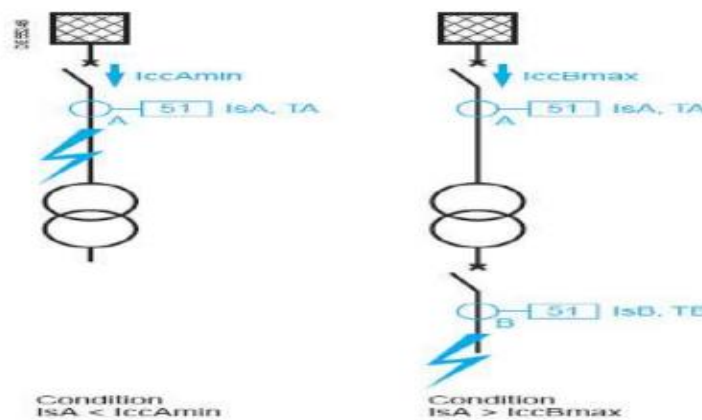


Figure 3. 13:sélectivité ampère métrique.

➤ **Inconvénients**

La protection située en amont (A) n'assure pas le secours de la protection située en aval (B). De plus, en pratique, il est difficile de définir les réglages de deux protections en cascade,

tout en assurant une bonne sélectivité, lorsque le courant ne décroît pas de façon notable entre deux zones voisines, ceci est le cas en moyenne tension sauf pour des tronçons avec transformateur

3.2.2.4. Sélectivité chronométrique

Mode de fonctionnement dans lequel les protections demandées sont structurées pour opérer de façon décalée temporellement. La protection la plus près de la source a le délai le plus étendu. Par conséquent, sur le diagramme (Fig. 3.14), toutes les protections (en A, B, C et D) perçoivent le court-circuit représenté. La protection temporisée D coupe ses contacts plus vite que celle mise en place en C, qui est elle-même plus rapide que celle mise en place en B.

Après l'ouverture du disjoncteur D et la disparition du courant de court-circuit, les protections A, B, C qui ne sont plus sollicitées, revient à leur position de veille. La différence des temps de fonctionnement T entre deux protections successives est l'intervalle de sélectivité [7].

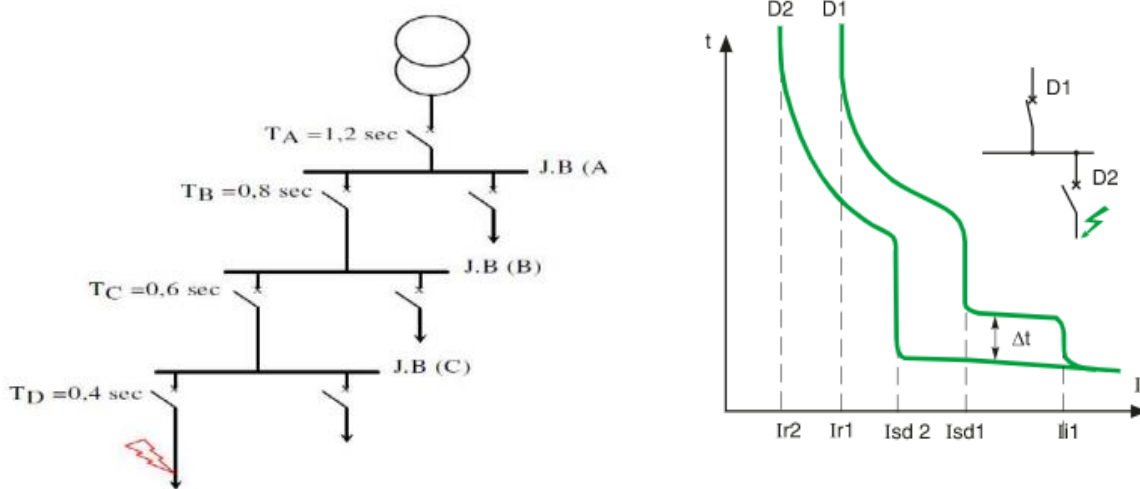


Figure 3. 14:Principe de sélectivité chronométrique.

➤ Avantages de la sélectivité chronométrique

Ce système de sélectivité a les avantages suivants :

- ◆ Assure son propre secours ; par exemple si la protection D est défaillante, la protection C est activée plus tard.
- ◆ Réalisation simple.

➤ Inconvénients

Lorsque le nombre de relais en cascade est grand, du fait que la protection située le plus en amont a la temporisation la plus longue, on aboutit à un temps d'élimination de défaut prohibitif et incompatible avec la tenue des matériels au courant de court-circuit.

❖ Relais à temps indépendant (Figure 3.14)

Les conditions à respecter sont : $I_{sA} > I_{sB} > I_{sC}$ et $T_A > T_B > T_C$. L'intervalle de sélectivité ΔT est 0,3 seconde[7].

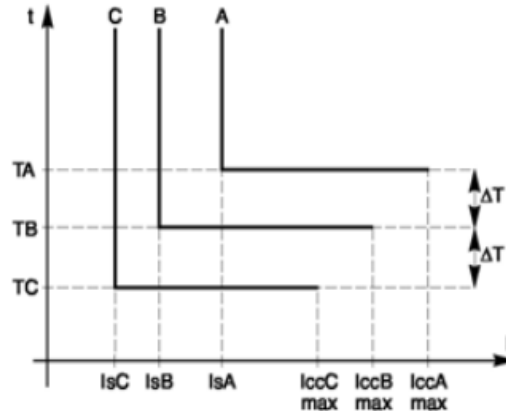


Figure 3. 15: Sélectivité chronométrique avec relais à temps indépendant.

❖ Relais à temps dépendant (Figure 3.16)

Si les seuils sont réglés au courant assigné I_n , la protection de surcharge est assurée en même temps que la protection de court-circuit et la cohérence des seuils est assurée.

$$I_nA > I_nB > I_nC$$

$$I_{sA} = I_nA, I_{sB} = I_nB, \text{ et } I_{sC} = I_nC$$

Les délais sont fixés pour déterminer l'intervalle de sélectivité ΔT pour le courant maximal observé par la protection en aval : on emploie à cet effet la même série de courbes, dans le but d'éviter leur intersection dans une section du domaine [7].

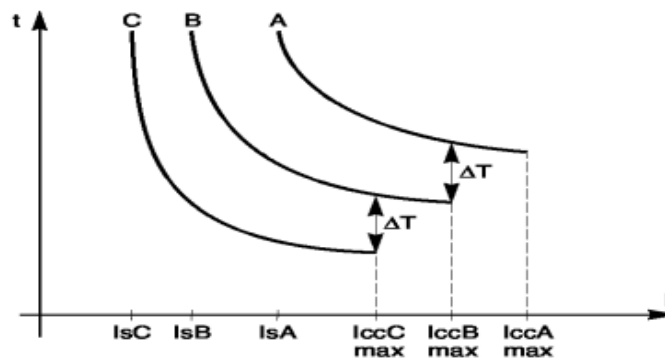


Figure 3. 16: Sélectivité chronométrique avec relais à temps dépendant.

3.2.2.5. Sélectivité logique

Lorsqu'une anomalie se manifeste dans un réseau en antenne, le courant de défaut parcourt le circuit situé entre la source et le point de défaut.

- Les protections en amont du défaut sont sollicitées.
- Les protections en aval du défaut ne sont pas sollicitées.
- Il convient que seule la première mesure de protection en amont du défaut soit mise en œuvre.

A chaque disjoncteur est associée une protection apte à émettre et recevoir un ordre d'attente logique. Lorsqu'une protection est sollicitée par un courant de défaut elle émet un ordre d'attente logique et elle provoque le déclenchement du disjoncteur associé. La Figure 3.17 décrit de façon simplifiée une distribution en antenne.

❖ Fonctionnement lorsqu'un défaut apparaît au point A (Figure 3.17)

Dans ce cas, les protections N° 1, N° 2, N° 3, ...etc., sont sollicitées. La protection N° 1 émet un ordre d'attente logique vers l'amont et un ordre de déclenchement au disjoncteur D1. Les protections N° 2, N° 3, ...etc., émettent un ordre d'attente logique de l'aval vers l'amont, et reçoivent un ordre d'attente logique qui les empêchent de donner l'ordre de déclenchement aux disjoncteurs D2, D3...etc., associés. Le disjoncteur D1 élimine le défaut A au bout du temps : $T_{D1} = T_1^1 + t_1$. T_1^1 est la temporisation de la protection N° 1 et t_{cD1} est le temps de coupure du disjoncteur D1.

❖ Fonctionnement lorsqu'un défaut apparaît au point B (Figure 3.17)

Pour le défaut B, la protection N° 1 n'est pas sollicitée et les protections N° 2, N° 3, ...etc., sont sollicitées et émettent un ordre d'attente logique vers l'amont. Seule la protection N° 2 ne reçoit pas d'ordre d'attente logique et émet un ordre de déclenchement. Le disjoncteur D2 élimine le défaut B au bout du temps : $T_{D2} = T_2^1 + t_2$. Où T_2^1 est la temporisation de la protection N° 2 et t_{cD2} le temps de coupure du disjoncteur D2. L'utilisation du système de sélectivité logique conduit à un temps d'élimination des défauts très réduit et indépendant du nombre de niveaux des protections. La fonction de l'attente logique correspond à une augmentation de la temporisation propre à la protection amont. Par souci de sécurité, la durée de l'attente logique est limitée ce qui permet à la protection amont de fonctionner en secours de la protection aval défailante.

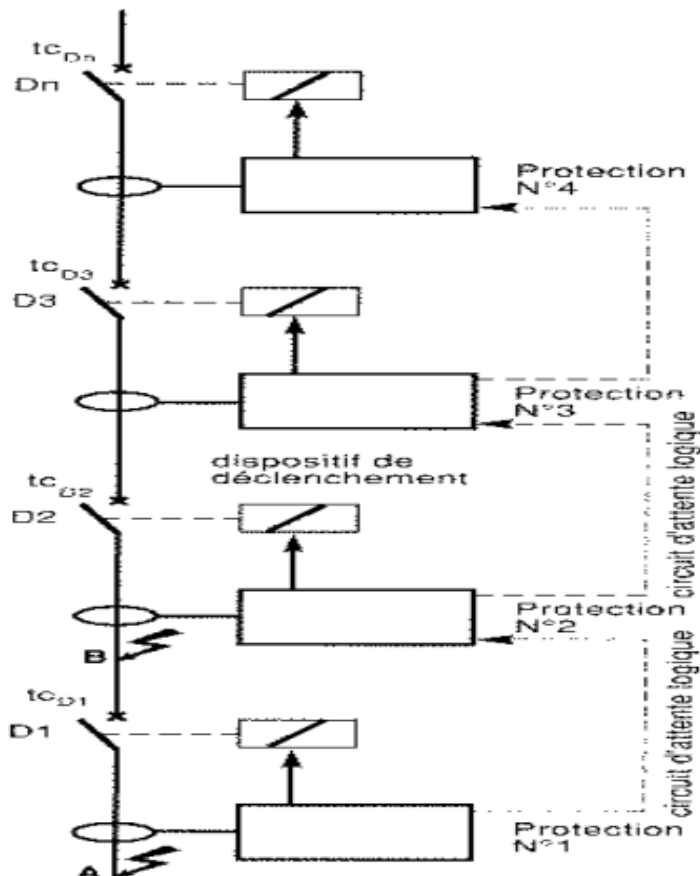


Figure 3. 17: Exemple d'utilisation de la sélectivité logique.

➤ Avantages de la sélectivité logique

Le caractère sélectif des protections se manifeste par une isolation rapide d'un éventuel défaut, notamment dans les circuits, ce qui contribue à diminuer les exigences relatives à la résistance des canalisations, de l'équipement et des transformateurs de courant. Elle est suffisamment simple et adaptable aux installations en études ainsi qu'aux installations déjà en place.

Elle est caractérisée par une mise en œuvre peu complexe. La sélectivité logique s'adapte sans difficulté aussi bien aux installations en études qu'aux installations existantes. En effet elle autorise des extensions sans modification des réglages, et ne nécessite qu'une simple liaison par fil pilote entre tableaux aval et tableau amont pour transmettre les informations logiques. Elle est indépendante du nombre de niveaux protégés.

➤ Inconvénients

Ce dispositif nécessite la transmission des signaux logiques entre les différents étages de protection, donc l'installation de filerie supplémentaire ; cette contrainte est forte lorsque les

protections sont éloignées, par exemple dans le cas de liaisons longues (plusieurs centaines de mètres). Aussi peut-on tourner la difficulté en faisant de la combinaison de fonctions : sélectivité logique au niveau de tableaux proches, et sélectivité chronométrique entre zone éloignées.

3.2.2.6. Sélectivité par protection différentielle

Ces protections comparent les courants aux deux extrémités du tronçon de réseau surveillé (Figure 3.18).

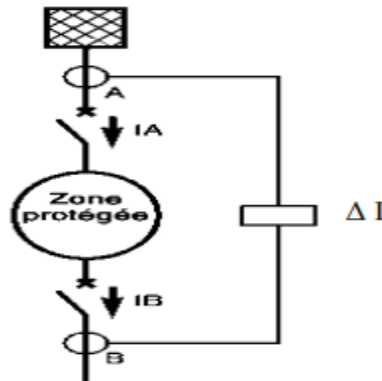


Figure 3. 18:Principe de la protection différentielle.

❖ Mode de fonctionnement

Toute variation d'amplitude ou de phase entre ces courants indique l'existence d'un défaut : la protection ne répond qu'aux anomalies internes à la zone surveillée et est indifférente à toute anomalie externe. Elle est donc par essence sélective.

Le fonctionnement est possible à condition d'utiliser des transformateurs de courant spécifiquement dimensionnés, rendant insensible la protection aux autres phénomènes. La stabilité de la protection différentielle est sa capacité à rester insensible s'il n'y a pas de défaut interne à la zone protégée, même si un courant différentiel est détecté :

- courant magnétisant de transformateur ;
- courant capacitif de ligne ;
- courant d'erreur dû à la saturation des capteurs de courant.

➤ Avantages de la sélectivité différentielle

- Protection sensible à des valeurs de courants de défaut inférieures au courant nominal de l'élément protégé ;
- Protection de zone qui peut déclencher instantanément.

➤ Inconvénients

- Le coût de l'installation est important ;
- La mise en œuvre du dispositif est délicate ;
- Il faut prévoir une fonction de secours à maximum de courant.

3.2.2.7. Sélectivité directionnelle

Dans un réseau en boucle, où un défaut est nourri de part et d'autre, il est impératif d'employer des protections réactives à l'absence de courant de défaut, afin de permettre son identification et sa suppression ciblée. Pour ce faire, on emploie des dispositifs de protection à courant maximal directionnel. Nous allons examiner un cas de sélectivité directionnelle pour les défauts se produisant entre les phases d'un réseau à deux entrées en parallèle (Figure 3.19) [7] .

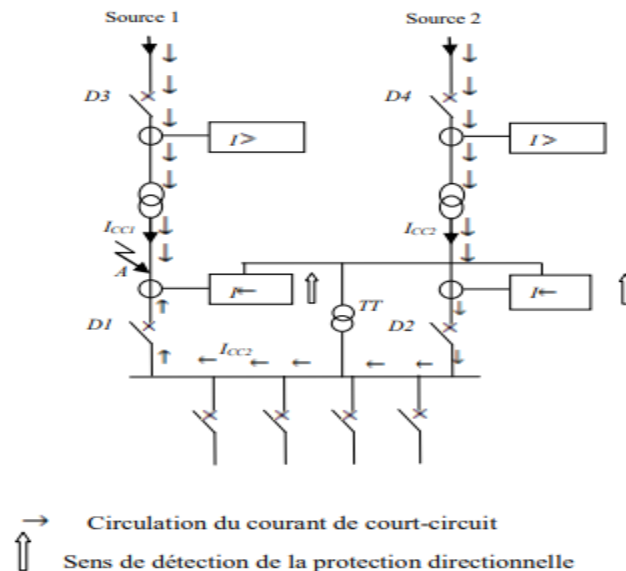


Figure 3. 19:Sélectivité directionnelle pour les défauts entre phases d'un réseau à deux.

