وزارة البحث العلمي والتعليم العالي

MINISTERE DE L' ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعـة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كـلية العــلـوم والتـكـنولوجيـا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

Master en Réseau électrique&Electrotechnique Industrielle

Startup

Création d' un bureau d' étude

Par

BOUKECHICHE OUM EL KHEIR

SADEG KHEIRA SIHAM

LAHOUEL FATIHA

Thème :

Contribution à la préparation d'un cahier des charges pour un bureau d'études concernant la méthodologie de conception des installations électriques industrielles des complexes de production.

Soutenu le Président : 25 /10/ 2026 devant le jury composé de :

Président : M elle Rezini Saliha MCA Université de Mostaganem.

Examinateur : Mr Souag Slimane MCB Université de Mostaganem.

Encadreur : Mr Bekkouche Benaissa Pr Université de Mostaganem.

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu de nous avoir donné le courage et la volonté nécessaires pour réaliser ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur, **Monsieur Bekkouche Benaissa**, professeur à l' **Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem**, pour son dévouement, ses conseils et son soutien tout au long de l' élaboration de ce travail.

Nous remercions également **Dr Rezini Saliha** pour l' honneur qu' elle nous fait en acceptant de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont également au **Dr Souag Slimane** pour l' intérêt qu' il a porté à notre travail en acceptant de l' examiner et de l' enrichir par ses précieuses propositions.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide et leurs conseils dans la réalisation de ce projet.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à l'ensemble des enseignants de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem pour les connaissances et les valeurs qu'ils nous ont transmises tout au long de notre parcours universitaire.

Dédicaces

À nos chers parents,

Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leurs encouragements et leur soutien tout au long de notre

parcours. Aucune parole ne saurait exprimer toute notre gratitude envers eux.

À nos familles,

Pour leur présence, leur affection et leur soutien dans les moments les plus difficiles. Merci d' avoir toujours cru en nous et de nous avoir donné la force de poursuivre nos rêves.

À nos amis,

Pour leur amitié sincère, leurs encouragements et tous les beaux souvenirs partagés au cours de cette aventure.

À nous-mêmes,

Pour notre persévérance, notre patience et notre détermination face aux difficultés. Pour les efforts fournis, les obstacles surmontés et les moments de doute dépassés. Nous sommes fiers du chemin parcouru et de tout ce que nous avons appris au cours de cette expérience.

À tous ceux qui nous sont chers,

Nous dédions ce modeste travail, fruit de nos efforts, de notre engagement et de notre volonté d' atteindre nos objectifs.

OUM ELKHEIR- KHEIRA SIHAM-FATIHA

ملخص:

تركز هذه الدراسة على تحليل وتصميم التركيبات الكهربائية لضمان تزويد المنظومة بالطاقة بشكل آمن وموثوق. شمل العمل إعداد توازن القدرة الكهربائية، التحقق من اختيار واختبار مقاطع الكابلات، والتأكد من قدرة المحولات والمولدات المستخدمة. كما قمنا بدراسة ملاءمة أجهزة الحماية وضبطها لضمان الانتقالية، واختبار سلوك الشبكة في ظروف التشغيل العادية وحالات الأعطال اعتمدنا في هذا البحث على المحاكاة باستخدام برنامج **ETAP** للحصول على نتائج دقيقة تعكس الواقع التشغيلي للمنشأة.

Abstract :

This work focuses on the analysis of the electrical distribution network in order to evaluate its performance. We carried out a power balance, verified câble sizing, and validated the selected protection devices. Furthermore, we analyzed different operating scenarios and fault cases to ensure the reliability of the installation. This study was based on the ETAP software, which allowed us to perform detailed simulations and obtain precise results that reflect the real behavior of the network.

Résumé :

Ce travail porte sur l' analyse du réseau de distribution électrique afin d' évaluer ses performances. Nous avons réalisé un bilan de puissance, vérifié le dimensionnement des câbles et validé les dispositifs de protection choisis. De plus, nous avons étudié différents scénarios de fonctionnement ainsi que des cas de défaut pour assurer la fiabilité de l' installation. Cette étude a été réalisée à l' aide du logiciel ETAP, qui nous a permis d' effectuer des simulations détaillées et d' obtenir des résultats précis reflétant le comportement réel du réseau

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

Introduction générale 1

Chapitre I : Dimensionnement et conception des installations électriques. 3

I. Introduction : 4

I.1 Généralité sur les normes : 4

I.2 Les domaines de tension : 4

I.3 Les équipements d'un réseau électrique : 4

I.4 Les différents étapes d'un réseau électrique : 5

I.5 Poste électrique : 6

I.5.1 Définition d'un poste électrique : 6

I.5.2 Les types des postes électriques : 6

I.5.3 Topologie des postes électriques 6

a) Les postes de livraison MT : 6

b) Poste de livraison HTA(BT) a comptage BT : 7
I.5.4 Les tableaux électriques : 9
I.6 structure générale d' une installation électrique industrielle MT /BT : 10
I.7 Méthodologie de dimensionnement des installations électriques : 11
I.8 schéma unifilaire : 12
I.9 Sélection d' un régime de neutre : 12
I.9.1 Régime TT : 12
I.9.2 Régime IT : 13
I.9.3 Régime TN : 13
I.9.4 Choix d'un régime de neutre : 15
I.9.5 comparaison : 15
I.10 Bilan de puissance : 15
I.11 Détermination des puissances : 15
I.11.1 puissance a installée : 15
I.11.2 puissance absorbée : 15
I.11.3puissance apparente : 15
I.11.4 La puissance utilisée 15
I.11.5 Puissance foisonné : 16
I.12 Exemple de calcul des puissances : 16
I.13 détermination de courant d'emploi Ib : 17
I.14 calcul de courant admissible Iz du conducteur : 17
I.15 section SZ relative au courant admissible : 17
I.16 Les paramètres influant sur l' état d'un conducteur : 17
I.16.1 Section de câble : 17
I.16.2 Détermination pratique : 18
I.17 Vérification de la Chute de Tension : 18
I.18 Section de câble pour court-circuit (Scc) : 19
I.19 Comparaison entre Sz et Scc : 19
I.20 Calcule de la section économique : 19
I.21 Conclusion : 19
Chapitre II : La Protection des installations industrielles. 20
II.1 Introduction : 21
II.2 Le système de protection : 21
II.2.1 Constitution d' un système de protection : 21
II.3 Éléments constituants d' un système de protection : 21
II.3.1 Transformateurs de mesure : 21

II.3.1.1 Transformateur de tension : 21
II.3.1.2 Transformateur de courant : 22
II.3.2 Les relais de protection : 22
II.3.2.1 Désignation d' un relais : 22
II.3.2.2 Différents types de relais : 22
II.3.3 Fusibles : 26
II.3.3.1 Fonctionnement des fusibles : 26
II.3.3.2 Différentes classes de fusibles : Il existe trois types de fusibles : 26
II.3.4 Disjoncteur : 26
II.3.4.1 Classification des disjoncteurs : 26
II.3.4.1.1 Classification des disjoncteurs suivant l' isolant : 26
II.3.4.1.2 Classification des disjoncteurs suivant le type de fonctionnement 28
II.3.5 Sectionneur : 29
II.3.6 Les interrupteurs : 29
II.3.7 Protection contre les phénomènes atmosphériques : 30
II.3.7.1 Cage de Faraday : 30
II.3.7.2 Paratonnerre : 30
II.3.7.3 Eclateur : 31
II.3.7.4 Les parafoudres : 32
II.3.7.5 Câbles de garde : 32
II.4 Qualités principales d' un système de protection : 33
II.4.1 Fiabilité : 33
II.4.3 Rapidité : 33
II.4.4 Sensibilité : 33
II.4.5 L' économie : 33
II.5 Sélectivité des protections : 33
II.5.1 Mode de sélectivité : 33
II.5.1.1 Sélectivité ampère métrique : 33
II.5.1.2 Sélectivité chronométrique : 34
II.5.1.3 Sélectivité logique : 34
II.6 Conclusion : 35
Chapitre III : Calcul de l' installation industrielle 36
III.1. Introduction : 37
III.2. Cahier des charges standard : 37
III.2.1. Présentation et objectifs du projet : 37
III.2.2. Périmètre du réseau industriel : 37

III.2.3. Spécifications techniques et contraintes : 37
III.2.4. Sécurité industrielle : 38
III.2.5. Exploitation, maintenance et accompagnement : 38
III.3. Cahier de charge technique pour la conception d' une installation industrielle : 38
III.3.1. Collecte de données : 38
III.3.1.1. Conditions d'environnement : 38
III.3.1.2. Classement des récepteurs : 38
III.3.1.3. Attachement géographique ou fonctionnel des récepteurs : 38
III.3.1.4. Extensions futures : 39
III.3.1.5. Classement des récepteurs par priorité : 39
III.3.1.6. Contraintes du réseau public : 39
III.3.2. Elaboration d'un premier schéma unifilaire : 39
III.3.2.1. Bilan de puissance : 39
III.3.2.2. Choix des niveaux de tension : 39
III.3.2.3. Sources d'énergie : 39
III.3.2.4. Choix des régimes de neutre : 40
III.3.2.5. Choix de la structure du réseau : 40
III.3.2.6. Gestion de l'énergie et choix de la tarification optimale : 40
III.3.3. Etudes techniques et homologation du schéma unifilaire : 40
III.3.3.1. Calcul des courants nominaux : 40
III.3.3.2. Choix des transformateurs : 40
III.3.3.3. Choix des générateurs : 40
III.3.3.4. Détermination des sections des conducteurs : 41
III.3.3.5. Etude des circuits de terre et des prises de terre : 41
III.3.3.7. Démarrage des moteurs : 41
III.3.3.8. Compensation de l'énergie réactive : 41
III.3.3.9. Etude des harmoniques : 41
III.3.3.10. Coordination de l'isolement dans une installation électrique industrielle : 42
III.3.3.11. Etude de la sûreté de fonctionnement : 42
III.3.4. Choix du matériel : 42
III.3.4.1. Aux normes en vigueur. 42
III.3.4.2. Aux caractéristiques du réseau : 42
III.3.4.3. Aux fonctions associées à chaque équipement : 42
III.3.4.4. Aux exigences de la continuité de service : 42
III.3.4.5. Aux qualifications du personnel : 43
III.3.4.6. Aux exigences liées aux extensions futures : 43

III.3.5. Détermination du plan de protection : 43
III.3.5.1. Le fonctionnement normal d'une installation : 43
III.3.5.2. Le rôle des protections : 43
III.3.6. Choix d'un système de contrôle–commande : 43
III.3.6.1. L' optimisation de cette gestion : 43
III.3.6.2. Conduire le réseau à distance : 43
III.3.6.3. Améliorer l'efficacité et la rapidité de diagnostic et d'intervention sur le réseau : 43
III.3.6.4. Optimiser le coût de l'énergie : 44
III.3.6.5. Optimiser la maintenance : 44
III.3.7. Cas d' étude : 44
III.3.7.1. Introduction : 44
III.3.7.2. Description de l'installation : 44
III.3.7.3. Collecte de données : 45
III.3.7.3.1. Conditions d'environnement : 45
III.3.7.3.2. Données météorologiques du lieu : 45
III.3.7.3.3. Classement des récepteurs : 45
III.3.7.3.4. Les Puissances nominales des récepteurs : 46
III.3.7.3.5. Classement des récepteurs par priorité : 48
III.3.7.4. Elaboration d'un premier schéma unifilaire : 48
III.3.7.4.1. Bilan de puissance demandé par l' usine : 48
III.3.7.4.2. Choix des niveaux de tension : 51
III.3.7.4.3. Les sources d'énergie : 51
III.3.7.4.4. Choix des régimes de neutre : 51
III.3.7.4.5. Choix de la structure du réseau : 52
III.3.7.4.6. Gestion de l'énergie et choix de la tarification optimale : 52
III.3.7.4.7. Schéma unifilaire de l'installation proposée : 52
III.3.7.5. Etudes techniques et homologation du schéma unifilaire : 53
III.3.7.5.1. Détermination du facteur de puissance total de l' installation pour le JDB 5.5 KV : 53
III.3.7.5.2. Choix des transformateurs : 53
III.3.7.5.2.1. Première possibilité : 53
III.3.7.5.2.2. Deuxième scénario : 53
III.3.7.5.2.3. Comparaison : 54
III.3.7.5.2.4. Calcul du rapport de transformation : 54
III.3.7.5.2. 5. Calcul du courant secondaire : 54

III.3.7.5.2.6. Calcul du courant primaire : 54
III.3.7.5.2.7. Détermination du courant de court-circuit Ucc : 54
III.3.7.5.3. Choix des alternateurs : 55
III.3.7.5.4. Calcul des courants de court-circuit : 55
III.3.7.5.5.1. Calcul de courant Ib : 56
III.3.7.5.5.2. Détermination des sections des conducteurs : 56
III.3.7.5.5.3. Le courant admissible : 56
III.3.7.5.5.4. Vérification de la contrainte thermique : 56
III.3.7.5.5.5. Calcul de courant de court-circuit Icc : 57
III.3.7.5.5.6. Calcul de section de court-circuit Scc : 57
III.3.7.5.5.6. Chutes de tensions : 57
III.7.5.6. Compensation de l'énergie réactive : 57
III.3.7.5.6.1. Détermination de la puissance réactive totale à compenser : 57
III.3.7.5.6.1. Choix de l'emplacement des condensateurs : 57
III.3.7.5.6.2. Interprétation : 58
III.3.7.5.7. Etude des harmoniques : 58
III.3.7.5.8. Démarrage des moteurs : 59
III.3.7.5.8.1. Etude du démarrage du moteur 750 Kw : 59
III.3.7.5.8.2. Diagnostic du démarrage : 59
III.3.7.5.8.3. Etude du démarrage simultané des 4 moteurs MT de la production : 59
III.3.7.6. Détermination du plan de protection : 60
III.4. Conclusion : 61
Chapitre IV : Simulation et Évaluation Techno-Économique. 62
IV. Introduction : 63
IV.1. Simulation : 63
IV.1.1. Caractéristiques de la Source Amont (Réseau Distribution) : 63
IV.1.2. Configuration des Transformateurs Principaux (Poste de Livraison) : 63
IV.1.3. Configuration des Alternateurs de Secours (Mode Urgence) : 64
IV.1.4. Spécifications des Canalisations et Câbles Moyenne Tension : 65
IV.1.5. Équipements de Sécurité (Système ASI&Câble DC) : 65
IV.1.5.1. Système ASI (UPS) : 65
IV.1.5.2. Batterie d'accumulateurs dédiée : 65
IV.1.5.3. Câble de liaison DC : 66
IV.1.5.4. Groupe électrogène de sécurité dédié : 66
IV.1.6. Spécifications des Disjoncteurs de Protection (CB) : 66
IV.1.7. Modélisation du réseau électrique sous ETAP : 67

IV.1.7. Étude de Contingence (Critère de Sécurité N-1) : 70
IV.1.7.1 Sélectivité (Module ETAP Star) (*transformateur principal 20 kV/5.5kV*) : 70
IV.1.7.2 Fonctionnement en Mode d'urgence (Analyse de Contingence N-1 et Délestage) : 73
IV.1.7.4. Étude des Harmoniques et Pollution du Réseau : 73
IV.1.7.4.1. Objectif de l'Étude : 73
IV.1.7.4.2. Configuration du Spectre Harmonique : 74
IV.1.7.4.3. Présentation des Résultats et Analyse : 74
IV.2 Introduction à l'Étude Économique : 76
IV.2.1 Objectif de l' étude techno-économique : 76
IV.2.2. Coût du matériel : 76
IV.2.2.1 Les coûts d' achat par atelier : 76
IV.2.2.2 Le poste d' alimentation : 76
IV.2.2.3 Atelier de préparation : 77
IV.2.2.4 Atelier de production : 78
IV.2.2.5 Atelier de maintenance : 79
IV.2.2.6. Parc de Stockage : 80
IV.2.2.7. Bâtiments administratif : 81
IV.2.2.8. Atelier d' épuration d' eau : 82
IV.2.2.9. La station de pompage : 83
IV.2.2.10. L' ensemble des prix d' achat du réseau interne du complexe : 84
IV.3 Coût des travaux : 85
IV.4 Coût de l' étude : 85
IV.5 Coût global de l' installation : 85
IV.6 Interprétation économique : 86
IV.7 Conclusion : 86
Conclusion générale 87
V: Startup 90
Bibliographiques 96
Annexe 98

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Schéma unifilaire d'un réseau électrique .....
Figure I.2: schéma d'alimentation de poste de livraison HTB .....
Figure I.3 : Alimentation en simple dérivation d'un poste HTA à comptage BT Alimentation .....
Figure I.4: Alimentation en double dérivation d'un poste de livraison HTA(MT) à comptage BT .....
Figure I.5: schéma alimentation en coupure d'artère d'un poste de livraison HTA à comptage BT .....
Figure I.6 : schéma alimentation des tableaux BT avec une seule source d'alimentation .....
Figure I.7: schéma alimentation des tableaux BT par une double alimentation sans couplage .....
Figure I.8: schéma alimentation des tableaux BT par une double alimentation avec couplage .....
Figure I.9 : exemple d' un réseau électrique industriel .....
Figure I.10 : schéma unifilaire d'une installation électrique .....
Figure I.11 : schéma régime de neutre TT .....
Figure I.12 : schéma régime de neutre IT .....
Figure I.13: schéma régime de neutre TN .....
Figure I.14: schéma RN TNS .....
Figure I.15: schéma RN TNC .....
Figure I.16: schéma régime de neutre TN-CS .....
Figure I.17: Exemple de calcule des puissances .....
Figure II-1 : Schéma de principe de la chaine de protection .....
Figure II-2 : Schéma de branchement TT .....
Figure II-3 : Schéma de branchement TC .....
Figure II-4 : relais électromagnétique .....
Figure II-5 : Relais statique .....
Figure II-6 : Schéma d' un relais numérique type IQ1000 .....
Figure II-7 : Principe du relais thermique .....
Figure II-8 : relais de phase .....
Figure II-9 : Schéma relais de niveau .....
Figure II-10 : Schéma de relais de temporisé .....
Figure II-11 : Différentes classes de fusibles .....
Figure II-12 : Disjoncteur pneumatique .....
Figure II-13 : Disjoncteur SF6 .....
Figure II-14 : Disjoncteur à l' huile .....
Figure II-15 : Principe d' un Disjoncteur magnétique .....
Figure II-16 : Principe d' un Disjoncteur thermique .....
Figure II-17 : Schéma de câblage d' un Disjoncteur magnétothermique .....
Figure II-18 : Sectionneur moyenne tension .....
Figure II-19 : interrupteur de protection .....
Figure II-20 : Schéma de principe de la cage de Faraday .....
Figure II-21 : Paratonnerre .....
Figure II-22 : éclateur MT avec tige anti-oiseaux .....
Figure II-23 : vue en coupe d' un Parafoudre .....
Figure II-24 : câble de garde .....
Figure II-25 : fonctionnement d' une sélectivité ampère métrique .....
Figure II-26 : principe de la sélectivité chronométrique .....
Figure II-27 : principe de la sélectivité logique .....
Figure III.1 : Plan de masse de l' installation .....
Figure III-2 : schéma unifilaire de l'installation .....

Figure IV.1 : Caractéristiques de la source amont du réseau électrique sous ETAP .....
Figure IV.2 : Configuration des transformateurs principaux 20/5,5 kV sous ETAP .....
Figure IV.3 : Configuration des groupes électrogènes de secours sous ETAP .....
Figure IV.4 : Caractéristiques des câbles et liaisons moyenne tension sous ETAP .....
Figure IV.5 : Configuration du système ASI (UPS) sous ETAP .....
Figure IV.6 : Configuration de la batterie d' accumulateurs sous ETAP .....
Figure IV.7 : Sélection des disjoncteurs moyenne tension 20 kv .....
Figure IV.8 : Sélection des disjoncteurs moyenne tension 5.5 kv .....
Figure IV.9 : Schéma de modélisation de l' installation électrique sous ETAP .....
Figure IV.10 : Résultats de l'écoulement de puissance (Load Flow Analysis) .....
Figure IV.11 : Rapport des pertes dans les branches de l' installation .....
Figure IV.12 : Courbe des résultats du Load Flow .....
Figure IV.13 : Écoulement de puissance en mode contingence N-1 .....
Figure IV.14 : Écoulement de puissance en mode d'Urgence avec groupes de secours actifs .....
Figure IV .15 : Forme d' onde et spectre harmonique d' une charge non linéaire à 6 impulsions .....
Figure IV.16 : Forme spectre fréquentiel (Spectrum) du courant harmonique .....
Figure IV.17 : Forme spectre fréquentiel (Spectrum) du courant harmonique .....
Figure IV.18 : Forme spectre fréquentiel (Spectrum) du courant harmonique .....
Figure IV.19 : Histogramme des coûts d' investissement du poste d' alimentation 20/5,5 Kv .....
Figure IV.20 : Histogramme des coûts d' investissement de l' atelier de préparation .....
Figure IV.21 : Histogramme des coûts d' investissement de l' atelier de production .....
Figure IV.22 : Histogramme des .....
Figure IV.23 : Histogramme des coûts d' investissement du parc de stockage .....
Figure IV.24 : Histogramme des coûts d' investissement du bâtiment administratif .....
Figure IV.25 : Histogramme des coûts d' investissement de l' atelier d' épuration d' eau .....
Figure IV.26 : Histogramme des coûts d' investissement de la station de pompage .....
Figure IV.27 : Histogramme des coûts totaux de l' installation électrique industrielle .....

IV.1.7.3. Étude de la Protection 73
IV.1.7.3.1Sélectivité (Module ETAP Star) : 73
IV.1.7.3 .2 court-circuit : 73
IV.1.7.4. Étude des Harmoniques et Pollution du Réseau : 73
IV.1.7.4.1. Objectif de l'Étude : 73
IV.1.7.4.2. Configuration du Spectre Harmonique : 74
IV.1.7.4.3. Présentation des Résultats et Analyse : 74
IV.2 Introduction à l'Étude Économique : 76
IV.2.1 Objectif de l' étude techno-économique : 76
IV.2.2. Coût du matériel : 76
IV.2.2.1 Les coûts d' achat par atelier : 76
IV.2.2.2 Le poste d' alimentation : 76
IV.2.2.3 Atelier de préparation : 77
IV.2.2.4 Atelier de production : 78
IV.2.2.5 Atelier de maintenance : 79
IV.2.2.6. Parc de Stockage : 80
IV.2.2.7. Bâtiments administratif : 81
IV.2.2.8. Atelier d' épuration d' eau : 82
IV.2.2.9. La station de pompage : 83
IV.2.2.10. L' ensemble des prix d' achat du réseau interne du complexe : 84
IV.3 Coût des travaux : 85
IV.4 Coût de l' étude : 85
IV.5 Coût global de l' installation : 85
IV.6 Interprétation économique : 86
IV.7 Conclusion : 86
Conclusion générale 87
V: Startup 90
Bibliographiques 96
Annexe 98

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Schéma unifilaire d'un réseau électrique .....
Figure I.2: schéma d'alimentation de poste de livraison HTB .....
Figure I.3 : Alimentation en simple dérivation d'un poste HTA à comptage BT Alimentation .....
Figure I.4: Alimentation en double dérivation d'un poste de livraison HTA(MT) à comptage BT .....
Figure I.5: schéma alimentation en coupure d'artère d'un poste de livraison HTA à comptage BT .....
Figure I.6 : schéma alimentation des tableaux BT avec une seule source d'alimentation .....
Figure I.7: schéma alimentation des tableaux BT par une double alimentation sans couplage .....
Figure I.8: schéma alimentation des tableaux BT par une double alimentation avec couplage .....
Figure I.9 : exemple d' un réseau électrique industriel .....
Figure I.10 : schéma unifilaire d'une installation électrique .....
Figure I.11 : schéma régime de neutre TT .....
Figure I.12 : schéma régime de neutre IT .....
Figure I.13: schéma régime de neutre TN .....
Figure I.14: schéma RN TNS .....
Figure I.15: schéma RN TNC .....
Figure I.16: schéma régime de neutre TN-CS .....
Figure I.17: Exemple de calcule des puissances .....
Figure II-1 : Schéma de principe de la chaine de protection .....
Figure II-2 : Schéma de branchement TT .....
Figure II-3 : Schéma de branchement TC .....
Figure II-4 : relais électromagnétique .....
Figure II-5 : Relais statique .....
Figure II-6 : Schéma d' un relais numérique type IQ1000 .....
Figure II-7 : Principe du relais thermique .....
Figure II-8 : relais de phase .....
Figure II-9 : Schéma relais de niveau .....
Figure II-10 : Schéma de relais de temporisé .....
Figure II-11 : Différentes classes de fusibles .....
Figure II-12 : Disjoncteur pneumatique .....
Figure II-13 : Disjoncteur SF6 .....
Figure II-14 : Disjoncteur à l' huile .....
Figure II-15 : Principe d' un Disjoncteur magnétique .....
Figure II-16 : Principe d' un Disjoncteur thermique .....
Figure II-17 : Schéma de câblage d' un Disjoncteur magnétothermique .....
Figure II-18 : Sectionneur moyenne tension .....
Figure II-19 : interrupteur de protection .....
Figure II-20 : Schéma de principe de la cage de Faraday .....
Figure II-21 : Paratonnerre .....
Figure II-22 : éclateur MT avec tige anti-oiseaux .....
Figure II-23 : vue en coupe d' un Parafoudre .....
Figure II-24 : câble de garde .....
Figure II-25 : fonctionnement d' une sélectivité ampère métrique .....
Figure II-26 : principe de la sélectivité chronométrique .....
Figure II-27 : principe de la sélectivité logique .....
Figure III.1 : Plan de masse de l' installation .....
Figure III-2 : schéma unifilaire de l'installation .....

Figure IV.1 : Caractéristiques de la source amont du réseau électrique sous ETAP .....
Figure IV.2 : Configuration des transformateurs principaux 20/5,5 kV sous ETAP .....
Figure IV.3 : Configuration des groupes électrogènes de secours sous ETAP .....
Figure IV.4 : Caractéristiques des câbles et liaisons moyenne tension sous ETAP .....
Figure IV.5 : Configuration du système ASI (UPS) sous ETAP .....
Figure IV.6 : Configuration de la batterie d' accumulateurs sous ETAP .....
Figure IV.7 : Sélection des disjoncteurs moyenne tension 20 kv .....
Figure IV.8 : Sélection des disjoncteurs moyenne tension 5.5 kv .....
Figure IV.9 : Schéma de modélisation de l' installation électrique sous ETAP .....
Figure IV.10 : Résultats de l'écoulement de puissance (Load Flow Analysis) .....
Figure IV.11 : Rapport des pertes dans les branches de l' installation .....
Figure IV.12 : Courbe des résultats du Load Flow .....
Figure IV.13 : Écoulement de puissance en mode contingence N-1 .....
Figure IV.14 : Écoulement de puissance en mode d'Urgence avec groupes de secours actifs .....
Figure IV .15 : Forme d' onde et spectre harmonique d' une charge non linéaire à 6 impulsions .....
Figure IV.16 : Forme spectre fréquentiel (Spectrum) du courant harmonique .....
Figure IV.17 : Forme spectre fréquentiel (Spectrum) du courant harmonique .....
Figure IV.18 : Forme spectre fréquentiel (Spectrum) du courant harmonique .....
Figure IV.19 : Histogramme des coûts d' investissement du poste d' alimentation 20/5,5 Kv .....
Figure IV.20 : Histogramme des coûts d' investissement de l' atelier de préparation .....
Figure IV.21 : Histogramme des coûts d' investissement de l' atelier de production .....
Figure IV.22 : Histogramme des .....
Figure IV.23 : Histogramme des coûts d' investissement du parc de stockage .....
Figure IV.24 : Histogramme des coûts d' investissement du bâtiment administratif .....
Figure IV.25 : Histogramme des coûts d' investissement de l' atelier d' épuration d' eau .....
Figure IV.26 : Histogramme des coûts d' investissement de la station de pompage .....
Figure IV.27 : Histogramme des coûts totaux de l' installation électrique industrielle .....

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : formule de calcul de chute de tension .....
Tableau III.1. Coordonnées géographiques du site .....
Tableau III–2 : caractéristiques des moteurs MT .....
Tableau III–3 : caractéristiques des variateurs de vitesse .....
Tableau III–4 : Identification des différents circuits électriques de l' installation .....
Tableau III–5 : Bilan de puissance globale de l' installation .....
Tableau III–6 : Bilan de puissance utilisée de l' installation .....
Tableau III–7 : Bilan de puissance totale de toute l' installation .....
Tableau III–8 : Bilan de puissance totale de toute l' installation .....
Tableau III–9 : Bilan de puissance totale de toute l' installation .....
Tableau III–10 : résume des puissances totales.....51
Tableau III–11 : Caractéristiques du transformateur adéquat pour l' installation .....
Tableau III–12 : le classement des charges .....
Tableau III–13 : caractéristiques des alternateurs .....
Tableau III–14 : la sélection de la section adéquate .....
Tableau III– 15 : emplacement des batteries de condensateurs .....
Tableau III–16 : courants harmoniques générés par les variateurs ATV–52V .....
Tableau III–17 : caractéristiques de l' ensemble moteur – charge .....
Tableau III–18 : caractéristiques de l' ensemble moteur – charge équivalent .....
Tableau IV.1 : synthèse des résultats du calcul de puissance, des pertes et de chute de tension .....
Tableau IV .2 : Résultats du chargement des transformateurs après la perte de T111 .....
Tableau IV .3 : Résultat de l' écoulement de puissance du générateur en mode secours .....
Tableau IV.4 : Courants de court–circuit obtenus par simulation .....
Tableau IV.5 : Investissement du poste d' alimentation (JDB 20/5.5 KV) .....
Tableau IV.6 : Le coût total de l'atelier de préparation .....
Tableau IV.7 : Le coût total de l'atelier de production .....
Tableau IV.8 : Le coût total de l'atelier de maintenance .....
Tableau IV.9 : Le coût total du parc de Stockage .....
Tableau IV.10 : Le coût total du Bâtiments administratif .....
Tableau IV.11 : Le coût total de l' atelier d' épuration d' eau .....
Tableau IV.12 : Le coût total de la station de pompage .....
Tableau IV.13 : Le coût total de l' installation électrique du complexe .....
Tableau IV.14 : les Coût global de l' installation .....
Tableau V.1 : Business Model Canvas du projet .....

ANNEX

Tableau I.1: Détermination de la lettre de sélection .....
Tableau I.2: Le facteur de correction K1 .....
Tableau I.3: Le facteur de correction K2 .....
Tableau I.4 : Le facteur de correction K3 .....
Tableau I.5: Sections des conducteurs pour les canalisations non enterrées .....

Introduction générale

Introduction générale

Les réseaux électriques industriels constituent un élément essentiel pour assurer l' alimentation en énergie électrique des différents équipements nécessaires au fonctionnement d' un site industriel. Leur conception doit permettre d' assurer une alimentation fiable, sûre et adaptée aux besoins de l' installation, tout en garantissant la continuité du fonctionnement des équipements et la sécurité des personnes et des biens.

Dans une installation industrielle, les différents appareils électriques sont soumis à des conditions de fonctionnement variables et peuvent être exposés à différents types de défauts et de perturbations. Une défaillance de l' alimentation électrique peut provoquer l' arrêt des machines, l' interruption de la production, l' endommagement des équipements ou encore engendrer des pertes économiques importantes. Il est donc nécessaire de réaliser une étude rigoureuse permettant de déterminer les caractéristiques de l' installation, de choisir les équipements appropriés et de mettre en place les dispositifs de protection nécessaires.

Par conséquent, le dimensionnement des installations électriques industrielles constitue un maillon important de la construction des réseaux électriques internes des grandes usines modernes. Il doit prendre en considération plusieurs paramètres, notamment les caractéristiques des récepteurs, les puissances installées et demandées, les courants admissibles, les conditions d' installation, les chutes de tension ainsi que les exigences de protection et de sécurité. Cette étude doit également tenir compte des normes et réglementations en vigueur afin d'obtenir une installation techniquement fiable et économiquement adaptée.