Les disjoncteurs D1 et D2 sont équipés de protection à maximum de courant de phase directionnel, D3 et D4 sont équipés de protection à maximum de courant de phase.

Lorsqu'un défaut apparaît en A:

- les courants de court-circuit ICC1 et ICC2 s'établissent simultanément ;
- la protection directionnelle en D2 n'est pas activée car elle est traversée par un courant circulant dans un sens de détection;

- la protection directionnelle en D1 est activée car elle est traversée par un courant circulant dans le sens de sa détection. Elle provoque le déclenchement du disjoncteur D1, le courant ICC2 est coupé;

- la protection en D4 n'est plus activée ;

- Le tronçon en défaut est isolé ;

- La sélectivité entre la protection directionnelle en D1 et la protection en D4 est chronométrique. De même, la sélectivité entre la protection directionnelle en D2 et la protection en D3 set chronométrique.

3.2.2.8. Sélectivité combinée

- **Sélectivité ampérométrique + chronométrique**

L'exemple montre que l'on définit à la fois :

- Une sélectivité ampérométrique entre A1 et B ;

- Une sélectivité chronométrique entre A2 et B.

On obtient alors une sélectivité totale, et la protection en A assure le secours de la protection B [6].

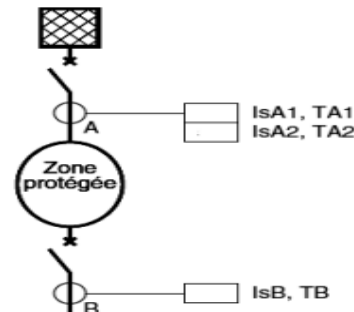


Figure 3. 20:Sélectivités ampérométrique + chronométrique.

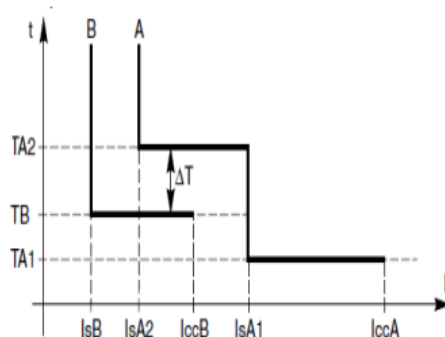


Figure 3. 21:Courbes de la sélectivité ampérométrique + chronométrique

3.2.2.9. Sélectivité logique + chronométrique

L'exemple montre que l'on définit à la fois :

- Une sélectivité logique entre A1 et B,
- Une sélectivité chronométrique entre A2 et B.

La protection A2 sert donc de secours à la protection A1, en cas de dysfonctionnement dû à une défaillance d'attente logique (ordre d'attente indéfini).

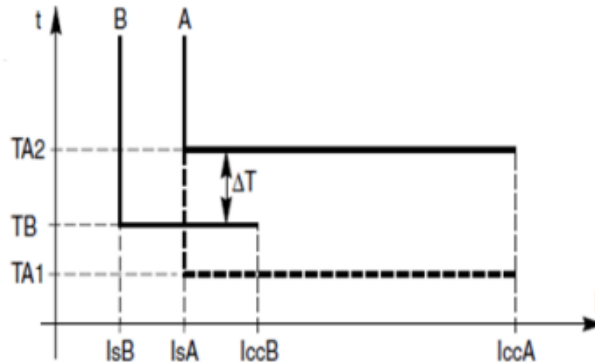


Figure 3. 22: Courbes de la sélectivité logique + chronométrique

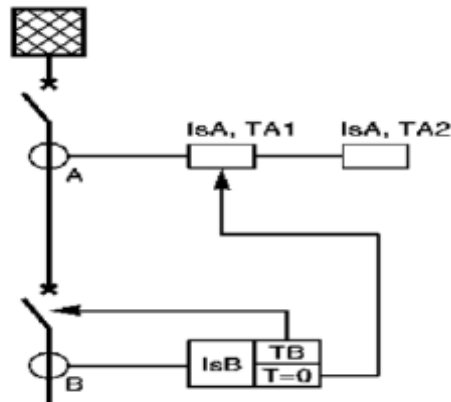


Figure 3. 23: Sélectivité logique + chronométrique.

L'exemple montre que l'on définit à la fois :

- Une sélectivité logique à l'intérieur d'un tableau (A et B d'une part, C et D d'autre part),
- Une sélectivité chronométrique entre les deux tableaux B et D, avec $TB = TD + DT$.
- Il n'est pas indispensable d'établir une connexion de transmission de signaux logiques entre deux tableaux distants. Les délais de déclenchement sont diminués par rapport à une simple sélectivité temporelle (Figure 3.24).

- De plus, il faut prévoir un secours chronométrique en A et C (se reporter au paragraphe ci-dessus).

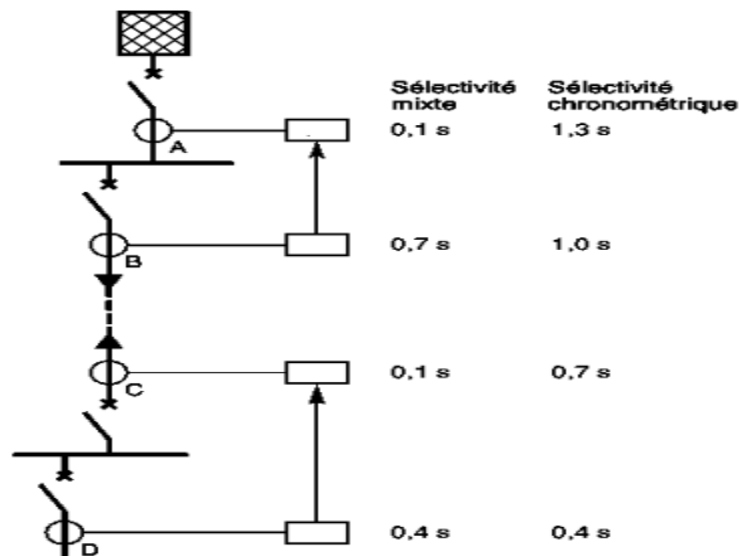


Figure 3. 24: Comparaison des temps de déclenchement entre la sélectivité chronométrique.

3.2.2.10. Sélectivité fusible – disjoncteur

Selon que le fusible est placé en amont ou en aval du disjoncteur, deux types distincts de sélectivité sont identifiés [7].

❖ Fusible en aval d'un disjoncteur

On envisage un fusible HTA et un disjoncteur HTA doté d'une protection contre le courant maximal. Les graphiques de fonctionnement et de fusion doivent se conformer aux conditions spécifiées dans la Figure 3.25, pour une protection indépendante du temps ou dans la Figure 3.25, pour une protection dépendante du temps.

Compte tenu de l'allure des courbes de fonctionnement et de fusion :

- I_f/I_{dest} minimale pour $I_d = I_r$;
- Δt est minimal pour $I = I_{cc} .max$.

Il suffit alors de vérifier que :

- $I_f \leq 0.8 I_d$ pour $I_d = I_r$;
- $\Delta t \geq 0.2s$ pour $I = I_{cc} .max$.

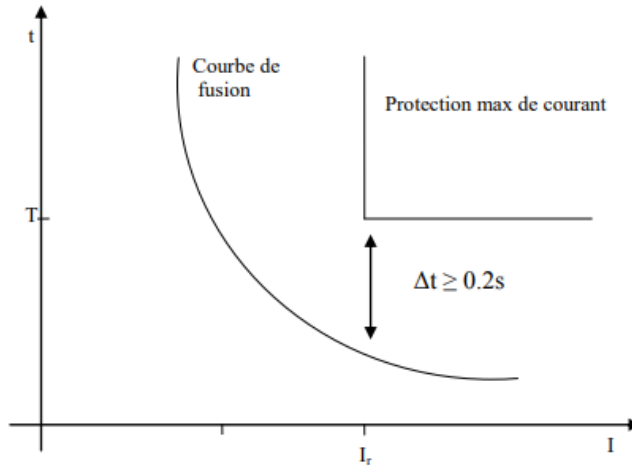


Figure 3. 25: Sélectivité entre un fusible et une protection à temps indépendant.

$$I_{fT} \leq 0.9I_r$$

T : Temporisation de la protection.

I_r : Seuil de réglage de la protection.

I_{fT} : Valeur du courant pour laquelle le fusible coupe en un temps T

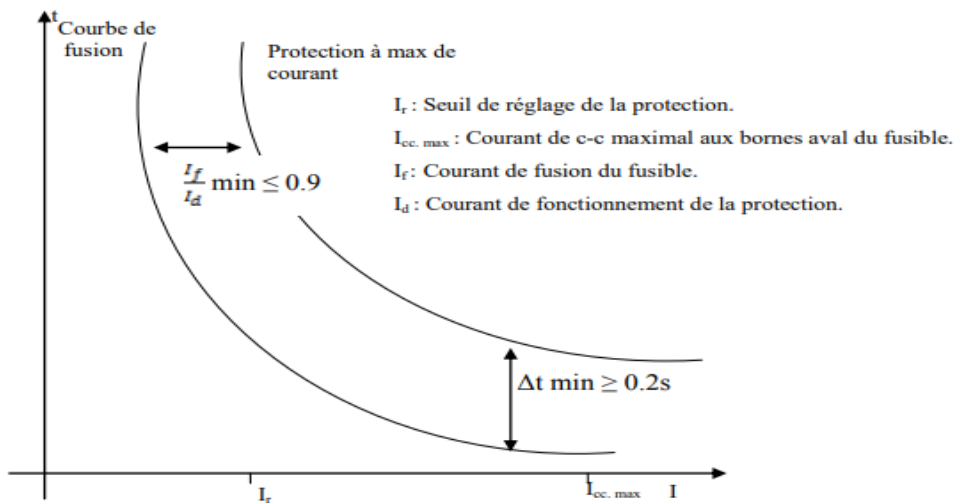


Figure 3. 26: Sélectivité entre un fusible et une protection à temps dépendant.

$I_f/I_d \text{ min}$: Point où le courant de fusion du fusible est le plus proche du courant activant la protection.

$\Delta t \text{ min}$: Point pour laquelle la différence entre le temps d'activation de la protection et le temps de fusion est minimale : pour I compris entre I_n et $I_{cc. \text{ max}}$.

❖ Fusible en amont d'un disjoncteur

Cette situation se présente entre l'interrupteur-fusible HTA protégeant le transformateur en amont et le disjoncteur BT situé en aval. La règle relative aux dispositifs combinés interrupteurs-fusible stipule que le courant de court-circuit triphasé à la sortie secondaire du transformateur doit entraîner la rupture des fusibles avant l'ouverture de l'interrupteur due à leur fusion.

Cela signifie que pour les courts-circuits basse tension près du transformateur, la durée de fusion des fusibles est inférieure à approximativement 36ms. Il est donc impossible d'obtenir une sélectivité entre le disjoncteur du tableau principal qui est proche du transformateur et le fusible. Si les disjoncteurs du réseau basse tension sont temporisés, seuls ceux qui se trouvent à une distance suffisante du transformateur peuvent être sélectifs avec le fusible. Effectivement, le courant de court-circuit est alors assez faible pour que la durée de fusion dépasse la temporisation. Pour que la sélectivité soit totale et sans risque d'altération du fusible, il faut que le temps de fusion du fusible soit supérieur à 5 fois la temporisation du disjoncteur pour le courant de court-circuit maximal aux bornes de celui-ci (Figure 3.27).

Le non sélectivité du fusible avec les disjoncteurs BT proches du transformateur est un désavantage important par rapport à la solution de protection par disjoncteur HTA.

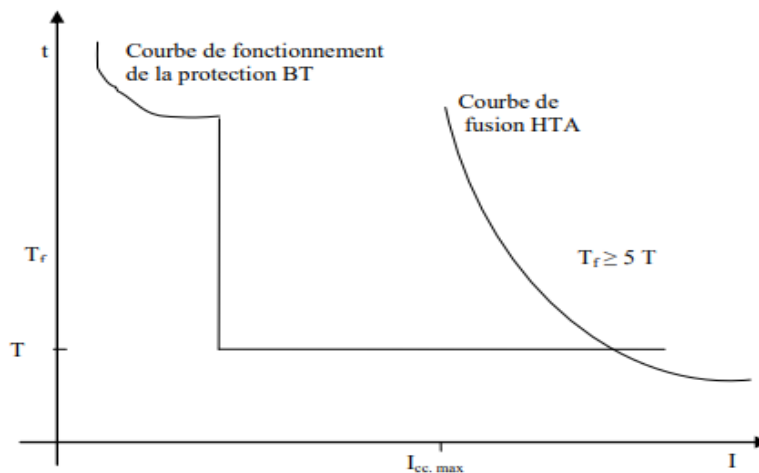


Figure 3. 27:Sélectivité entre un fusible HTA amont et un disjoncteur BT aval.

T : Temporisation du disjoncteur.

I_f : Courant de fusion du fusible pour $I_{cc. max}$.

$I_{cc. max}$: Courant de c-c maximal vu par le disjoncteur.

3.2.2.11. Vérification de la limite de sélectivité entre deux disjoncteurs C60 /N /H et C60/N/H par les courbe de déclenchement

Les deux courbes de déclenchement des disjoncteurs amont et aval est représentées comme suit :

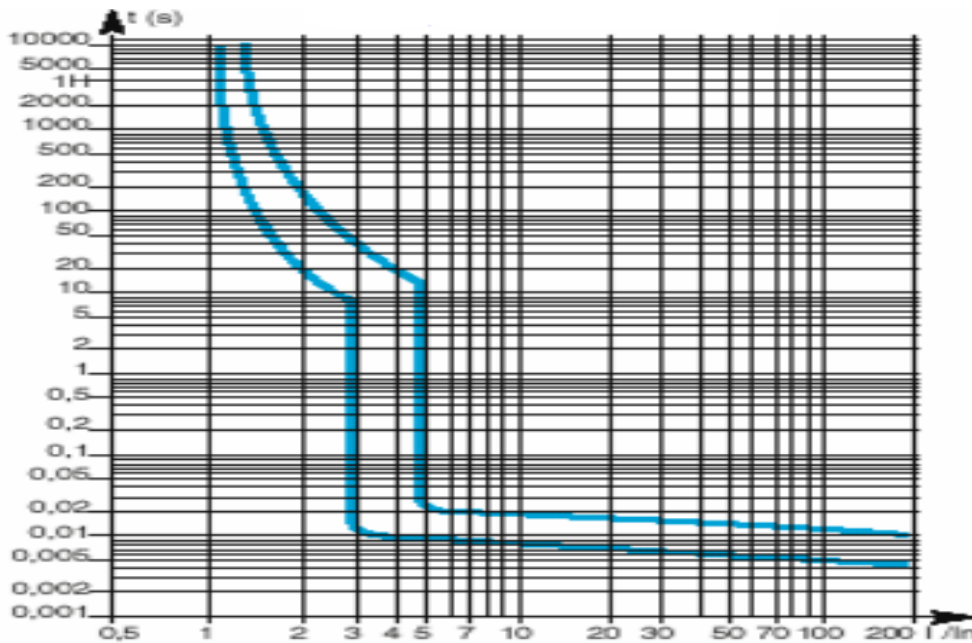


Figure 3. 28: Disjoncteur C60N aval 20A.