Afin de standardiser la méthodologie de conception des installations industrielles, nous proposons un modèle de cahier des charges servant de document de travail et de guide, permettant aux bureaux d'études d'atteindre leurs objectifs avec précision. Ce modèle constitue également un soutien précieux pour les jeunes diplômés intégrant le secteur des micro-entreprises industrielles.

Le cahier des charges proposé débutera par une collecte de données et une évaluation sur le terrain afin d'identifier les contraintes du réseau, la priorisation des charges et les extensions futures. La deuxième étape consistera à élaborer un schéma unifilaire préliminaire illustrant les différents niveaux de puissance et de tension, les sources d'énergie, les systèmes de neutre et le choix de l'architecture du réseau.

Le troisième article portera sur les études techniques et l' homologation du schéma unifilaire proposé. Cette section comprendra les calculs des courants de fonctionnement, des courants admissibles, des sections des conducteurs et le rôle des dispositifs de protection.

La quatrième étape consistera à sélectionner les équipements en fonction des paramètres prédéterminées et les normes en vigueur. La dernière étape sera réservée à la vérification du bon fonctionnement de l'installation à l'aide d'un logiciel de simulation afin d'identifier les améliorations potentielles en termes d'efficacité et de rapidité des diagnostics et interventions sur le réseau, ainsi que d'optimiser certains paramètres.

Dans ce contexte, et afin d'atteindre les objectifs définis, notre travail s'articulera autour de quatre axes principaux.

Le premier axe portera sur deux compétences essentielles. La première sera consacrée à l'étude des concepts généraux relatifs aux réseaux électriques industriels, dans le but de comprendre l'organisation de la distribution d'énergie, ses différentes étapes, du transport à la distribution, ainsi que les équipements essentiels tels que les postes de transformation moyenne tension et les tableaux de distribution basse tension. La compréhension de la structure du réseau et de ses composantes ouvrira la voie à la deuxième compétence principale de ce travail, à savoir l'étude systématique du dimensionnement des installations électriques industrielles. Cette prospection garantira également que le dimensionnement final sera conforme aux normes et efficace, en tenant compte des exigences spécifiques du réseau industriel.

Le deuxième axe portera sur la protection des installations électriques afin d' assurer la sécurité des équipements et la continuité de service en cas de défaut. Les différents dispositifs de protection ainsi que leur rôle et leur principe de fonctionnement seront exposés. Alors pour une mise ajour des connaissances les qualités principales d' un système de protection seront décrivais. Cet sera achevés par un aperçu sur les différentes Sélectivités des protections.

La troisième section constituera le cœur de cette contribution à la méthodologie de conception des installations industrielles. Elle sera consacrée à l'explication des différents éléments inclus dans le cahier des charges proposé et nécessaires à l'étude des installations électriques. Un plan détaillé de l'usine sera fourni, incluant le tracé des différentes gaines de câbles ainsi que l'emplacement et les dimensions des différents ateliers. Un schéma unifilaire préliminaire sera établi, suivi d'une analyse des calculs de puissance pour différentes charges afin de déterminer les paramètres d'installation nécessaires. Cette section se conclura par la validation du schéma unifilaire proposé et une analyse du fonctionnement de l'installation.

Le quatrième axe comprendra les différentes simulations à l' aide du logiciel ETAP, du réseau électrique interne conçu suivants le cahier de charge permettant de vérifier le comportement de l' installation et de valider les résultats obtenus par les calculs. La

section sera achevée par une étude économique afin d' évaluer les coûts associés aux principaux équipements et de compléter l' analyse technique de l' installation.

Ce travail sera achevé par une conclusion générale qui présentera une synthèse des principales étapes de l' étude, des résultats obtenus ainsi que les principaux enseignements tirés de cette étude.

Chapitre 1 :
Dimensionnement et conception des installations électriques.

Chapitre I : Dimensionnement e conception des installations électriques

I. Introduction :

La réalisation d' une installation électrique industrielle nécessite, avant tout calcul ou conception, une bonne compréhension de la structure générale du réseau.

Dans ce chapitre, nous avons commencé par étudier les notions générales sur les réseaux électriques industriels, afin de comprendre l' organisation de la distribution de l' énergie, les différentes étapes du transport à la distribution, ainsi que les équipements essentiels tels que les postes MT et BT et les tableaux électriques.

Cette approche préparatoire permet ensuite de passer à la méthodologie de dimensionnement. Comprendre la structure et les composants du réseau permet de saisir l' objectif de chaque calcul : déterminer les puissances nécessaires, calculer les courants, choisir les sections de câbles et sélectionner les dispositifs de protection adaptés.

Ainsi, le dimensionnement final devient cohérent avec les normes, sûr et efficace, tout en reflétant la réalité d' un réseau industriel.

I.1 Généralité sur les normes :

On se réfère ici aux règles et recommandations reconnues dans le domaine électrique, qui servent de guide pour concevoir et exploiter les installations en toute sécurité. Leur respect est fortement conseillé et, dans certains cas, peut être obligatoire. **(1)**

- NF C 15-100 : "Installations électriques à basse tension" et les guides d'applications.
- NF C 14-100 : "Installations de branchement à basse tension" comprises entre le réseau de distribution et les installations intérieures.
- NFC13-100 : "Postes de livraison établis à l'intérieur d'un bâtiment et alimentés par un réseau de distribution publique HTA".
- NFC13-101 : "Postes semi-enterrés préfabriqués sous enveloppe".
- NF C 13-102 : "Postes simplifiés préfabriqués sous enveloppe".
- NF C 13-103 : "Postes sur poteau".
- NF C 13-200 : "Installations électriques à haute tension".
- CEI60364 : Installations électriques basse tension (dimensionnement, protection, mise à la terre.
- CEI 60947 : Appareillage basse tension (disjoncteurs, contacteurs...).
- CEI 61439 : Tableaux électriques BT.
- CEI 60076 : Transformateurs de puissance.
- CEI 60204-1 : Équipements électriques des machines industrielles.
- CEI 61000 : Compatibilité électromagnétique (qualité de l' énergie).
- CEI 62305 : Protection contre la foudre.
- IEC 61000-2-2:Compatibilité électromagnétique dans les réseaux publics BT.
- IEC 62040-1 : Exigences de sécurité des alimentations sans interruption (ASI).
- EN 50160:Caracté ristiques de la tension fournie par les ré seaux publics de distribution électrique.

I.2 Les domaines de tension :

Les réseaux électriques se classent en BT, MT, HT et THT selon la puissance et la sécurité. Cette classification guide le dimensionnement des équipements industriels. (2)

- BT : U ≤ 1 kV → P : 0 à 250 Kva ;
- MT : 1 kV < U ≤ 63 kV → P : 250 à 10 000 Kva ;
- HT : 63 kV < U ≤ 225 kV → P : 10 000 à 40 000 Kva ;
- THT: U > 225 kV → P > 40 000 Kva;

I.3 Les équipements d'un réseau électrique :

Les équipements de réseau industriel permettent de produire, transformer, protéger et distribuer l' électricité aux différents utilisateurs d' une installation industrielle.

- Centrale de production : produit l' électricité pour le réseau industriel ;
- Transformateurs : changent le niveau de tension (HT ↔ MT/MT ↔ BT) ;
- Disjoncteurs et fusibles : protègent le réseau contre les surcharges et court-circuit ;
- Tableaux électriques (TGBT, distribution) : répartissent l' électricité vers les circuits industriels ;
- Câbles et conducteurs : transportent l' énergie vers les machines et équipements ;
- Appareillages (contacteurs, relais, sectionneurs) → commandent le fonctionnement des machines ;
- Mise à la terre et protections : assurent la sécurité des personnes et du matériel.

I.4 Les différents étapes d'un réseau électrique :

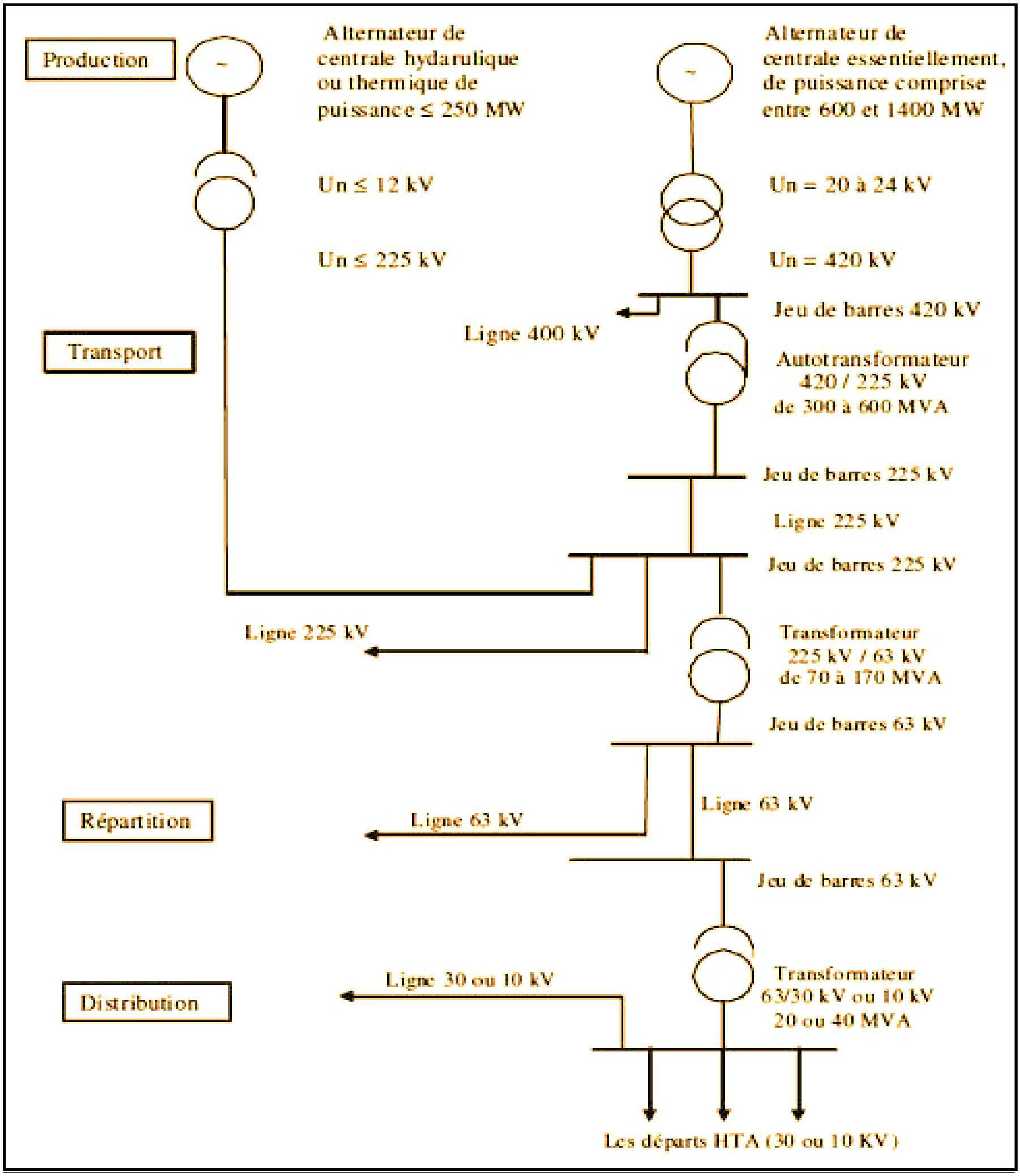


Figure I.1 : Schéma unifilaire d'un réseau électrique.

I.5 Poste électrique :

I.5.1 Définition d'un poste électrique :

Les postes électriques sont des éléments principaux du réseau électrique. Il assure la jonction de différentes parties du réseau électrique. Ainsi Ils représentent les maillons responsables de la variation de tension d'un niveau à un autre. Les postes comprennent plusieurs appareils électriques (transformateurs, jeux de barres, disjoncteurs, sectionneurs, appareils de mesures) qui participent au fonctionnement du réseau. (3)

I.5.2 Les types des postes électriques :

Il existe quatre grandes catégories de postes électriques, selon le rôle à accomplir. (4)

- Les postes d'interconnexion.
- Les postes de livraison.
- Les postes de distribution.
- Les postes mixtes.

I.5.3 Topologie des postes électriques

a) Les postes de livraison MT :

Dans les postes de livraison MT(HTB), on trouve trois schémas principaux qui montrent une évolution du plus simple au plus sécurisé.

- Simple antenne :

Une seule source alimente les jeux de barres et le transformateur.

Avantage : coût faible.

Inconvénient : faible disponibilité (en cas de défaut, coupure totale).

- Double antenne :

Deux sources d' alimentation. Si une source tombe en panne, l' autre assure l' alimentation.

Avantage : meilleure continuité de service.

Inconvénient : plus coûteux.

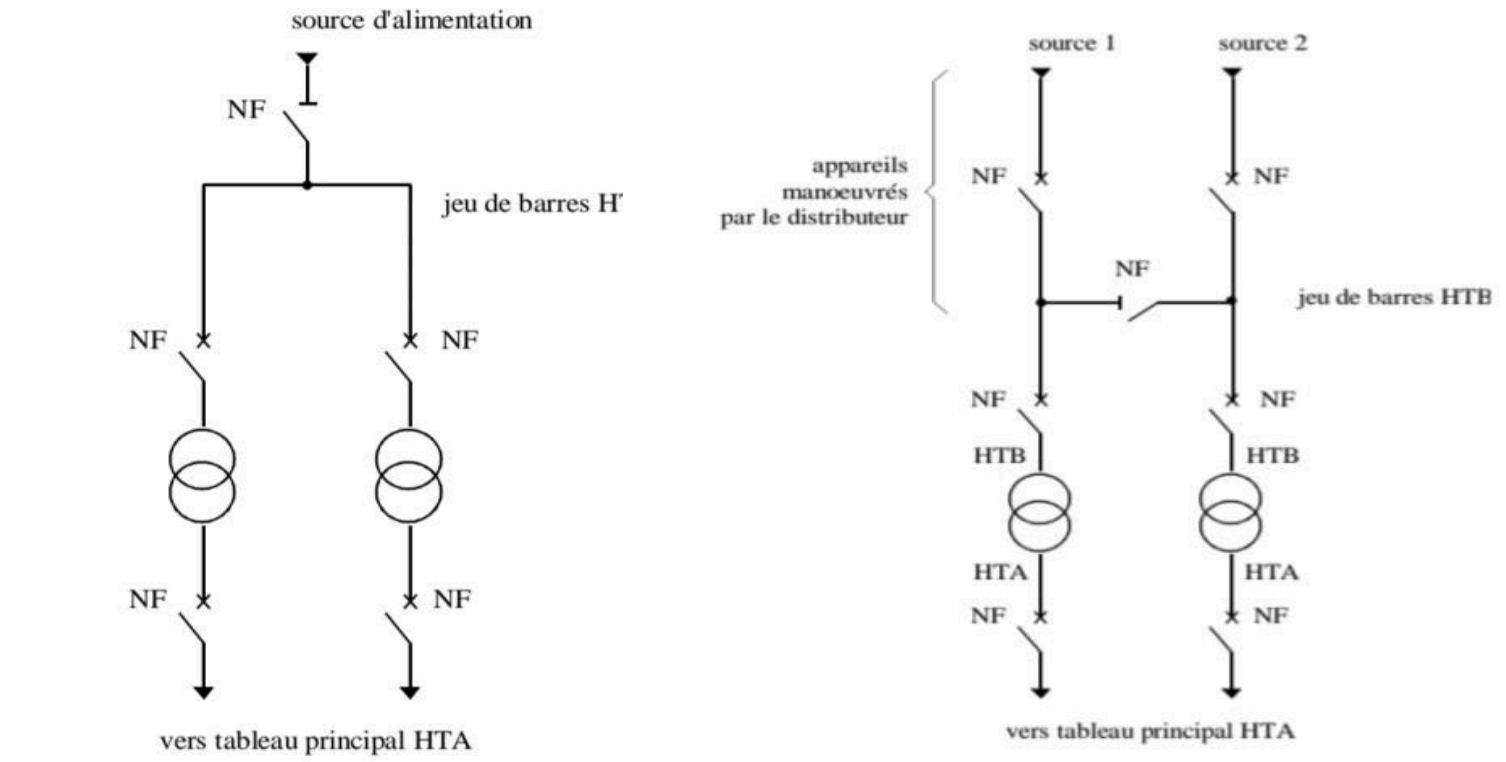
- Double antenne – double jeu de barres :

Deux sources et deux jeux de barres avec disjoncteur de couplage.

Permet la maintenance sans coupure et offre une grande flexibilité.

Inconvénient : coût élevé

On passe d'un système simple et économique à un système plus fiable et plus flexible, mais plus cher et plus complexe.



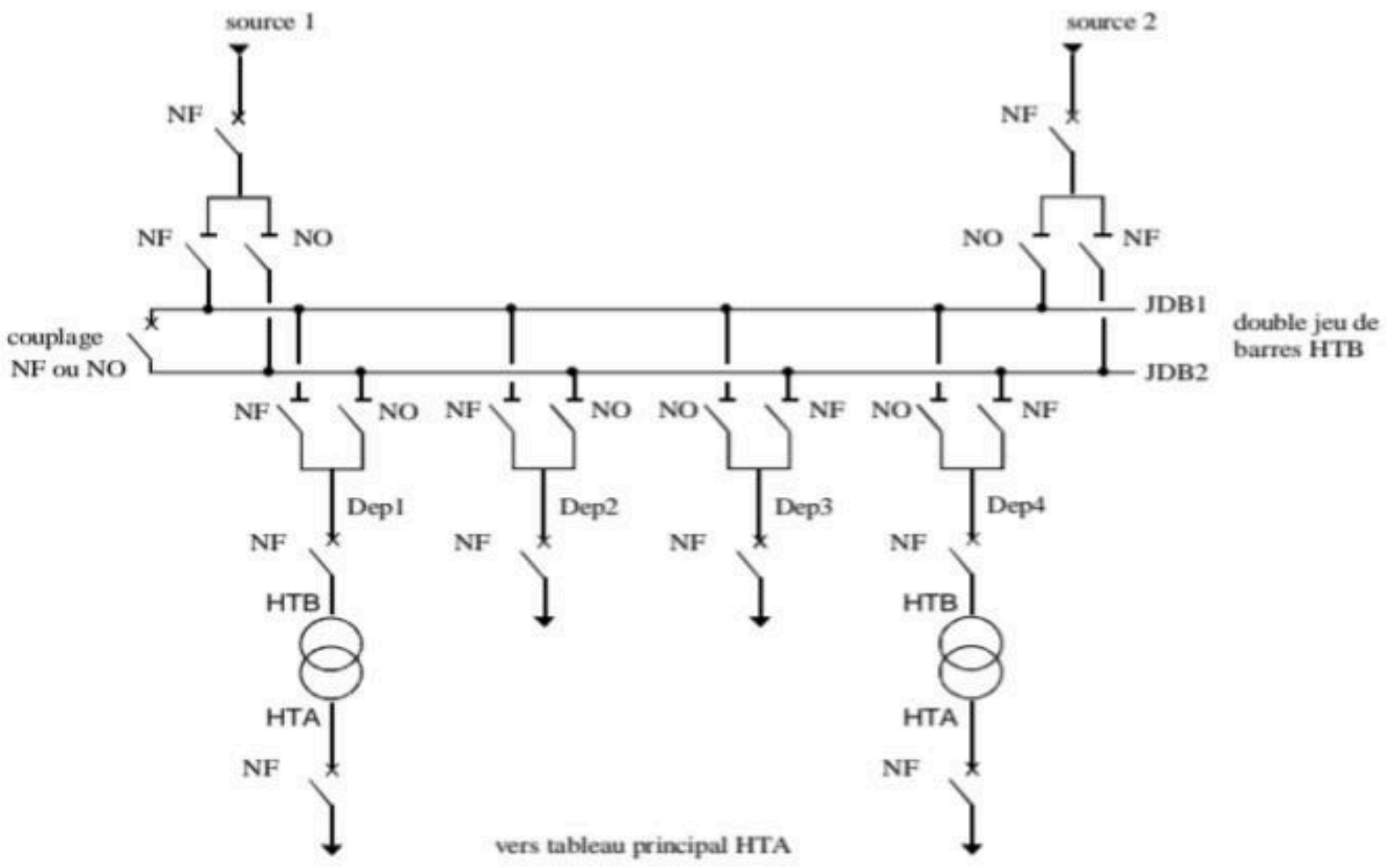


Figure I.2: schéma d'alimentation de poste de livraison HTB.

b) Poste de livraison HTA(BT) a comptage BT :

1) Alimentation en simple dérivation :

Ce type de poste HTA/BT à comptage est utilisé pour la distribution publique en lignes aériennes et dispose d' une protection générale par disjoncteur.

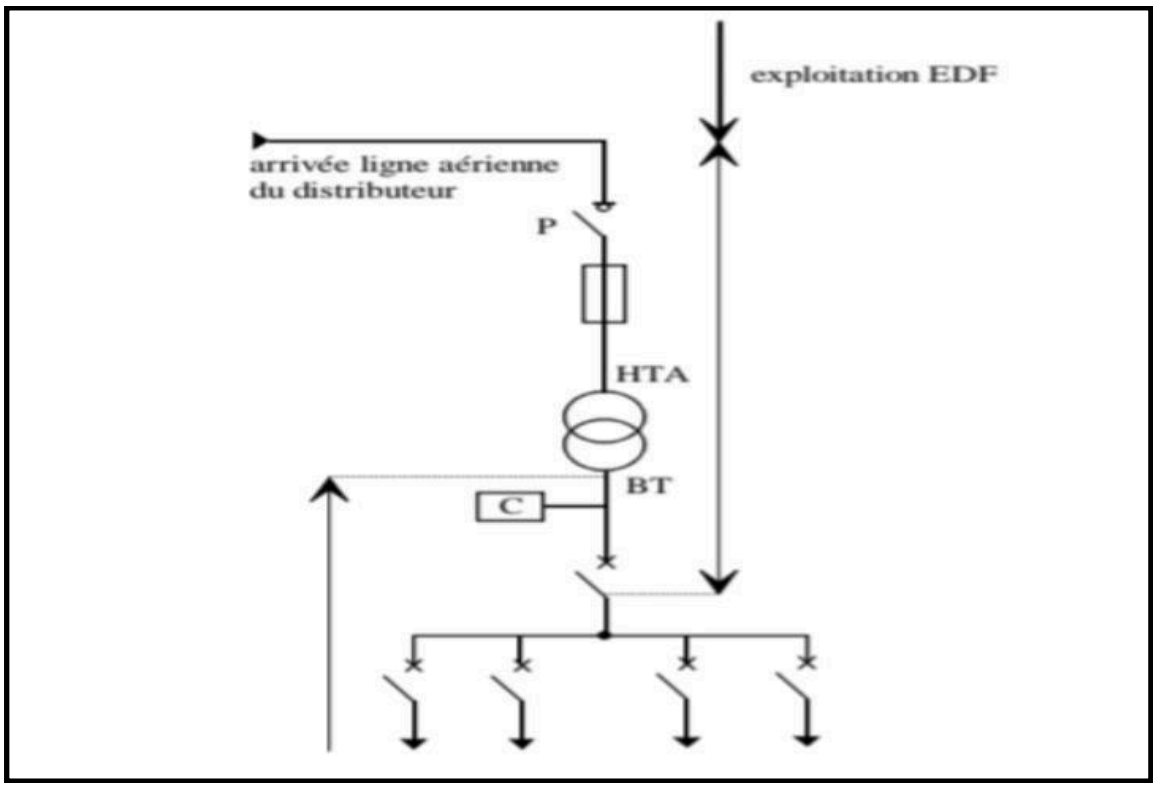


Figure.I.3 : Alimentation en simple dérivation d'un poste de livraison HTA (MT) à comptage BT Alimentation.

2) en double dérivation :

La double dérivation garantit une alimentation continue même en cas de panne ou de travaux, en permettant de basculer les postes de livraison automatiquement ou à distance

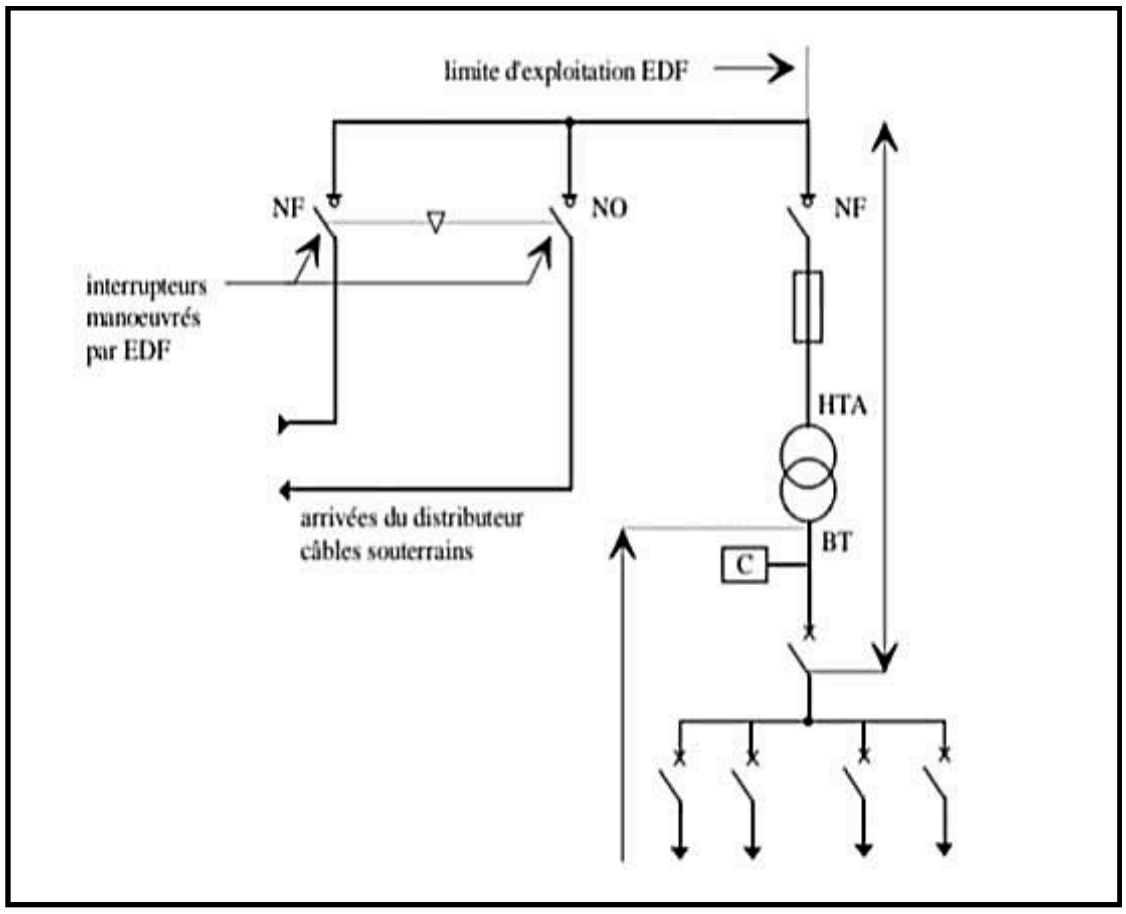


Figure I.4: Alimentation en double dérivation d'un poste de livraison HTA(MT) à comptage BT.

3) Alimentation en coupure d' artère : (5)

La coupure d'artère permet de contrôler le réseau et d'isoler rapidement un tronçon en cas de panne ou de travaux, grâce aux cellules "arrivée" du poste.

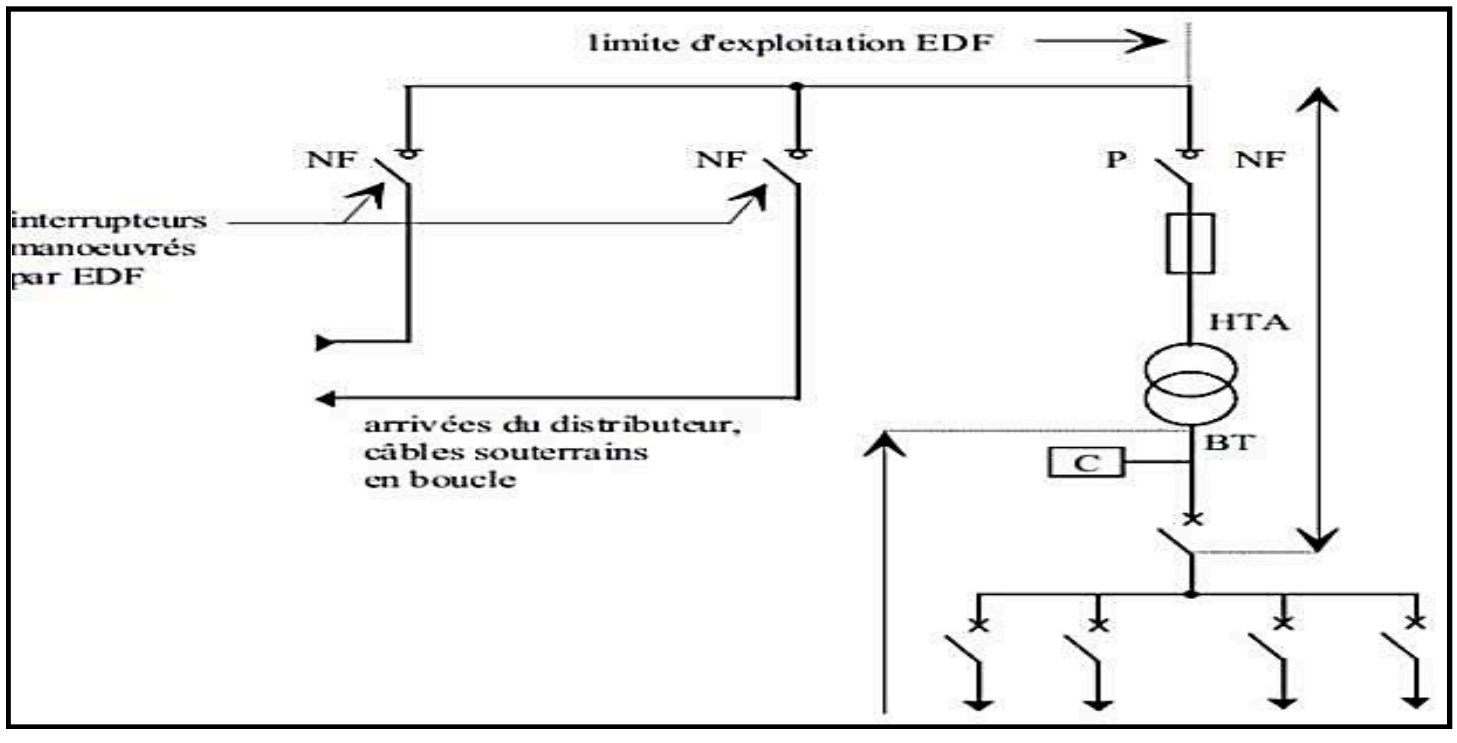


Figure I.5: schéma alimentation en coupure d'artère d'un poste de livraison HTA à comptage BT.

I.5.4 Les tableaux électriques :

a) Tableaux de distribution :

Ces tableaux présentent le point d'arrivée de l'énergie électrique d'une installation BT. En se divisant en plusieurs départs, chacun est commandé et protégé par l' appareillage installé, Chaque type de tableau de distribution doit être adapté à son application.

b) Les types des tableaux de distribution :

Les tableaux, ou ensemble d'appareillage à BT, se différencient selon le type d'application en :

- Tableau général basse tension (TGBT).
- Tableau secondaire.
- Tableau terminal.
- Tableau de contrôle-commande.

c) mode d'alimentation des tableaux BT :

1) Alimentation des tableaux BT avec une seule source d'alimentation :

Dans ce cas, tous les départs bénéficient d'une seule source d'alimentation. En cas de défaut en T1 ou perte de la source, toute l'installation est mise hors service jusqu'à l'opération de réparation. (5)

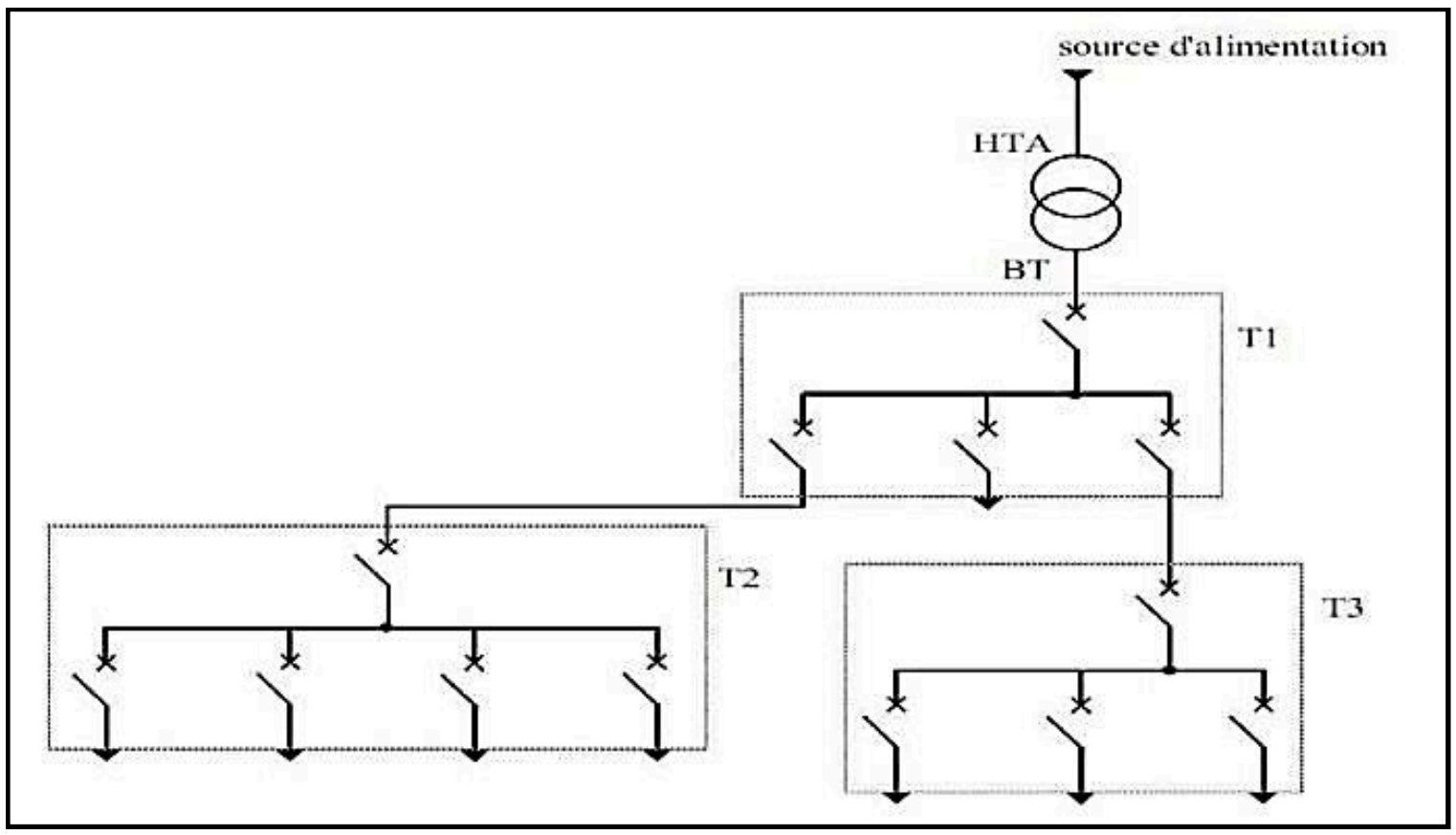


Figure I.6 : schéma alimentation des tableaux BT avec une seule source d'alimentation.

2) Alimentation des tableaux BT par double alimentation sans couplage :

Pour ce type d'alimentation, chaque tableau a sa propre source d'alimentation. En cas de défaut, T2 bénéficie de l'alimentation à partir de la seconde.

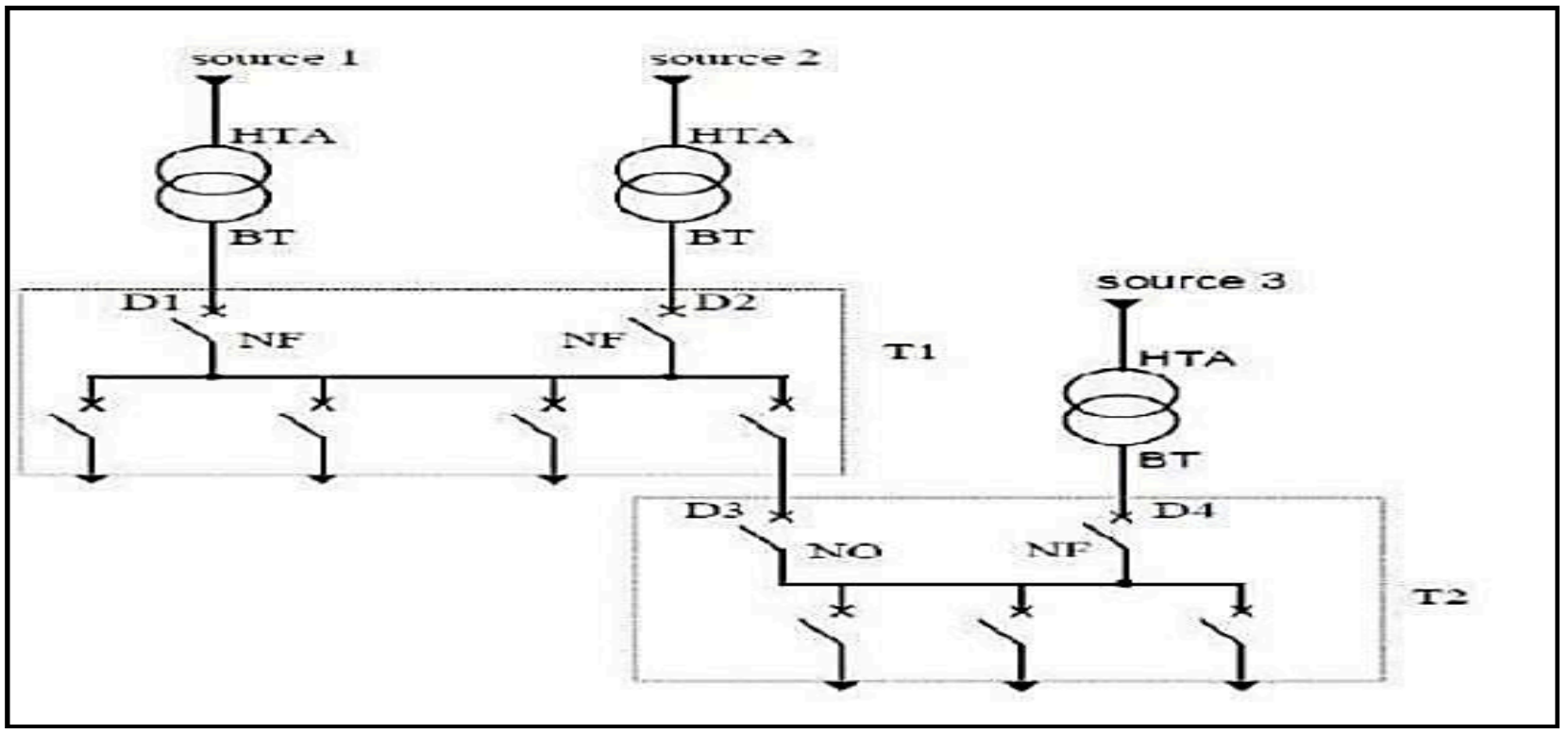


Figure I.7: schéma alimentation des tableaux BT par une double alimentation sans couplage.

3) Alimentation des tableaux BT par une double alimentation avec couplage :

Le tableau T1 bénéficie d'une double alimentation avec couplage par deux transformateurs. En cas de perte d'une source d'alimentation, le disjoncteur de couplage D3 est fermé et un seul transformateur alimente la totalité de T1.

Pour le tableau T2, il profite d'une double alimentation avec couplage par deux départs. En fonctionnement normal, le disjoncteur de couplage D6 est ouvert et chaque source

alimente une partie de T2. En cas de perte d'une source, le disjoncteur de couplage D6 est fermé et l'autre source alimente la totalité de T2.

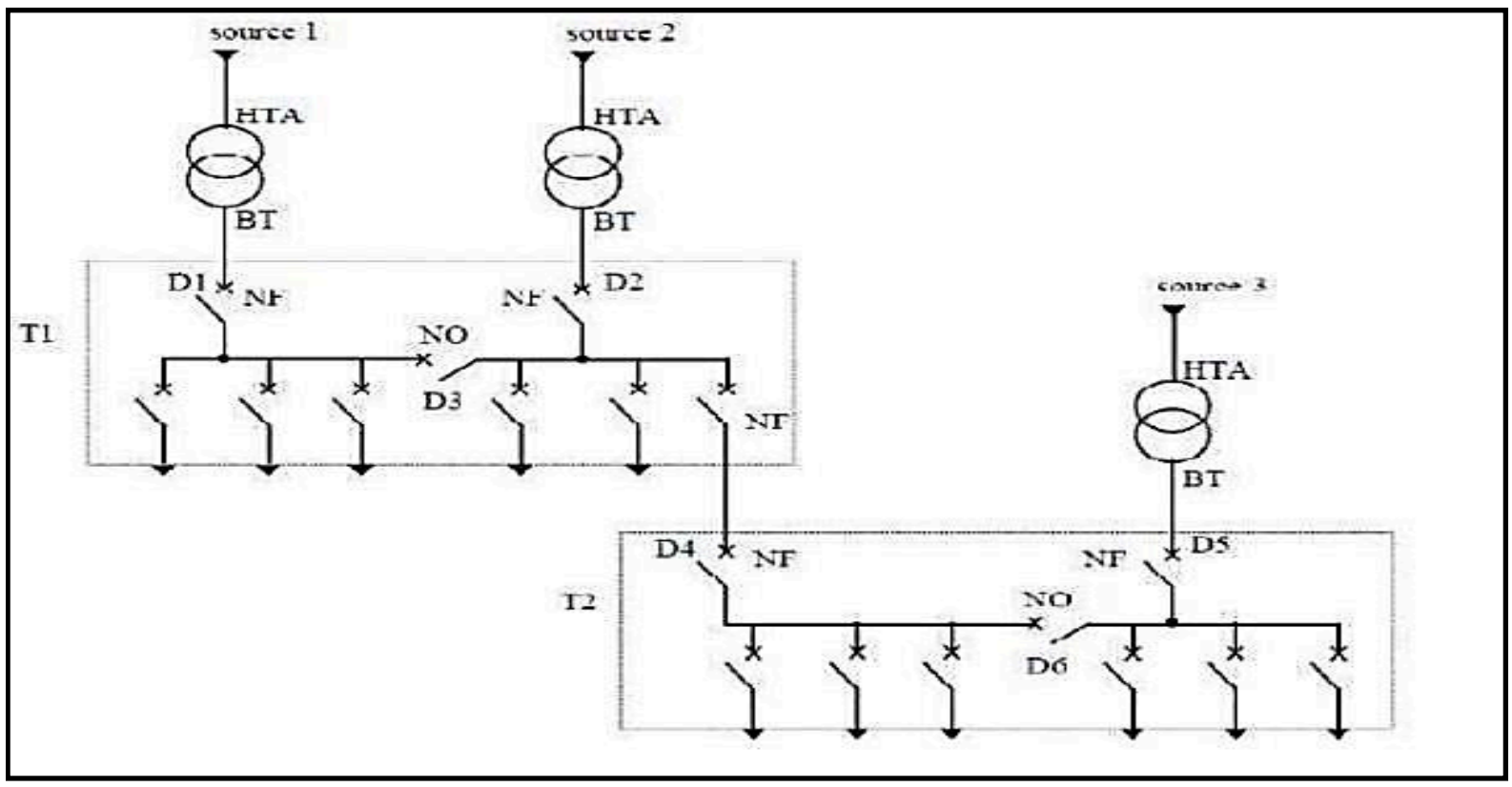


Figure I.8: schéma alimentation des tableaux BT par une double alimentation avec couplage.

I.6 structure générale d' une installation électrique industrielle MT /BT :

Dans les installations industrielles, l' énergie électrique est généralement fournie en moyenne tension (MT). Cette alimentation arrive d' abord au tableau principal MT qui assure la protection et la répartition de l' énergie. Par la suite, la tension est abaissée à l' aide des transformateurs MT/BT afin d' alimenter les différents équipements utilisés dans l' installation. [6]

En général, une installation électrique industrielle comprend :

- Une arrivée d' alimentation en MT
- Un tableau principal MT
- Des transformateurs MT/BT
- Un tableau principal BT pour la distribution
- Des tableaux terminaux alimentant les différentes charges.

La figure ci-dessus montre le parcours de l' énergie depuis la moyenne tension (MT) jusqu' aux charges industrielles en basse tension (BT).

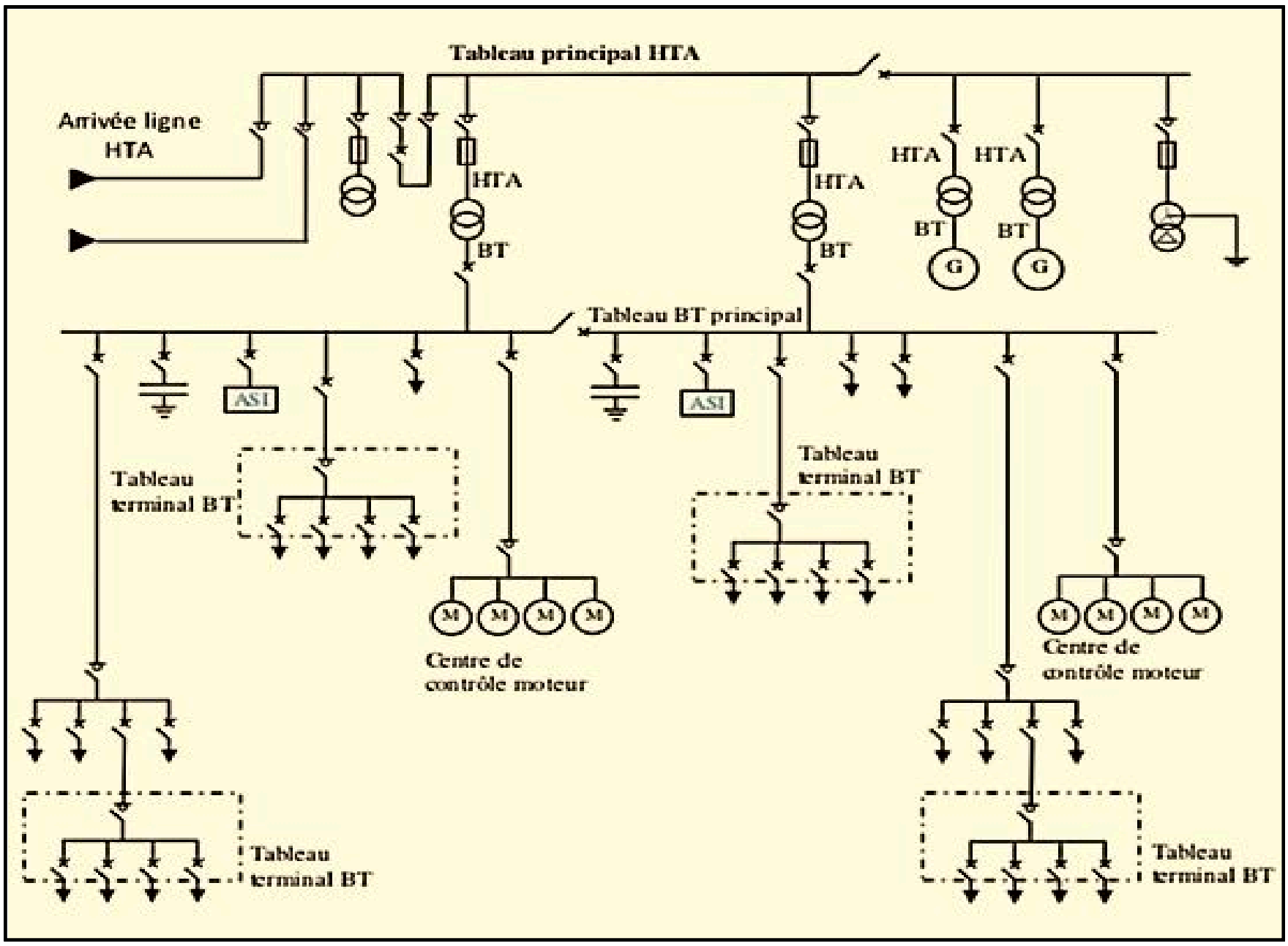


Figure I.9 : exemple d' un réseau électrique industriel.

I.7 Méthodologie de dimensionnement des installations électriques :

Algorithme à suivre :

L'algorithme de dimensionnement des installations électriques montre étape par étape comment choisir la bonne section des câbles, la puissance de la source et le régime de neutre , Il permet aussi de vérifier que le courant, la chute de tension et la résistance aux courts-circuits sont corrects. Le but est que l'installation soit sûre et fonctionne bien.

Le dimensionnement d' une installation électrique est un art difficile dans la mesure où il nécessite de prendre en considération des impératifs techniques, normatifs, économiques, contractuels et stratégiques.

Une installation électrique est un ensemble cohérent d' appareillage, câbles, circuits et récepteurs.

Le dimensionnement d'une installation électrique implique le choix optimal des éléments de l' appareillage, les câbles et les récepteurs.

Cependant, la maîtrise du dimensionnement exige un ensemble de compétences et d'expériences dans les domaines de génie électrique. Dans ce contexte nous avons

consacré les chapitres un et deux de notre mémoire pour présenter des généralités sur les réseaux électriques, la méthodologie de conception et la protection.

I.8 schéma unifilaire :

Avant de commencer le dimensionnement, il est nécessaire de réaliser le schéma unifilaire de l' installation. Ce schéma permet de visualiser l' ensemble du réseau électrique et d' identifier les différentes sources d' alimentation, les tableaux électriques ainsi que les charges. Ainsi, il facilite la compréhension de la structure du réseau et constitue une base pour effectuer les calculs de dimensionnement.

Le schéma présenté ci-dessous représente un exemple de schéma unifilaire :

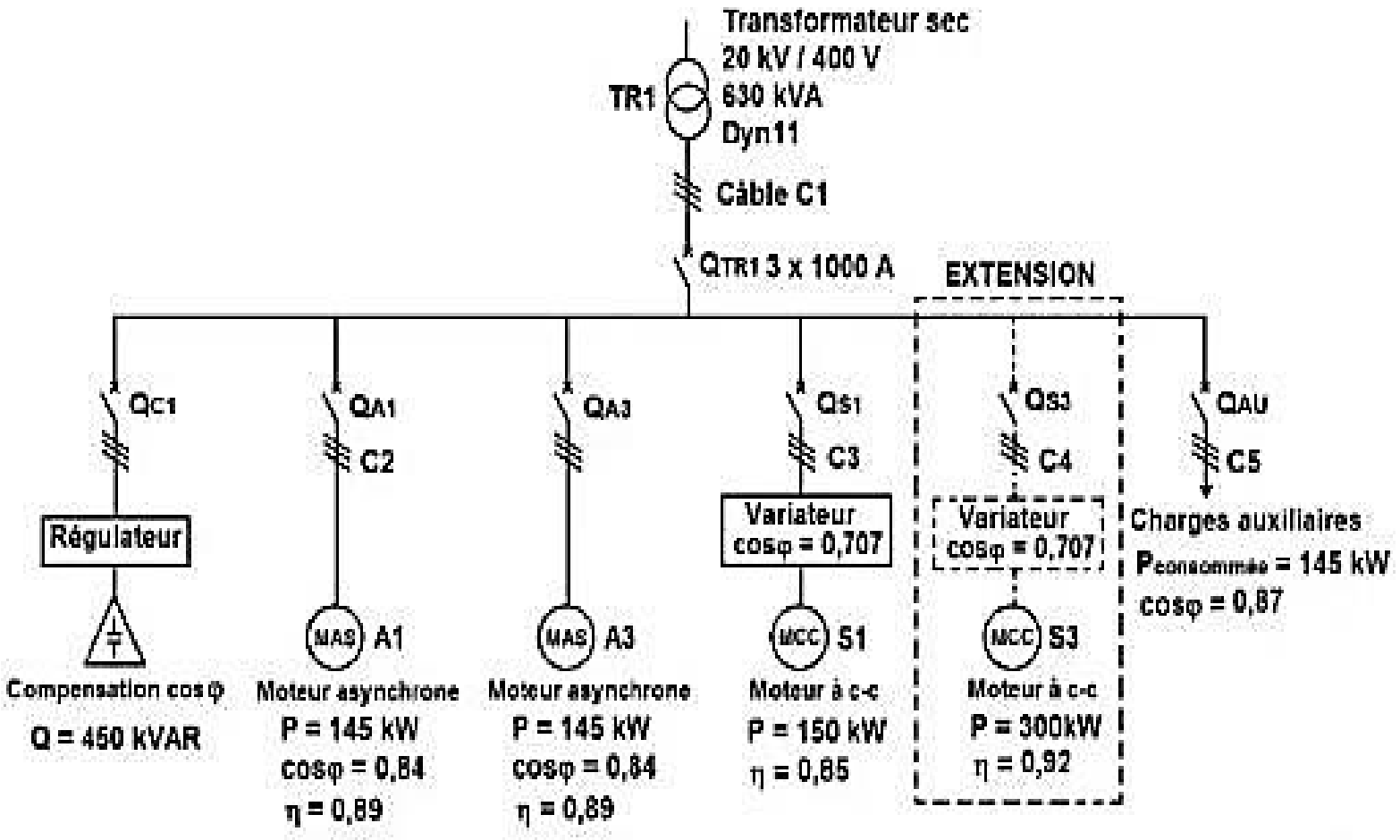


Figure I.10 : schéma unifilaire d'une installation électrique.

I.9 Sélection d' un régime de neutre :

On a L' énergie électrique est utile mais dangereuse pour l' homme en cas de contact avec le courant.

Il est donc nécessaire de mettre en place des systèmes de protection.

Les réseaux de distribution se caractérisent par la nature du courant, le nombre de conducteurs et le régime de neutre.

La sécurité des personnes et du matériel dépend du régime de neutre utilisé.

Le choix dépend surtout de la sécurité, de la continuité de service et du type d' installation.

I.9.1 Régime TT :

Le régime TT est un système de mise à la terre où le neutre de la source est relié à la terre et les masses des installations sont reliées à une prise de terre indépendante. Il

permet de limiter les courants de défaut et d' assurer la protection des personnes grâce au déclenchement des dispositifs de protection

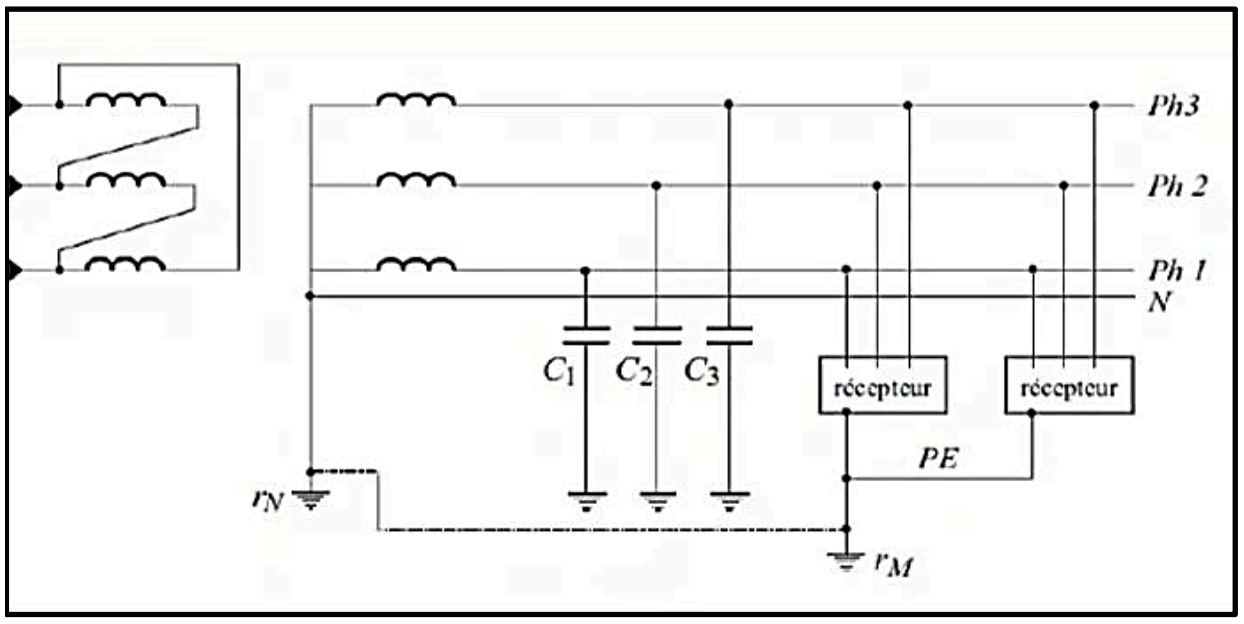


Figure I.11 : schéma régime de neutre TT.

I.9.2 Régime IT :

Le neutre du transformateur (source de tension) est isolé de la terre ou reliée à la terre par une forte impédance Z L'installation électrique est reliée à la terre (T), La résistance de terre RA doit être la plus faible possible. (5)

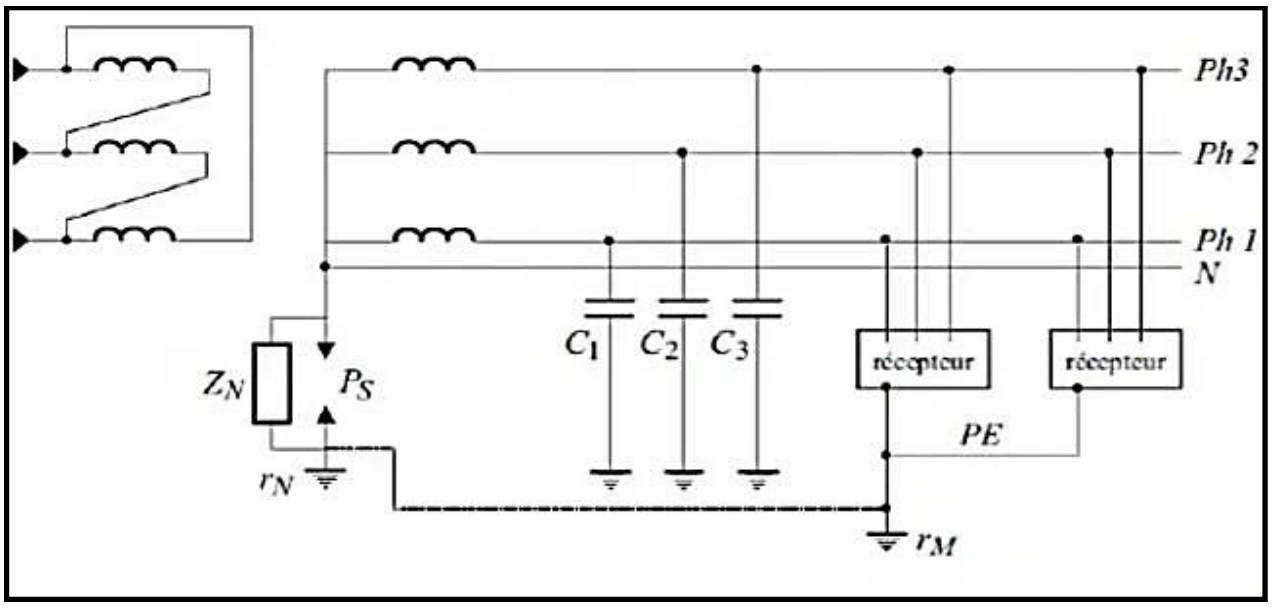


Figure I.12 : schéma régime de neutre IT.

I.9.3 Régime TN :

Le régime TN est un système de mise à la terre où le neutre de la source est relié à la terre et les masses des installations sont directement connectées à ce neutre. Ce raccordement crée un chemin direct pour le courant de défaut, ce qui permet le déclenchement rapide des dispositifs de protection et assure ainsi la sécurité des personnes. (7)

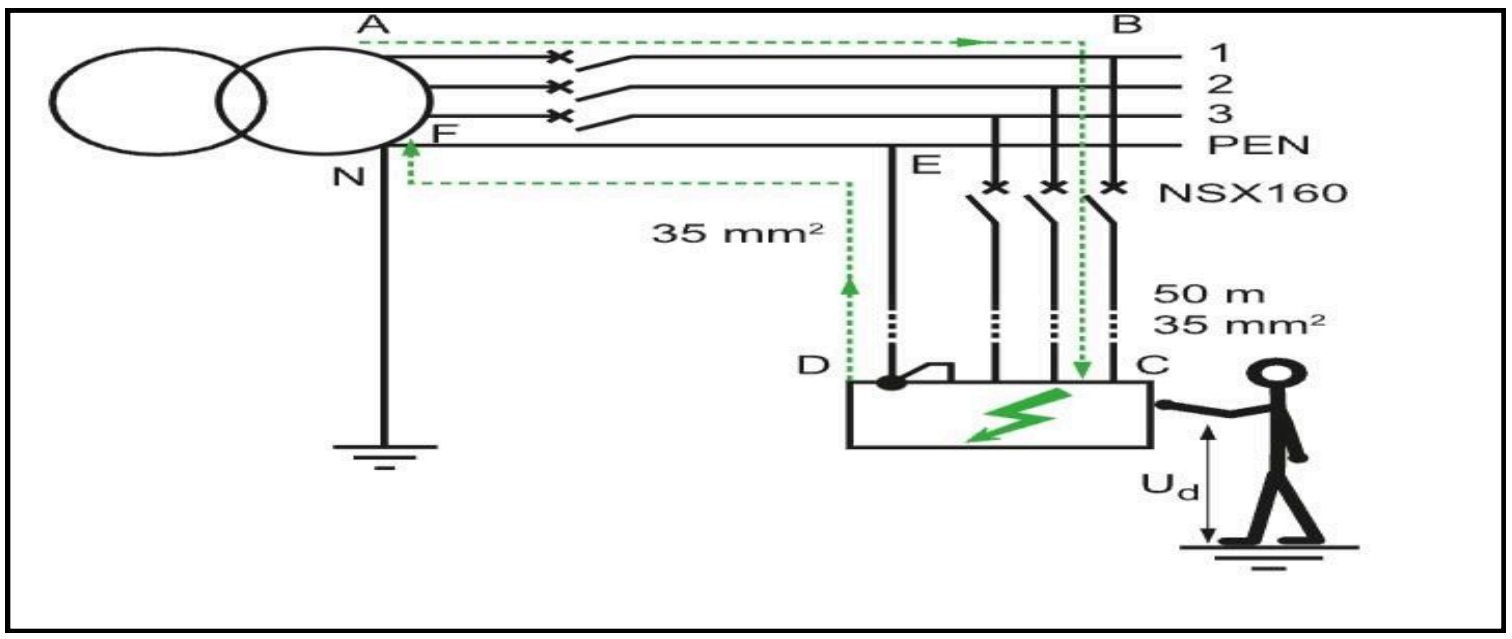


Figure I.13: schéma régime de neutre TN.

Il existe trois types de schéma TN :

- TNC : ou le neutre et le conducteur de protection (PE) sont confondus, Ce schéma est interdit pour les faibles sections.
- TN–S : neutre (N) et protection (PE) séparés sur toute la longueur ;
- TN–C–S : mixte on part en PEN puis on sépare N et PE en aval du tableau principal.