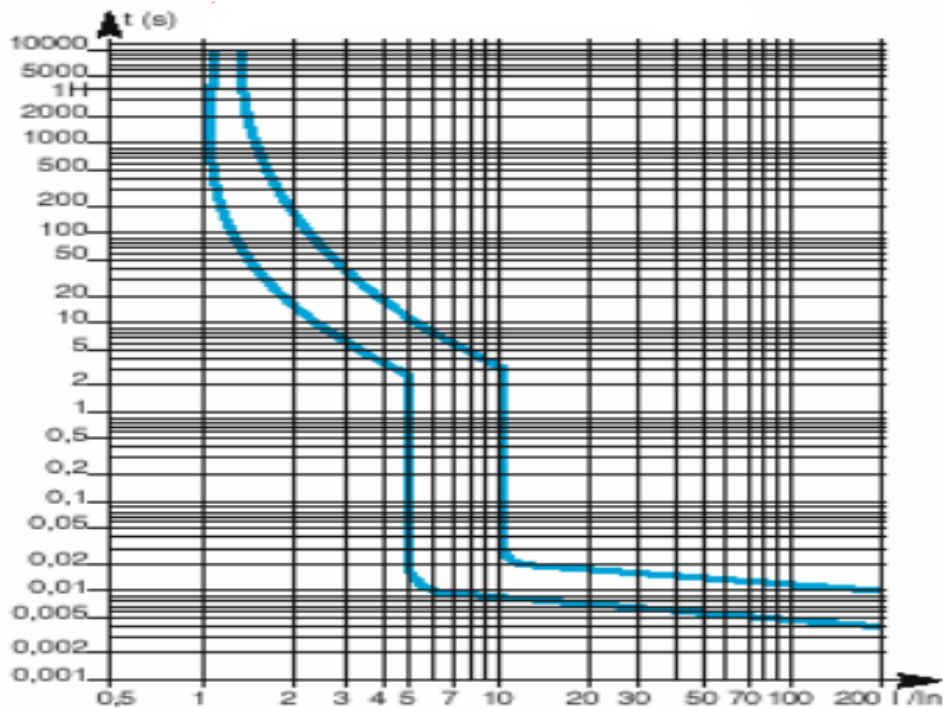


Figure 3. 29: Disjoncteur C60/N/H amont 40A.

➤ La limite de sélectivité entre deux disjoncteurs C60N et C60/N/H

Si en transposant la courbe du disjoncteur amont 40 A sur le graphe du disjoncteur aval 20 A on obtient :

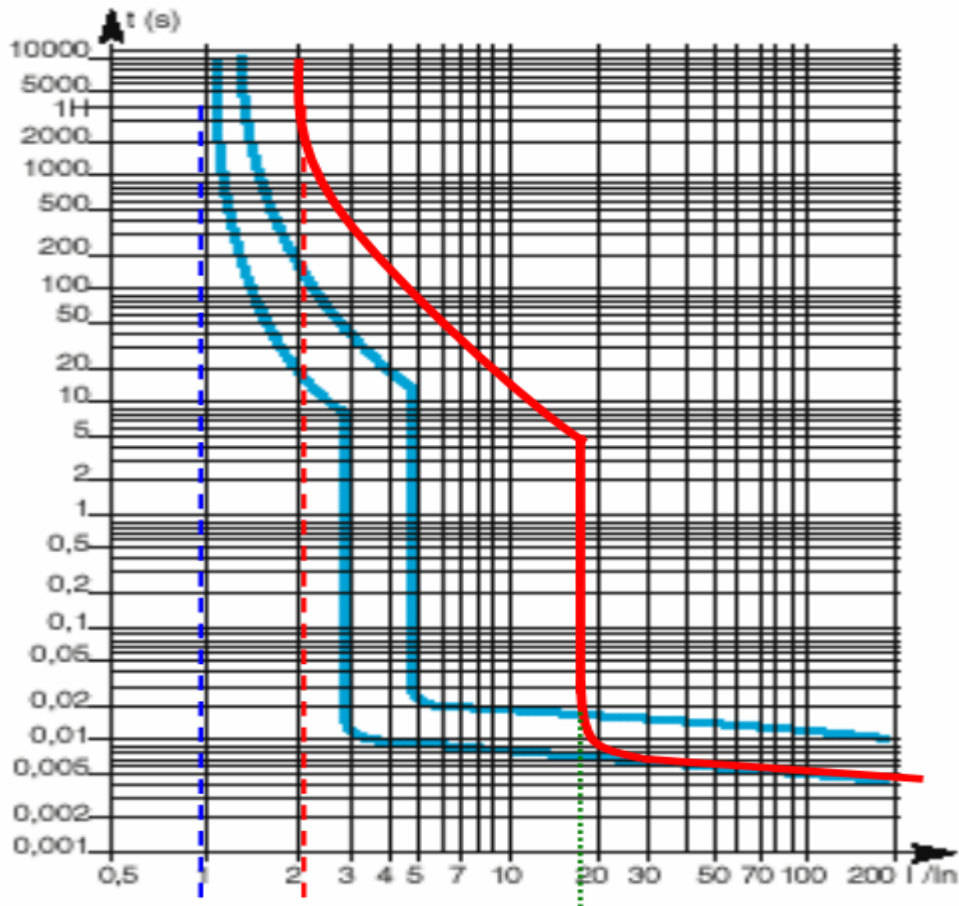


Figure 3. 30: La limite de sélectivité entre deux disjoncteurs C60N et C60/N/H.

Limite de sélectivité = $17 \times I_n$ Soit $17 \times 20 \text{ A} = 340 \text{ A}$

✓ Conclusion

La valeur de la limite de sélectivité donnée par le tableau de sélectivité est vérifiée.

Dans ce cas :

Pour $I_{ccB} < 340 \text{ A}$: seul le disjoncteur C60N s'ouvre → la sélectivité est **totale**.

Pour $I_{ccB} > 340 \text{ A}$: les disjoncteurs C60N et C60/N/H s'ouvrent → la sélectivité est **partielle**.

3.2.3. Avantage de sélectivité

- Disponibilité permanent l'énergie.
- Pas de rupture de fabrication.
- Pas de respire de procédure de démarrage.
- Pas d'arrête intempestif et dangereux des machines ou système.
- Disponibilité permanent l'énergie.

3.2.4. Filiation

3.2.4.1. Définition

La filiation est l'utilisation du pouvoir de limitation des disjoncteurs, qui permet d'installer en aval des disjoncteurs moins performants. Les disjoncteurs Compact amont jouent alors un rôle de barrière pour les forts courants de court-circuit. Ils permettent ainsi à des disjoncteurs de pouvoir de coupure inférieur au courant de court-circuit présumé (en leur point d'installation) d'être sollicités dans leurs conditions normales de coupure. La limitation du courant se faisant tout au long du circuit contrôlé par le disjoncteur limiteur amont, la filiation concerne tous les appareils placés en aval de ce disjoncteur. Elle n'est pas restreinte à deux appareils consécutifs.

❖ Filiation à 2 niveaux

Dans le cas de circuits monophasés (protégés par des disjoncteurs 1P+N ou 2P) dans un réseau 400/415 V, alimentés en amont par un circuit triphasé, il convient d'utiliser les tableaux d'association sous 230/240 V [7].

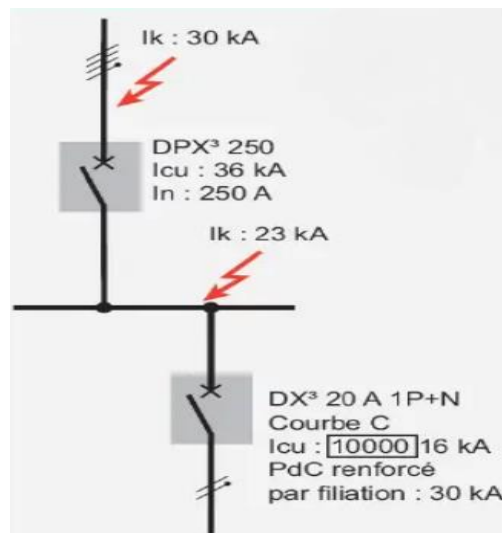
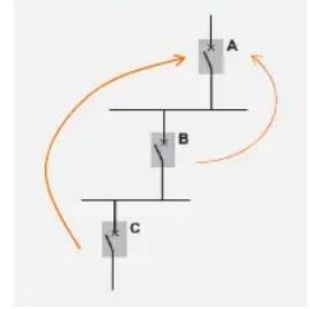


Figure 3. 31: filiation à 2 niveaux

❖ Filiation à 3 niveaux

• Filiation avec l'appareil de tête

Les appareils B et C sont coordonnés avec l'appareil A. L'appareil amont A doit avoir un pouvoir de coupure suffisant en son point d'installation. Il suffit alors de vérifier que les valeurs de filiation B + A et C + A ont les pouvoirs de coupure nécessaires. Dans ce cas, il est inutile de vérifier la filiation entre les appareils B et C. [7]



• Filiation en cascade

La coordination est réalisée entre appareils successifs. L'appareil amont A doit avoir un pouvoir de coupure suffisant en son point d'installation. Il suffit alors de vérifier que les valeurs de filiation C + B et B + A ont les pouvoirs de coupure nécessaires. Dans ce cas, il est inutile de vérifier la filiation entre les appareils A et C. [7]



❖ Courbes de limitation en courant

Tension 400/440 V CA

Courant de court-circuit limité (KA crête)

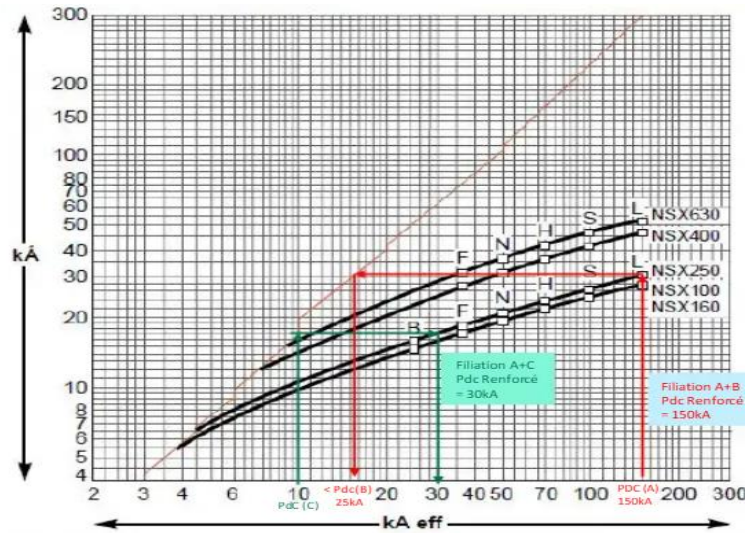


Figure 3.32: Courbes de limitation en courant.

❖ Tableaux de filiation

- réseaux 400/440

Amont : compact

Aval : compact multi 9

amont pouvoir de coupure (kA eff)	NG160N 25	NR100F 25	NSX100F 36	NSX100N 50	NSX100H 70	NSX100S 100	NSX100L 150
aval	pouvoir de coupure (kA eff)						
DT40 (3P, 3P+N)	10	10	10	10	10	10	10
DT40N (3P, 3P+N)	20	20	20	20	20	20	20
DT60N, C60N	25	25	25	30	30	30	30
DT60H, C60H	25	25	30	40	40	40	40
C60L ≤ 25 A	25		30	40	40	40	40
C60L ≤ 40 A	25	25	30	40	40	40	40
C60L ≤ 63 A	25	25	30	40	40	40	40
P25M ≥ 14 A	25		25	40	50	50	50
C120N/H	25	25	25	25	25	25	25
NG125N			36	36	36	50	70
NG125L/LMA					70	100	150
NS80HMA						100	150
NSX100F				50	70	100	150
NSX100N					70	100	150
NSX100H						100	150
NSX100S							150

Tableau 3. 1:Tableaux de filiation.

Dans un réseau 400/440 V, le tableau présente les valeurs de filiation entre des disjoncteurs Compact (NSX, NG, NR) placés en amont et des disjoncteurs Multi 9 (DT40, C60, C120...) placés en aval. Il indique le courant de court-circuit maximal (kA) que peut supporter l'appareil aval grâce à la protection assurée par l'amont. Par exemple, un C60L 25 A peut être utilisé sur un point à 40 kA s'il est protégé par un NSX100N. Cela permet d'utiliser des appareils aval à faible pouvoir de coupure, en assurant la sécurité par coordination constructeur.

3.2.4.2. Avantages

La filiation permet de bénéficier de tous les avantages de la limitation. Ainsi, sont réduits les effets résultant des courants de court-circuit, soit :

- les effets électromagnétiques ;
- les effets électrodynamiques, ;
- les effets thermiques.

L'installation d'un seul disjoncteur limiteur amène des simplifications et des économies importantes pour toute l'installation aval :

- simplification du choix des appareils par les tableaux de filiation ;
- économie sur les appareils aval. La limitation permet d'utiliser des disjoncteurs aux performances standards.

3.3. Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'importance de la coordination des dispositifs de protection dans les réseaux électriques. Elle permet d'assurer la sécurité des personnes, la protection des équipements, ainsi que la continuité de service. À travers l'étude des différents dispositifs (sectionneurs, disjoncteurs, fusibles, relais...) et des principes de sélectivité (ampérométrique, chronométrique, logique, différentielle, directionnelle), on comprend que chaque méthode possède ses avantages et limites selon les besoins du réseau. La filiation, complémentaire à la sélectivité, permet une protection économique et efficace en aval. En somme, une coordination bien pensée garantit un réseau fiable, sélectif et adapté aux contraintes techniques et économiques d'une installation électrique.

Chapitre IV

Résultats et interprétations

4.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons et analysons les résultats obtenus à partir de la modélisation et des simulations réalisées sur le schéma électrique étudié. L'objectif principal est d'évaluer les niveaux de danger liés à l'éclair d'arc électrique et de vérifier l'efficacité des dispositifs de protection mis en place. À travers une approche méthodique, nous interpréterons les données issues des calculs de l'énergie incidente, des courants de défaut et de la coordination des protections, afin d'en déduire les performances du système et les éventuels points de faiblesse. Cette analyse permettra d'apporter des recommandations concrètes pour améliorer la sécurité et la fiabilité de l'installation électrique.

➤ Partie 01 : analyse danger l'arc électrique

4.2. Description générale du schéma

Le présent document a pour objectif d'analyser un schéma unifilaire représentant une distribution moyenne tension (MT) dans une installation électrique industrielle. Le système reçoit une alimentation haute tension (HT) de 115 kV et la transforme en 13,2 kV pour l'alimentation de plusieurs moteurs. Ce type de réseau est typiquement utilisé dans les grandes installations industrielles ou les postes de transformation.

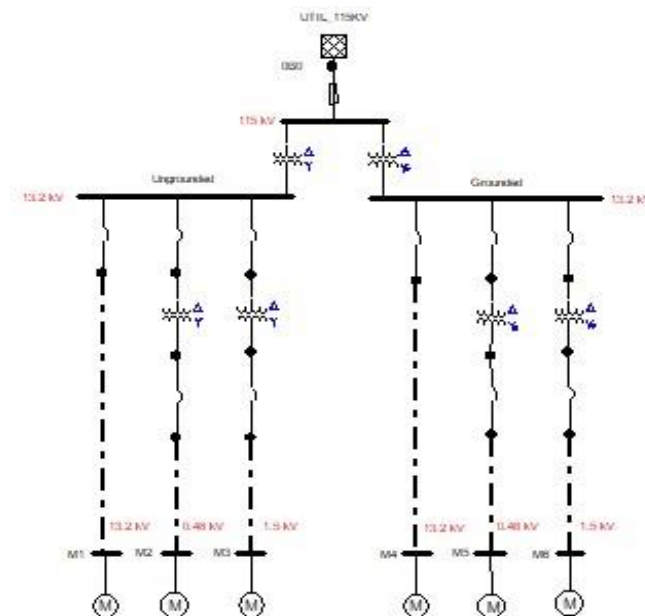


Figure 4. 1:Schéma unifilaire représentant une distribution d'un réseau électrique .

Le schéma est divisé en trois sections principales : (ANNEXE 01)

- Une source haute tension (115 kV)
- Un transformateur de puissance abaisseur (115 kV / 13,2 kV)

- Neuf jeux de barres (deux en 13,2 kV : l'un non mis à la terre et l'autre mis à la terre)
- Six départs moteurs (M1 à M6)

➤ **Courbe de couple mécanique du moteur M_13.2KV**

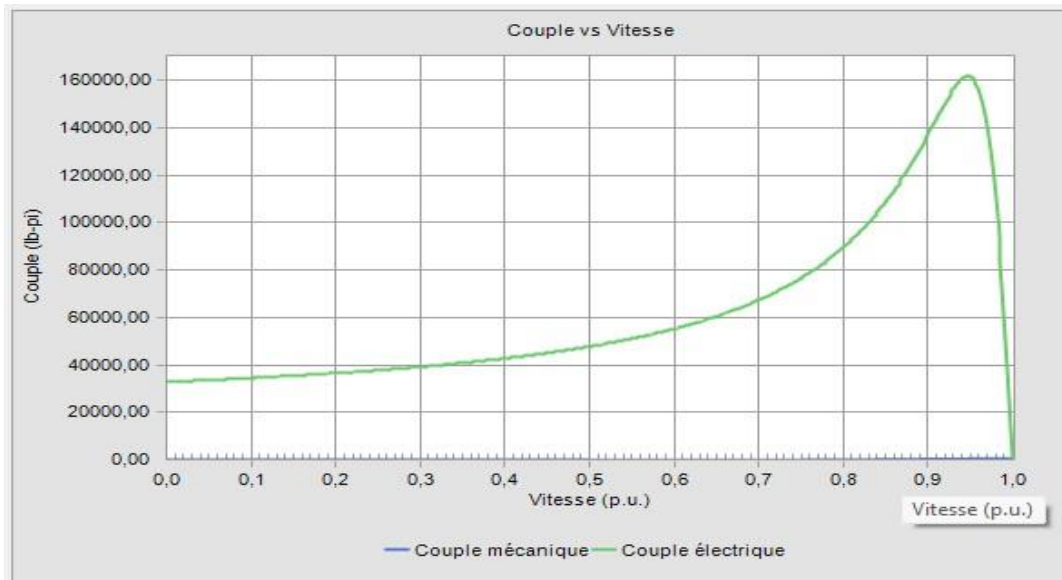


Figure 4. 2: Courbe de couple mécanique du moteur M_13.2KV.

➤ **Courbe de couple mécanique du moteur M_0.48KV**

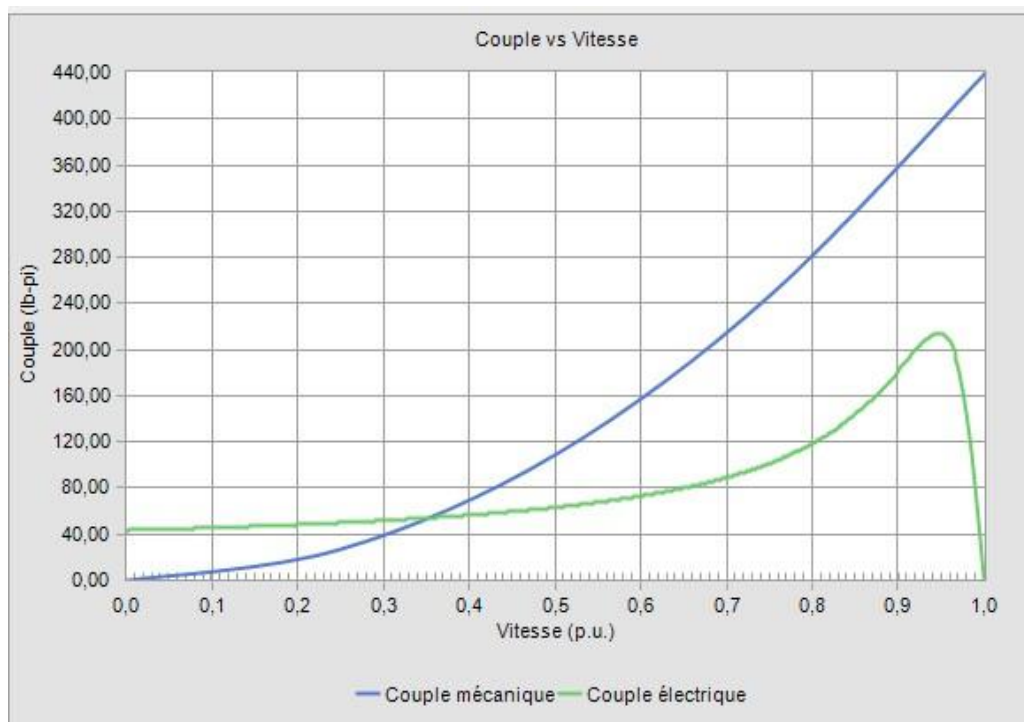


Figure 4. 3: Courbe de couple mécanique du moteur M_0.48KV.

➤ Courbe de couple mécanique du moteur M_1.5KV

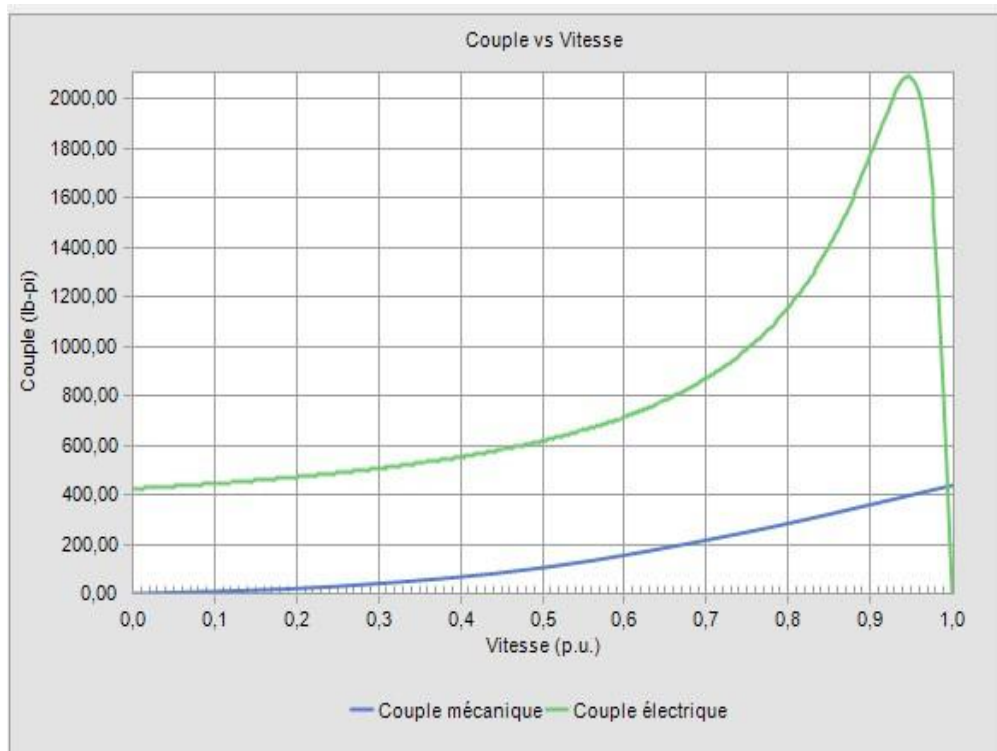


Figure 4. 4: Courbe de couple mécanique du moteur M_1.5KV.

4.3. Résultats et interprétations

4.3.1. L'équipement connecté à ciel ouvert

Nom de nœud/Nom de barre	Type de dispositif de protection	Tension de basse [KV]	I (arc) détectée par dispositifs [KA]	Défaut franc [KA]	Défaut d'arc [KA]	Multi défaut d'arc	Temps d'ouverture [ms]	Périmètre de protection contre l'éclair d'arc [in]	Energie incidente [cal/cm^2]	Méthode/Standard
M1	Disjoncteur à basse tension	13,20	1,313	1,340	1,346	100%	609	18,793	0,736	IEEE-1584
M2	Disjoncteur à basse tension	0,48	2,441	4,546	2,871	100%	90	13,326	0,370	IEEE-1584
M3	Disjoncteur à basse tension	1,50	4,634	4,994	4,905	100%	90	14,534	0,440	IEEE-1584
M4	Disjoncteur à basse tension	13,20	1,313	1,340	1,346	100%	609	16,501	0,567	IEEE-1584
M5	Disjoncteur à basse tension	0,48	2,441	4,546	2,871	100%	90	11,700	0,285	IEEE-1584
M6	Disjoncteur à basse tension	1,50	4,606	4,994	4,905	100%	90	12,761	0,339	IEEE-1584

Tableau 4. 1: L'équipement connecté à ciel ouvert

Le tableau présente les résultats de l'analyse du risque d'arc électrique pour les équipements connectés en plein air, selon la norme IEEE-1584.

Les données montrent que l'énergie incidente varie entre 0,285 et 0,736 cal/cm^2 , ce qui reste en dessous des seuils dangereux, indiquant une protection efficace.

Le temps d'ouverture varie selon le niveau de tension et la configuration, atteignant 609 ms pour la moyenne tension et 90 ms pour la basse tension.

Ainsi, les résultats démontrent que la conception actuelle assure une protection adéquate contre les risques d'arc électrique conformément aux normes internationales.

4.3.2. L'équipement connecté à commutateur à haute tension

Nom de nœud/Nom de barre	Type de dispositif de protection	Tension de basse [KV]	I (arc) détectée par dispositifs [KA]	Défaut franc [KA]	Défaut d'arc [KA]	Multi défaut d'arc	Temps d'ouverture [ms]	Périmètre de protection contre l'éclair d'arc [in]	Energie incidente [cal/cm ²]	Méthode/Standard
M1	Disjoncteur à basse tension	13,20	1,313	1,340	1,346	100%	609	695,679	1,269	IEEE-1584
M2	Disjoncteur à basse tension	0,48	2,777	4,546	3,266	100%	90	436,510	0,743	IEEE-1584
M3	Disjoncteur à basse tension	1,50	4,634	4,994	4,905	100%	90	380,689	0,759	IEEE-1584
M4	Disjoncteur à basse tension	13,20	1,313	1,340	1,346	100%	609	494,176	0,978	IEEE-1584
M5	Disjoncteur à basse tension	0,48	2,777	4,546	3,266	100%	90	365,831	0,566	IEEE-1584
M6	Disjoncteur à basse tension	1,50	4,606	4,994	4,905	100%	90	291,368	0,585	IEEE-1584

Tableau 4. 2: L'équipement connecté à commutateur à haute tension

Le tableau présente les résultats de l'évaluation du risque d'arc électrique pour l'équipement connecté à un commutateur à haute tension, selon la norme IEEE-1584.

L'énergie incidente varie entre 0,585 et 1,269 cal/cm², restant maîtrisable mais nécessitant une attention particulière dans certains cas.

Le point M1 enregistre la valeur la plus élevée en raison d'un temps d'ouverture prolongé (609 ms) en moyenne tension.

Il est donc recommandé de prendre des mesures de protection adéquates, notamment des EPI, dans les zones à haute énergie incidente.

4.3.3. L'équipement connecté à câble

Nom de nœud/Nom de barre	Type de dispositif de protection	Tension de basse [KV]	I (arc) détectée par dispositifs [KA]	Défaut franc [KA]	Défaut d'arc [KA]	Multi défaut d'arc	Temps d'ouverture [ms]	Périmètre de protection contre l'éclair d'arc [in]	Energie incidente [cal/cm ²]	Méthode/Standard
M1	Disjoncteur à basse tension	13,20	1,313	1,340	1,346	100%	609	627,205	1,270	IEEE-1584
M2	Disjoncteur à basse tension	0,48	2,777	4,546	3,266	100%	90	476,749	0,734	IEEE-1584
M3	Disjoncteur à basse tension	1,50	4,634	4,994	4,905	100%	90	484,969	0,759	IEEE-1584
M4	Disjoncteur à basse tension	13,20	1,313	1,340	1,346	100%	609	550,605	0,979	IEEE-1584
M5	Disjoncteur à basse tension	0,48	2,777	4,546	3,266	100%	90	418,591	0,566	IEEE-1584
M6	Disjoncteur à basse tension	1,50	4,606	4,994	4,905	100%	90	425,808	0,583	IEEE-1584

Tableau 4. 3 : L'équipement connecté à câble

Le tableau représente une analyse du risque d'arc électrique (Arc Flash) en plusieurs points d'un système électrique basse tension, dans le but d'évaluer la sécurité au travail. Il présente des données telles que le courant de court-circuit, la durée de l'arc, son énergie, ainsi que la distance à l'arc, selon la norme IEEE 1584. Ces valeurs aident à déterminer les équipements de protection individuelle (EPI) appropriés et à réduire le risque de brûlures. Le tableau est utilisé pour garantir la protection des intervenants et améliorer la conception des systèmes de protection électrique.

4.3.4. Les figures

4.3.4.1. L'équipement connecté à ciel ouvert

La figure représente de la densité d'énergie (cal/cm^2) en fonction de la longueur (en mm) pour différents scénarios (M1 à M6), avec un temps d'arc fixé à 60 ms. Certains cas incluent un facteur E.P.I = 1,2, qui semble représenter un facteur de correction (Équipement de Protection Individuelle ou facteur de sécurité).

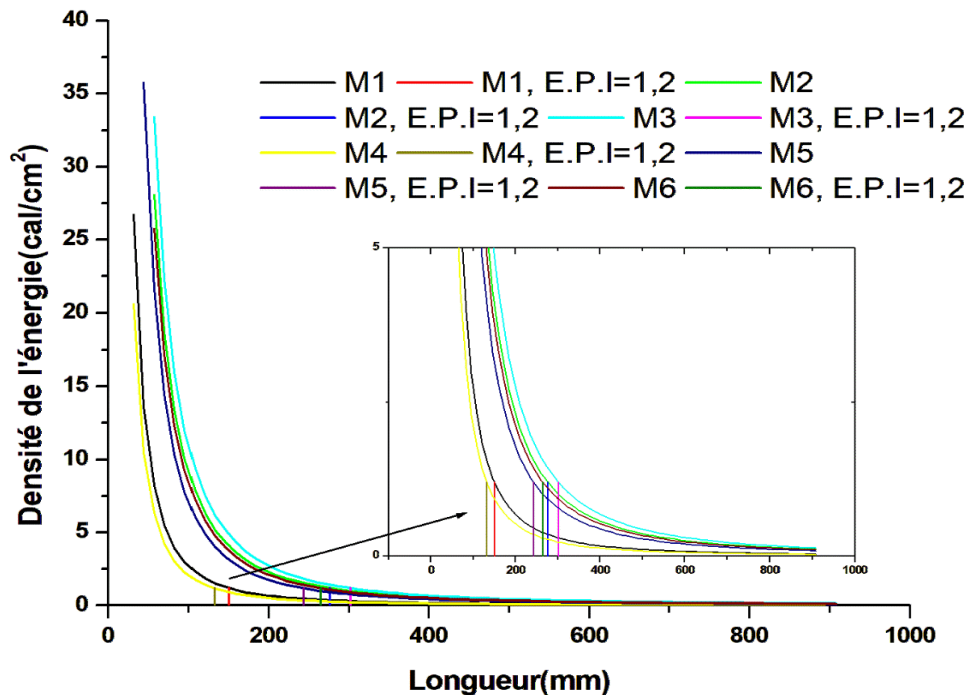


Figure 4. 5: L'équipement connecté à ciel ouvert

• Une interprétation détaillée et une analyse technique :

Analyse de la variation spatiale de la densité d'énergie Présentation des résultats la figure présente l'évolution de la densité d'énergie thermique en fonction de la distance (ou longueur) à partir de la source de l'arc, pour différents scénarios de défaut (M1 à M6), avec un temps d'arc constant de 60 millisecondes. Pour chaque scénario, deux courbes sont représenté une sans correction (standard), Une avec un facteur de correction ou d'atténuation E.P.I = 1,2.Effet de la distance sur la densité d'énergie Les courbes montrent une diminution rapide de la densité d'énergie avec la distance. À proximité de l'arc (0–100 mm), l'énergie est très élevée, pouvant atteindre jusqu'à $35 \text{ cal}/\text{cm}^2$, ce qui représente un niveau extrêmement dangereux. Cependant, au-delà de 200 mm, la densité chute fortement, et au-delà de 400 mm, elle devient inférieure à $2 \text{ cal}/\text{cm}^2$ pour la majorité des cas. Ce comportement est typique du rayonnement thermique d'un arc électrique, qui diminue

fortement avec la distance selon une loi exponentielle ou quadratique. Cette décroissance justifie à nouveau l'importance des distances minimales de sécurité pour limiter l'exposition.