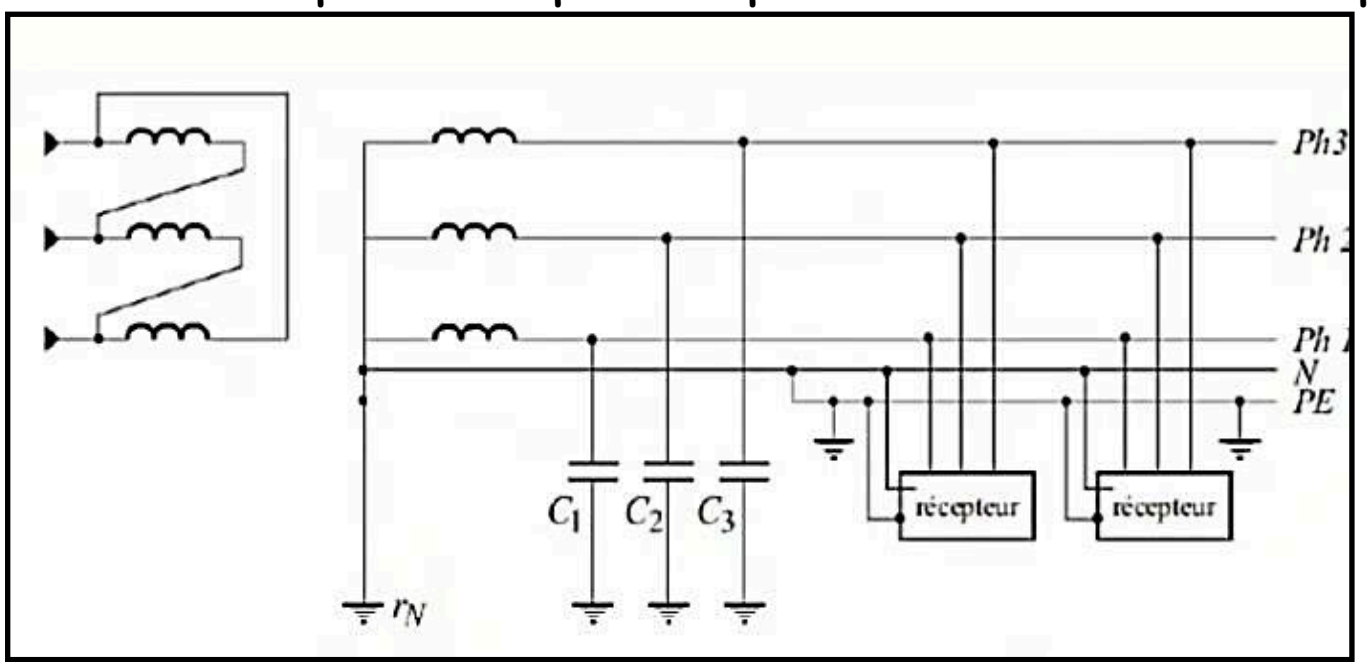


Figure I.14: schéma RN TNS.

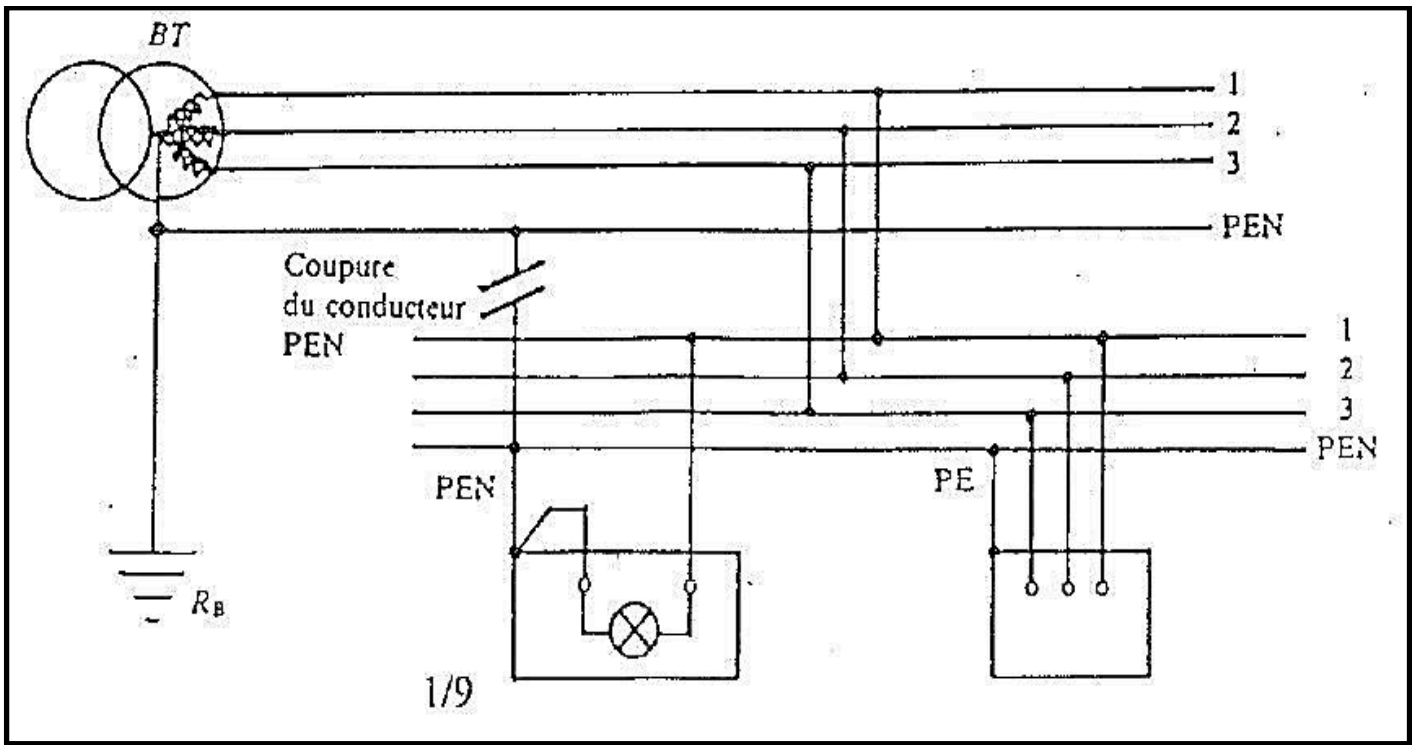


Figure I.15: schéma RN TNC.

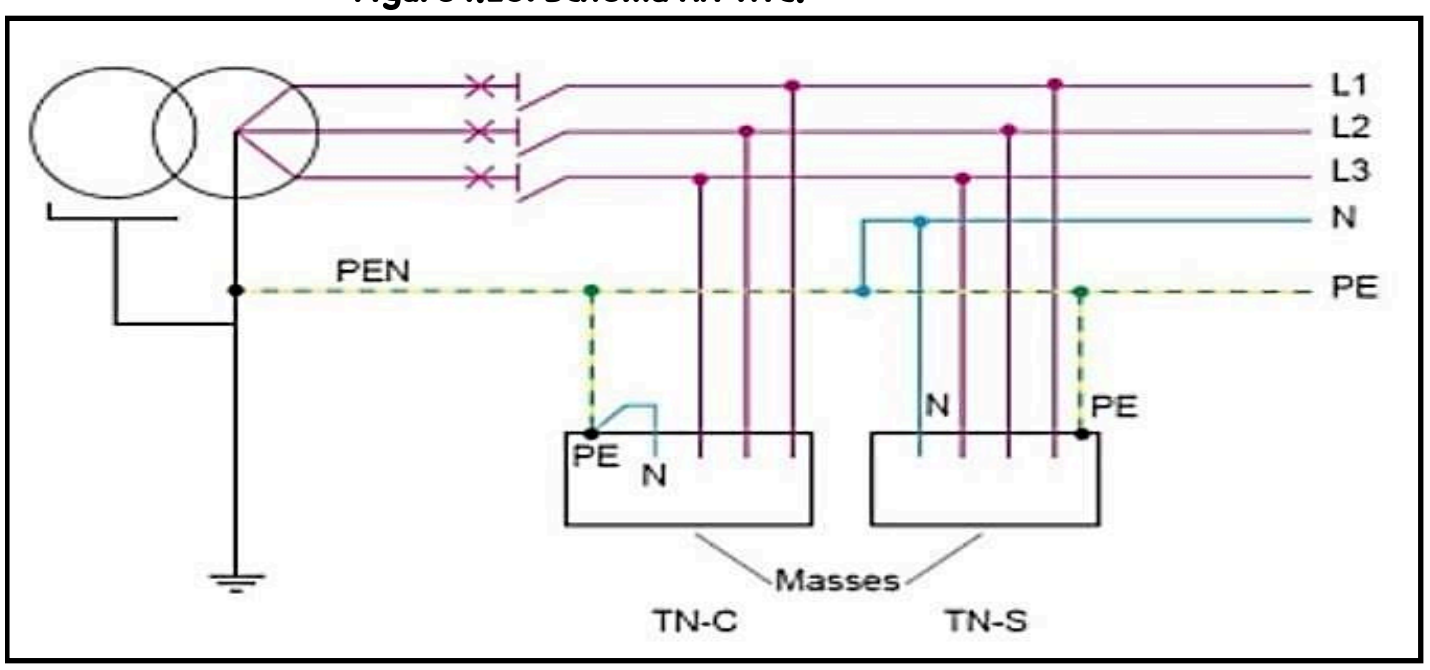


Figure I.16: schéma régime de neutre TN–CS.

I.9.4 Choix d'un régime de neutre :

Les performances des régimes du neutre s'apprécient selon les six critères suivants :

- La protection contre les chocs électriques ;
- La protection contre l' incendie d' origine électrique ;
- La continuité de l' alimentation ;
- La protection contre les surtensions ;
- La protection contre les perturbations électromagnétiques ;
- Les contraintes de mise en œuvre.

I.9.5 comparaison :

Le schéma TT est simple à installer, assure une bonne protection des personnes grâce aux dispositifs différentiels, mais entraîne une coupure dès le premier défaut.

Le schéma TN offre une coupure rapide des défauts par surintensité, mais nécessite une mise à la terre rigoureuse et peut générer des courants de défaut élevés.

Le schéma TN-C est économique car il combine neutre et protection, mais il présente des risques importants, des perturbations électromagnétiques et est interdit dans les locaux à risque d' incendie.
Le schéma TN-S est le plus sûr et le plus fiable, réduit les perturbations, protège mieux les équipements sensibles et est recommandé pour les installations modernes et informatiques.

I.10 Bilan de puissance :

Après la réalisation du schéma unifilaire, on passe à l' établissement du bilan de puissance. Cette étape consiste à déterminer la puissance des différentes charges de l' installation afin d' évaluer la puissance totale demandée. Le bilan de puissance permet ainsi de calculer le courant et constitue une base essentielle pour le dimensionnement des câbles et des dispositifs de protection.

I.11 Détermination des puissances :

La puissance installée n'est pas la somme arithmétique de la puissance de tous les récepteurs. Sa détermination nécessite la connaissance de la puissance et la localisation des différents récepteurs pour déduire la puissance d'utilisation de chacun, et par la suite la détermination de la puissance requise du transformateur.

I.11.1 puissance a installée :

La puissance installée correspond à la capacité maximale d' électricité que peut utiliser ou fournir une installation.

$$Sn = \sum_{i=1}^{n} Sni \quad \text{(KVA)} \qquad \text{(I.1)}$$

I.11.2 puissance absorbée :

La puissance absorbée est la puissance électrique que l' appareil retire du réseau pour fonctionner.
Elle indique la quantité d' énergie réellement utilisée par l' installation ou le matériel.

$$Pa = Pu/\eta \ (KW) \qquad \text{(I.2)}$$

I.11.3puissance apparente :

$$S = \frac{Pa}{Cos\,(Q)}$$

(KVA) (I.3)

I.11.4 La puissance utilisée

La puissance utilisée est définie comme la partie de la puissance nominale réellement utilisable. Pratiquement tous les récepteurs ne sont pas toujours utilisés à leur puissance maximale.

$$Su = S \times K\,u$$

(KVA) (I.4)

- **Facteur d'utilisation Ku :**

Il traduit le fait que le régime de fonctionnement d' un récepteur peut être inférieur à la puissance nominale. Il s'applique individuellement à chaque récepteur (circuits terminaux).

I.11.5 Puissance foisonné :

La puissance foisonné PF d' une distribution est égale à la somme des puissances absorbées et valorisées par les facteurs suivants :

$$S = Ks \times Ke \times Su$$

(KVA) (I.5)

- **Facteur de simultanéité Ks**

La détermination des facteurs de simultanéité nécessite la connaissance détaillée de l'installation considérée et l'expérience des conditions d'exploitation, notamment pour les moteurs et les prises de courant.

La détermination des facteurs de simultanéité nécessite la connaissance détaillée de l'installation considérée et l'expérience des conditions d'exploitation, notamment pour les moteurs et les prises de courant.

On ne peut donc pas donner des valeurs précises applicables à tous les cas. Les normes NF C 14-100, NF C 63-410 et le guide UTEC 15-105, donnent cependant des indications sur ce facteur selon le nombre de récepteurs et selon l'utilisation Tableau : Facteur de simultanéité selon le nombre de récepteurs

- **Facteur d'extension ke :**

Le rôle du facteur d'extension, également appelé facteur de réserve, est de prévoir une augmentation de la puissance absorbée. Le coefficient varie de 1 à 1,5. Dans notre cas Ke varie entre un TGBT et un autre.

I.12 Exemple de calcul des puissances :

La figure ci-dessous donne un exemple d'estimation de la valeur de la puissance d'utilisation à tous les niveaux d'une installation, à partir des charges jusqu'au point d'alimentation.

Dans cet exemple, à la somme des puissances totales absorbées de 126,6 kVA (somme des puissances absorbées indiquées sur les récepteurs) correspond une puissance d'utilisation aux bornes du transformateur de 58 kVA seulement.

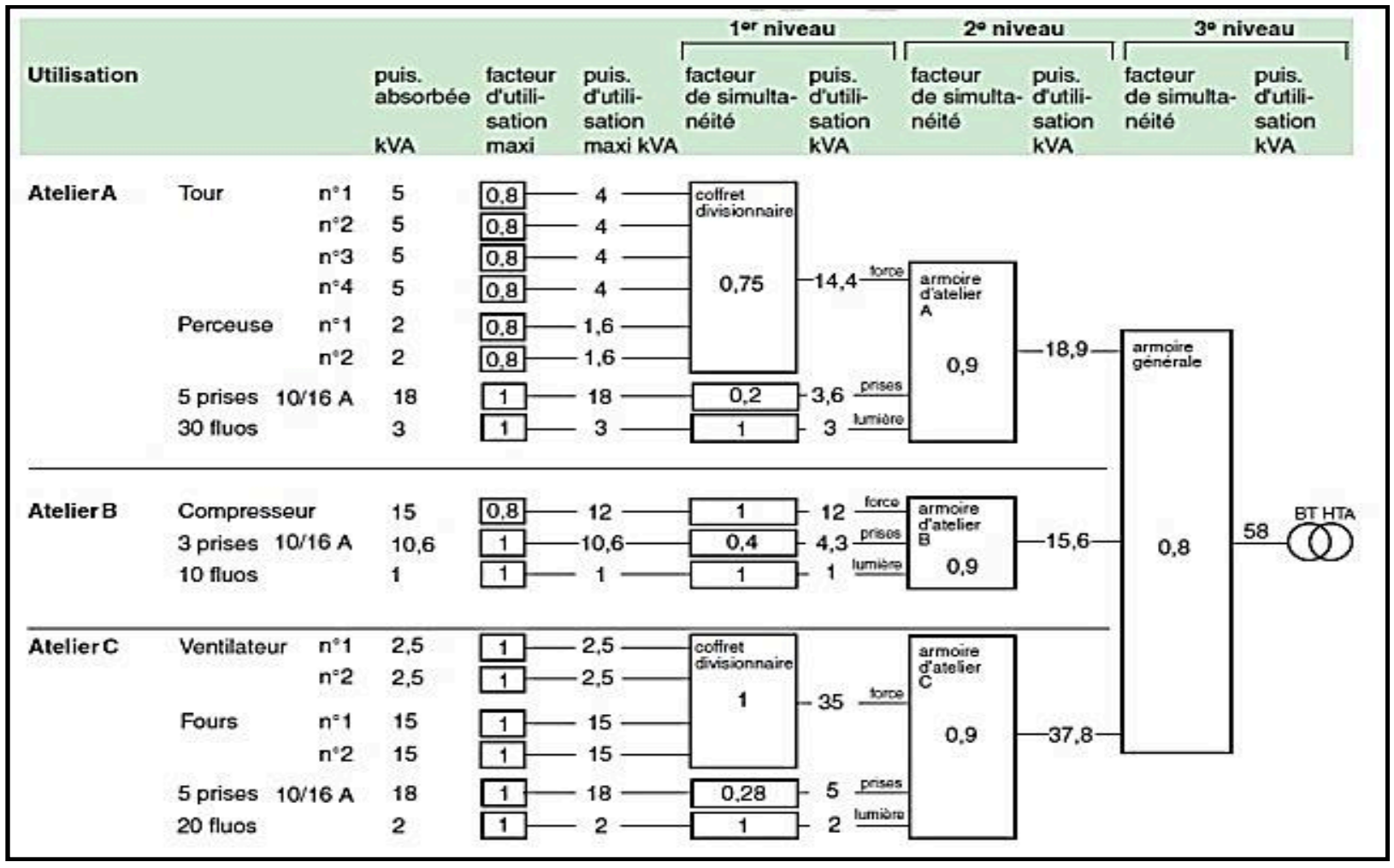


Figure I.17: Exemple de calcule des puissances.

Une fois le bilan de puissance établi, il devient possible de calculer le courant d'emploi (ou courant nominal).

Ce courant sert ensuite à déterminer la section des câbles, en prenant en compte la longueur du circuit et les exigences de sécurité.

I.13 détermination de courant d'emploi Ib :

Le courant d'emploi Ib est le courant correspondant à la plus grande puissance transportée par le circuit en service normal. Ce courant dépend directement de la puissance des appareils alimentés par le circuit, il est déterminé à partir du courant absorbé et corrigé selon plusieurs facteurs.

La valeur du courant d'emploi Ib circulant dans les conducteurs de phase et définie par :

$$Ib = Sn/\sqrt{3}\ .U \qquad (I.6)$$

I.14 calcul de courant admissible Iz du conducteur :

- Le courant admissible est la valeur constante de l'intensité que peut supporter, dans des conditions données, un conducteur sans que sa température soit supérieure à la valeur spécifiée.
- Le courant admissible est désigné par IZ.
- Le courant d'emploi (IB) est lié au courant admissible par la relation :

$$Iz \geq Ib/k1 * k2 * k3 \qquad (I.7)$$

- **Facteur de correction :**

Les valeurs des courants admissibles sont déterminées pour une température de 30 ° C dans l'air et de 20 ° C dans le sol. Il faut aussi tenir compte du groupement des conducteurs. Relation entre courants, d'emploi et, admissible avec :
IB : courant d'emploi ;
IZ : courant admissible ;
K1 : pour nombre de couches de conducteur ;
K2 : pour le groupement des conducteurs ;
K3 : correction de la température ;
Ces coefficients sont donnés par des tableaux reliés au mode de pose.

I.15 section SZ relative au courant admissible :

La section d'un conducteur, exprimée en mm², représente la surface qui permet le passage du courant. Elle d é termine le courant maximal supportable sans dépasser la température limite de l'isolant.
Une grande section améliore la dissipation de la chaleur et évite la surchauffe, tandis qu'une section trop petite peut provoquer un échauffement excessif, réduire la durée de vie du câble et présenter un danger pour l'installation.

I.16 Les paramètres influant sur l' état d'un conducteur :

Les câbles sont considérés comme les piliers d'une installation électrique, en outre un sur dimensionnement engendre des surcoûts dans la réalisation du projet, par contre un sou
Dimensionnement peut engendrer des échauffements et causer un dysfonctionnement de l' installation électrique, d'où la nécessité d'un dimensionnement optimal.
Le dimensionnement optimal des câbles doit tenir compte de conditions suivantes :

- Le mode de pose et la nature des milieux traversés ;
- La température extrême du milieu ambiant ;
- La tension, la nature du courant et L'intensité à transporter ;
- La nature de l'âme, La longueur de la liaison ;
- La chute de tension admissible ;
- La valeur du courant de court-circuit et le temps de coupure sur défaut.

I.16.1 Section de câble :

La section de la canalisation est indiquée dans le tableau suivant par lecture directe :

- Du choix de la colonne est réalisé à partir du mode de pose (lettre de sélection) et des caractéristiques du câble (isolant, nombre de conducteurs chargés).
- Du choix de la ligne est réalisé à partir de la valeur ≥ l'z dans la colonne du tableau correspondant à la nature de l' âme du conducteur (cuivre ou aluminium).

I.16.2 Détermination pratique :

On utilise les tableaux normalisés (NF C 15–100) pour choisir la section du câble selon le courant admissible Iz, en tenant compte du mode de pose, de la nature de l'isolant et du nombre de conducteurs actifs.

I.17 Vérification de la Chute de Tension :

Lorsque le courant circule dans les conducteurs, leur résistance provoque une diminution de la tension entre l'alimentation et le point de consommation. Il faut s' assurer que cette baisse reste dans les limites autorisées, généralement entre 3 % et 5 % de la tension nominale, afin de garantir un fonctionnement correct des appareils électriques

◆ **Remarque**

- La chute de tension entre l' origine d' une installation, en tout point d' utilisation ne doit pas être supérieure aux valeurs du tableau des chutes de tension normalisées.
- Une chute de tension plus grande peut être acceptée, pour les moteurs pendant la période de démarrage, ou pour tout autre matériel ayant des appels de courants importants.
- Les chutes de tension sont déterminées à partir des valeurs du courant d' emploi des circuits, la longueur de la canalisation ou de la ligne, et la longueur d' un seul conducteur de la canalisation.

◆ **Calcul de chute de tension :**

Tableau I.1 : formule de calcul de chute de tension.

Alimentation	Chute de tension (VCA)	En%
Monophasé : deux phases	DU=2IbL(Rcosphi+X sinphi)	100 DU/Un
Monophasé : phase et neutre	DU=2IbL(Rcosphi+X sinphi)	100 DU/Un
Triphasé :trois phase (avec ou sans neutre)	DU=√3IbL(Rcosphi+ Xsinphi)	100 DU/Un

√R : Résistance du conducteur avec : $R = \rho * L / S$ (I.8)

- S : Section du conducteur
- L : Longueur du conducteur
- ρ : Résistivité du conducteur (ρ = 0.027 Ω. mm²/m pour Cu, ρ= 0.043 Ω. mm²/m pour Al).

- X : Réactance d'un conducteur

◆ **Vérification à l'aide de tableaux :**

Les tableaux normalisés indiquent la longueur maximale (L max) des câbles pour une chute de tension de 6 %.

Pour un tronçon quelconque, on peut calculer sa chute de tension relative u% avec la formule :

$$U = 6 * L/Lmax \quad (I.9)$$

L : longueur réelle du tronçon

L max : longueur maximale donnée dans le tableau

La somme des chutes de tension de tous les tronçons, depuis l'origine jusqu' à l' extrémité de l' installation, ne doit pas dépasser les limites réglementaires (3 %, 5 % ou 6 % selon le cas).

I.18 Section de câble pour court-circuit (Scc) :

La section Scc représente la section minimale du câble capable de résister au courant de court-circuit sans subir de dommage thermique pendant le temps de coupure du disjoncteur.

Elle se calcule à l' aide de la formule :

$$Scc = Icc * \sqrt{t} / k \quad (I.10)$$

Où :

Icc : courant de court-circuit (A)

t : temps de coupure du disjoncteur (s)

K : coefficient dépendant du matériau (cuivre ou aluminium) et de l' isolant du câble (PVC, XLPE...).

I.19 Comparaison entre Sz et Scc :

Dans le dimensionnement des câbles, il est nécessaire de vérifier à la fois la section pour le fonctionnement normal et la section pour le court-circuit.

La section Sz est calculée à partir du courant d' emploi Ib et du courant admissible Iz, afin d' assurer que le câble peut transporter le courant nominal sans échauffement.

La section Scc est calculée à partir du courant de court-circuit Icc et du temps de coupure t du disjoncteur, afin de garantir que le câble ne subira pas de dommages thermiques en cas de défaut.

La section finale retenue correspond à la valeur la plus grande entre Sz et Scc, ce qui assure simultanément la sécurité en régime normal et la résistance en cas de court-circuit.

I.20 Calcule de la section économique :

Le calcul économique de la section d' un câble consiste à choisir une section qui permet de réduire le coût total de la liaison électrique. En effet, lorsque la section du câble est petite, le coût d' achat est faible mais les pertes d' énergie par effet Joule

deviennent importantes. En revanche, si la section est grande, le prix du câble augmente mais les pertes d' énergie diminuent. Le but du calcul économique est donc de trouver une section optimale qui assure un équilibre entre le coût d' investissement et le coût des pertes d' énergie pendant l' exploitation.

- Exemple de calcul :

Pour illustrer le calcul de la section économique, on considère les données suivantes :

- Courant d' emploi : Ib =66A ;
- Nombre d' heures d' utilisation : H=4000h/an ;
- Coût de l' énergie : C=0.1 ;
- Coefficient financier : A=0.1 ;
- Conducteur en cuivre : K=1 ;

La section économique est donnée par la relation :

$$S0 = (K \times Ib / 100) \times \sqrt{(H \times C / A)} \quad (I.11)$$

La section normalisée la plus proche est 50 mm².

Donc, la section économique du câble choisie est 50 mm².

I.21 Conclusion :

Ce chapitre constituera une base importante pour la compréhension et le dimensionnement des installations électriques industrielles. Les notions étudiées permettront de maîtriser les principes de conception, de calcul et de protection des réseaux électriques. Ces connaissances seront utiles pour réaliser plusieurs projets électriques dans le domaine industriel.

À long terme, elles pourront également servir à développer des compétences professionnelles et à ouvrir un bureau d' affaires spécialisé dans les études et les projets d' installations électriques.

Chapitre II : La Protection des installations industrielles.

II.1 Introduction :

Le présent chapitre a pour objet de décrire les dispositifs de protection à mettre en œuvre sur le réseau de distribution et les installations raccordées au réseau. Les dispositifs de protection surveillent en permanence l' état de fonctionnement des éléments d' une structure électrique et provoquent leurs mises hors tension, lorsque ces éléments sont le siège d' une perturbation indésirable comme les courts-circuits, les défauts d' isolement, les surtensions, ...etc.

Le choix d' un dispositif de protection n' est pas le fruit d' une réflexion isolée, mais une des étapes les plus importantes de la conception d' un réseau électrique. A partir de l' analyse du comportement du matériel électrique (moteurs, transformateurs, câbles, ...etc.) par rapport aux défauts et les phénomènes qui en découlent, on choisit les dispositifs de protection les mieux adaptés. C' est ce que l' on va présenter dans ce chapitre.

II.2 Le système de protection :

Un système de protection contient un ensemble de dispositifs destinés à la détection des défauts et des situations anormales de fonctionnement des installations, afin de commander le déclenchement des éléments de coupures.

La chaine fonctionnelle de protection comporte deux parties :

La détection du défaut : est réalisée par des détecteurs (capteurs) basé sur les lois de l' électricité ;

L'élimination du défaut : qui dans la plupart des cas, s'effectue par la mise hors circuit du tronçon en défaut.

II.2.1 Constitution d' un système de protection :

Un système de protection est constitué :

- D' un organe de mesure ou d' une chaine de mesure (TC ou TT) ;
- D' un organe de comparaison (relais) ;
- D' un organe de l' exécution d' ordre des manœuvres.

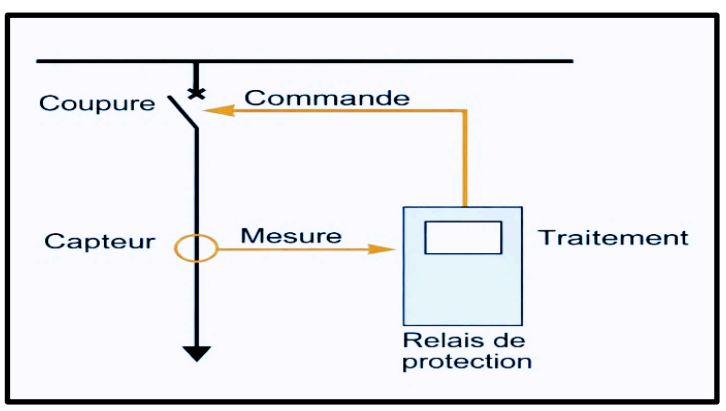


Figure II-1 : Schéma de principe de la chaine de protection.

II.3 Éléments constituants d' un système de protection :

Toute installation électrique est exposée à différents incidents (surintensité, court-circuit, etc…) qui constituent un risque pour les personnes, les appareils et les bâtiments/habitations. Il est donc indispensable de mettre en place des solutions de protection pour éviter tout danger (électrocution, incendie, etc..). Dispositifs clés vous permettent d' assurer une sécurité optimale des personnes et des appareils.

II.3.1 Transformateurs de mesure :

Un transformateur de mesure est un appareil utilisé dans les réseaux électriques pour réduire les grandeurs électriques élevées (courant ou tension) à des valeurs normalisées.

II.3.1.1 Transformateur de tension :

Dans un circuit du schéma de protection le rôle de transformateur de tension est réduire la tension en BT et TBT, comme montre la figure :

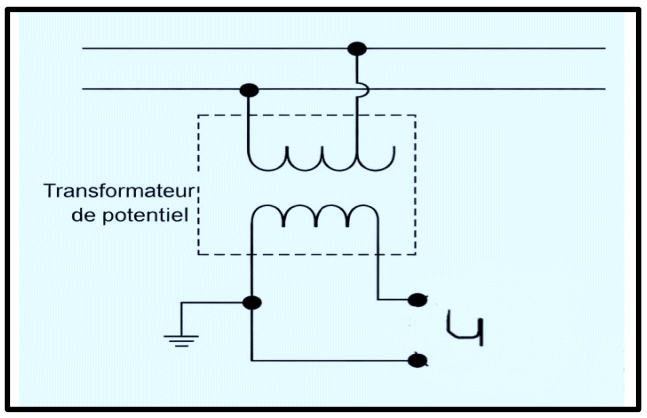


Figure II-2 : Schéma de branchement TT.

II.3.1.2 Transformateur de courant :

Dans un schéma de protection le rôle de transformateur de courant est Convertir un courant grande en **5A** ou **1A**, comme montre la figure :

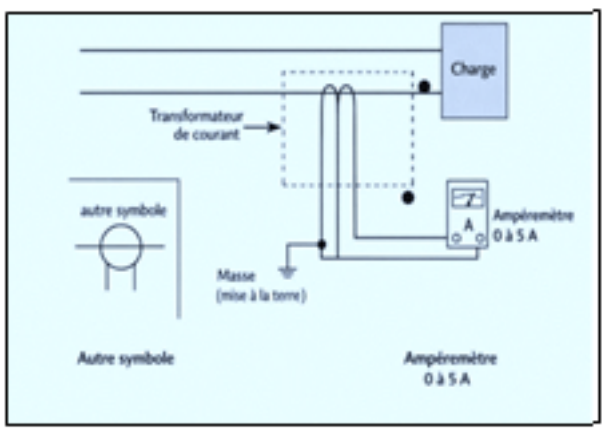


Figure II-3 : Schéma de branchement TC.