• Impact du facteur E.P.I = 1,2

Les courbes où E.P.I = 1,2 représentent probablement une majoration du risque pour inclure un facteur de sécurité, ou bien une correction liée à l'efficacité réelle des équipements de protection. Ce facteur augmente légèrement la densité d'énergie dans toutes les configurations, ce qui permet d'avoir une estimation plus conservatrice (pessimiste) du risque, afin de ne pas sous-estimer la gravité potentielle d'un arc.

• Comparaison des scénarios

Même si la tendance générale est similaire pour tous les scénarios M1 à M6, les courbes varient en fonction des paramètres du défaut. Certains scénarios, notamment M6, produisent des densités plus importantes à courte distance, ce qui montre qu'ils représentent un risque thermique plus élevé, même avec une durée d'arc très courte (60 ms).

Cette analyse permet de tirer plusieurs enseignements :

La densité d'énergie diminue fortement avec la distance : au-delà de 300–400 mm, les valeurs deviennent nettement plus sûres.

Le facteur de correction E.P.I = 1,2 permet de mieux dimensionner les protections en tenant compte d'incertitudes.

Même pour des durées d'arc très brèves, la zone proche de l'arc reste extrêmement dangereuse, ce qui souligne l'importance d'une protection efficace et d'une distance minimale d'approche.

4.3.4.2. L'équipement connecté à ciel ouvert (la densité de l'énergie (cal/cm²) en fonction du temps (s))

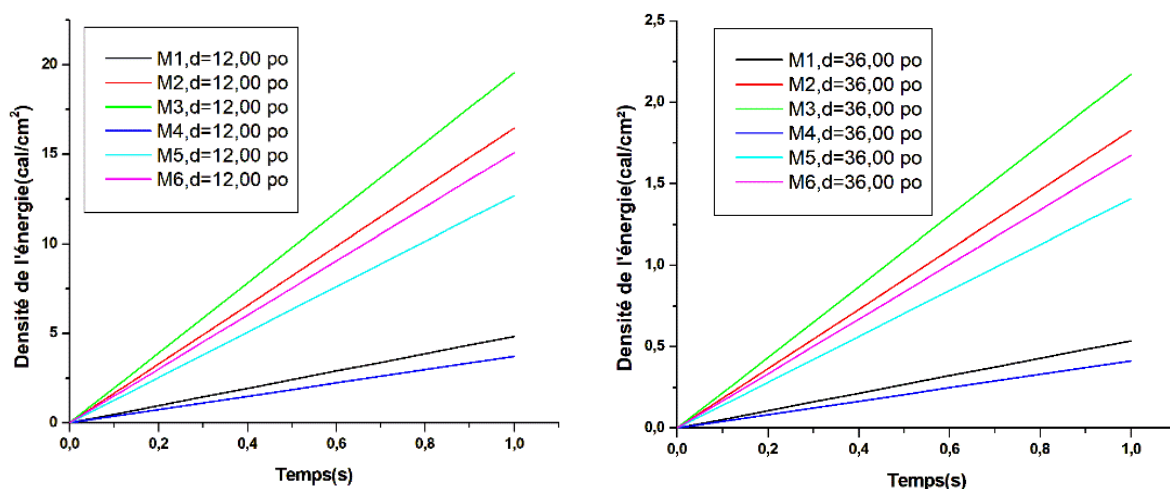


Figure 4. 6: La densité de l'énergie (cal/cm²) en fonction du temps(s).

Ce figure représentant la densité de l'énergie (cal/cm^2) en fonction du temps (s) pour différents cas (M1 à M6), avec deux distances d (12 pouces à gauche et 36 pouces à droite).

• Analyse des courbes de densité d'énergie en fonction du temps

Les deux graphiques ci-dessus présentent l'évolution de la densité de l'énergie incidente (en cal/cm^2) en fonction du temps (en secondes) pour différentes configurations (M1 à M6), et à deux distances différentes de l'arc électrique : 12 pouces (30,48 cm) à gauche et 36 pouces (91,44 cm) à droite.

• Influence de la distance

L'effet de la distance est clairement visible :

À 12 pouces, la densité d'énergie atteint des valeurs très élevées, dépassant $20 \text{ cal}/\text{cm}^2$ pour certaines configurations après 1 seconde.

À 36 pouces, cette densité est considérablement réduite, restant inférieure à $2,5 \text{ cal}/\text{cm}^2$ dans tous les cas.

Cela confirme la relation inverse entre la distance et l'intensité thermique reçue : plus l'observateur ou le travailleur est proche de l'arc, plus il est exposé à une énergie dangereuse. Cela justifie les recommandations de sécurité exigeant un éloignement suffisant lors d'interventions sous tension ou dans des zones à risque.

Influence du scénario (M1 à M6)

Chaque courbe représente une configuration différente :

Les courbes M1 à M6 montrent que les paramètres de défaut influencent fortement la densité d'énergie. Ces paramètres peuvent inclure l'intensité du courant de court-circuit, le type de disjoncteur, le temps de coupure, la tension, ou la nature de l'équipement.

À distance égale, certaines configurations comme M6 génèrent beaucoup plus d'énergie que M1, ce qui pourrait être dû à une intensité plus élevée ou à un dispositif de protection moins rapide.

• Importance du temps d'exposition

On remarque une croissance quasi-linéaire de l'énergie avec le temps pour chaque courbe. Cela montre que plus l'arc dure longtemps, plus la densité d'énergie incidente ne devient dangereuse :

À 0,5 s, la densité peut déjà dépasser $10 \text{ cal}/\text{cm}^2$ à 12 pouces, seuil au-delà duquel les brûlures peuvent devenir sévères (2e à 3e degré).

Cela met en évidence l'importance de réduire le temps de déclenchement des disjoncteurs pour limiter l'énergie libérée.

• Conclusion

Cette analyse met en évidence trois éléments essentiels dans la gestion du risque d'arc électrique :

- ✓ L'éloignement réduit significativement le risque thermique.
- ✓ Les caractéristiques du circuit et des protections influencent fortement le niveau de danger.
- ✓ Le temps d'exposition doit être minimisé pour éviter les blessures graves.

Ces courbes permettent ainsi de mieux comprendre l'intérêt de l'évaluation des risques d'arc électrique selon les normes (NFPA 70E, IEEE 1584) et de dimensionner les équipements de protection individuelle (EPI) en conséquence.

La figure représente le périmètre de protection l'éclair (pouces) en fonction du temps (seconde)

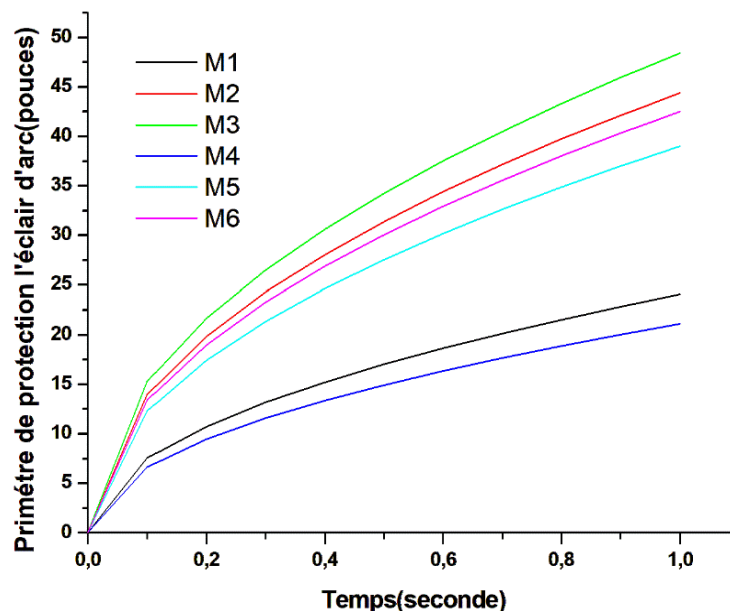


Figure 4. 7: le périmètre de protection l'éclair (pouces) en fonction du temps (seconde).

On observe à partir des courbes que le périmètre de protection diminue avec l'augmentation du temps, ce qui indique une dégradation de l'efficacité de la protection au fil du temps.

Les modèles M1 et M2 conservent un périmètre de protection plus élevé pendant une plus longue période, ce qui suggère qu'ils sont plus résistants.

Le modèle M6 montre une diminution plus rapide, ce qui signifie qu'il offre une protection moindre ou qu'il se détériore plus rapidement.

Conclusion : La figure compare l'efficacité de différents matériaux ou méthodes de protection contre l'arc électrique.

Il est important de choisir des matériaux qui maintiennent un niveau de protection élevé pendant une longue durée, comme les modèles M1 ou M2.

➤ Partie 02 : Analyse de coordination de protection

4.4. Description complète du schéma électrique

Le schéma électrique ci-dessus est un schéma de commande et de puissance typique utilisé pour contrôler un moteur triphasé. Il est conçu dans un contexte pédagogique ou industriel dans le cadre d'un projet de fin d'études (PFE) pour l'année académique 2024/2025. Ce schéma montre clairement les composants de contrôle, de protection, d'alimentation et de mise à la terre.

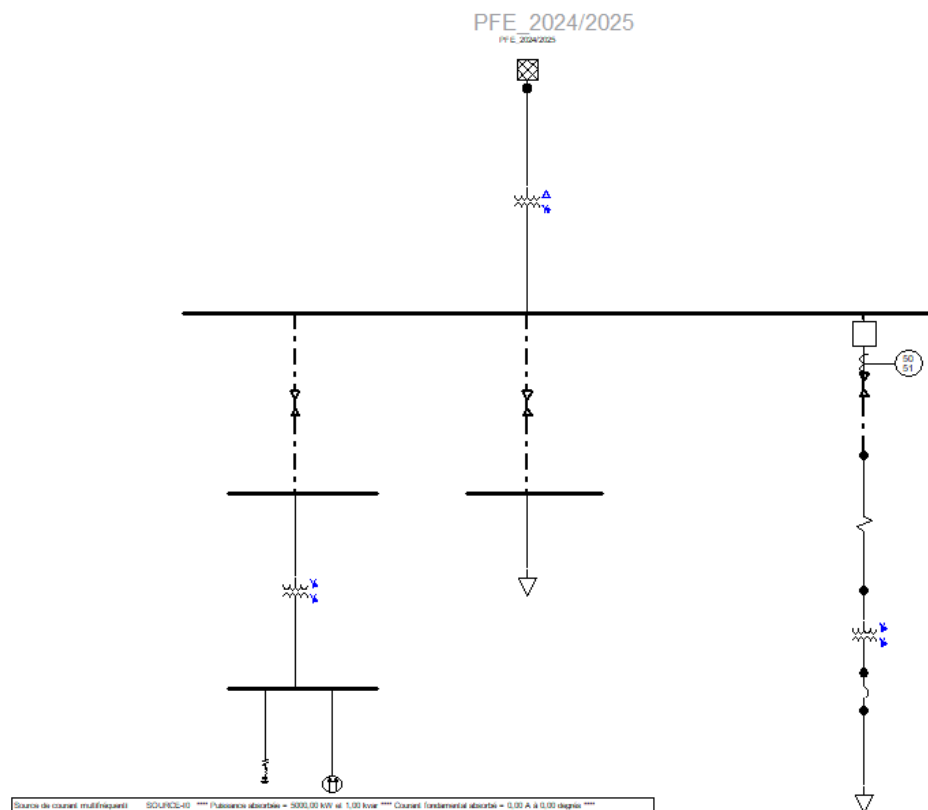


Figure 4. 8:Schéma unifilaire de protection et de démarrage du moteur triphasé.

Les composants du schéma électrique (unifilaire)

- Voici les principaux composants du schéma :(ANNEXE 02)

➤ Courbe de couple mécanique

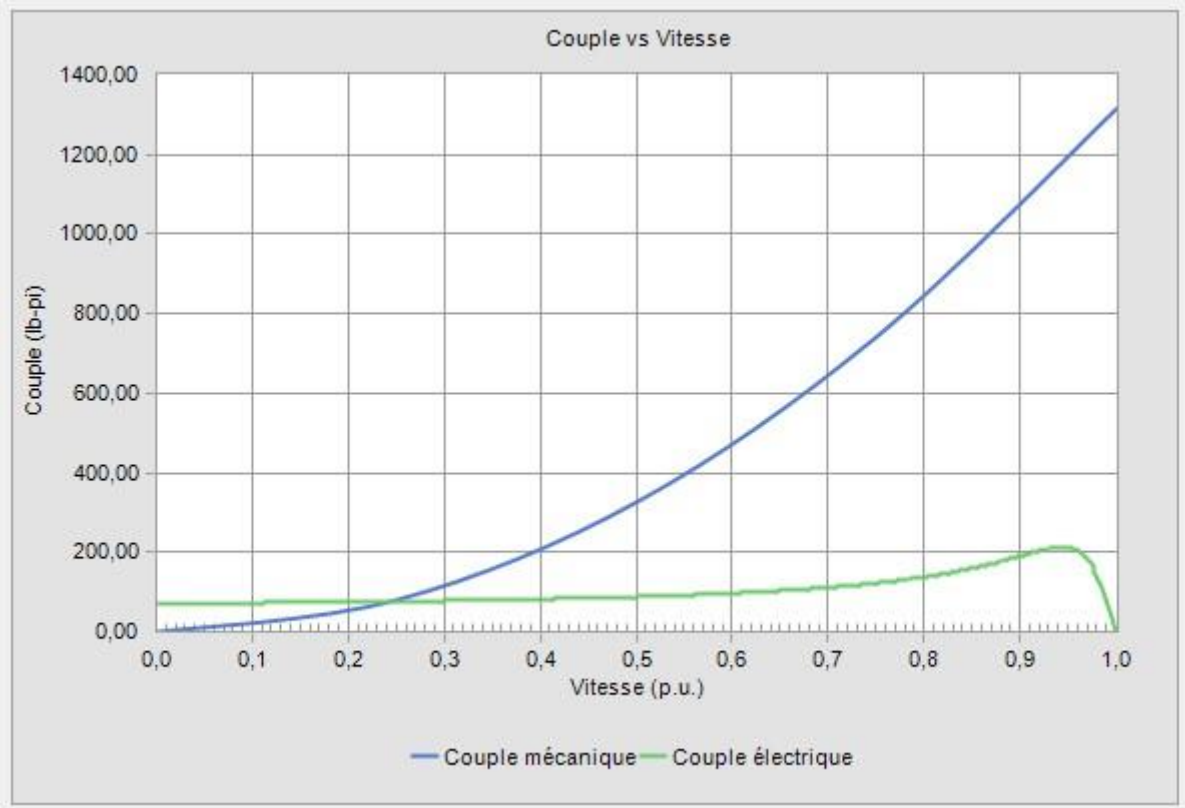


Figure 4. 9: Courbe de couple mécanique.