II.3.2 Les relais de protection :

Les relais de protection sont des appareils qui reçoivent une ou plusieurs informations (signaux) à caractère analogique (courant, tension, puissance, fréquence, température, ...etc.) et le transmettent à un ordre binaire (fermeture ou ouverture d' un circuit de commande) lorsque ces informations reçues atteignent les valeurs supérieures ou inférieures à certaines limites qui sont fixées à l' avance. Donc le rôle des relais de protection est de détecter tout phénomène anormal pouvant se produire sur un réseau électrique tel que le court-circuit, variation de tension...etc. Un relais de protection détecte l' existence de conditions anormales par la surveillance continue de l' état du réseau concerné, détermine quel est le disjoncteur qui doit s' ouvrir et lui alimente son circuit de déclenchement. **(8)**

II.3.2.1 Désignation d' un relais :

Un relais est désigné selon la grandeur surveillée (tension, courant, puissance, impédance,) :

- Relais à maximum de courant RMA ou TA.
- Relais à maximum de tension RMV ou TV.
- Relais à minimum d'impédance RMZ ou TZ.
- Relais directionnel de puissance RDW ou TLW.
- Relais à minimum de réactance RMX.

II.3.2.2 Différents types de relais :

Il existe plusieurs types de relais de protection :

a- **Relais électromagnétique :**

Relais traditionnels utilisant des composants mécaniques (bobines, contacts mobiles) pour détecter un défaut et déclencher une commande.

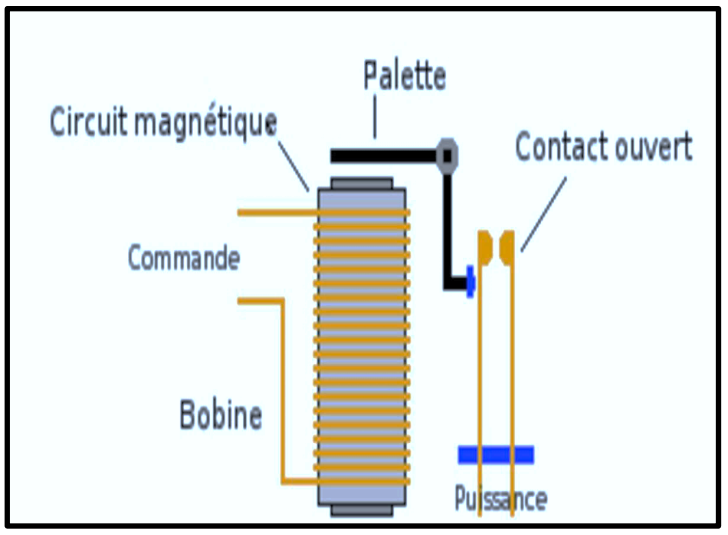
Les avantages :

Simplicité et fiabilité éprouvée.

Maintenance accessible.

Les inconvénients :

Temps de réponse lent.

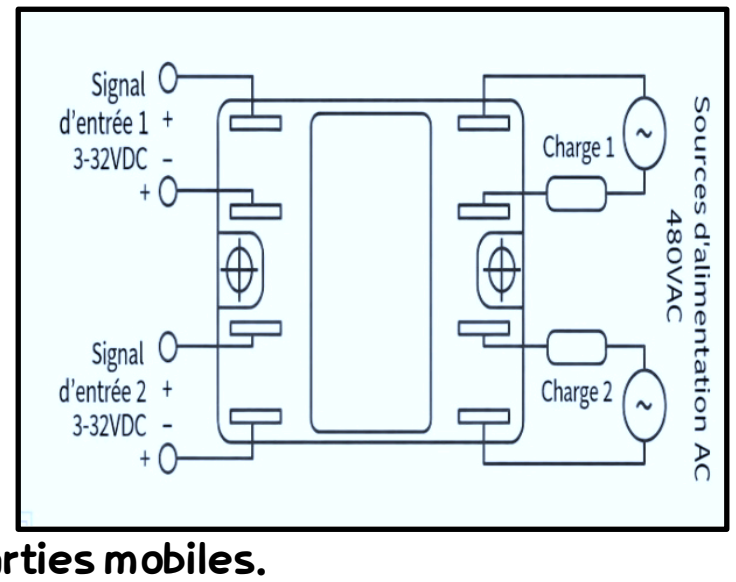


Usure mécanique et fonctions limitées.

Figure II-4 : relais électromagnétique.

b- **Relais statique :**

Relais à technologie utilisant des composants électroniques (transistors, diodes,



circuits intégrés) sans parties mobiles.

Figure II-5 : Relais statique.

Les avantages :

Temps de réponse très rapide.

Grande précision et sensibilité.

Les inconvénients :

Vulnérabilité aux surtensions/transitoires.

Dépannage plus complexe.

c- Relais numérique :

Relais basés sur microprocesseur et logiciels, avec traitement numérique des signaux et fonctions programmables.

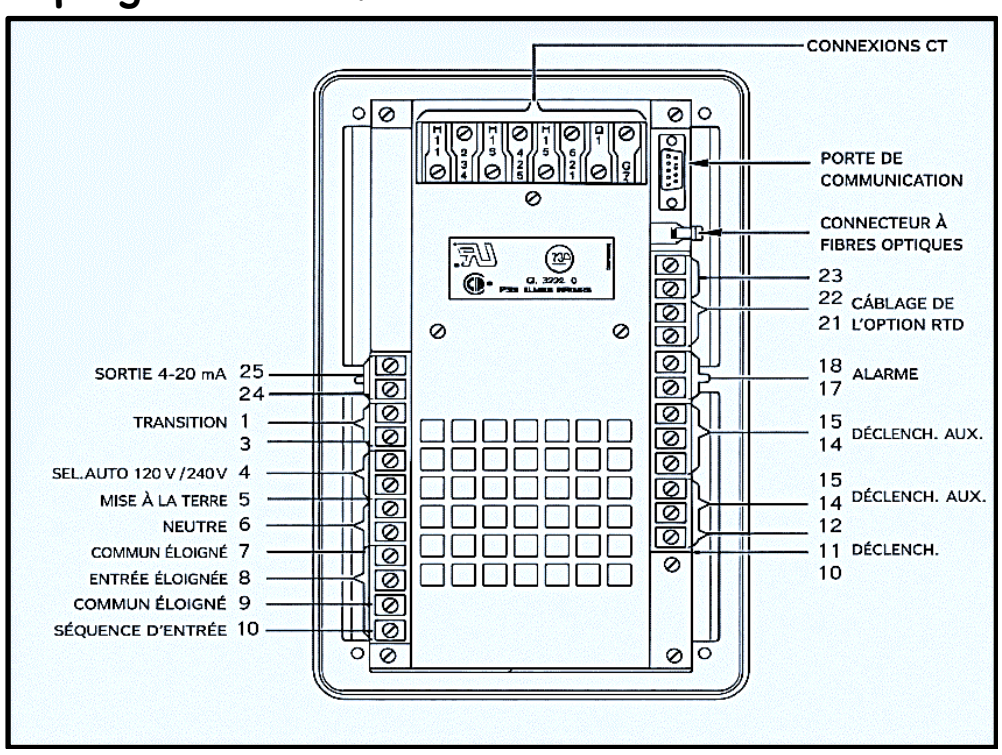


Figure II-6 : Schéma d' un relais numérique type IQ1000.

Les avantages :

Haute précision et fonctions avancées.

Communication et intégration réseau.

Les inconvénients :

Complexité technologique.

Cout plus élevé.

d- Relais thermique :

Relais thermique est un dispositif de protection qui détecte les surcharges prolongées dans un moteur électrique ou un circuit. Il se base sur le principe de l' expansion thermique d' un élément bimétallique sous l' effet du courant électrique.

Les avantages :

Protection simple et économique contre les surcharges prolongées.

Facile à régler selon le courant nominal du moteur.

Les inconvénients :

Temps de déclenchement long pour éviter les déclenchements intempestifs lors des démarrages.

Ne protégé pas contre les court-circuités ni les défauts de phase.

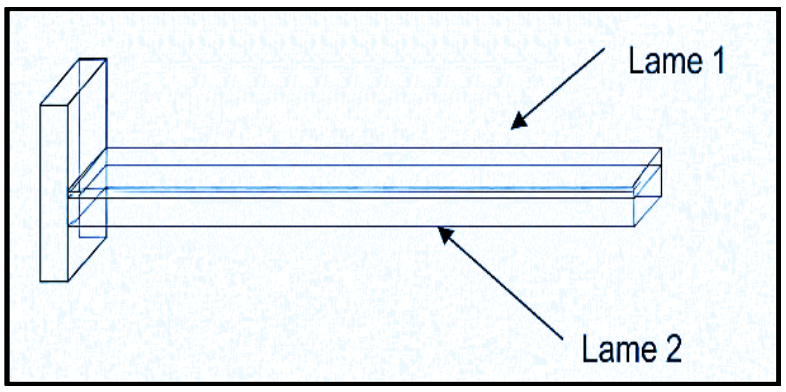


Figure II-7 : Principe du relais thermique.

e- Relais de Phase :

Le relais de phase protégé les moteurs et installations triphasées contre :

- La perte d' une phase (phase manquante).
- Les déséquilibres de tension entre phases.

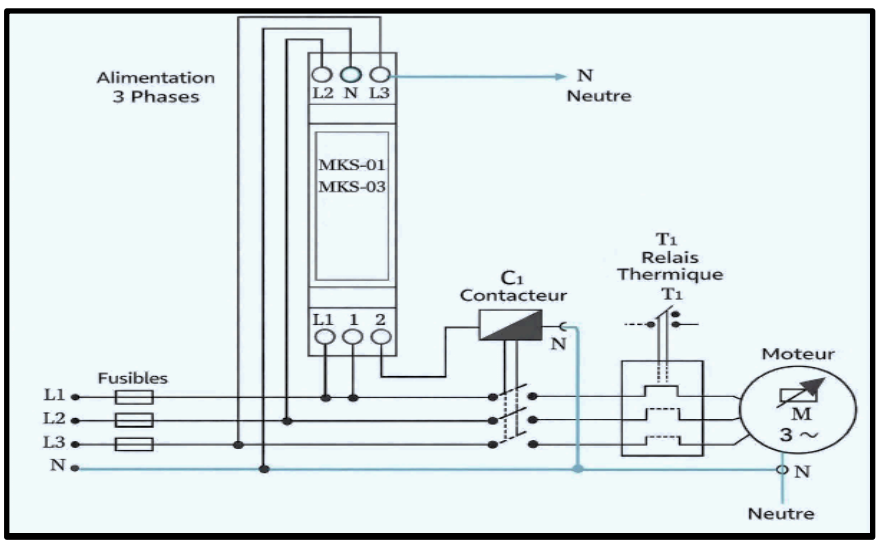


Figure II-8 : relais de phase.

Les avantages :

Protection efficace des moteurs triphasées.

Fonctionnement automatique et rapide.

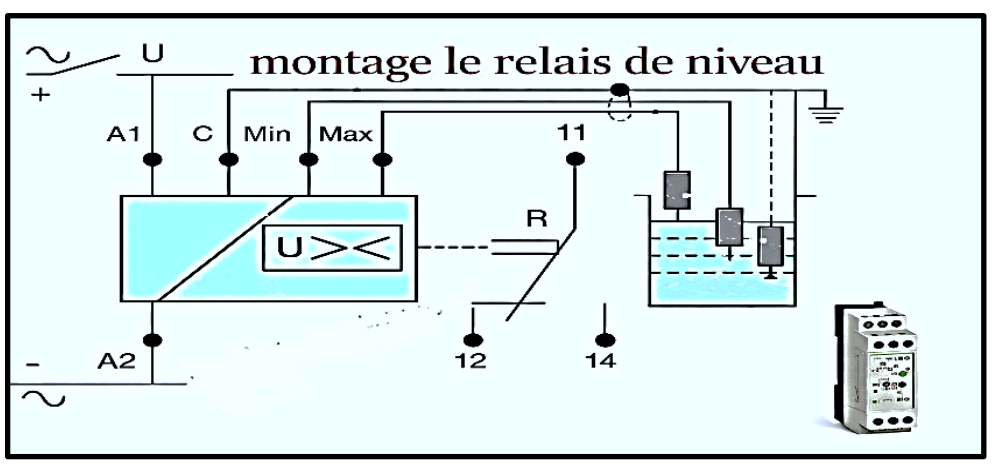
Les inconvénients :

Sensible aux micro-variations du réseau.

Protection limitée (spécifique aux défauts de phase).

f- Relais de niveau:

Le relais de niveau est un dispositif de protection et de commande utilisé pour surveiller le niveau d' un liquide (eau, huile, etc.) dans un réservoir ou un bac et agir



automatiquement en fonction du niveau détecté.

Figure II-9 : Schéma relais de niveau.

Les avantages :

Automatisation du niveau.

Protection du système.

Les inconvénients :

Sensibilité aux impuretés.

Nécessite un entretien.

g- Relais de temporisé (TIMER 2):

Le relais temporisé (Timer 2) est un relais qui permet de retarder l' activation ou la désactivation d' un circuit électrique pendant un temps prédéfini.

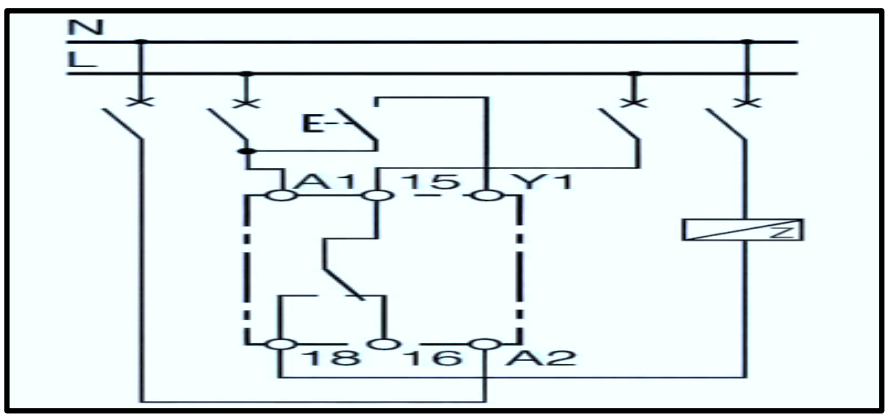


Figure II-10 : Schéma de relais de temporisé.

Les avantages :

Contrôle du temps de fonctionnement.

Automatisation des processus.

Les inconvénients :

Sensibilité aux variations.

Coût et maintenance.

II.3.3 Fusibles :

Le fusible est un dispositif de sécurité dont la fonction est de couper le circuit dans lequel il est installé en fondant, afin d'interrompre le courant lorsque celui – ci dépasse une certaine valeur pendant une durée spécifique. Son appellation provient de son fonctionnement basé sur la fusion d'un filament. (9)

II.3.3.1 Fonctionnement des fusibles :

Le courant qui circule dans le circuit passe intégralement à travers le fusible. Lorsque le courant excède la limite (valeur définie pendant une durée déterminée), la partie conductrice du fusible se liquéfie et interrompt le circuit.

II.3.3.2 Différentes classes de fusibles : Il existe trois types de fusibles :

Fusible polyvalent assurant une protection contre les surcharges et les courts – circuits.

Fusible de protection pour moteur (aM) : il est spécifiquement destiné à la protection contre les courts – circuits.

Fusible à fusion rapide : conçu pour assurer la protection des dispositifs semi – conducteurs.

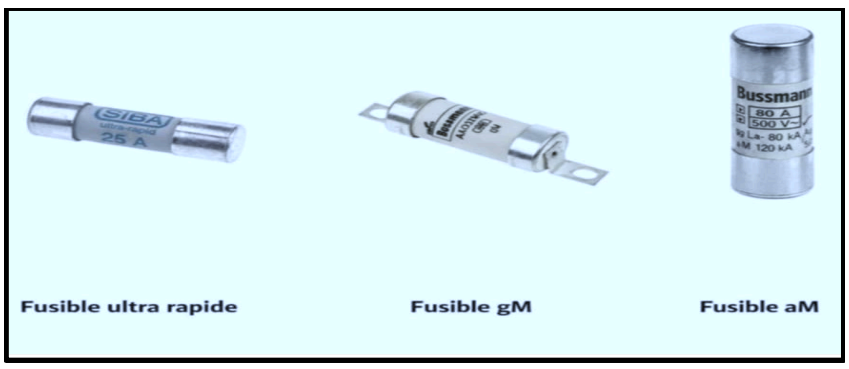


Figure II-11 : Différentes classes de fusibles.

II.3.4 Disjoncteur :

Un disjoncteur est un dispositif de protection conçu pour résister aux courants électriques et les interrompre sous la tension du réseau électrique, dans des conditions normales de service, pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique et automatiquement dans des conditions anormales spécifiées, en particulier pour éliminer un défaut. (10)

II.3.4.1 Classification des disjoncteurs :

Les disjoncteurs contiennent deux classement, suivant leurs isolations diélectriques pour l' extinction de l' arc et suivant le type de fonctionnement.

II.3.4.1.1 Classification des disjoncteurs suivant l' isolant :

a- Disjoncteur pneumatique :

Le gaz présent dans les disjoncteurs à air comprimé est maintenu à une pression élevée (entre 20 et 35 bars) grâce à un compresseur. Cette pression élevée garantit l'isolation diélectrique et favorise l'extinction de l'arc lors de la coupure. (11)



Figure II-12 : Disjoncteur pneumatique.

Les inconvénients :

Nécessité d'une station d'air comprimé.

Appareil plus cher et Bruit violent. (11)

b- Disjoncteur SF6 (Hexafluorure de soufre) :

Ces disjoncteurs fonctionnent selon le même principe que les disjoncteurs à air comprimé à la seule différence qu'ils utilisent de l'hexafluorure de soufre pour éteindre l'arc. : (12)



Figure II-13 : Disjoncteur SF6.

c- Disjoncteur à l'huile :

Dans ces disjoncteurs, le contact mobile est isolé du contact fixe par un milieu diélectrique, qui est l'huile. Lorsqu' un défaut se produit, le disjoncteur s'active, générant un arc électrique entre les deux contacts. Sous l'effet de la chaleur, l' huile se décompose produisant des gaz qui augmentent la pression et la résistance. (13)

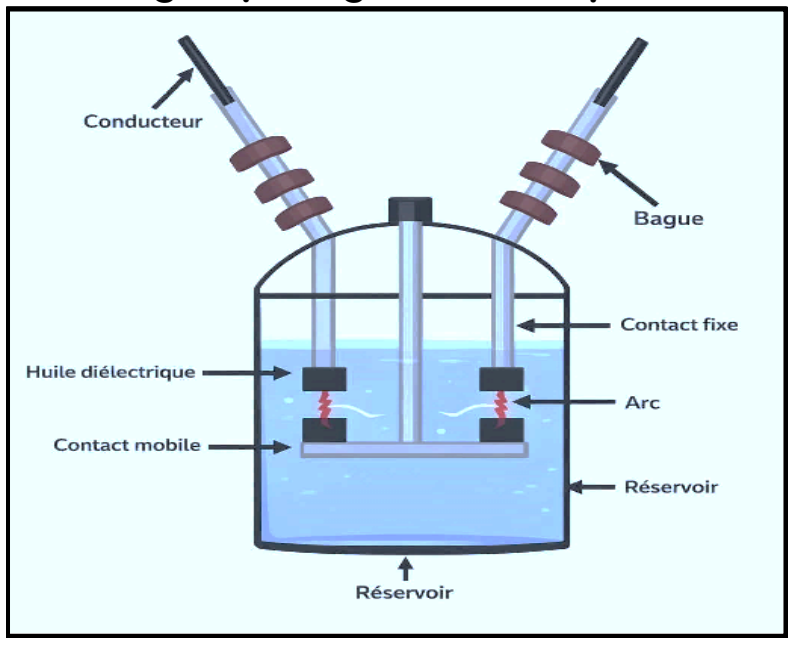


Figure II-14 : Disjoncteur à l' huile.

II.3.4.1.2 Classification des disjoncteurs suivant le type de fonctionnement :

Les disjoncteurs fonctionnent suivant différentes techniques. (12)

a- Magnétique :

Un court – circuit entraîne une élévation soudaine du courant, et cette variation intense, en traversant la bobine, génère un champ magnétique puissant qui provoque l'ouverture du circuit. Les disjoncteurs magnétiques jouent un rôle crucial en protégeant les circuits électriques contre ces incidents de court- circuit. Pour des courants de court – circuit relativement faibles, ces dispositifs réagissent plus rapidement que les fusibles. En

fonction du disjoncteur sélectionné, l' utilisateur la possibilité de régler le seuil de déclenchement.

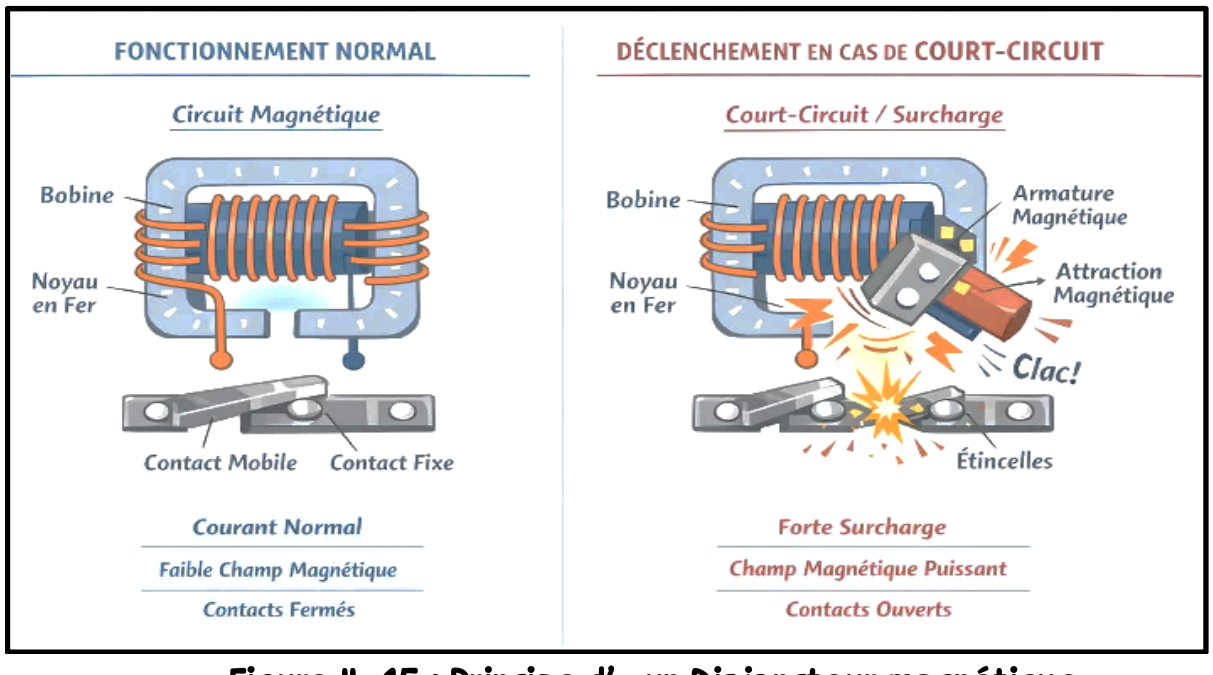


Figure II-15 : Principe d' un Disjoncteur magnétique.

b- Thermique :

Le disjoncteur est équipé d'un bilame. Lorsque le courant passe, il produit un effet Joule sur les fils des spires, ce qui provoque le réchauffement du bilame. À une température spécifique, ce bilame se déforme et, grâce au contact électrique associé, le circuit de commande se déclenche, ouvrant ainsi le contact et interrompant le circuit. Ce modèle de disjoncteur est destiné à protéger les conducteurs contre les surchauffes causées par des surcharges.

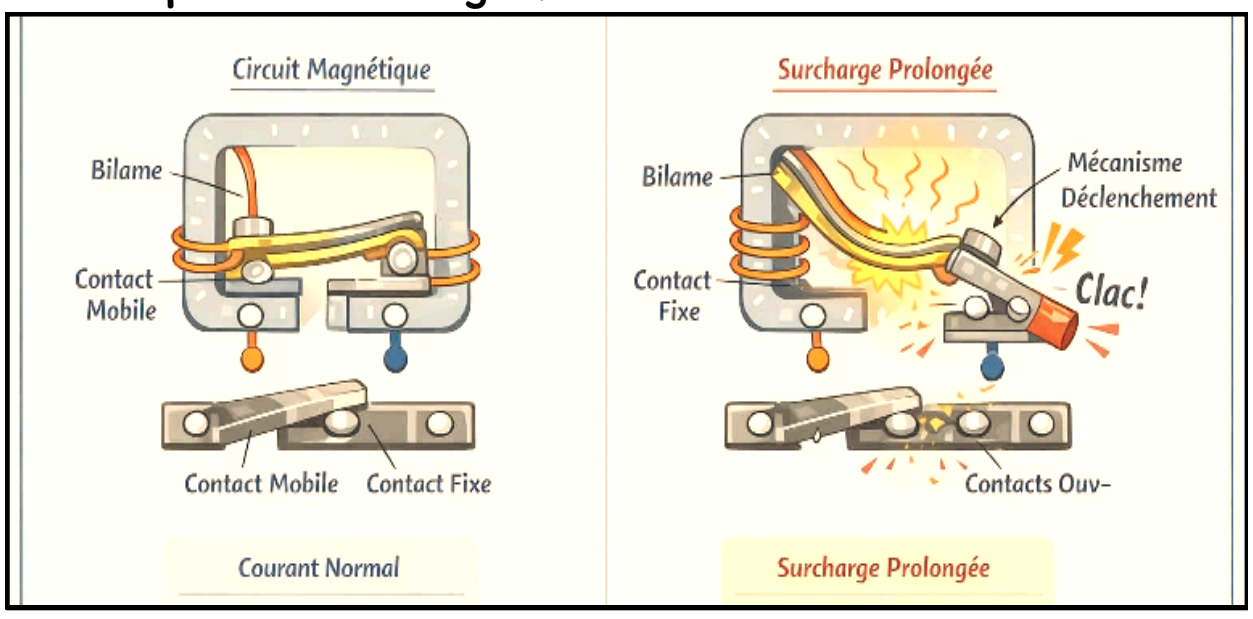


Figure II-16 : Principe d' un Disjoncteur thermique.

C- Magnétothermique :

Ce modèle de disjoncteur combine les deux méthodes évoquées antérieurement, ce qui est perçu comme un atout, car il offre la possibilité de surveiller simultanément plusieurs paramètres.

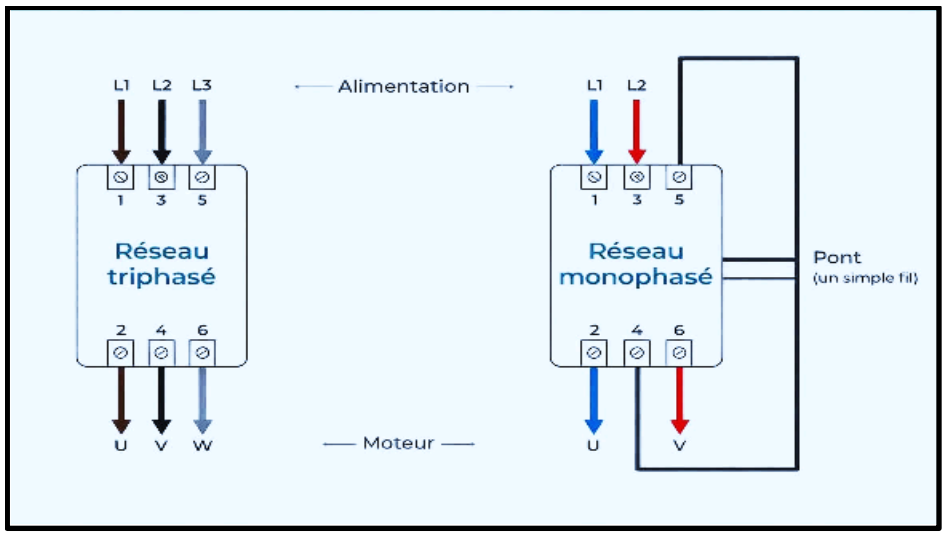


Figure II-17 : Schéma de câblage d' un Disjoncteur magnétothermique.

II.3.5 Sectionneur :

Le sectionneur est un appareil électromécanique permettant de séparer, de façon mécanique, un circuit électrique et son alimentation, l' 'objectif peut être d'assurer la sécurité des personnes travaillant sur la partie isolée du réseau électrique, d'éliminer une partie du réseau en dysfonctionnement pour pouvoir en utiliser les autres parties. (10)

Le sectionneur, à la différence du disjoncteur ou de l'interrupteur n'a pas de pouvoir de coupure, ni de fermeture. Il est impératif d'arrêter l'équipement aval pour éviter une ouverture en charge. Dans le cas contraire de graves brûlures pourraient être provoquées, liées à un arc électrique provoqué par l'ouverture.



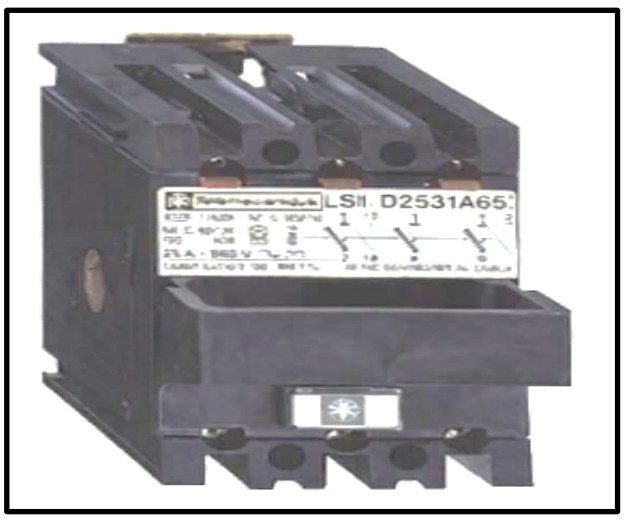


Figure II-18 : Sectionneur moyenne tension.

II.3.6 Les interrupteurs :

Les interrupteurs sont des appareils destinés à ouvrir ou à fermer un circuit électrique, plus perfectionné 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.

Le pouvoir de coupure peut être renforcé sur certains appareils. Par contre les sectionneurs-En fin, le pouvoir de fermeture est suffisant pour permettre la fermeture en charge des i. (14)

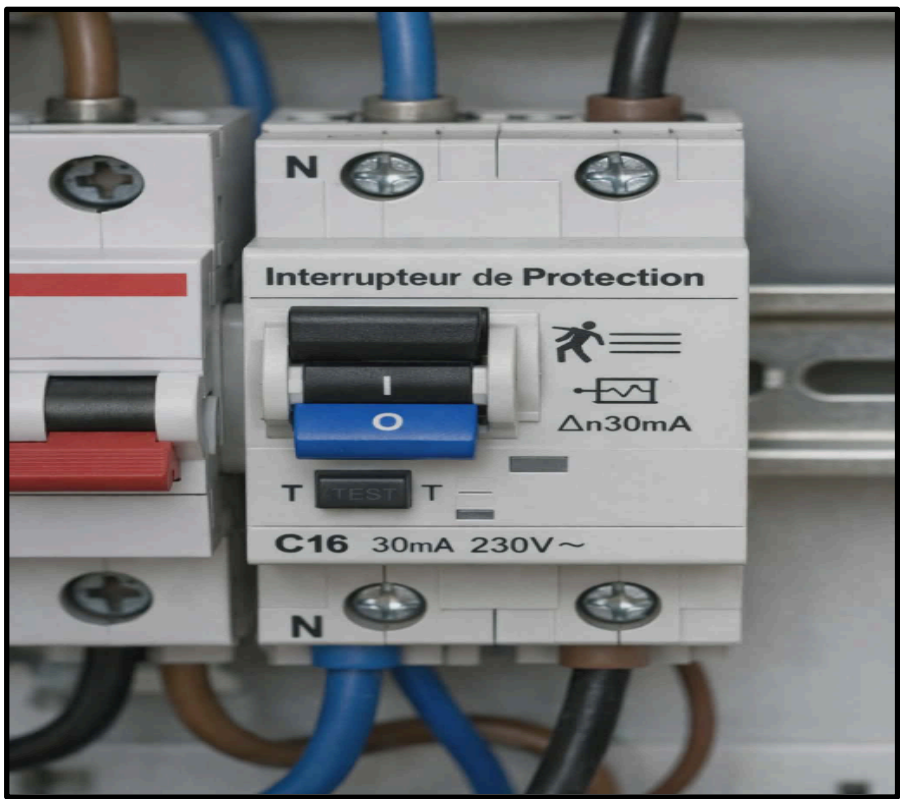


Figure II-19 : interrupteur de protection.

II.3.7 Protection contre les phénomènes atmosphériques :

II.3.7.1 Cage de Faraday :

Le principe de la cage de Faraday est un phénomène qui bloque les champs électromagnétiques. La cage de Faraday se représente comme une enveloppe protectrice qui rend hermétique la réception les ondes électromagnétiques telles que le Wi-Fi ou les signaux mobiles opérateurs.

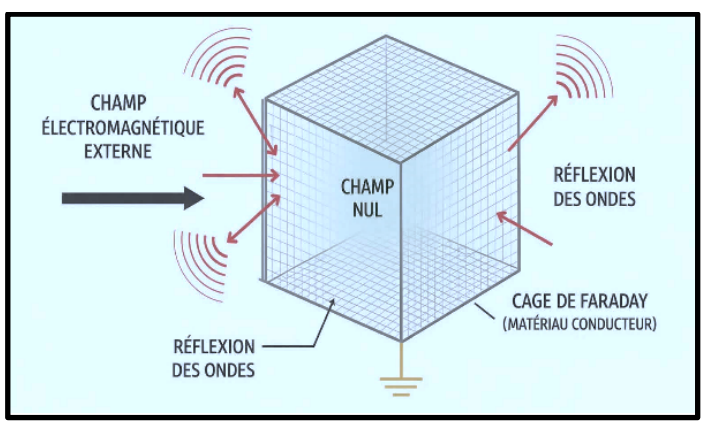


Figure II-20 : Schéma de principe de la cage de Faraday.

II.3.7.2 Paratonnerre :

Le paratonnerre est un dispositif supprimant les surtensions dues à la foudre, en écoulant le courant vers la terre. (15)

Il existe deux types de paratonnerres :

- Paratonnerre à tige.
- Paratonnerre à dispositif d'amorçage.

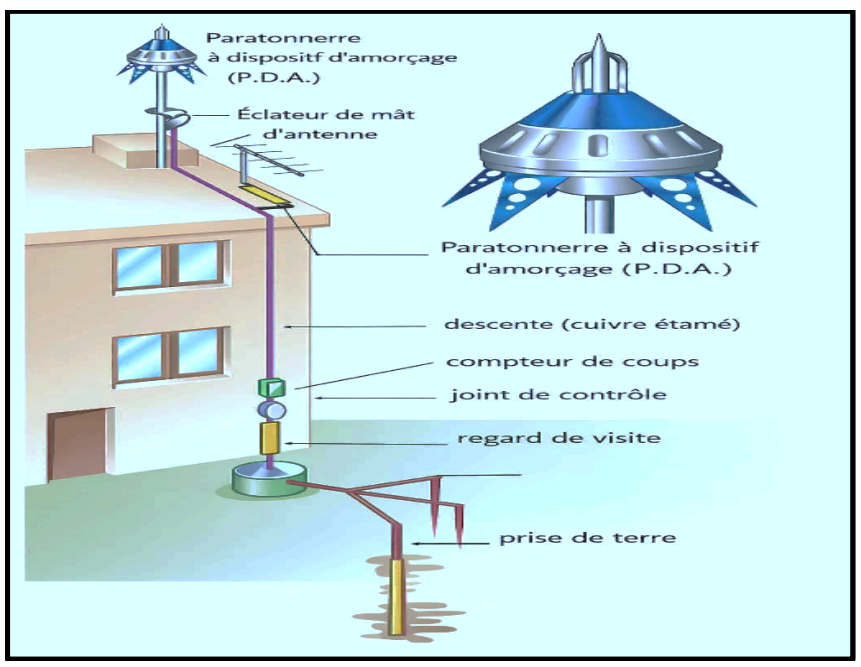


Figure II-21 : Paratonnerre.

II.3.7.3 Eclateur :

Ils sont composés de deux électrodes situées l' une face à l' autre dans un milieu qui peut être l' air ambiant (éclateurs à air), ou du gaz (éclateurs à gaz). Au-delà d' une certaine tension entre les électrodes, un amorçage se produit et le courant passe en formant un arc électrique. Les éclateurs permettent de dévier des courants de foudre importants. (16)

Principe de fonctionnement :

Quand l'onde de tension frappe l' installation, la grande surtension qui apparaît aux bornes de l'éclateur produit un arc électrique qui dévie le courant vers la terre, car le courant choisit le chemin le moins résistant.

La tension d'amorçage de l'éclateur est réglée en agissant sur la distance dans l'air entre les électrodes, de façon à obtenir une marge entre la tenue au choc du matériel à protéger et la tension d'amorçage au choc de l'éclateur.

Les éclateurs sont utilisés en (HTB) et en (HTA), ils sont placés sur les points des réseaux particulièrement exposés à l' entrée des postes HTA/BT. On distingue plusieurs types d' éclateurs :

a-**Éclateur à cornes** : Ils sont constitués de deux électrodes reliés, l' une au conducteur et l' autre à la terre. Ces deux électrodes sont montées sur une chaine d' isolateur rigide. Les éclateurs utilisés en HTA comportent en général entre leurs électrodes une tige anti-oiseaux.

b-**Eclateurs à tige :** Les éclateurs à tige sont utilisés à l' intérieur des postes, sur les réseaux à neutre mis à la terre où le courant de défaut franc à la terre peut atteindre 300A.

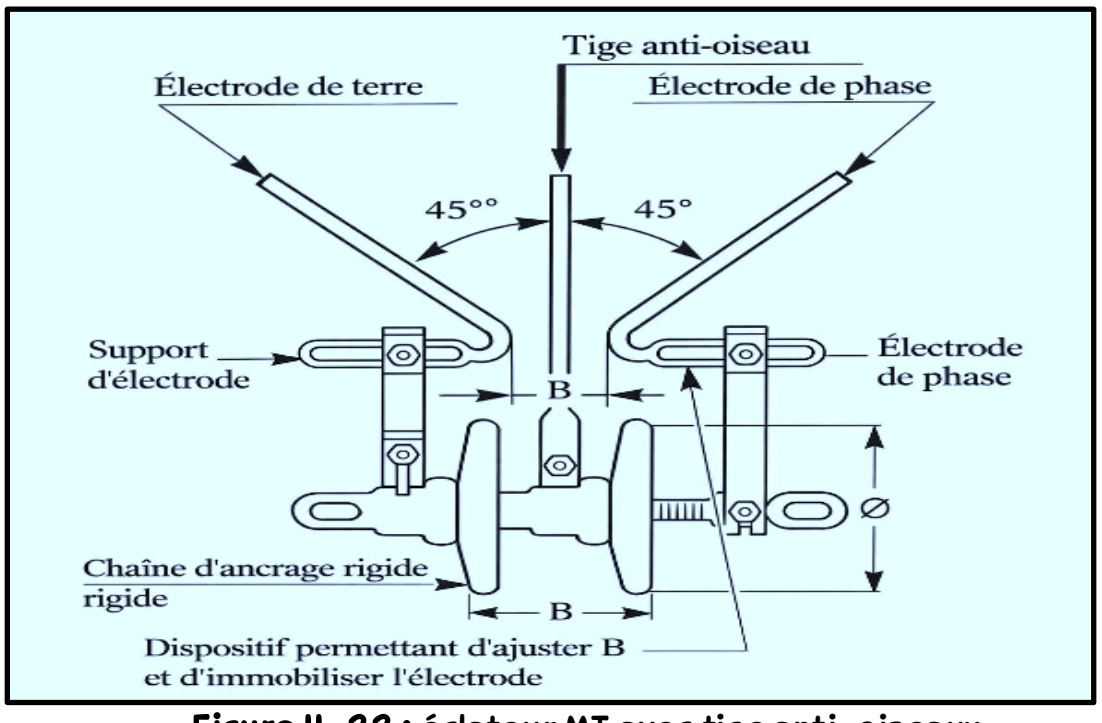


Figure II-22 : éclateur MT avec tige anti-oiseaux.

Réglage de l'écart de l'éclateur :

Nous pouvons calculer l'écart d'un éclateur nécessaire à certain réseau, il faut utiliser cette formule :

L' écart en centimètres est égal à la tension divisée par 30000 V qui renvoie au champ de conductance de l'air E =30KV/cm

$$d = \frac{U}{30 * 10\text{^}3} \qquad (II.1)$$

II.3.7.4 Les parafoudres :

Un parafoudre est un dispositif de protection des appareillages électriques ou électronique contre les surtensions électriques transitoires générées par exemple par la foudre ou certains défauts d' exploitation ; à ne pas confondre avec le paratonnerre qui protège contre les couts directs de la foudre. (16)

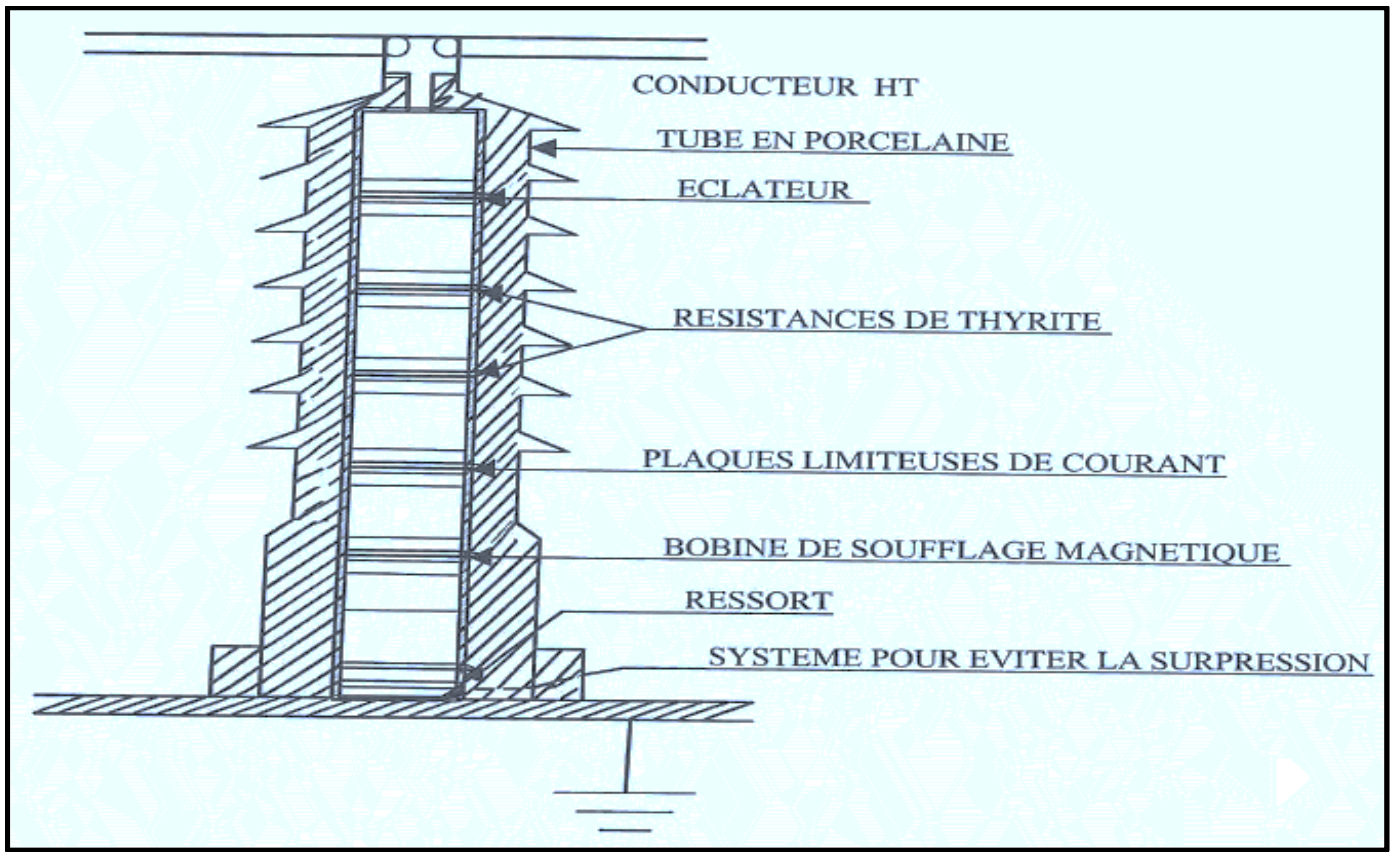


Figure II-23 : vue en coupe d' un Parafoudre.

II.3.7.5 Câbles de garde :

Situés au-dessus des conducteurs, ils sont plus tendus que ceux-ci pour assurer une bonne protection contre la foudre. Ces conducteurs, servent à l' intercepter avant que la décharge n'atteigne les conducteurs sous tension de la ligne, ils améliorent la circulation des courants de défauts à la terre et diminue les effets d' induction sur les installations voisines Ils ne portent normalement aucun courant ; pour cette raison, ils sont ordinairement en acier. On les relie solidement à la terre à chaque pylône. Cependant, malgré leur faible section, ils doivent présenter une sécurité mécanique équivalente à celle des conducteurs en cas de vent violent ou de surcharge de givre ou de neige.

Électriquement, ils doivent assurer l' interconnexion des mises à terre des supports et tolérer les échauffements provoqués par les courants de court-circuit. Pour satisfaire à ces conditions, les câbles de garde comportent toujours une section importante d' acier et, autour de l' âme d' acier, une couche ou exceptionnellement deux couches de fils d' almélec. (10)

Deux types de câbles de garde sont utilisés :

Des câbles almélec-acier normaux.

Des câbles almélec-acier comportant à l' intérieur des circuits de télécommunication.

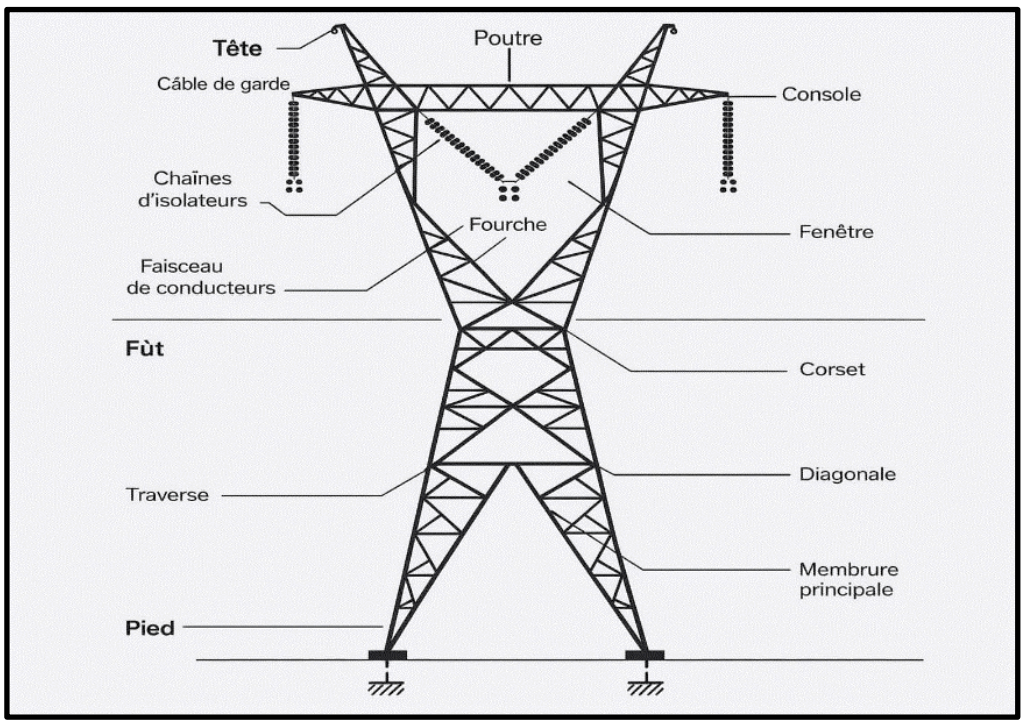


Figure II-24 : câble de garde.

II.4 Qualités principales d' un système de protection :

Pour qu' un système de protection accomplisse convenablement sa mission, il doit présenter les qualités suivantes :

II.4.1 Fiabilité :

Le système doit fonctionner uniquement lorsqu' un défaut réel apparait.

II.4.2 Sélectivité :

Seule la partie en défaut doit être isolée, tandis que le reste du réseau continue à fonctionner.

II.4.3 Rapidité :

Le système doit éliminer le défaut le plus rapidement possible afin de limiter les dégâts.

II.4.4 Sensibilité :

Doit détecter la moindre variation des paramètres de l' élément surveillé.

II.4.5 L' économie :

Le système doit offrir une protection efficace avec un cout raisonnable.

II.5 Sélectivité des protections :

La sélectivité de protection consiste à **hiérarchiser les dispositifs de protection** (fusibles, disjoncteurs, relais) pour que **seul le dispositif le plus proche du défaut déclenche**.

- Elle évite les **coupures inutiles** sur d' autres parties du réseau.
- Elle améliore la **continuité du service électrique.**

II.5.1 Mode de sélectivité :

La sélectivité des protections consiste à isoler le plus rapidement la partie du réseau affectée par un défaut et uniquement cette partie, en laissant sous tension toutes les parties saines du réseau.

Pour y parvenir différents systèmes peuvent être mis en œuvre :

La sélectivité ampère métrique (par les courants),

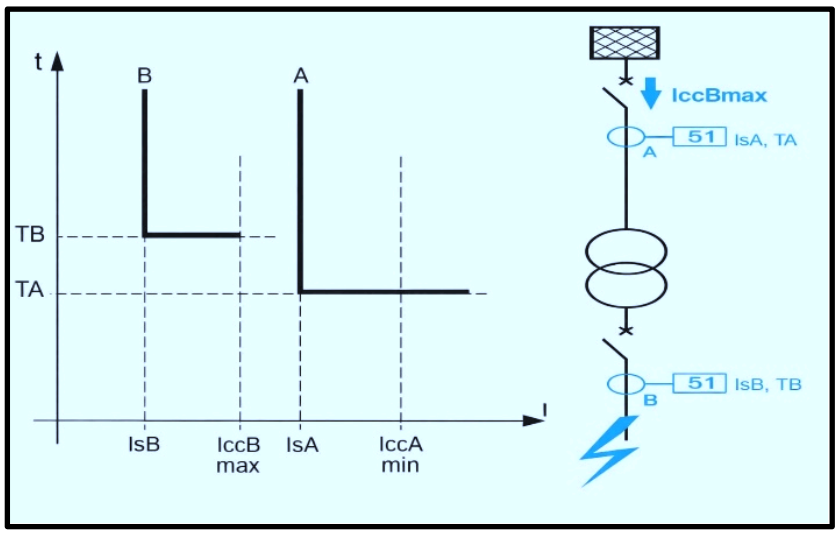
La sélectivité chronométrique (par le temps),

La sélectivité par échange d'informations dite sélectivité logique.

II.5.1.1 Sélectivité ampère métrique :

Principe : Il est basé sur le fait que dans un réseau, le courant de défaut est d'autant plus faible que le défaut est plus éloigné de la source. (17)

Mode de fonctionnement : Une protection ampère métrique est disposée au départ de chaque tronçon : son seuil est réglé à une valeur inférieure à la valeur de court – circuit minimal provoqué par un défaut sur la section surveillée, et supérieure



à la valeur maximale du courant provoqué par un défaut situé en aval (au – delà de la zone surveillée).

Figure II-25 : fonctionnement d' une sélectivité ampère métrique.

II.5.1.2 Sélectivité chronométrique :

Principe : Il consiste à donner des temporisations différentes aux protections à maximum de courant échelonnées le long du réseau. Ces temporisations sont d'autant plus longues que le relais est plus proche de la source. (17)

Mode de fonctionnement : Ainsi, sur le schéma (fig. 26), le défaut représenté est vu par toutes les protections (en A, B, C, et D). La protection temporisée D ferme ses contacts plus rapidement que celle installée en, elle – même plus rapide que celle installée en B ... Après l'ouverture du disjoncteur D et la disparition du courant de défaut, les protections A, B, C qui ne sont plus sollicitées, reviennent à leur position de veille. La différence des temps de fonctionnement AT entre deux protections successives vrai est l'intervalle de sélectivité.

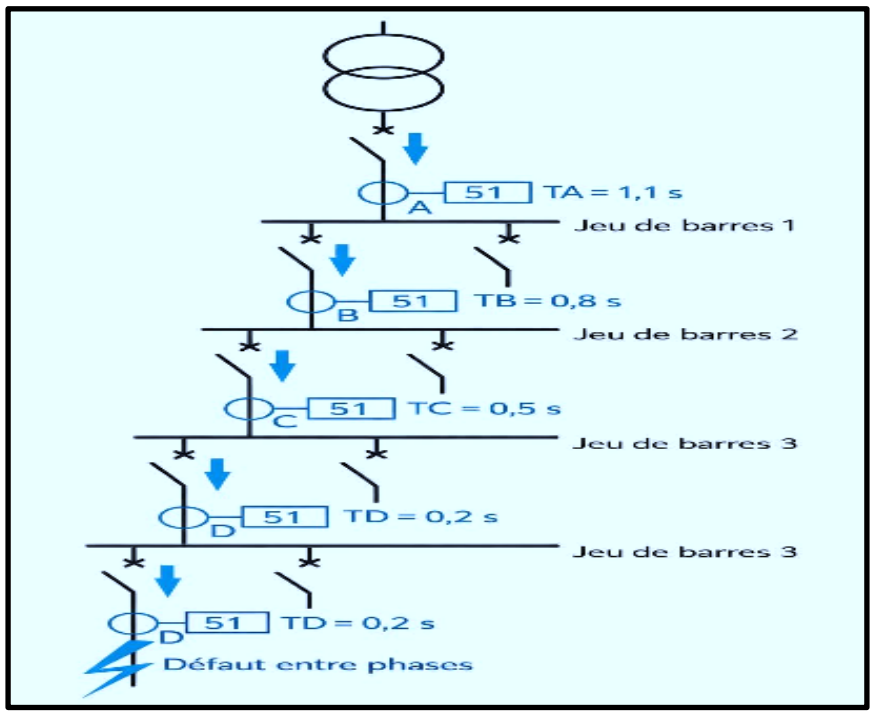


Figure II-26 : principe de la sélectivité chronométrique.

II.5.1.3 Sélectivité logique :

Principe : Ce système a été développé pour remédier aux inconvénients de la sélectivité chronométrique. Ce principe est utilisé lorsque l'on souhaite obtenir un temps court d'élimination de défaut (fig. 27). [17]

Mode de fonctionnement : L' échange d'informations logiques entre protections successives permet la suppression des intervalles de sélectivité, et donc de réduire considérablement le retard de déclenchement des disjoncteurs situés les plus près de la source. En effet, dans un réseau en antenne, les protections situées en amont du point de défaut sont sollicitées, celles en aval ne le sont pas ; cela permet de localiser sans ambiguïté le point de défaut et le disjoncteur à commander.

Chaque protection sollicitée par un défaut envoie :

Un ordre d'attente logique à l'étage amont (ordre d'augmentation de la temporisation propre du relais amont),

Un ordre de déclenchement au disjoncteur associé sauf s'il a lui – même reçu un ordre d'attente logique de l'étage aval. Un déclenchement temporisé est prévu en secours.

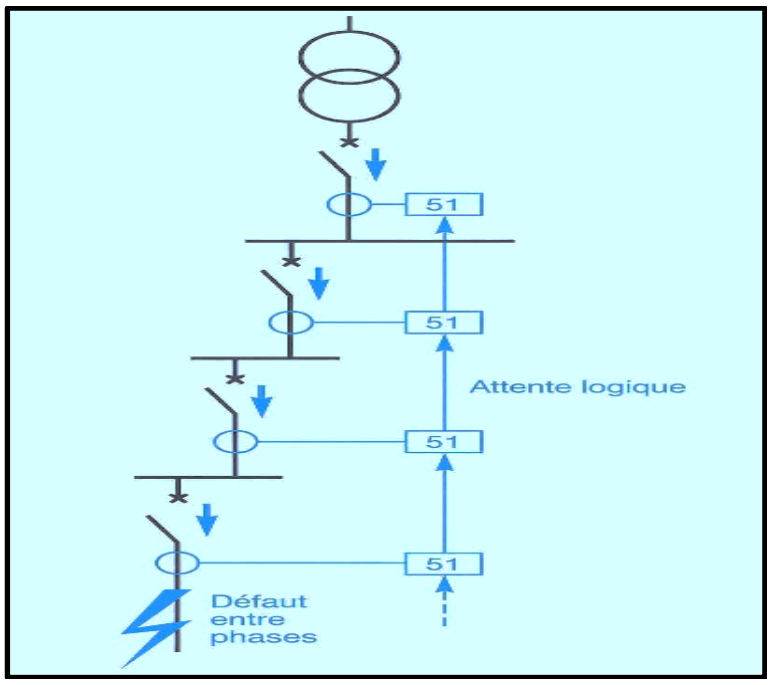


Figure II-27 : principe de la sélectivité logique.

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les généralités sur la protection des installations industrielles ainsi que les principaux équipements utilisés, notamment les transformateurs, les relais de protection et les disjoncteurs. Nous avons également abordé les notions de qualité de protection, de protection de secours et de sélectivité, ainsi que les moyens de protection contre les phénomènes atmosphériques.

Cette étude nous a permis de mieux comprendre l' importance des systèmes de protection dans la sécurité des installations, la protection des équipements et la continuité de service. Ces notions constituent une base essentielle pour aborder, dans la suite de notre travail, l' étude pratique de la protection d' une installation industrielle.

Chapitre III : Calcul de l'installation industrielle

III.1. Introduction :

Les réseaux électriques fournissent l'énergie nécessaire au fonctionnement des équipements de production. Par conséquent, des efforts sont déployés pour assurer la continuité de l'alimentation des charges dès la phase de conception du réseau, notamment lors des choix initiaux pour le schéma unifilaire. La rentabilité d'une installation industrielle est directement liée à la robustesse de sa conception, et donc à la disponibilité des équipements de production. La conception du réseau électrique vise à identifier les installations électriques qui répondent aux exigences du processus industriel avec les coûts d'investissement, d'exploitation et de panne les plus faibles.

Ce chapitre présentera brièvement dans sa première partie les principaux points qui doivent figurer dans le cahier des charges pour l'étude et la conception des installations industrielles ; tandis que sa seconde partie sera consacrée au calcul d' une installation industrielle pour une entreprise de production.

III.2. Cahier des charges standard :

Un cahier des charges a pour fonction de formaliser un besoin afin que ce dernier soit compris par l'ensemble des acteurs impliqués dans le projet. Il précise les spécifications attendues. Un cahier des charges (CDC) pour un réseau industriel doit garantir la fiabilité, la sécurité et la haute disponibilité des installations de production. [18]

Voici la structure standard et essentielle pour concevoir un réseau industriel :

III.2.1. Présentation et objectifs du projet :

a) **Contexte :** Description de l'entreprise (secteur, usine de production).

b) **Objectifs :** Modernisation ou extension de ligne de production, ou création d' une nouvelle installation pour une nouvelle usine.

c) **Enjeux :** Améliorer l' efficacité, réduire les temps d' arrêt et intégrer le réseau de gestion de l' entreprise à celui des ateliers de production. Cela implique de mettre en place la traçabilité, la maintenance à distance et la maintenance prédictive.

III.2.2. Périmètre du réseau industriel :

a) **Topologie physique et géographique :** Nombre de bâtiments, ateliers, armoires électriques et postes de travail à connecter.

b) **Architecture réseau :** Mise en œuvre du modèle de séparation complète des capteurs, des automates programmables (API) et du réseau informatique de l' entreprise. Application d' une architecture redondante en étoile ou en anneau est utilisée pour garantir une reprise rapide en cas de panne.

c) **Redondance :** Double alimentation électrique pour les équipements prioritaires ainsi que des commutateurs et transformateurs en doubles.

d) **Contraintes environnementales :** Températures extrêmes, humidité, vibrations, poussière, et présence d' interférences électromagnétiques.

e) **Équipements à intégrer :** Capteurs, actionneurs, API, systèmes de supervision et d' acquisition de données, et bases de données de production.

III.2.3. Spécifications techniques et contraintes :

a) **Temps réel et** critiques : Les flux de données de l'atelier exigent des connexions spécifiques et une latence quasi nulle afin d' éviter des arrêts de ligne coûteux.

b) **Protocoles industriels :** Préciser les protocoles requis (Ethernet /IP, PROFINET, Modbus-TCP, EtherCAT, etc.).

c) **Câblage :** Utilisation de paires torsadées blindées ou fibre optique pour s'affranchir des fortes perturbations électromagnétiques.

d) **Équipements robustes** : utilisez des commutateurs et des routeurs de qualité industrielle (indice de protection IP67 ou IP30, montage sur rail DIN).

III.2.4. Sécurité industrielle :

a) **Norme de référence :** Conformité aux exigences de la norme IEC 62443.

b) **Contrôle d'accès** : Authentification robuste, politiques de ports inactifs et segmentation des flux de données entre les différentes cellules de production.

c) **Pare-feu :** Mise en place de pare-feu industriels entre les réseaux informatiques et opérationnels.

d) **Accès à distance** : Contrôle d'accès strict pour la maintenance à distance des machines par les fabricants d'équipements.

e) **Surveillance** : Mise en place de systèmes de détection d'intrusion (IDS) spécifiquement conçus pour les environnements industriels.

III.2.5. Exploitation, maintenance et accompagnement :

a) **Supervision du réseau :** Outils de surveillance (NMS) pour alerter les équipes techniques en temps réel.

b) **Documents attendus :** Dossier d'architecture, plans de câblage, schémas logiques, et matrices de flux.

c) **Support et maintenance :** Modalités d'intervention (astreintes, délais de réparation) et gestion des pièces de rechange.

III.3. Cahier de charge technique pour la conception d' une installation industrielle :

On se propose d'étudier l'alimentation électrique d'une installation industrielle de production.

L'installation industrielle à alimenter est une usine de production qui s'étend sur une superficie de 32 hectares, elle est constituée de plusieurs bâtiments.

III.3.1. Collecte de données :

Il est essentiel de collecter autant de données que possible pour permettre la conception du réseau et la sélection des équipements. [18]

III.3.1.1. Conditions d'environnement :

La compréhension des paramètres liés aux conditions environnementales réelles du site prévu permet d'intégrer des facteurs de correction ou de réduction de puissance pour l'équipement. Parmi les conditions environnementales que le concepteur prendra en compte, l'altitude et le risque d'explosion en présence de gaz, le niveau de la mer dans la zone afin de protéger l'installation contre les risques de foudre, la pollution atmosphérique et la réglementation du site.

III.3.1.2. Classement des récepteurs :

Cette section est essentielle car elle exige que le concepteur connaisse toutes les charges de l'installation et les classe par type. La puissance nominale, le rendement et le facteur de puissance de chaque charge doivent également être déterminés. De plus, il convient de prendre en compte les systèmes transitoires, les facteurs d'utilisation, les facteurs de foisonnements et les niveaux de perturbation émis et tolérés « la norme CEI 1000-2-4 (voir tableau III-2). » par chaque consommateur.

III.3.1.3. Attachement géographique ou fonctionnel des récepteurs :

Il est essentiel d'identifier les récepteurs en fonction de la conception de l'usine et de leur rôle dans le processus industriel. En effet, de par leur situation géographique au sein de l'usine ou leur rattachement à une unité fonctionnelle, les destinataires génèrent un premier niveau de regroupement naturel des charges.

III.3.1.4. Extensions futures :

La connaissance exacte des possibilités d'extensions de tout ou partie de l'installation permet au concepteur en tenir compte notamment :

- Pour le dimensionnement des liaisons, des transformateurs, des disjoncteurs... ;
- Pour le choix de la structure du réseau de distribution ;
- Pour l'estimation des superficies des locaux.

III.3.1.5. Classement des récepteurs par priorité :

Les conséquences des pannes de courant sur la sécurité des personnes, des biens et de la production peuvent être graves. Il est donc important de déterminer la durée maximale de déconnexion pour chaque catégorie de récepteurs et de choisir la méthode de redémarrage appropriée en conséquence.