4.5. Résultats et interprétations

4.5.1. L'équipement connecté à ciel ouvert

Nom de nœud/Nom de barre	Type de dispositif de protection	Tension de basse [KV]	I (arc) détectée par dispositifs [KA]	Défaut d'arc [KA]	Défaut franc [KA]	Multi défaut d'arc	Temps d'ouverture [ms]	Périmètre de protection contre l'éclair d'arc [in]	Energie incidente [cal/cm^2]	Méthode/Standard
M1	Disjoncteur à basse tension	13,20	1,313	1,340	1,346	100%	609	18,793	0,736	IEEE-1584
M2	Disjoncteur à basse tension	0,48	2,441	4,546	2,871	100%	90	13,326	0,370	IEEE-1584
M3	Disjoncteur à basse tension	1,50	4,634	4,994	4,905	100%	90	14,534	0,440	IEEE-1584
M4	Disjoncteur à basse tension	13,20	1,313	1,340	1,346	100%	609	16,501	0,567	IEEE-1584
M5	Disjoncteur à basse tension	0,48	2,441	4,546	2,871	100%	90	11,700	0,285	IEEE-1584
M6	Disjoncteur à basse tension	1,50	4,606	4,994	4,905	100%	90	12,761	0,339	IEEE-1584

Tableau 4. 4: L'équipement connecté à ciel ouvert (partie 02).

Ce tableau représente une analyse du risque d'arc électrique en différents points d'un réseau électrique selon la norme IEEE-1584. Il présente des valeurs critiques telles que le courant de défaut, le temps d'ouverture du disjoncteur et l'énergie incidente, qui déterminent le niveau des équipements de protection individuelle requis. On remarque que les points avec un temps d'ouverture plus long (comme M1 et M4) génèrent une énergie incidente plus élevée, augmentant ainsi le niveau de danger. Cette analyse est essentielle pour assurer la sécurité du personnel et définir les mesures de prévention adéquates lors des interventions électriques.

4.5.2. Résultat d'Analyse du danger d'éclair d'arc

Nom de nœud/Nom de barre	Type de dispositif de protection	Tension de basse [KV]	I (arc) détectée par dispositifs [KA]	Défaut d'arc [KA]	Temps d'ouverture [ms]	Distance Minimale d'approche [m m]	Périmètre de protection contre l'éclair d'arc [in]	Energie incidente [cal/cm ²]	Système cal	Méthode/ Standard
N1	Disjoncteur commandé par relais	13,80	9,253	9,253	96	300,0	2287,003	43,238	>12	Lee
N2	Fusible	13,80	9,253	9,253	96	300,0	2287,003	43,238	>12	Lee
N3	Fusible	0,48	1,255	36,093	96	300,0	842,393	5,866	8,0	Lee
N4	Disjoncteur à basse tension	0,48	36,093	36,093	96	300,0	842,393	5,866	8,0	Lee

Tableau 4. 5: Résultat d'Analyse du danger d'éclair d'arc (partie 02).

Ce tableau présente les résultats de l'analyse du danger d'arc électrique selon la méthode de Lee. On y observe des énergies incidentes très élevées aux nœuds N1 et N2 (>43 cal/cm²), nécessitant une protection de niveau très élevé (>12 cal). Les nœuds N3 et N4, bien que sous basse

tension, présentent aussi un risque modéré (5,866 cal/cm²). Cette analyse est cruciale pour définir les équipements de protection adéquats et

Nom de nœud/Nom de barre	Type de circuit	Type d'équipement connecte	Courant de défaut franc [KA]	Distance entre barres [mm]	Distance de travail [mm]	Méthode de temps d'ouverture	Temps d'ouverture [ms]
N1	Fixe	A ciel ouvert	Calculé	152,00	910,00	Défini par	96

assurer la sécurité des intervenants.

4.5.3. Les paramètres physiques utilisés pour l'évaluation du risque d'arc électrique sur des circuits fixes en plein air.

						l'utilisateur	
N2	Fixe	A ciel ouvert	Calculé	152,00	910,00	Défini par l'utilisateur	96
N3	Fixe	A ciel ouvert	Calculé	32,00	610,00	Défini par l'utilisateur	96
N4	Fixe	A ciel ouvert	Calculé	32,00	6 10,00	Défini par l'utilisateur	96

Ce tableau présente les paramètres physiques utilisés pour l'évaluation du risque d'arc électrique sur des circuits fixes en plein air. Il inclut les distances entre barres et de travail, ainsi que le courant de défaut calculé pour chaque nœud. Le temps d'ouverture des dispositifs est fixé manuellement à 96 ms pour toutes les situations. Ces données sont essentielles pour estimer l'énergie incidente et définir les mesures de protection nécessaires.

Tableau 4. 6: les paramètres physiques utilisés pour l'évaluation du risque d'arc électrique sur des circuits fixes en plein air.

Nom de nœud/Nom de Barre	Type de dispositif de protection	Tension de basse [KV]	I(arc) détectée par dispositifs [KA]	Défaut franc [KA]	Défaut d'arc [KA]	Mult défaut d'arc	Temps d'ouverture [ms]	Périmètre de protection contre l'éclair d'arc [in]	Energie incidente [cal/cm ²]	Catégorie	Méthode/ Standard
N1	Disjoncteur commandé par relais	13,80	8,993	9,253	8,993	100%	96	540,799	0,424	0	IEEE_1548

N2	Fusible	13,80	8,993	9,253	8,993	100%	96	540,799	0,424	0	IEEE_1548
N3	Fusible	0,48	0,561	36,093	36,093	100%	96	780,068	1,962	1	IEEE_1548
N4	Disjoncteur à basse tension	0,48	16,123	36,093	36,093	100%	96	780,068	1,962	1	IEEE_1548

4.5.4. Les critères de protection contre l'arc électrique dans différents sites à l'aide de dispositifs variés (disjoncteur, fusibles)

Ce tableau présente les critères de protection contre l'arc électrique dans différents sites à l'aide de dispositifs variés (disjoncteur, fusibles). Il met en évidence les valeurs de tension et de courant, les distances de sécurité, l'énergie incidente et la catégorie de risque. Le tableau est basé sur la norme IEEE_1584, garantissant une évaluation précise des risques électriques. Ce tableau constitue un outil essentiel pour définir des stratégies de sécurité dans la conception et l'exploitation des systèmes électriques.

4.6. Les nœuds N1 N2 N3 N4 :

Les quatre graphiques présentés montrent l'évolution de la densité d'énergie (Densité de l'énergie) en unités de (J/cm²) le long de la longueur de l'échantillon (en mm) sur une période de temps allant de 0,01 s à 0,1 s.

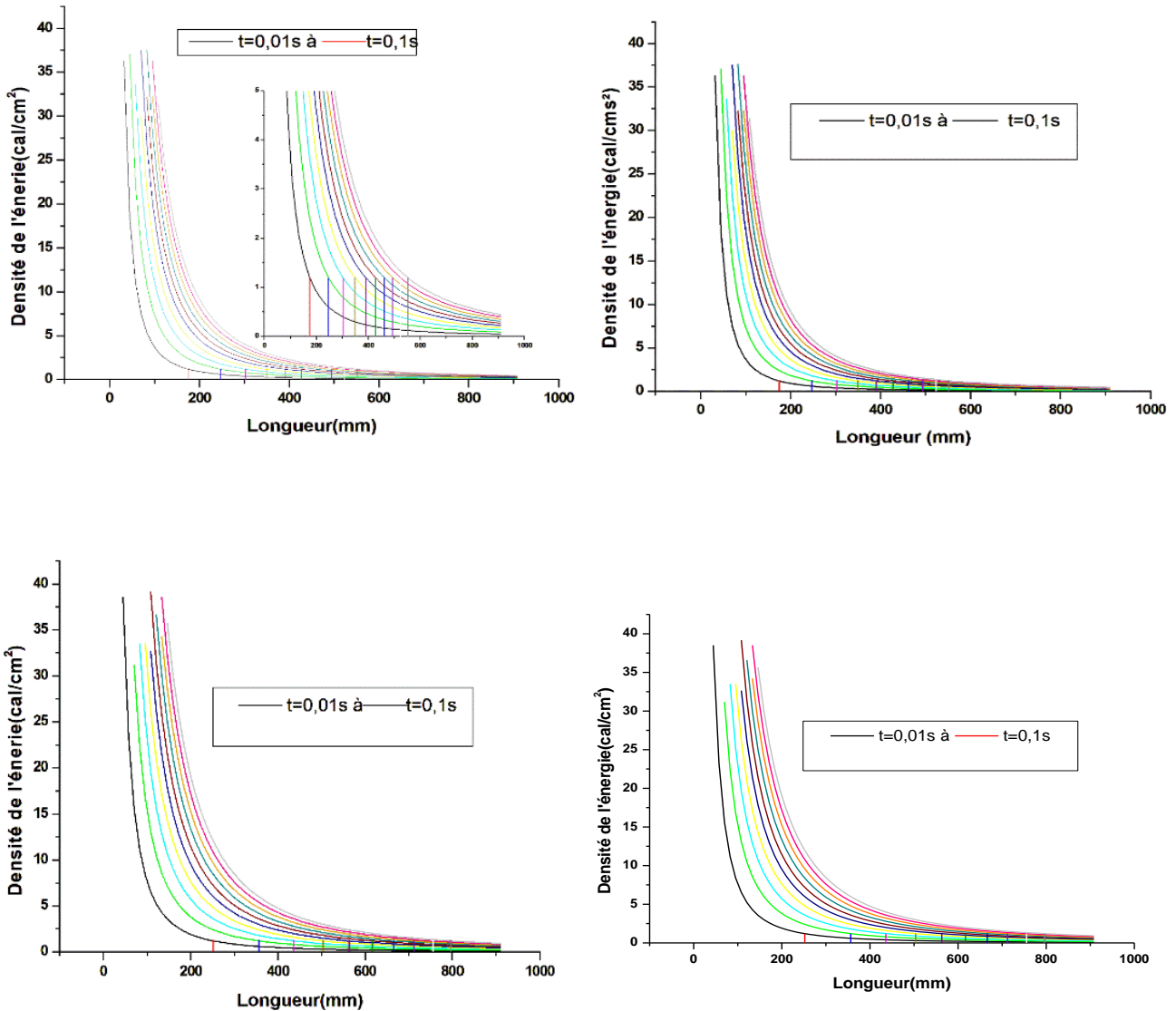


Tableau 4. 8:présentés montrent l'évolution de la densité d'énergie en unités de (J/cm²) .

Les courbes montrent une diminution rapide de la densité d'énergie avec l'augmentation de la distance par rapport à la source, ce qui indique une diffusion ou une absorption de l'énergie dans le milieu. L'effet du temps est également visible, avec une baisse progressive de la densité entre 0,01 s et 0,1 s, reflétant une dissipation de l'énergie au fil du temps. Les différences légères entre les quatre graphiques peuvent indiquer un changement des propriétés

des matériaux ou des conditions expérimentales. Globalement, les résultats confirment un comportement typique de propagation d'une énergie impulsionnelle.

AVERTISSEMENT	
13800 VAC Danger d'éclair d'arc et d'électrocution	
1,50 m (Électrocution)	Zone d'accès limité (Personnes qualifiées seulement)
70 cm (Électrocution)	Zone d'accès restreint (EPI requis)
200 mm (Électrocution)	Zone d'accès interdit (EPI requis)
54 cm (Éclair d'arc)	Périmètre de protection contre l'éclair d'arc (EPI requis)
Catégorie 0	EPI requis 0,4 cal/cm ²
Yeux et tête	Lunettes de sécurité et casque de sécurité diélectriques avec cagoule et écran facial.
Corps	Fibre naturelle non traitée ignifuge (coton/laine/rayon/soie > 4.5 oz/vg ca), chemise (manches longues), pantalons (longs).
Mains et bras	>50V = outils de classe de niveau de tension + gants de classe 2 (minimum).
Pieds	Chaussures diélectriques ou tapis isolant (tensions de pas et de contact)
Nom de l'équipement	N1

Tableau 4.9: Collant d'avertissement N1.

AVERTISSEMENT	
13800 VAC Danger d'éclair d'arc et d'électrocution	
1,50 m (Électrocution)	Zone d'accès limité (Personnes qualifiées seulement)
70 cm (Électrocution)	Zone d'accès restreint (EPI requis)
200 mm (Électrocution)	Zone d'accès interdit (EPI requis)
54 cm (Éclair d'arc)	Périmètre de protection contre l'éclair d'arc (EPI requis)
Catégorie 0	EPI requis 0,4 cal/cm ²
Yeux et tête	Lunettes de sécurité et casque de sécurité diélectriques avec cagoule et écran facial.
Corps	Fibre naturelle non traitée ignifuge (coton/laine/rayon/soie > 4.5 oz/vg ca), chemise (manches longues), pantalons (longs).
Mains et bras	>50V = outils de classe de niveau de tension + gants de classe 2 (minimum).
Pieds	Chaussures diélectriques ou tapis isolant (tensions de pas et de contact)
Nom de l'équipement	N2

Tableau 4.10: Collant d'avertissement N2.

AVERTISSEMENT	
480 VAC Danger d'éclair d'arc et d'électrocution	
1,00 m (Électrocution)	Zone d'accès limité (Personnes qualifiées seulement)
30 cm (Électrocution)	Zone d'accès restreint (EPI requis)
25 mm (Électrocution)	Zone d'accès interdit (EPI requis)
78 cm (Éclair d'arc)	Périmètre de protection contre l'éclair d'arc (EPI requis)
Catégorie 1	EPI requis 2,0 cal/cm ²
Yeux et tête	Lunettes de sécurité et casque de sécurité diélectriques avec cagoule et écran facial.
Corps	4 cal/cm ² , chemise (manches longues) et pantalon résistant au feu (longs), ou combinaison résistant au feu, vêtements de pluie au besoin.
Mains et bras	>50V = outils de classe de niveau de tension + Gants et protecteurs en cuir (éclair d'arc) Classe 0 (minimum) au besoin.
Pieds	Chaussures en cuir (arc), au besoin. Chaussures diélectriques ou tapis isolant (tension de pas et de contact).
Nom de l'équipement	N3

Tableau 4.11: Collant d'avertissement N3.

AVERTISSEMENT	
480 VAC Danger d'éclair d'arc et d'électrocution	
1,00 m (Électrocution)	Zone d'accès limité (Personnes qualifiées seulement)
30 cm (Électrocution)	Zone d'accès restreint (EPI requis)
25 mm (Électrocution)	Zone d'accès interdit (EPI requis)
78 cm (Éclair d'arc)	Périmètre de protection contre l'éclair d'arc (EPI requis)
Catégorie 1	EPI requis 2,0 cal/cm ²
Yeux et tête	Lunettes de sécurité et casque de sécurité diélectriques avec cagoule et écran facial.
Corps	4 cal/cm ² , chemise (manches longues) et pantalon résistant au feu (longs), ou combinaison résistant au feu, vêtements de pluie au besoin.
Mains et bras	>50V = outils de classe de niveau de tension + Gants et protecteurs en cuir (éclair d'arc) Classe 0 (minimum) au besoin.
Pieds	Chaussures en cuir (arc), au besoin. Chaussures diélectriques ou tapis isolant (tension de pas et de contact).
Nom de l'équipement	N4

Tableau 4.12: Collant d'avertissement N4.

4.7. Résultats de la coordination des dispositifs de protection

Une fois l'analyse complétée, l'étiquette dans la figure mentionnera les dispositifs de protection ayant été détectés qui présente un problème à être examiné, soit coordination, charge ou temps d'ouverture. Par exemple, on peut voir dans l'illustration que le disjoncteur basse tension CB2 et le fusible F1 présentent un problème de coordination. Le disjoncteur basse tension présente aussi un problème de charge.