On peut classer les récepteurs, en trois grandes familles :

- Les récepteurs n'acceptant aucune coupure ;
- Les récepteurs nécessitant des temps de reprises incompatibles avec

l'intervention humaine ;

Les récepteurs à temps de reprise compatible avec l'intervention humaine.

III.3.1.6. Contraintes du réseau public :

Au point de raccordement, le réseau public impose certaines contraintes qui peuvent être décisives pour les choix préliminaires de la structure du réseau interne à l'usine, telles que :

La puissance de court-circuit requise au point de raccordement dépend de la puissance de l'installation, de la puissance des gros récepteurs et des perturbations générées et tolérées par l'installation.

Les caractéristiques principales de la tension fournie par un réseau public de distribution moyenne et basse tension dans des conditions normales d'exploitation sont définies par la norme des qualités de réseau EN 50160.

III.3.2. Elaboration d'un premier schéma unifilaire :

A partir du recueil des données, un premier schéma unifilaire de distribution peut être établi. (18)

III.3.2.1. Bilan de puissance :

C' est une étape essentielle de la conception d'une installation industrielle. Cela implique de déterminer les valeurs de puissance active et réactive absorbée, ainsi que leur répartition géographique en fonction de la superficie du site, de la capacité installée et de la distribution. L'installation est donc divisée en plusieurs zones géo énergétiques de 3 à 8 zones. Ensuite, le bilan de puissance est calculé en appliquant des coefficients d'utilisation à chaque récepteur et un facteur de foisonnement pour le regroupement de plusieurs charges ou circuits en fonction de la capacité installée.

III.3.2.2. Choix des niveaux de tension :

Le choix de la tension d'alimentation dépend des niveaux de tensions d'alimentation usuellement et de la puissance de l'installation de la puissance de l'installation. En général, l'expérience acquise montre que choix des tensions :

Pour des puissances jusqu'à 10 MVA, on choisit deux niveaux de tension (MT, BT) ;

Pour des puissances de plus de 10 MVA, le choix de trois niveaux de tension peut s'avérer plus économique (HT, MT, BT).

III.3.2.3. Sources d'énergie :

La source principale d'énergie est généralement constituée par le réseau de distribution publique.

Pour des raisons de sécurité ou de continuité de service, la source principale d'une installation industrielle est souvent accompagnée d'une source de remplacement.

Les différentes sources de remplacement envisageables sont :

- Deuxième alimentation du distributeur ;
- Source autonome permanente ;
- Source de secours ;
- Sources d'alimentation des auxiliaires des postes.

III.3.2.4. Choix des régimes de neutre :

Choix des régimes de neutre des réseaux MT :

Il est un compromis entre les paramètres suivants :

La continuité de service, les contraintes d'exploitation et de maintenance et l'étendue du réseau ;

Le niveau des surtensions générées, le niveau d'isolement phase – terre du matériel ;

Les contraintes thermiques liées à la valeur du courant de défaut à la terre ;

La complexité des protections.

Choix des schémas de liaison à la terre des réseaux BT :

Il e s t un compromis entre les paramètres suivants) :

La continuité de service, le niveau des surtensions générées et le risque d'incendie d'origine électrique ;

Le niveau des perturbations électromagnétiques et les contraintes de conception et d'exploitation.

III.3.2.5. Choix de la structure du réseau :

Le choix d'une structure de réseau est une étape déterminante pour la disponibilité de l'énergie.

Parmi les différentes structures possibles :

- Structure du poste de livraison HT/MT.
- Structure du réseau MT.
- Structure des réseaux BT.

III.3.2.6. Gestion de l'énergie et choix de la tarification optimale :

Une étude d'optimisation s'avère toujours rentable pour les paramètres suivants :

Composante de la tarification ;

Compensation de l'énergie réactive ;

Courbes de charge journalières et saisonnières ;

Identification des charges délestables ;

Intérêt d'installer une centrale de cogénération.

III.3.3. Etudes techniques et homologation du schéma unifilaire :

Dans cette étape de l'étude de conception, il s'agit de valider par des calculs la structure définie précédemment. C' est une étape itérative dans la mesure où certains paramètres déjà définis peuvent être modifiés pour satisfaire certaines conditions ou

dispositions normatives. Dans ce cas, les calculs qui en dépendent seront à chaque fois revus en conséquence. (18)

III.3.3.1. Calcul des courants nominaux :

Sur la base du bilan de puissance effectué, seront déterminés les courants nominaux qui transitent dans chaque canalisation, transformateurs et autres éléments du réseau.

III.3.3.2. Choix des transformateurs :

Le choix du transformateur est fait sur la base de la puissance maximale qui correspond à la journée la plus chargée de l'année. Cette puissance est le résultat d'un bilan de puissance, en tenant compte des coefficients d'utilisation et de simultanéité.

III.3.3.3. Choix des générateurs :

La puissance des générateurs sera déterminée en fonction de la puissance de remplacement nécessaire ou de la puissance à délester pendant les périodes EJP.

III.3.3.4. Détermination des sections des conducteurs :

La méthode détaillée de détermination des sections des conducteurs consiste à :

Calculer le courant maximal d'emploi ;

Déterminer le facteur de correction global relatif au mode de pose et aux conditions d'installation ;

Calculer le courant admissible ;

Déterminer la section nécessaire à l'échauffement en régime normal ;

Vérifier la contrainte thermique en cas de court-circuit en fonction du dispositif de protection ;

Vérifier les chutes de tension en régime normal et pendant le démarrage de gros moteurs ;

Vérifier, pour la basse tension, les longueurs maximales des canalisations pour la protection des personnes contre les contacts indirects, en fonction du dispositif de protection ;

Vérifier la tenue thermique des écrans de câble lors d'un défaut phase – terre en MT ;

Déterminer les conditions de mise à la terre des écrans de câbles en MT ;

Déterminer les sections des conducteurs de neutre, de protection et d'équipotent alité ;

La section à retenir est la section minimale vérifiant toutes ces conditions.

III.3.3.5. Etude des circuits de terre et des prises de terre :

Les valeurs des impédances des circuits de terre et des prises de terre déterminent les niveaux de surtension qui peuvent apparaître sur les équipements

électriques. Il est notamment intéressant de réaliser des zones équipotentielles en fond de fouille qui réduisent les surtensions entre les équipements et la terre.

III.3.3.6. Calcul des courants de court-circuit :

L'intensité du courant de court-circuit doit être calculée à chaque étage de l'installation pour les différentes configurations possibles du réseau ; ceci pour pouvoir déterminer les caractéristiques du matériel qui doit supporter ou qui doit couper ce courant de défaut

L'utilisation de logiciels de calcul conformes à la norme CEI 909 est d'une utilité précieuse pour la rapidité et la fiabilité des résultats.

III.3.3.7. Démarrage des moteurs :

Le démarrage est un point délicat de l'exploitation des moteurs électriques. Les dispositifs de démarrage doivent pouvoir résoudre la plupart des cas qui se présentent au concepteur d'installation:

Couple résistant élevé ;
Appel limité d'intensité ;
Démarrages fréquents.

Lors de la mise sous tension, l'impédance présentée par le moteur est très faible. Il peut s'ensuivre un violent appel de courant (4 à 10 fois le courant nominal) ce qui provoque des perturbations. Un moteur démarre plus vite, s'échauffe moins et provoque une moindre chute de tension si la puissance de court-circuit au point de raccordement du moteur est élevée.

III.3.3.8. Compensation de l'énergie réactive :

- Recherche de la compensation optimale.
- Critères de choix du mode de compensation.
- Équipements de compensation.
- Problèmes liés aux condensateurs en présence d'harmoniques.

III.3.3.9. Etude des harmoniques :

Les récepteurs non linéaires tels que fours à arc, éclairages, convertisseurs, redresseurs, ... absorbent des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau et provoquent ainsi une déformation de la sinusoïde de tension d'alimentation. La déformation de la forme d'onde est caractérisée par l'apparition de fréquences harmoniques de tension.

Les perturbations généralement constatées sont :

Échauffement ou claquage de condensateurs ;
Échauffement de moteurs ou de transformateurs ;
Dysfonctionnement de régulateurs, convertisseurs, contrôleurs permanents d'isolement, relais de protection, ...

Une étude d'harmoniques a pour objectif de définir les moyens permettant de réduire

les perturbations à des niveaux acceptables.

III.3.3.10. Coordination de l'isolement dans une installation électrique industrielle :

La coordination de l'isolement d'une installation consiste à déterminer les caractéristiques d'isolement nécessaires aux divers constituants du réseau, en vue d'obtenir une tenue homogène aux tensions normales, ainsi qu'aux différentes surtensions.

Son but final est de permettre une distribution sûre et optimisée de l'énergie électrique.

III.3.3.11. Etude de la sûreté de fonctionnement :

En raison de l'accroissement des coûts générés par une perte d'alimentation, les concepteurs et les exploitants de réseaux électriques ont besoin de s'appuyer sur un ensemble de méthodes d'évaluation qualitative et quantitative de la sûreté de fonctionnement du réseau (voir § 10).

Au niveau de la conception, il est important de disposer de méthodes permettant :

D' évaluer la sûreté de fonctionnement pour répondre à un cahier des charges ;
De choisir des solutions adaptées ;
De réaliser la continuité de service au coût minimum ;
De déterminer la politique de maintenance optimale.

III.3.4. Choix du matériel :

La structure du réseau étant choisie et validée, les matériels électriques prévus doivent satisfaire : [18]

III.3.4.1. Aux normes en vigueur.

III.3.4.2. Aux caractéristiques du réseau :

Il s'agit notamment :

Des tensions de service qui doivent être compatibles avec la tension la plus élevée pour le matériel ;

Des surtensions susceptibles d'apparaître dans le réseau qui doivent être compatibles avec les tensions de tenue du matériel (à fréquence industrielle, choc de manœuvre, choc de foudre) ;

Des courants nominaux ;

Des courants de court-circuit qui doivent être compatibles avec le pouvoir de coupure, le pouvoir de fermeture, la tenue thermique et électrodynamique du matériel.

III.3.4.3. Aux fonctions associées à chaque équipement :

Coupure sur court-circuit (disjoncteur, fusible) ;
Manœuvre en régime nominal (interrupteur) ;
Manœuvres fréquentes (contacteurs...) ;

Hors charge (sectionneurs).

III.3.4.4. Aux exigences de la continuité de service :

Ce qui détermine le choix du type de matériel :

Appareil fixe.

Appareil déblocable pour faciliter l'entretien ou le remplacement.

III.3.4.5. Aux qualifications du personnel :

Le niveau de qualification des agents d'exploitation et de maintenance détermine :

La nécessité ou non de verrouillages et d'asservissements pour éviter les fausses manœuvres ;

Le choix d'un matériel avec ou sans entretien.

III.3.4.6. Aux exigences liées aux extensions futures :

Cela détermine les réserves à prévoir et peut conduire au choix de matériels modulaires.

III.3.5. Détermination du plan de protection :

Le rôle fondamental des protections d'un réseau électrique industriel est d'assurer la sécurité des personnes et des biens et, d'améliorer la continuité d'alimentation des récepteurs. (18)

III.3.5.1. Le fonctionnement normal d'une installation :

Il peut être perturbé par un certain nombre d'incidents comme :

Les surcharges ;

Les court-circuites ;

Les fausses manœuvres ;

Les détériorations des isolants.

III.3.5.2. Le rôle des protections :

Elle évite les conséquences de ces incidents, en permettant :

De limiter les contraintes thermiques, et mécaniques auxquelles sont soumis les matériels ;

De préserver la stabilité du réseau ;

De réduire la durée des perturbations électromagnétiques causées aux circuits voisins.

Le système de protection est un ensemble cohérent qui dépend de la structure du réseau et du schéma de liaison à la terre. Il doit assurer une sélectivité en isolant le plus rapidement possible la partie du réseau en défaut tout en préservant les parties saines.

III.3.6. Choix d'un système de contrôle-commande :

Les installations industrielles nécessitent une gestion optimale de leur réseau électrique afin de garantir la disponibilité de l'énergie et réduire la facture d'énergie. (18)

III.3.6.1. L' optimisation de cette gestion :

Un système de contrôle-commande permet l'optimisation de cette gestion grâce aux fonctions d'automatismes telles que :

- Transfert de sources ;
- Reconfiguration de boucle ;
- Délestage/relestage ;
- Programmation horaire ou tarifaire ;
- Gestion des groupes de production interne ...

Il permet de plus de surveiller l'état du réseau électrique, de commander les équipements à distance et de prévoir les opérations de maintenance.

III.3.6.2. Conduire le réseau à distance :

La conduite à distance du réseau permet au personnel d'exploitation :

- De visualiser l'état du réseau électrique ;
- De surveiller les différentes mesures ;
- D' effectuer les commandes à distance ;
- D' être informé des incidents survenant sur l'installation électrique.

III.3.6.3. Améliorer l'efficacité et la rapidité de diagnostic et d'intervention sur le réseau :

L'efficacité et la rapidité de diagnostic et d'intervention sur le réseau sont améliorées grâce à l'intégration des fonctions suivantes :

- Gestion des automatismes de délestage/relestage et de transfert de sources ;
- Gestion des automatismes de ré accélération des moteurs a moyenne tension ;
- Gestion des groupes de production interne ;
- Chronologie fine ;
- Oscillo-perturbographie.

III.3.6.4. Optimiser le coût de l'énergie :

Le coût de l'énergie électrique est optimisé grâce aux fonctions suivantes :

- Programmation tarifaire ;
- Programmation horaire ;
- Gestion des groupes de production interne ;
- Compensation de l'énergie réactive ;
- Comptage et sous-comptage de l'énergie.

III.3.6.5. Optimiser la maintenance :

Le comptage du nombre de manœuvres effectuées par les appareils de coupure et le comptage du nombre d'heures de fonctionnement des appareils permet d'optimiser les opérations de maintenance.

III.3.7. Cas d' étude :

III.3.7.1. Introduction :

Le bon fonctionnement des installations industrielles dépend fortement de la disponibilité de l'électricité. Une alimentation électrique fiable et continue est essentielle pour assurer le bon fonctionnement des différents ateliers et équipements de toute usine. Par conséquent, la conception du réseau électrique doit garantir la puissance suffisante, la continuité du service, la sécurité du personnel et des équipements, ainsi que la qualité de l'alimentation électrique.

Dans ce chapitre, à titre d'étude de cas, nous proposons une étude d'une installation industrielle pour une usine standard de production dont le plan de masse comprend divers ateliers, notamment la réception, la préparation, la production, le stockage, l'atelier de maintenance, la station de pompage, le bâtiment administratif et l'usine de traitement des eaux, comme indiqué sur la figure III.1.

Comme indiqué précédemment, l'analyse du cahier des charges et de la documentation technique du projet révèle les contraintes et les données essentielles à l'étude de conception. Donc pour mener à bien cette étude, il convient tout d'abord de recueillir les caractéristiques techniques des différentes charges électriques (moteurs, transformateurs, générateurs, éclairage, etc.) afin d'obtenir un dimensionnement précis conforme aux exigences techniques et aux normes de sécurité. Ensuite, il est nécessaire de déterminer le bilan de puissance de l' installation du complexe de production et de dimensionner ces différents éléments afin de satisfaire les besoins énergétiques.

L'objectif est de mettre en évidence des méthodes de résolution de problèmes liés à la conception et avoir un savoir-faire pour débuter un bureau d' étude et de maintenance des systèmes électriques. C' est la raison pour laquelle certaines étapes ne sont pas abordées d'une manière détaillée.

III.3.7.2. Description de l'installation :

L'installation industrielle à alimenter est une usine de production qui s'étend sur une superficie de 32 hectares, situé au sud de Mostaganem, elle est constituée de plusieurs bâtisses :

- Une unité de réception-préparation.
- Un processus de production.
- Une unité de stockage.
- Un l' atelier de maintenance.
- Une unité d'épuration d'eau.
- Un bâtiment administratif.
- Une station de pompage.

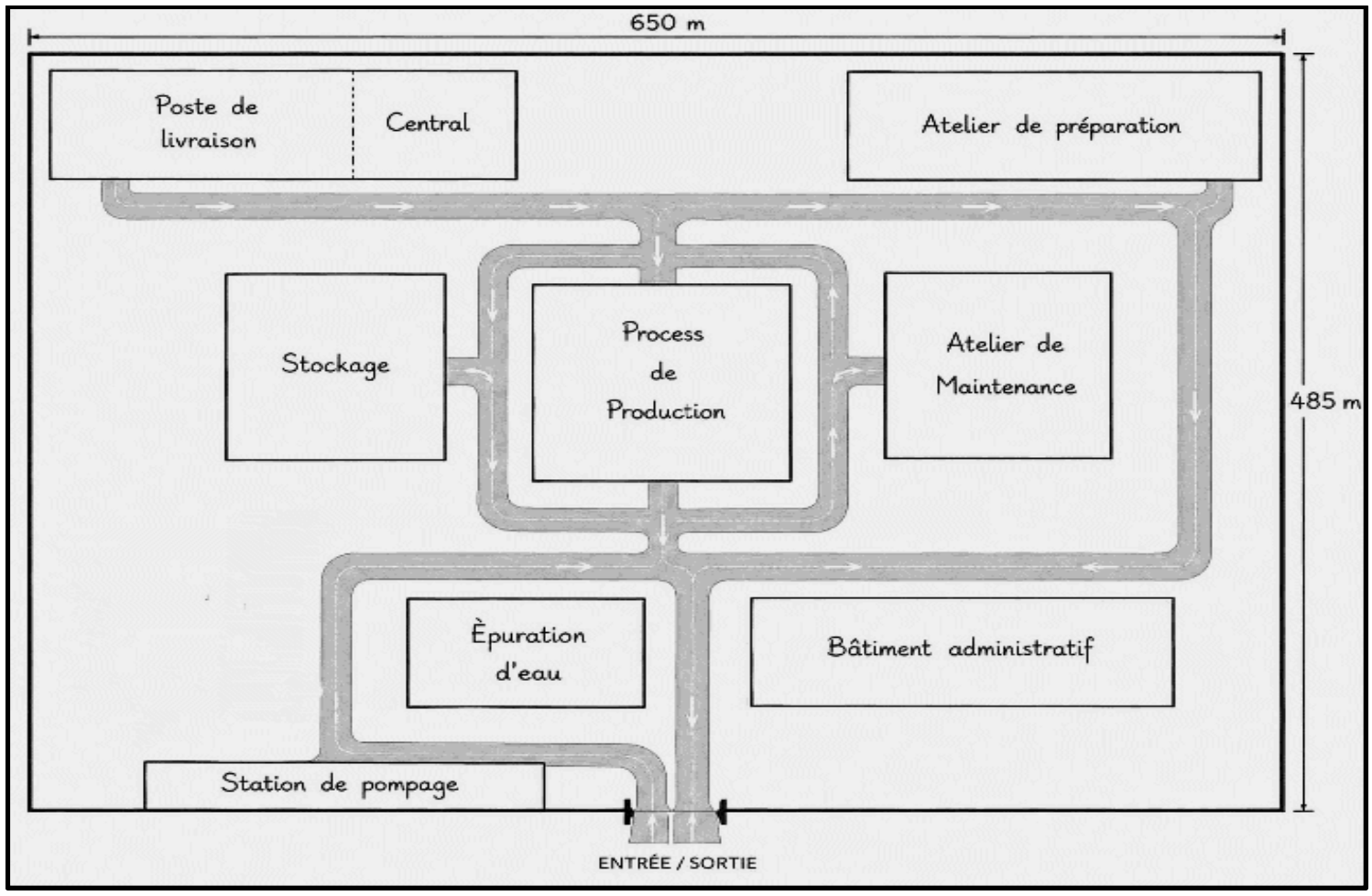


Figure III.1 : Plan de masse de l' installation.

III.3.7.3. Collecte de données :

III.3.7.3.1. Conditions d'environnement :

Ce Tableau III.1 résume les coordonnées géographiques du lieu de l' usine de production. Le climat de cette région est modéré donc pas de risque de déclassement des récepteurs.

Tableau III.1. Coordonnées géographiques du site.

Caractéristiques / Site	Longitude	Latitude	Altitude
Hassi-Maméche (Mostaganem)	0° 04' 23,55' ' E	35° 51' 37,20' ' N	137 m

Source : Mostaganem, Algérie-DB-City : Toutes les infos sur les Pays, Régions, Villes et Villages.

III.3.7.3.2. Données météorologiques du lieu :

Température :

La période *de la saison très chaude est allongée, du21juin* au*17 septembre*, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à *35 ° C*. La durée de *saison fraîche* est *4 mois*, du *21 novembre*au*23 mars*, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à *18 ° C*. Les températures ainsi indiquée n' influent pas sur le fonctionnement des moteurs et des équipements.

III.3.7.3.3. Classement des récepteurs :

Les caractéristiques des **moteurs MT** sont données dans le tableau III-2 :

Tableau III-2 : caractéristiques des moteurs MT.

Unité	Nombre	Rendement	Cos	P_m (kW) (1)	P (kW) (1)	Q (kvar)	S (kVA)	C_{max} C_N	$\frac{I_d}{I_n}$
Production	2	0,95	0,9	750	790	383	878	2,4	5,7
	2	0,93	0,78	280	301	242	386	2,3	5,0
Réception-préparation	1	0,93	0,78	280	301	242	386	2,3	5,0
Stockage	1	0,93	0,78	280	301	242	386	2,3	5,0

(1) P_m : puissance mécanique.

(2) P : puissance électrique.

Équipements perturbateurs :

Au niveau de l'unité de production, sont installés deux variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau III-3.

Tableau III-3 : caractéristiques des variateurs de vitesse.

Type	P (kW)	CosQ	S (kVA)	F_P	Q (kvar)	F_d	U_n (V)	Nombre
ATV52 V	110	0,85	204	0,54	68	0,63	400	2

III.3.7.3.4. Les Puissances nominales des récepteurs :

Le tableau III-4. Représente l' ensemble de toutes les charges de l' installation, ainsi que leurs puissances nominales (utiles), le courant nominal, facteur de puissance nominal, le rendement et leurs attachements fonctionnels. Les données devez être relevées des catalogues des récepteurs soit par recherche et comparaison ou bien ils sont fixés par le maitre d' œuvre du projet.

Tableau III-4 : Identification des différents circuits électriques de l' installation et Calcul des puissances.

Récepteur	Quantité	U(V)	P(KW)	Q(KVAR)	S(KVA)	Cos(Q)	In(A)	ρ %	Sab (KVA)
Départ 1 : Réception Préparation									

M° 1	1	5500	301	242	386	0.78	41	0,96	402
M° 2	1	400	150	113	188	0.80	271	0,93	201.61
Eclairage	3	400	30	69	75	0.4	108	0,98	76.53
Chauffage	2	400	150	0	150	1	217	0,98	153.06
Prise	5	400	3.6	10.4	11	0.4	16	0,98	9.18
Total	/	5500	301	242	386	/	41	/	402
	/	400	558	372	768	/	1109	/	783.22
Départ 2 : Process de production									
M° 1	2	5500	790	383	878	0.9	92	0,96	914.35
M° 2	2	5500	301	242	386	0.78	41	0,96	402
M° 3	3	400	220	136	259	0.85	374	0,94	275.34
Eclairage	4	400	30	69	75	0.4	108	0,98	76.53
Chauffage	3	400	300	0	300	1	433	0,98	306.12
Prise	10	400	3.6	10.4	11	0.4	16	0,98	9.18
Total	/	5500	2182	1250	2528	/	266	/	2632.7
	/	400	1716	788	2087	/	3013	/	2142.3
Départ 3 : Atelier de Maintenance									
M° 1	2	400	220	136	259	0.85	374	0,94	275.34
Eclairage	2	400	10	23	25	0.4	36	0,98	25.51
Ventilation	2	400	2	1.5	2.5	0.8	4	0,93	2.69
Compresseur	2	400	13	9	16	0.8	23	0,94	17.29
Four a résistance	2	400	15	0	15	1	22	0,90	16.67
Fluos	6	400	0.1	0	0.1	1	0.14	0,98	0.1
Prise	12	400	3.6	10.4	11	0.4	16	0,98	9.18
Presseuse	2	400	2	2	3	0.78	4	0,97	2.64
Tour	1	400	4	3	5	0.82	7	0,96	5.08
Presse	2	400	1.3	0.9	1.6	0.8	2.3	0,98	1.66
Poste de soudure	2	400	7	5.7	9	0.75	13	0,8	11.67

Pont roulant	2	400	11	9	14	0.8	20	0,87	15.80
Fraiseuse	2	400	6	3.6	7	0.85	10	0,97	7.28
Rectifieuse	2	400	3.5	2.6	4.4	0.8	6	0,98	4.46
Meule	2	400	2.6	1.95	3.25	0.8	5	0,96	3.39
Etau limeur	2	400	3.5	2.6	4.4	0.8	6	0,95	4.61
Rouleuse	2	400	4.55	2.81	5.35	0.85	8	0,95	5.63
Plieuse	2	400	4.55	2.81	5.35	0.85	8	0,95	5.63
Scie à ruban	2	400	2.5	1.66	3	0.82	4	0,98	3.11
Total	/	400	664.8	538.06	896.3	/	1290.44	/	922.6
Départ 4 : Stockage									
M° 1	1	5500	301	242	386	0.78	41	0,96	402
M° 2	1	400	120	90	150	0.8	217	0,93	161.29
Eclairage	2	400	45	103	113	0.4	163	0,98	114.80
Chauffage	2	400	100	0	100	1	144	0,98	102.04
Ventilation	2	400	2	1.5	2.5	0.8	4	0,92	2.72
Prise	10	400	3.6	10.4	11	0.4	16	0,98	9.18
Climatiseur	2	400	2	1.5	2.5	0.8	4	0,93	2.69
Total	/	5500	301	242	386	/	41	/	402
	/	400	454	406	696	/	1007	/	697.59
Départ 5 : Bâtiment administrative									
Eclairage	1	400	30	69	75	0.4	108	0,98	76.53
Chauffage	1	400	300	0	300	1	433	0,98	306.12
Climatiseur	1	400	2	1.5	2.5	0.8	4	0,93	2.69
Prise de bureau	4	400	2	4.5	5	0.4	7	0,99	5.05
Prise quotidien	3	400	3.6	10.4	11	0.4	16	0,99	9.09
Ascenseur	1	400	12	9	15	0.8	22	0,98	15.31
Total	/	400	362.8	128.7	445.5	/	643	/	448.12
Départ 6 : Epuration d' eau									

M° 1	1	400	80	60	100	0.8	144	0,93	107.53
Eclairage	2	400	3	6.8	7.5	0.4	11	0,98	7.65
Chauffage	2	400	90	0	90	1	130	0,98	91.84
Compresseur l' air	2	400	13	9.75	16.25	0.8	23	0,88	18.47
Mélangeurs	2	400	4.55	3.43	5.7	0.8	8	0,95	6
Total	/	400	301.1	99.96	338.9	/	488	/	355.45
Départ 7 : station de pompage									
Station de pompage	2	400	160	120	200	0.8	289	0.93	215.05
Total	/	400	320	240	400	/	578	/	430.1

U(V) : tension nominale.

P(KW), Q(KVAR), S (KVA) : puissances nominales.

Cos(Q) : nominale.

In(A) : nominale.

ρ % : Rendement.

$$Sab = \frac{P}{\rho \times \cos Q} \qquad (III.1)$$

Nous avons donc le bilan des puissances installées de l' installation résumé dans le tableau suivant :

Tableau III-5 : Bilan de puissance globale de l' installation.

U (V)	PT (KW)	QT (Kvar)	SabT (Kva)	In(A)
5500	2784	1734	3436.7	348
400	4376.7	2572.72	5779.38	8128.44

III.3.7.3.5. Classement des récepteurs par priorité :

Les charges qui peuvent être délestées en cas de défaillance du réseau public, sans incidence sur la production, représentent :

- 0% du processus de production (charge prioritaire).
- 0% de l'unité d'épuration d'eau (charge prioritaire).
- 0% de la station de pompage (charge prioritaire).
- 50% de l'unité de réception-préparation.
- 50% de l'unité de stockage.
- 50% des ateliers de maintenance.
- 50% du bâtiment administratif.

III.7.3.6. Contraintes du réseau public :

Puissance de court-circuit égale à 200 MVA sur un réseau aérien 20 Kv ;

Courant de défaut à la terre limité à300 A ;

Continuité de service moyenne :

- Coupures brèves : inférieur ou égale 100 par an.
- Coupures longues : inférieur ou égale 20 par an.

Les autres caractéristiques sont conformes à la norme EN 50160. (18)

III.3.7.4. Elaboration d'un premier schéma unifilaire :

III.3.7.4.1. Bilan de puissance demandé par l' usine :

Le bilan des puissances a installé est calculé pour chaque unité sur la base des puissances relevés dans le tableau (III-6) après application des facteurs d'utilisation et de simultanéité. Pour la détermination de la puissance totale de l'installation, on applique un facteur de simultanéité global de 0,95 à la somme des puissances de chaque unité.

Pour déterminer la puissance d' utilisation du TGBT, il faut une bonne connaissance des facteurs d' utilisation de chaque charge, cette puissance est donnée par la relation suivante :

$$Su = Ku \times Sab \qquad \text{(III.2)}$$

Cette puissance est déterminée en établissant la somme de toutes les puissances utiles du groupe de récepteurs alimenté par la même branche, multipliée par le facteur de simultanéité correspondant. Elle est donnée par la relation suivante :

$$Suj = Ks \times \sum Sui \qquad \text{(III.3)}$$

Cette puissance nous servira ensuite, au calcul de la puissance à prévoir au poste de transformation et ce, en prenant en compte l' évolution de la charge :

$$Sut = Ks \times Ke \times \sum Suj \qquad \text{(III.4)}$$

$$Ib = \frac{Su}{\sqrt{3} \times U} \times Ks \times Ku \qquad \text{(III.5)}$$

Tableau III-6 : Bilan de puissance utilisée de l' installation.