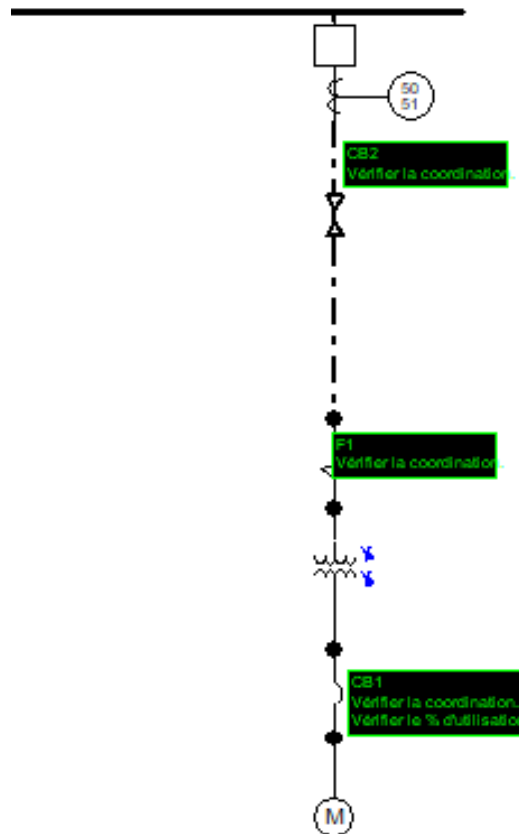


Figure 4. 10: la coordination des dispositifs de protection.

La figure montre le tracé des courbes temps-courant des dispositifs de protection qui confirme les problèmes de charge et de coordination mis en évidence par le module d'analyse.

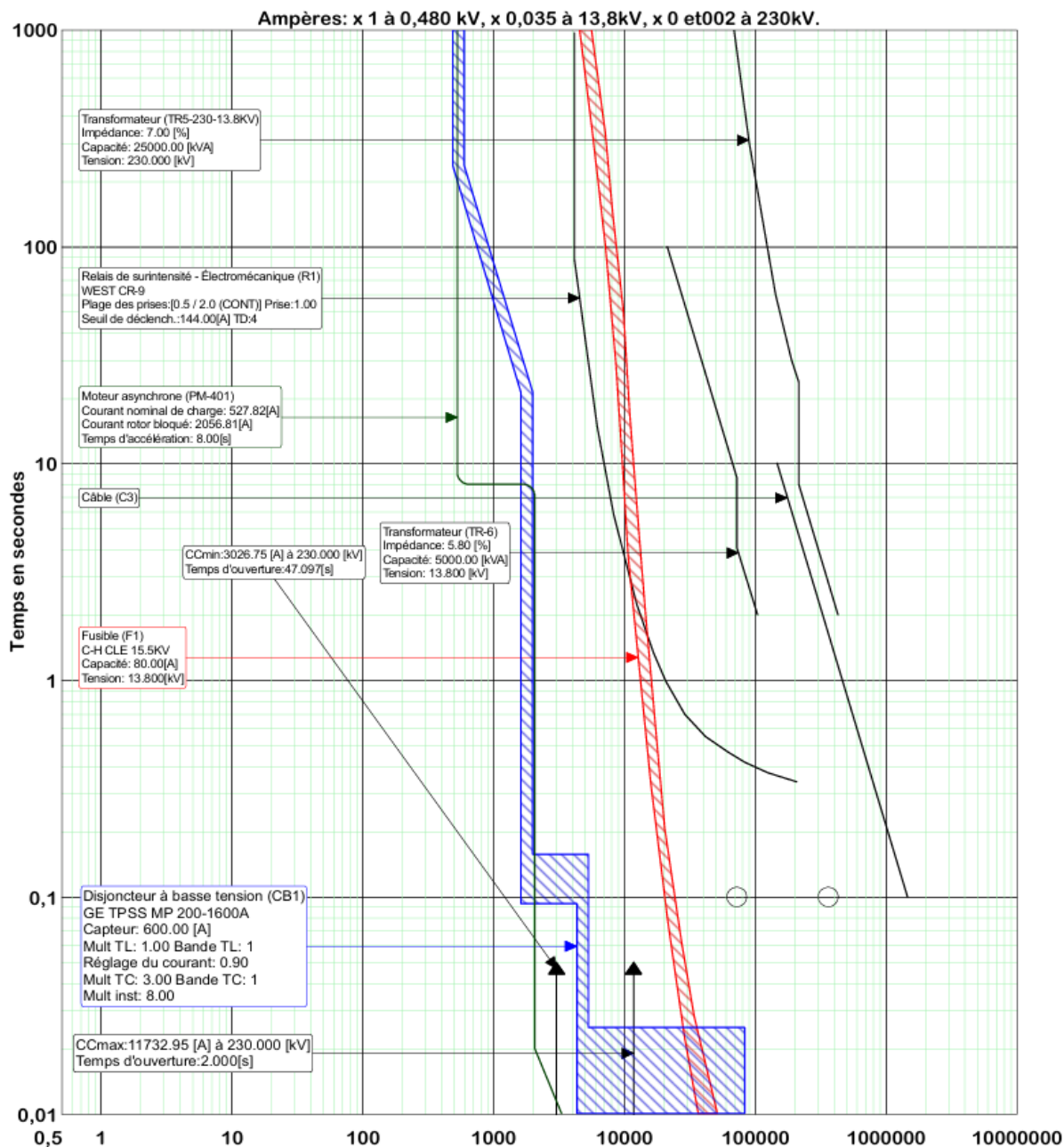


Figure 4. 11: Courbes caractéristiques temps-courant de l'artère.

4.7.1. Analyse des dispositifs de protection

• Rapport de charge

Ce tableau indique le courant de pleine charge de chaque dispositif ainsi que si le pourcentage (du courant de mise au travail) est plus grand ou non que celui défini dans les critères. Les résultats indiquent un problème de charge et le problème de charge du disjoncteur CB1 doit être corrigé. Généralement, le courant de mise au travail > (FLA / limite de charge).

Courant de mise au travail $> 535.04 / 0.8$ Ainsi, le courant de mise au travail doit être plus grand que 668.8A.

Type de dispositif	Numéro de dispositif	Protection	Calibre/Seuil (amps)	Courant à pleine charge (amps)	Charge (%)	Limite de charge (%)	Surchargé ?
Disjoncteur à basse tension	CB1	Phase	540,00	535,04	99,08	80,00	Oui
Fusible	F1	Phase	80,00	18,61	23,26	80,00	Non
Disjoncteur	R1	Phase	144,00	18,61	12,92	80,00	Non

Figure 4. 12:le disjoncteur CB1 fonctionne avec un taux de charge.

Le tableau montre que le disjoncteur CB1 fonctionne avec un taux de charge élevé de 99,08 %, indiquant une surcharge nécessitant une intervention.

En revanche, le fusible F1 et le disjoncteur R1 fonctionnent dans des conditions sûres avec des taux de charge faibles (23,26 % et 12,92 %).

Cette analyse montre que certains appareils ne sont pas adaptés aux courants actuellement traversés.

Il est donc recommandé de revoir le disjoncteur CB1, soit en augmentant son calibre, soit en redistribuant les charges.

• Rapport de coordination

Le rapport de coordination affiche les paires de dispositifs de protection ainsi que leur coordination dans le tableau. Nous pouvons constater que la paire numéro 1 présente un problème de coordination où il y a intersection des courbes. La courbe du fusible F1 croise celle du disjoncteur commandé par relais CB2 (figure. De son côté, le pair numéro 2 se trouve où le disjoncteur basse tension et le fusible n'ont pas une bonne coordination.

Les propriétés du fusible la plage des prises est 0.5/2.0 et dans la prise L est 1.0. Le nouveau seuil de déclenchement primaire sera 144A et la capacité du fusible est de 80 A

4.7.2. Une absence de coordination entre les dispositifs F1/CB1 et CB2/F1

Numéro de dispositif Amont	Type de dispositif Amont	Protection	Courbe amont / Capacité (amps)	Clients entre dispositifs	Numéro de dispositif Aval	Type de dispositif Aval	Courbe aval / Capacité (amps)	Plage de protection Minimum (A)	Plage de protection Maximum (A)	Point de non-coordination (A)	Coordination
F1	Fusible	Phase	80	0	CB1	Disjoncteur à basse tension	GE TPSS MP 200-1600A	594,00	83155,76	35817,81	Non
CB2	Disjoncteur	Phase	WEST CR-9	0	F1	Fusible	80	194,26	1763,55	519,21	Non

Figure 4. 13 : Absence de coordination entre les dispositifs F1/CB1 et CB2/F1.

Le tableau montre une absence de coordination entre les dispositifs F1/CB1 et CB2/F1, avec des points de non-coordination enregistrés dans la zone de protection.

Ce dysfonctionnement peut entraîner l'intervention simultanée de plusieurs appareils en cas de défaut, provoquant un déclenchement non sélectif.

L'absence de coordination expose le système à un risque d'arrêt global ou d'interruptions inutiles sur plusieurs sections.

Par conséquent, il est nécessaire d'ajuster les réglages de protection ou de choisir des dispositifs avec des courbes temporelles compatibles.

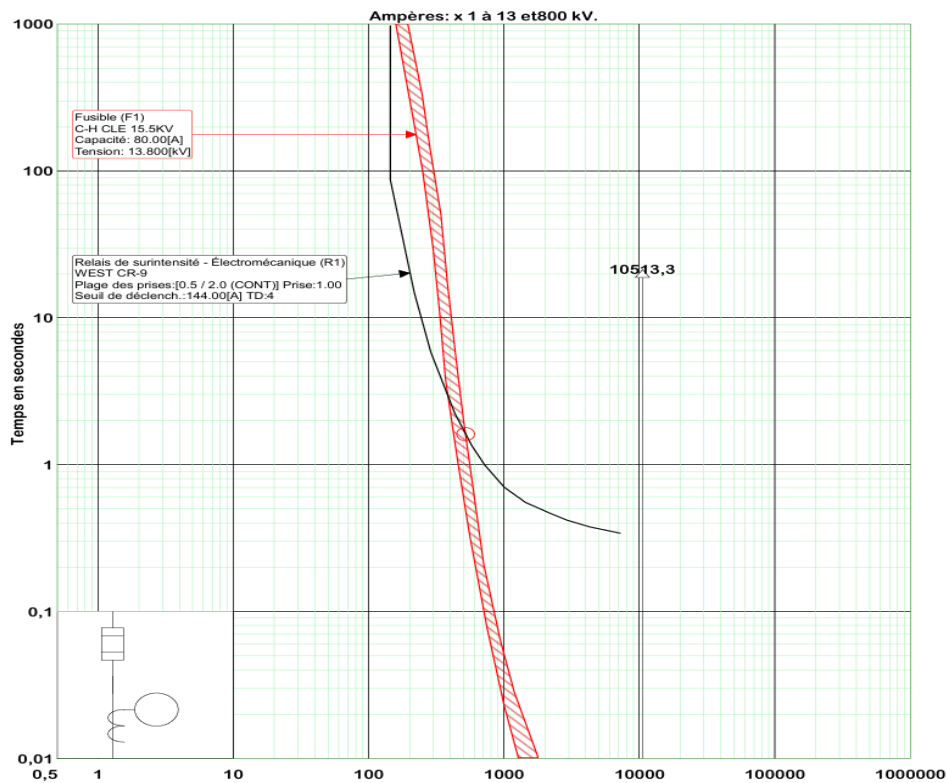


Figure 4. 14: Caractéristiques temps-courant.

4.7.3. Coordination des dispositifs de la branche.

• Réglage de la TCC

Les réglages TCC (Temps-Courant-Courbes) d'un fusible concerne le temps nécessaire pour que le fusible se coupe pour un courant donné, et la forme de cette courbe est un facteur crucial pour la protection des circuits électriques. Ils sont définis par des normes et permettent de choisir le fusible approprié pour chaque application. Dans les propriétés du fusible la plage des prises est 2.5/10.0 et dans prise L est 6.0. Le nouveau seuil de déclenchement primaire sera 0.72 kA. On Remplace l'ancienne capacité du fusible qui était de 80 A par une capacité plus élevée 150 A. Le trajet de la coordination vers la source est mis en évidence dans le schéma unifilaire ainsi que les options d'analyse

• Rapport de charge

Type de dispositif	Numéro de dispositif	Protection	Calibre/Seuil (A)	Courant à pleine charge (A)	Charge (%)	Limite de charge (%)	Surchargé
Disjoncteur à basse tension	CB1	Phase	1080,00	535,04	49,54	80,00	Non
Fusible	F1	Phase	150,00	18,61	12,41	80,00	Non
Disjoncteur	R1	Phase	720,00	18,61	2,58	80,00	Non

Tableau 4. 13:Rapport de charge.

Le tableau du rapport de charge montre que tous les dispositifs fonctionnent dans les limites autorisées, sans aucun cas de surcharge enregistré.

Le disjoncteur CB1 présente un taux de charge modéré de 49,54 %, bien en dessous de la limite maximale autorisée de 80 %.

De même, le fusible F1 et le disjoncteur R1 affichent des taux de charge très faibles, indiquant une large marge de sécurité.

Par conséquent, aucune anomalie n’est relevée au niveau des charges, ce qui reflète la fiabilité du dimensionnement des protections choisies.

• Rapport de coordination

Numéro de dispositif Amont	Type de dispositif Amont	Protection	Courbe amont / Capacité (amps)	Clients entre dispositifs
CB2	Disjoncteur	Phase	WEST CR-9	0
F1	Fusible	Phase	150	0

Tableau 4.14:Rapport de coordination des dispositifs amont.

Numéro de dispositif Aval	Type de dispositif Aval	Courbe aval / Capacité (amps)	Plage de protection Minimum (A)	Plage de protection Maximum (A)	Point de non-coordination (A)	Coordination
F1	Fusible	150	350,70	5052,17	n/a	Oui
CB1	Disjoncteur à basse tension	GE TPSS MP 200-1600A	1188,00	83155,76	n/a	Oui

Tableau 4.15:Rapport de coordination des dispositifs aval.

Le rapport de coordination montre une bonne coordination entre tous les dispositifs étudiés, avec la mention "Oui" enregistrée dans la colonne de coordination.

Aucun point de non-coordination (n/a) n'a été relevé, ce qui reflète une bonne compatibilité entre les courbes de fonctionnement des dispositifs amont et aval.

Ces résultats démontrent le succès du réajustement des courbes de protection après le remplacement de l'ancien fusible par un modèle de 150A.

Cette coordination renforce la fiabilité du système et garantit l'intervention du dispositif le plus proche du défaut sans déclenchement excessif ou inutile.

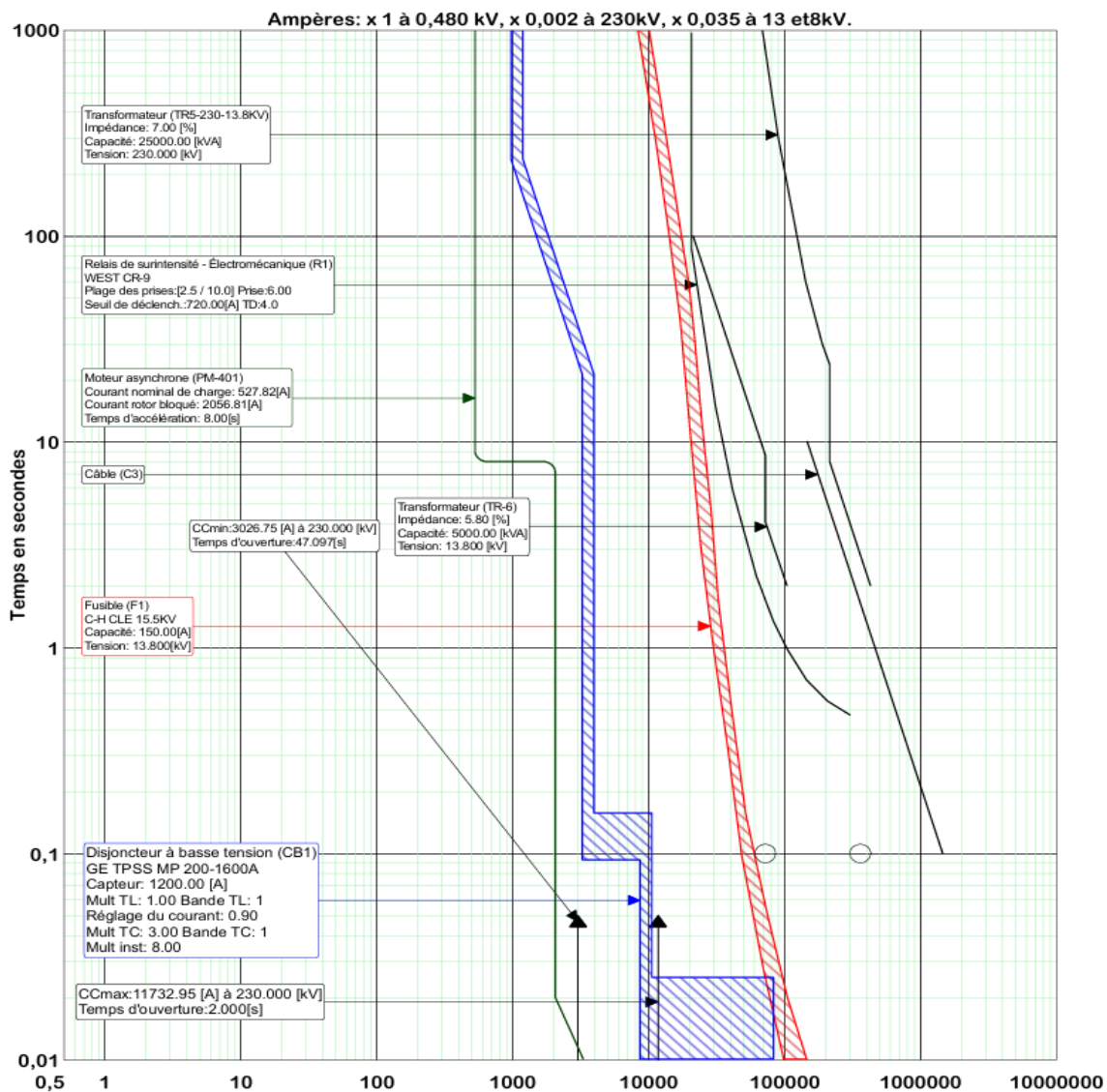


Figure 4. 15: Courbes caractéristiques temps-courant de l'artère.

L'analyse des tableaux de charge et de coordination montre que tous les dispositifs fonctionnent dans les limites autorisées, sans aucune surcharge, ce qui reflète une bonne répartition des charges.

Le remplacement du fusible par un calibre plus élevé a contribué à améliorer la performance de la protection.

La coordination temporelle entre les appareils est correcte, garantissant une intervention sélective en cas de défaut.

Ces résultats confirment l'efficacité du dimensionnement et la fiabilité du choix des dispositifs de protection.

4.7.4. Rapport de vérification court-circuit

L'analyse compare le temps d'ouverture requis pour relever un défaut pour chaque tronçon dans chaque zone de protection.

• Zone pour Disjoncteur à basse tension CB1 au tronçon CB1

Tronçon : CB1		Disjoncteur à basse tension : CB1	
Milieu		Tronçon : CB1	
LT	77336,1A	Hors limites	Hors limites
LLT	83155,8A	Hors limites	Hors limites
LL	67040,0A	Hors limites	Hors limites
LLL	77411,1A	Hors limites	Hors limites

Tableau 4. 16: les valeurs de court-circuit (disjoncteur CB1 au tronçon CB1).

Le tableau montre que toutes les valeurs des courants de court-circuit possibles se situent hors des limites de réponse temporelle du disjoncteur CB1, avec la mention "Hors limites" dans tous les cas.

Cela indique que le disjoncteur ne couvre pas l'ensemble des défauts possibles sur cette section, ce qui représente une faiblesse dans la protection.

Cela signifie que le disjoncteur pourrait ne pas intervenir rapidement, voire pas du tout, en cas de certains défauts.

Il est recommandé de revoir les courbes de réglage ou de remplacer l'appareil afin d'améliorer la fiabilité de la protection.

• Zone pour Fusible F1 au tronçon F1

Tronçon : F1		Fusible : F1	
Milieu		Tronçon : F1	
LT	8587,4A	Hors limites	Hors limites
LLT	10513,3A	Hors limites	Hors limites
LL	8074,1A	Hors limites	Hors limites
LLL	9323,2A	Hors limites	Hors limites

Tableau 4. 17:Les valeurs de courant (fusible F1 au tronçon F1).

Les valeurs de courant de défaut enregistrées dans ce tableau se situent également en dehors des limites de protection du fusible F1, car l'appareil n'a réagi à aucun des défauts possibles. Cette défaillance indique que le fusible actuel est inadapté à cette section du réseau. L'absence d'intervention rapide expose le système à de graves risques opérationnels. Il est recommandé de sélectionner un fusible avec une courbe de protection plus courte, plus adaptée aux conditions réelles.

• Zone pour Relais de surintensité R1 au tronçon CB2

Tronçon : CB2		Relais de surintensité : R1	
Milieu		Tronçon : CB2	
LT	8587,4A	Hors limites	Hors limites
LLT	10513,3A	Hors limites	Hors limites
LL	8074,1A	Hors limites	Hors limites
LLL	9323,2A	Hors limites	Hors limites

Tableau 4. 18:Les valeurs de courant (relais de surintensité R1 au tronçon CB2).

Les données enregistrées montrent que le relais R1 ne réagit pas non plus aux courants de défaut possibles, tous les cas étant décrits comme « limitant en heures ». Cela indique une défaillance des paramètres de protection ou de la qualité du relais utilisé. L'absence de réponse rapide du relais aux conditions de défaut affaiblit la sélectivité de la protection du système. Le relais doit être réinitialisé ou remplacé pour couvrir l'intégralité de la plage de défaut.

4.8.Conclusion

L'ensemble des résultats obtenus au cours de cette étude met en évidence l'importance d'une analyse rigoureuse du risque d'éclair d'arc électrique. Les simulations réalisées ont permis de quantifier l'énergie incidente dans différents scénarios, de mettre en évidence les zones critiques de l'installation, et d'évaluer la pertinence des dispositifs de protection

choisis. La coordination entre ces derniers s'est révélée globalement satisfaisante, bien que certaines améliorations puissent encore être envisagées pour optimiser la sélectivité et réduire les temps de déclenchement. Ces observations constituent une base solide pour orienter les futures interventions de maintenance, de mise en conformité et d'amélioration des performances du réseau électrique industriel étudié.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le présent mémoire a permis d'explorer en profondeur un sujet crucial dans le domaine de l'électrotechnique industrielle : le danger d'éclair d'arc électrique, un phénomène à la fois violent, imprévisible et aux conséquences parfois dramatiques. Cette étude s'est articulée autour d'une analyse théorique rigoureuse, de l'application des normes internationales, ainsi que d'une étude pratique basée sur des simulations à l'aide du logiciel CYME.

Dans un premier temps, nous avons rappelé les fondements des réseaux électriques, leur architecture, les types de tensions utilisées et l'importance de la fiabilité et de la sécurité dans leur conception et exploitation. Cette base a permis de mieux situer le contexte dans lequel le risque d'arc électrique se manifeste.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude détaillée de l'éclair d'arc, en analysant ses causes, ses effets destructeurs, ainsi que les paramètres qui influencent sa gravité. L'apport essentiel de la norme IEEE 1584 a été mis en avant, notamment pour le calcul de l'énergie incidente et la délimitation de la zone de danger. Ces données sont indispensables à la sélection des équipements de protection individuelle (EPI) et à la planification sécurisée des opérations de maintenance.

Ensuite, la coordination des dispositifs de protection a été analysée. Ce volet constitue une composante indispensable de la sécurité électrique. Une protection mal coordonnée peut aggraver les incidents ou provoquer l'arrêt injustifié de tout un système. À travers les notions de sélectivité et de filiation, nous avons montré comment une protection bien pensée peut limiter les dégâts, garantir la continuité de service et protéger efficacement les personnes et les équipements.

Enfin, les simulations sur le logiciel CYME ont apporté une dimension concrète à notre travail. Elles ont permis de visualiser les effets d'un éclair d'arc sur différents équipements, d'évaluer l'énergie libérée dans diverses configurations, et de vérifier l'efficacité des dispositifs de protection choisis. Ces résultats confirment l'importance de l'analyse préventive et du dimensionnement rigoureux des protections.

Au terme de ce travail, il apparaît clairement que la prévention des risques liés à l'éclair d'arc ne doit plus être perçue comme une contrainte réglementaire, mais comme un enjeu stratégique. Elle est à la fois un gage de sécurité, de performance et de durabilité des installations électriques.

Nous espérons que ce mémoire pourra servir de référence ou d'outil de sensibilisation pour les ingénieurs, techniciens et décideurs œuvrant dans le domaine de

l'électrotechnique, et contribuer ainsi à la conception de réseaux toujours plus sûrs, performants et fiables.

La source (UTIL_115KV)

Tension de l'équivalent de la source	
Tension nominal(KVLL)	115
Exploitation(KVLL)	115
Capacité (MVA)	100
Puissance de basse (MVA)	2,025

Impédance de l'équivalent de source	R	X
Z1(Ohms)	8.7709	87.7291
Z0(Ohms)	8.7709	87.7291
Z2(Ohms)	8.7709	87.7291

Fusible(BUSS_MV_155_F_1DBX_SB)

BUSS_MV_155_F_1DBX_SB	Caractéristique
Capacité (E)	125
Courant continu nominal (A)	125
Tension nominale (KV)	13.2
Pouvoir de coupure max admissible (A)	50000

Jeux de barres

Jeux de barres en (KV)	115	13.2	1.5	0.48	13.2	1.5	0.48	13.2	13.2
Longueur	75,0	166,099	18,75	19,824	18,263	19,236	19,236	18,263	154,751

Câble (BC6)

BC6	Caractéristique
Tension nominal (KV)	0,48
Cour, perman, nominal (A)	50000,0
Tenu nominal de CC (A)	50000,0
Type	Tripolaire
Matériau	Cuivre
Fréquence (HZ)	60
Température (°F)	77,0

La charge (Moteur asynchrone)

55	M_13.2KV	M_0.48KV	M_1.5KV	M_13.2KV	M_0.48KV	M_1.5KV
Type de moteur	Triphasé	Triphasé	Triphasé	Triphasé	Triphasé	Triphasé
Puissance mécanique (HP)	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0
Puissance nominal (KVA)	149,69	149,69	149,69	149,69	149,69	149,69
Tension nominal (KVLL)	13,2	0,48	1,5	13,2	0,48	1,5
Vitesse synchronisme (TPM)	1800,0	1800,0	1800,0	1800,0	1800,0	1800,0
Courant à pleine charge (A)	6,55904	180,3736	57,71955	6,55904	180,3736	57,71955
Rendement (%)	91	91	91	91	91	91
Facteur de puissance (%)	82	82	82	82	82	82
Impédance (PU)	R=0,002 X=0,2	R=0,002 X=0,2	R=0,002 X=0,2	R=0,002 X=0,2	R=0,002 X=0,2	R=0,002 X=0,2

Les Transformateurs

Transformateur	TX_13.2_0.48_DY	TX_13.2_0.48_DYG	TX_13.2_1.5_DY	TX_13.2_1.5_DYG	TX_115_13.2_DY	TX_115_13.2_DYG
Type de transformateur	Triphasé Dy1	Triphasé Dyn1	Triphasé Dy1	Triphasé Dyn1	Triphasé Dy1	Triphasé Dyn1
Capacité nominale (KVA)	2025,0	2025,0	2025,0	2025,0	2025,0	2025,0
Tension primaire (KVLL)	13,2	13,2	13,2	13,2	115,0	115,0
Tension secondaire (KVLL)	0,48	0,48	1,5	1,5	13,2	13,2

Disjoncteur basse tension (MB0)

MB0	Caractéristique
Type du disjoncteur	A semi-conducteurs
Courant nominal (A)	2000,0
Courant nominaux d'interruption(V)	480,0
Pouvoir de coupure nominal (A)	65000,00

La source

Tension de l'équivalent d'EQ-SOURCE	Les caractéristiques
Nominal (KVLL)	230,0
Exploitation (KVLL)	230,0
Puissance de basse en (MVA)	100,0
Capacité nominal (MVA)	100,0

Impédance de l'équivalent d'EQ-SOURCE	R	X
Z1 (PU)	0,0136	0,117
Z0 (PU)	0,0982	0,2184
Z2 (PU)	0,0136	0,117

Jeux de barre

Jeux de barres	B12	B13	B14	B16
Longueur	18,708	3,401	3,779	3,401

Transformateur

Trois transformateurs triphasés TR5-230-13.8KV , TR-6 , TR6-13.8-4.16KV

Transformateur	TR5-230-13.8KV	TR-13.8-0.48KV	TR6-13.8-4.16KV
Type de transformateur	Triphasé Dyn11	Triphasé YNyn0	Triphasé YNyn0
Capacité nominale (KVA)	25000,0	5000,0	7500,0
Tension primaire (KVLL)	230,0	13,8	13,8
Tension secondaire (KVLL)	13,8	0.48	4.16

Disjoncteur basse tension (CB-1 et CUTLER-HAMMER-150VCP-W500H)

Caractéristique	CUTLER-HAMMER-150VCP- W500H	CB-1
Courant continu nominal (A)	1200,0	2000,0
Tension nominal (KV)	15,0	0,6
Pouvoir de coupure nominal (KA)	18,0	24,0

Câble (CABLE-C1, CABLE-C2, CABLE-C3)

Caractéristique	CABLE-C1	CABLE-C2	CABLE-C3
Tension nominal (KV)	13,8	13,8	13,8
Cour, permance, nominal (A)	250,0	250,0	100,0
Tenu nominal de CC (A)	400,0	400,0	300,0
Type	unipolaire	unipolaire	unipolaire
Matériau	Cuivre	Cuivre	Cuivre
Fréquence (HZ)	60	60	60
Température (°F)	77,0	77,0	77,0

Fusible(C-HCLE15.5KV_80)

C-HCLE15.5KV_80	Caractéristique
Capacité (E)	80,0
Courant continu nominal (A)	80,0
Tension nominale (KV)	15,5
Pouvoir de coupure max admissible (A)	6200,0

La charge (Moteur asynchrone)

Moteur asynchrone	450HP
Type de moteur	Triphasé
Puissance mécanique (HP)	450,0
Puissance nominal (KVA)	438,82
Tension nominal (KVLL)	0,48
Vitesse synchronisme (TPM)	1800,0
Courant à pleine charge (A)	527,82267
Rendement (%)	90
Facteur de puissance (%)	85
Impédance (Ohms)	R=0,03368 X=0,13046

Bibliographie

[1] :Jean-Claude Sabonnadière, Nouredine HadjSaïd. « Lignes et réseaux électrique1 », Lavoisier, Paris, 2007.

[2] : Mémoire de Master, Réseaux électriques: Amélioration du plan de tension de réseau 220 kV par dispositif FACTS <SVC> (Drici Manel* Djenane Chaima→ MOKHTAR BADJI UNIVERSITE ANNABA).

[3] : L.BENARAB 'DÈtermination des seuils de rÈglage des protections des dÈparts moyenne tension au complexe de l'ENIEM ^a, mÈmoire d'ingÈnieur, ummto, annÈe 2010.

[4] : NF C 15-100, *Installation électrique basse tension – Règles de conception et coordination des protections*, AFNOR, France.

[5] : Guillaume RAMI « contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées.

[6] : legrand-guide-la-coordination-entre-les-dispositifs-de-protection.

[7] :prt219026_05-2020_la-sélectivité-legrand.

[8] :H. Saad,*Les relais de protection : Théorie et application pratique*, Dunod, Paris, 2017.

[9] :IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations ,IEEE Std 1584-2002.

[10]:IEEE Standard 1584™-2018, *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018.