Récepteurs	Quantité	U(v)	S ab kVa	Ku	Su kVa	Ks1	Ss1 KVa	Ks2	Ss2 KVa	Ks3	$Ss3_T$ KVa	Ib (A)	Iz (A)
Départ1 : récepteur préparation													

M1	1	5500	402	0.8	321.6	/	321.6	0.9	289.44	0.95	262.59	27.56	34.45
M2	1	400	201.61	0.8	161.3	0.8	129.04		427.44		406.07	586.11	732.64
Eclairage	3	400	229.59	0.75	172.19		137.75						
Chauffage	2	400	306.12	0.7	214.28		171.42						
Prise	5	400	45.9	1	45.9		36.72						
Départ2 : process de production													
M1	2	5500	1828.7	0.8	1463	/	1463	0.9	1895.58	0.95	1800.8	189.03	236.3
M2	2	5500	804	0.8	643.2		643.2		1170.05		1111.55	1604.38	2005.48
M3	3	400	826.02	0.8	660.82	0.8	528.66						
Eclairage	4	400	306.12	0.75	229.59		183.67						
Chauffage	3	400	918.36	0.7	642.85		514.28						
Prise	10	400	91.8	1	91.8		73.44						
Départ3 : atelier de maintenance													
M° 1	2	400	550.68	0.8	440.54	0.8	352.43	0.9	542.86	0.95	515.72	744.38	930.48
Eclairage	2	400	51.02	0.75	38.27		30.62						
ventilation	2	400	5.38	0.8	4.30		3.44						
Compresseur	2	400	34.58	0.8	27.66		22.13						
Four	2	400	33.34	1	33.34		26.67						
Fluos	6	400	0.6	1	0.6		0.48						
Prise	12	400	110.16	1	110.16		88.13						
Persseuse	2	400	5.28	0.8	4.22		3.38						
Tour	1	400	5.08	0.8	4.06		3.25						
Presse	2	400	3.32	0.75	2.49		2						
Soudure	2	400	23.34	0.7	16.34		13.07						
Pont roulant	2	400	31.6	0.7	22.12		17.7						
fraiseuse	2	400	14.56	0.8	11.65		9.32						
rectifieuse	2	400	8.92	0.7	6.24		5						
Meule	2	400	6.78	0.7	4.75		3.8						
Eteau limeur	2	400	9.22	0.7	6.45		5.16						
rouleuse	2	400	11.26	0.7	7.88		6.3						
Plieuse	2	400	11.26	0.7	7.88		6.3						
Scie à ruban	2	400	6.22	0.8	5		4						

Départ4 : Stockage												
M1	1	5500	402	0.8	321.6	/	321.6	0.9	289.44	0.95	275	28.87	36.09
M2	1	400	161.29	0.8	129.03	0.8	103.22		392.08		372.48	537.63	672.04
Eclairage	2	400	229.6	0.75	172.2		137.76						
Chauffage	2	400	204.08	0.7	142.86		114.3						
Ventilation	2	400	5.44	0.8	4.35		3.48						
Prise	10	400	91.8	1	91.8		73.44						
climatiseur	2	400	5.38	0.8	4.30		3.44						
Départ5 : Station de pompage													
Station de pompage	2	400	430.1	0.8	344.08	0.8	275.26	0.9	247.73	0.95	235.34	339.68	424.6
Départ6 : Bâtiment administrative													
Eclairage	1	400	76.53	0.75	57.40	0.8	45.92	0.9	236.23	0.95	224.42	323.92	404.9
Chauffage	1	400	306.12	0.7	214.28	0.8	171.42						
Climatiseur	1	400	2.69	0.8	2.15	0.8	1.72						
Prise de bureau	4	400	20.2	1	20.2	0.8	16.16	0.9					
Prise quotidien	3	400	27.27	0.8	21.82	0.8	17.46						
Ascenseur	1	400	15.31	0.8	12.25	0.8	9.8						
Départ 7 : Epuration d' eau													
M1	1	400	107.53	0.8	86.02	0.8	68.82	0.9	190.96	0.95	181.41	261.84	327.3
Eclairage	2	400	15.3	0.75	11.48		9.18						
Chauffage	2	400	183.68	0.7	128.58		102.86						
Compresseur	2	400	36.94	0.8	29.55		23.64						
Mélangeur	2	400	12	0.8	9.6		7.68						

Nous avons donc le bilan des puissances installées de l' installation résumé dans le tableau suivant :

Tableau III-7 : Bilan de puissance totale de toute l' installation.

/	U (V)	S_{fT} (Kva)	Ib (A)
Total	5500	2338.39	245.46
Total	400	3045	4395.07

Pour notre installation, en introduisant **un facteur d' extension** qui est égal à **1.4**, on obtient :

Tableau III-8 : Bilan de puissance totale de toute l' installation.

/	U (V)	Ke	SeT (Kva)	Ib (A)
Total	5500	1.4	3273.74	343.64
Total	400	1.4	4263	6153.10

En peut faire des calculs pour calculer le Cos Q :

Tableau III-9 : Bilan de puissance totale de toute l' installation.

/	U (V)	Ke	PeT (KW)	QeT (Kvar)
Total	5500	1.4	2665.96	1660.45
Total	400	1.4	2641.53	1910.3

Tableau III-10 : Résumé des puissances totales.

Total installée	Pa(kW)	Q(kvar)	S(kVA)	Ib (A)
	5307.49	3570.75	7536.74	6496.74

III.3.7.4.2. Choix des niveaux de tension :

Tension d'alimentation du distributeur :

Une tension d'alimentation de 20 kV provenant du réseau public de distribution est adaptée aux besoins en puissance de l' usine, qui avoisine 7.5 MVA. La puissance de court-circuit de 200 MVA équivaut à environ 230 fois la puissance apparente de la charge la plus importante, soit environ 4 MVA. Par conséquent, cette robustesse du réseau public de distribution atténuera l'impact des perturbations aléatoires générées par les récepteurs.

Tensions de distribution

Le choix d'une tension de distribution moyenne tension de 5,5 kV dépend des éléments suivants :

- La présence des motrices moyennes tensions répartis sur le site (voir tableau III-2).
- La consommation électrique de chaque moteur.
- La superficie du site, qui comprend des distances allant de 300 m à 1 000 m.

Pour les tensions BT, une tension triphasée de 400 V est suffisante pour alimenter les charges les plus importantes.

III.3.7.4.3. Les sources d'énergie :

Source principale :

L'usine sera alimentée par trois lignes standard de 20 kV provenant de trois sources différentes afin de garantir l'alimentation électrique et de réduire la charge sur chaque source. (18)

Source de remplacement :

En cas de coupure de courant sur le réseau public, l'usine sera alimentée par trois groupes de secours raccordée au jeu de barres 5,5 kV du poste de transformation. Cette source de secours fonctionnera indépendamment du réseau principal et alimentera les charges prioritaires.

Source de sécurité :

Pour assurer la sécurité des personnes et des biens, un système d'alimentation sans interruption (ASI) de 300 kVA est prévu pour le système de contrôle commande de la production et pour l'éclairage de secours.

Ce système ASI sera secourue par un groupe électrogène de 300 kVA pour alimenter le tableau de distribution basse tension de l'unité de production, afin de pallier l'autonomie limitée des batteries d'accumulateurs (10 à 30 min.).

III.3.7.4.4. Choix des régimes de neutre :

En moyenne tension :

La présence des moteurs de moyennes tensions impose une limite maximale de 30 ampères au courant de défaut à la terre dans un réseau de tension de 5,5 kV. Donc on opte pour un neutre mis à la terre par résistance de limitation. **(18)**

En basse tension :

– Processus de production : les exigences sur la continuité de service imposent le choix du neutre isolé. Pour l'éclairage, on utilise un transformateur BT/BT pour passer au schéma de liaison à la terre TT.

– Pour le reste de l'installation, on opte pour le schéma TT, notamment pour ne pas endommager les moteurs en cas de défaut à la terre.

III.3.7.4.5. Choix de la structure du réseau :

- Les données et les éléments qui ont été prédéfinis nous permettent d'établir un premier schéma unifilaire du réseau (voir fig. III–2). **(18)**
- **Poste de livraison :**
- Le poste de raccordement est alimenté par trois lignes de 20 kV connectées à trois transformateurs 20 kV/5,5 kV débitant sur un jeu de barres 5,5 kV avec couplage.
- **Réseau interne :**

L'unité de production sera alimentée par une liaison à double antenne avec couplage sur la MT et la BT. Les unités de réception, de traitement et de stockage seront alimentées seront alimentées en simple antenne. Les autres unités seront alimentées par une liaison en boucle ouverte (coupure d'artère) en raison des distances importantes.

III.3.7.4.6. Gestion de l'énergie et choix de la tarification optimale :

Cela peut notamment comprendre:

- Le suivi et l' analyse de la consommation d' électricité ;
- La réduction des consommations inutiles ;
- L' amélioration de l' efficacité énergétique des équipements ;
- Le choix entre différentes offres et options tarifaires ;
- L' adaptation de la consommation aux périodes où l' électricité est moins chère.

III.3.7.4.7. Schéma unifilaire de l'installation proposée :

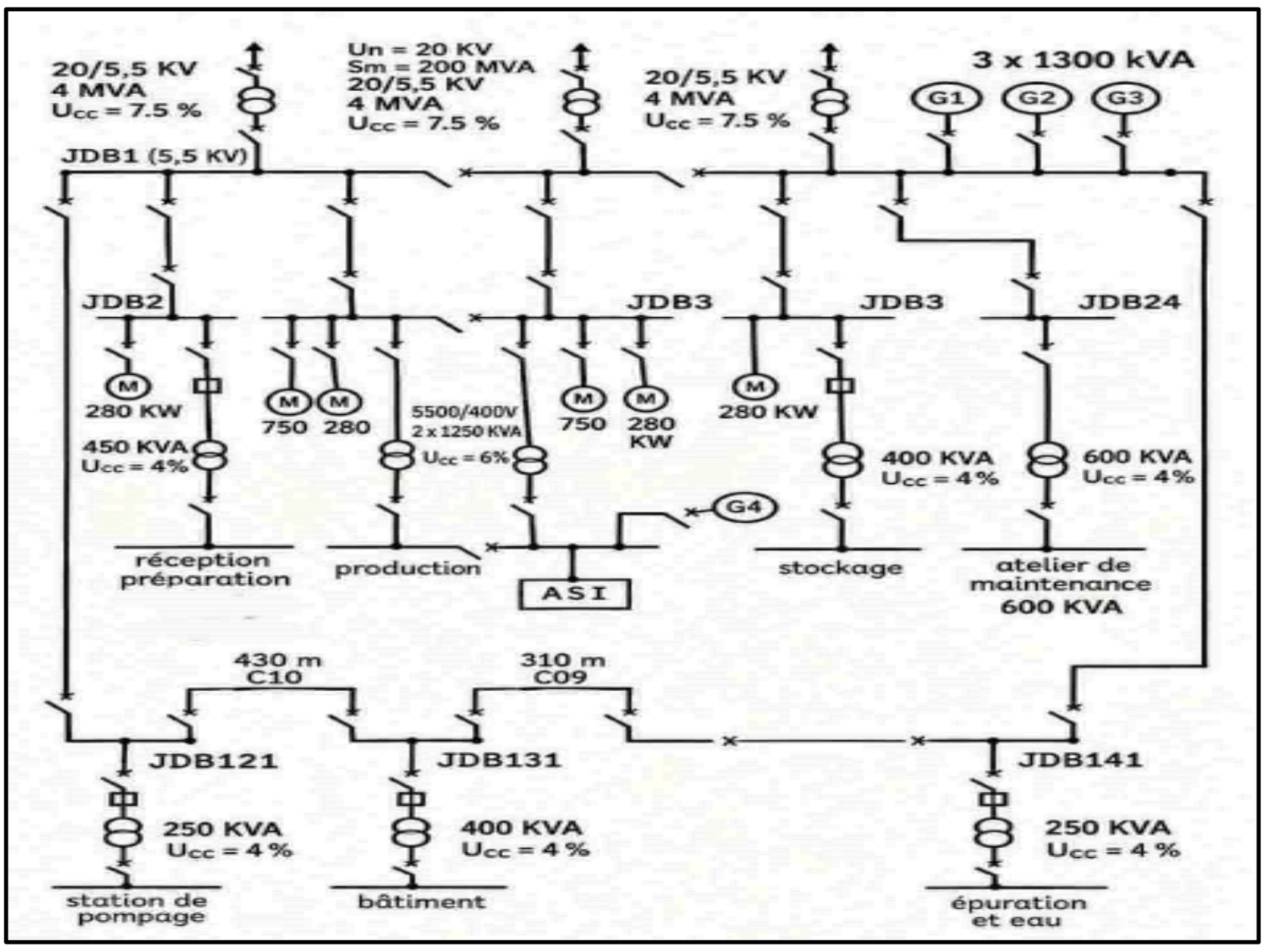


Figure III–2 : schéma unifilaire de l'installation.

III.3.7.5. Etudes techniques et homologation du schéma unifilaire :

III.3.7.5.1. Détermination du facteur de puissance total de l' installation pour le JDB 5.5 KV :

Le facteur de puissance est un indicateur de la qualité de la conception et de la gestion d'une installation électrique. Il repose sur deux notions très basiques : les puissances active et apparente.

La puissance active P (kW) est la puissance réelle transmise à des charges telles que moteurs, lampes, appareils de chauffage, ordinateurs. La puissance active est

transformée en énergie mécanique, chaleur ou lumière. La puissance apparente est la base du dimensionnement de l' équipement électrique.

Le facteur de puissance PF est le rapport de la puissance active P (kW) sur la puissance apparente S (kVA).

$$\text{Cos Q} = \frac{\text{P}}{\text{SeT}} \qquad \text{(III.6)}$$

$$\text{Cos Q} = \frac{2665.96}{3273.74}$$

$$\text{Cos Q} = \mathbf{0.81}$$

III.3.7.5.2. Choix des transformateurs :

Le réseau de distribution alimente l'installation en 20 kV. Afin d'assurer l'alimentation des différents départs MT, la tension est abaissée à 5,5 kV à l'aide de trois transformateurs principaux.

Après l'établissement du bilan de puissance de l'installation, la puissance apparente totale a permis de déterminer la puissance nominale nécessaire du transformateur. En se référant aux puissances normalisées, le choix s'est porté sur trois transformateurs de 4 MVA, de rapport de transformation 20/5,5 kV. Ce choix garantit l'alimentation de l'ensemble des charges, tout en assurant une réserve de puissance pour les surcharges temporaires et les extensions futures de l'installation.

Les transformateurs retenus sont de type 20/5,5 kV, de puissance nominale 4 MVA, avec une tension de court-circuit Ucc = 7,5 % et un groupe vectoriel Dyn11.

III.3.7.5.2.1. Première possibilité :

Deux transformateurs à 100 % de la puissance On installe deux transformateurs, chacun ayant une puissance égale à la puissance totale de l'installation. En fonctionnement normal, la charge est répartie entre les deux transformateurs (≈ 50 % chacun).

En cas de défaillance d'un transformateur, le second assure à lui seul 100 % de l'alimentation de l'installation.

Avantages :

- Continuité de service élevée.
- Fiabilité importante.

Inconvénients :

- Plus coûteux, car chaque transformateur est dimensionné pour la puissance totale.

III.3.7.5.2.2. Deuxième scénario :

Trois transformateurs (3 × S) Trois transformateurs sont installés et la charge est répartie entre eux. En régime normal, chaque transformateur fonctionne à environ

45 % de sa puissance nominale (selon le dimensionnement retenu). En cas de défaillance d'un transformateur, les deux autres reprennent la charge et fonctionnent à environ 67 % de leur puissance nominale.

Avantages :

- Très bonne continuité de service.
- Meilleure répartition des charges.
- Les transformateurs ne sont pas fortement sollicités, même en cas de panne de l'un d'eux.

Inconvénients :

- Coût d'installation et de maintenance plus élevé (trois transformateurs).

Protection, commande et exploitation plus complexes.

III.3.7.5.2.3. Comparaison :

Le choix de trois transformateurs a été retenu, car il représente une solution plus avantageuse sur le plan technique et économique. En effet, l'utilisation de transformateurs de puissance moyenne permet de réduire les difficultés liées au transport, à l'installation et à la mise en service, contrairement à deux transformateurs de très grande puissance. De plus, cette configuration assure une meilleure répartition de la charge et garantit une bonne continuité de service en cas de défaillance de l'un des transformateurs.

III.3.7.5.2.4. Calcul du rapport de transformation :

Pour le calcul du rapport de transformation, on utilise la formule suivante, tout en supposant que le primaire et le secondaire ont le même couplage :

$$m = \frac{N2}{N1} = \frac{U2}{U1} = \frac{I1}{I2} \qquad \text{(III.7)}$$

Avec :

- I1, I2 : Courant primaire et secondaire du transformateur ;
- N1, N2 : Nombre de spires au primaire et au secondaire du transformateur
- U1, U2 : Tension primaire et secondaire du transformateur.

$$m = \frac{U2}{U1} = \frac{5.5}{20} = 0.275$$

Le rapport de transformation est égal à : $m = 0{,}275$

III.3.7.5.2. 5. Calcul du courant secondaire par un transformateur :

Le courant assigné au secondaire du transformateur, est déterminé par l' expression :

$$I2n = \frac{Sn}{\sqrt{3} \times U} \qquad \text{(III.8)}$$

Avec :

- In : Courant assigné du transformateur, côté MT (valeur efficace) en (A)

- Sn : puissance assignée du transformateur (kVA).
- $U20$: Tension assignée secondaire (à vide) du transformateur en (V).

A.N :

$$I2n = \frac{4000}{\sqrt{3} \times 5.5} = 420\ A$$

Donc, le courant secondaire du transformateur égal à : 420 A

III.3.7.5.2.6. Calcul du courant primaire :

Pour calculer le courant primaire du transformateur, on applique la formule suivante :

$$m = \frac{I1}{I2}$$

$$\rightarrow I1 = m \times I2 \qquad \text{(III.9)}$$

A.N:

$$I1 = 0.275 \times 420 = 115.5\ A$$

Donc, le courant primaire du transformateur est égal à :115.5 A

III.3.7.5.2.7. Détermination du tension de court-circuit Icc :

Pour le transformateur de distribution (norme IEC60076), Ucc a des valeurs normalisées. On trouve que la tension de court- circuit de notre transformateur Ucc= 7.5 % U20, ce qui nous donne Ucc= 1500V.

$$Ucc\ (v) = \frac{Ucc\ \%}{100} \times Un \qquad \text{(III.10)}$$

Le tableau suivant nous présente les caractéristiques du transformateur adéquat pour notre installation après avoir effectué les calculs nécessaires du bilan de puissance.

Avec :

$$Zt = \frac{Ucc\ \%}{100} \times \frac{Un\hat{}2}{Sn} \qquad \text{(III.11)}$$

Tableau III-11 : Caractéristiques du transformateur adéquat pour l' installation.

Puissance apparente (kVA)	Tension primaire (kV)	Tension secondaire (KV)	Courant primaire (kA)	Courant secondaire (kA)	m	Ucc= 7.5% U20	Zt
4000	20	5.5	115.5	420	0.275	1500	7.5

III.3.7.5.3. Choix des alternateurs :

La puissance à secourir est déterminée à partir du bilan de puissance au point de livraison auquel on soustrait les charges délestables en leur appliquant le facteur de simultanéité global :

Tableau III-12 : le classement des charges.

Atelier	P(kW)	Q(KVAR)	Sab (KVA)	Délestage

Départ 1 : Réception Préparation	859	614	1185,22	50%
Départ 2 : Procès de production	3898	2038	4775	00%
Départ 3 : Atelier de Maintenance	664.8	538.06	922.6	50%
Départ 4 : Stockage	755	648	1099,59	50%
Départ 5 : Bâtiment administrative	362.8	128.7	448.12	50%
Départ 6 : Epuration d' eau	301.1	99.96	355.45	00%
Départ 7 : station de pompage	320	240	430.1	00%

$S_{ab} = (4775+355.45+430.1) - 0{,}95 \times \left((1185{,}22 + 922.6 + 1099{,}59 + 448.12) \times 0{,}5 \right) = 3824.28$ kVA (III.12)

On choisit trois alternateurs 1300 kVA dont les caractéristiques sont données dans le tableau suivant :

Tableau III–13 : caractéristiques des alternateurs.

Type	$U_n\,(V)$	$S\,(kVA)$	$X''_d\,(\%)$	$\cos\phi_n$
LSA 545A	5500	3 x 1300 = 3900	18,4	0,8

III.3.7.5.4. Calcul des courants de court–circuit :

Les calculs des courants de court–circuit sont effectués à l'aide du logiciel SELENA de Schneider pour les différentes configurations de source :

- Réseau alimenté seulement par le distributeur.
- Réseau alimenté seulement par les alternateurs.
- Réseau alimenté par les alternateurs couplés au distributeur.

La méthode de calcul utilisée est conforme à la norme CEI 909.

III.3.7.5.5. Dimensionnement du câble de tableau de distribution 20 KV vers le JDB1 de 5.5KV :

▪ Détermination de la section $S1$ du câble pouvant véhiculer le courant Iz.

III.3.7.5.5.1. Calcul de courant Ib :

Le courant maximal d'emploi (Ib) est défini selon la nature de l'installation alimentée par la canalisation. C' est le courant correspondant à la plus grande puissance transportée par le circuit en service normal qui est calculé par la formule suivante :

$$Ib = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times cos\varphi} \qquad \text{(III.13)}$$

Avec :

U : tensions composées en triphasée.

P : Puissance absorbée, en tenant compte de l' ensemble des facteurs.

$\cos\varphi$: Facteur de puissance du récepteur.

Dans notre cas le courant primaire de transformateur est :

$$Ib = \frac{Sn}{\sqrt{3} \times Un} \qquad \text{(III.14)}$$

$$I\,b = In = \frac{4000}{\sqrt{3} \times 5.5} \rightarrow Ib = 420\ A$$

III.3.7.5.5.2. Détermination des sections des conducteurs :

L'étude est limitée aux canalisations 5,5 kV

Caractéristiques des canalisations :

Les canalisations sont constituées de 3 câbles unipolaires 6/10 (12) kV en cuivre isolés au PR, posés directement dans des caniveaux fermés dans une température de 30 ° C.

Les canalisations ne comportent pas de groupement de plusieurs circuits.

La canalisation correspond au mode de pose L4

La colonne (3) des tableaux de courant admissible doit être utilisée.

Les facteurs de correction à appliquer sont :

Température ambiante : K 1 =1

Groupement de plusieurs circuits : K 2 =1

Mode de pose : *K3*=0,8

- Le facteur de correction global est :

Kc →K1 × K2 × K3 → Kc= 0,8. (III.15)

III.3.7.5.5.3. Le courant admissible :

–Le courant équivalent que le câble doit pouvoir véhiculer dans les conditions standards d'installation est : $Iz = \frac{Ib}{Kc}$ (III.16)

- D' après le tableau de dimensionnement des câbles, la section normalisée retenue est :

Pour le départ de réception–préparation et stockage (Iz = 34.45 et Iz = 36.09), donc la section de câble Sz = 4 mm^2 et d' intensité nominal maximale de 45 A.

Pour le départ de production Iz = 236.3, donc la section de câble Sz = 70 mm^2 et d' intensité nominal maximale de 268 A.

III.3.7.5.5.4. Vérification de la contrainte thermique :

Il est recommandé de vérifier la tenue thermique au court–circuit (c' est le courant maximal que peut supporter un câble) selon norme CEI 60949 pour valider les sections face à un éventuel défaut. Pour cela on va négligeant l'impédance amont au transformateur et l'impédance de la liaison transformateur–jeu de barres, le courant de court–circuit maximal à l'origine du câble est égal au courant de court–circuit du transformateur.

On calcule l' impédance du transformateur :

On suppose que le transformateur MT à une puissance S = 7.5MVA

$$Z \quad t = \frac{Un^2}{Sn} \times \frac{Un\%}{100} \rightarrow \frac{(20 \times 10\hat{}3)^2}{4 \times 10\hat{}6} \times \frac{7.5}{100}$$

= 7.5 Ω (III.17)

Avec :

III.3.7.5.5.5. Calcul de courant de court-circuit Icc :

$$Icc = 1.1 \times \frac{Un}{\sqrt{3} \times Zt} \quad \text{(III.18)}$$

A.N : $$Icc = 1.1 \times \frac{20000}{\sqrt{3} \times 7.5}$$

Icc=1.7 KA

III.3.7.5.5.6. Calcul de section de court-circuit Scc :

On suppose que le temps d'élimination maximal du court-circuit est t =1 seconde.

La section des conducteurs satisfaisant à la contrainte du court-circuit est :

$$Scc = \frac{Icc\sqrt{t}}{k} \quad \text{(III.19)}$$

A.N : $$Scc = \frac{(1.7 \times 10^3) \times \sqrt{1}}{143}$$

Scc = 11.9 mm^2

Avec :

t = 1 s : le temps de fonctionnement total du dispositif de protection ou la tenue au court-circuit de l' appareillage.

K : coefficient dépendant du matériau et de l' isolation (Cu/ XLPE → 143).

Tableau III-14 : la sélection de la section adéquate.

Paramètre	Section de câble en ($mm2$)
S1	4 mm^2
S2	70 mm^2
S3	11.9 mm^2
Section choisi finale	S = max (S1,2,S3)=70 mm^2

La section minimale à retenir est donc : $S2$=70 $mm2$

III.3.7.5.5.6. Chutes de tensions :

Les chutes de tension en régime normal sont inférieures à 4 %, en tout point du réseau 5,5 kV. Elles ne sont donc pas contraignantes.

III.7.5.6. Compensation de l'énergie réactive :

La puissance réactive à compenser est calculée de façon à limiter à tgQ_0 = 0,4 au point de Livraison.

III.3.7.5.6.1. Détermination de la puissance réactive totale à compenser :

Le bilan des puissances des tableaux III-4 et tableau III-10 donne les puissances totales suivantes :

P = 5307.49 kW

Q = 3570.75 kvar

S = 7536.74 kVA

cos Q = 0,81 → $\tan Q = \frac{Q}{P} = \frac{3570.75}{5307.49} = 0,673$

On en déduit:

$Q_C = P(tg\phi - tg\phi 0) = 5307.49\ (0,673 - 0,4) = 1448.94$ **kvar.**

III.3.7.5.6.1. Choix de l'emplacement des condensateurs :

Supposons que la demande minimale de puissance réactive appelée par l'usine soit de 200 kvar ; cette puissance sera installée dans le poste de transformation 5,5 kV, sur le tableau de distribution JDB1.

Le tableau III-12, montre que l'unité de production est la plus consommatrice d'énergie et elle comprend également des moteurs de moyennes et de basse tension dont leurs la courbe de charge est très irrégulière. Il est donc nécessaire d'installer des batteries de condensateurs en gradins sur les deux jeux de barres (MT (JDB 2), BT (JDB 3)) alimentant les moteurs. Ces batteries seront commandées par un relais varmétrique afin d'adapter la courbe de charge. Le reste de la compensation est effectué par des batteries fixes. Le tableau (III-15) donne un récapitulatif de l'emplacement des batteries de condensateurs. (18)

Tableau III- 15 : emplacement des batteries de condensateurs.

Emplacement	Poste de livraison	Unité de production		Réception-préparation	Stockage	Total
		MT (JDB 2)	BT (JDB 3)			
Q_C (kvar)	200	600	200	75	75	1150

III.3.7.5.6.2. Interprétation :

La puissance à compenser n'est pas très importante et est essentiellement située en MT. Les longueurs des liaisons MT étant assez faibles, les pertes joule dues à la puissance réactive sont presque négligeables. Il n'est donc pas utile de faire un calcul d'optimisation économique.

III.3.7.5.7. Etude des harmoniques :

L' alimentation sans interruption de puissance 250 kVA est munie d' un filtre d' entrée qui réduit les valeurs des courants harmoniques suffisamment pour qu' elles soient négligeables.

L' étude consiste à déterminer les taux de distorsion en courant et en tension générales par les variateurs de vitesse pour différentes configurations du réseau et de déterminer les moyens de les réduire à un niveau acceptable.

Les deux variateurs de vitesse, de puissance identique, sont raccordés aux départs 400 V pour commander les moteurs électriques et constituent les sources d'harmoniques étudiées.

CCX WWWWWWWWWXRG

Tableau III–16 : courants harmoniques générés par les variateurs ATV–52V.

Rang	1	5	7	11	13	17	19	23	25
courant (%)	100	85	72	41	27	8	5	6	5

Les simulations seront réalisées à l' aide du logiciel « ETAP » pour différentes configurations des sources :

- L' usine alimentée par le distributeur seul.
- L' usine alimentée par les groupes de secours, les condensateurs restant connectés.
- L' usine alimentée par les trois sources en parallèle, les condensateurs restant connectés.

Les résultats de simulation des harmoniques seront interprétés en chapitre quatre.

III.3.7.5.8. Démarrage des moteurs :

Etude de démarrage des moteurs :

L' étude a été effectuée par des simulations sur le logiciel « start' n Go » de Schneider :

Pour le moteur le plus puissant de l' installation

Pour le démarrage simultané des 4 moteurs MT de l' unité de production en utilisant un moteur « équivalent » (le logiciel ne permet d' étudier qu' un seul moteur à la fois).

III.3.7.5.8.1. Etude du démarrage du moteur 750 Kw :

Caractéristiques de l' ensemble moteur – charge (voir tableau III–17)

Tableau III–17 : caractéristiques de l' ensemble moteur – charge.

Eléments	*Pn* (kW)	Rendement	Vitesse Tr/min	Moment d' inertie (kg m²)	*Un* (V)	cos
Moteur Asynchrone	750	0,96	1485	135	5500	0,9
Compresseur sans ventelles	300	–	1485	200	–	–

Nota : Les autres caractéristiques du moteur sont données dans le tableau III–2.

III.3.7.5.8.2. Diagnostic du démarrage :

Durée du démarrage : 8.9 s

Intensité du démarrage : 296 A

Le courant de démarrage donné par le constructeur est déterminé pour une puissance de court–circuit, sa valeur est de 315 A. La valeur déterminée par le logiciel est plus faible car celui–ci tient compte de la chute de tension au point de raccordement du moteur. (18)

Chutes de tension :

6,26% sur le jeu de barres JDB 2 5,93 % sur le jeu de barres JDB 1 1,57% au point de livraison (20kV)

Ces valeurs sont acceptables pour le moteur et les autres récepteurs alimentés par JDB 2 et JDB 1, et pour le distributeur dont la variation de tension doit être inférieure à 4 % (voir tableau III.2, EN 50 160). **(18)**

Echauffement du moteur :

Le logiciel possède une base de données des contraintes admissibles au démarrage, déterminée à partir des caractéristiques d' échauffement des moteurs. Celle–ci nous fournit les contraintes admissibles par notre moteur, soit $922 kA^2 \times s$ à froid et $298 kA\& \times s$ à chaud.

La contrainte réalisée au démarrage est de $602 kA^2 \times s$.Le moteur supportera donc le démarrage à froid, mais pas le démarrage à chaud. **(18)**

III.3.7.5.8.3. Etude du démarrage simultané des 4 moteurs MT de la production :

Les caractéristiques des moteurs sont données dans le tableau III–2.

On suppose que les valeurs des moteurs sont données dans le tableau III–2.

On suppose que les valeurs des moments d' inertie de chaque moteur et de chaque charge sont connues.

On détermine un *Cos* Q de chaque moteur en leur affectant un coefficient égal à la puissance :

$$\cos\phi = \frac{\sum_{i=1}^{4} Pi \times \cos Q}{\sum_{i=1}^{4} Pi} = \frac{(790 \times 2 \times 0.9) + (301 \times 2 \times 0.78)}{2 \times 790 + 2 \times 301} = 0.87$$

On détermine de la même manière le courant de démarrage équivalent :

$$\frac{Ist}{In} = \frac{(790 \times 2 \times 5.7) + (301 \times 2 \times 5)}{2 \times 790 + 2 \times 301} = 5.5$$

On en déduit les caractéristiques de l' ensemble moteur – charge équivalent (voir tableau III–18).

Tableau III–18 : caractéristiques de l' ensemble moteur – charge équivalent.

Eléments	*Pn(kW)*	Rendement	Vitesse Tr/min	Moment d' inertie (kg m²)	*Un* (V)	cos	*Id In*
Moteur équivalent	1230	0,95	1485	370	5500	0,87	5,5
Charge équivalente	900	–	1485	600	–	–	–

Diagnostic du démarrage :

Durée du démarrage : 13,7 s

Intensité de démarrage : 765 A

Chutes de tension :

16,2% sur le jeu de barres JDB 2 15,4% sur le jeu de barres JDB 1

Les chutes de tension sont importantes et risquent de perturber le réseau. D' autre part, les moteurs subissent un échauffement important au démarrage, car la chute de tension provoque une augmentation de la durée du démarrage. Il sera donc préférable de démarrer les moteurs successivement.

III.3.7.6. Détermination du plan de protection :

Etude de la sélectivité des protections :

On se propose d' étudier la sélectivité des protections à maximum de courant phase pour trois éléments du réseau MT (voir tableau III–12) :

- Le transformateur MT/BT de l' unité de production, TR22
- Le moteur MT, ASM1
- Le câble MT, C01.

Obtenir la sélectivité quelle que soit la configuration des sources (Source réseau seul, EJP seul, EDF+EJP) est parfois difficile, voire même impossible. Dans ce dernier cas, il faut prévoir deux plans de protection, un pour EDF et EDF+EJP et un autre pour EJP seul. Un changement de configuration de source provoquera, le cas échéant, la

modification des réglages des protections (le Sepam 2000 offre cette possibilité).
On se limite à l' étude du cas de l' alimentation par le réseau EDF seul.
Les calculs des courants de court-circuit et les simulations de courbes de sélectivité sont effectués à l' aide du logiciel ETAP. Les résultats de simulation du plan de protection seront discutés et interprétés dans le chapitre quatre. (18)

III.4. Conclusion :

Au terme de ce chapitre, nous avons pu mettre en œuvre les différentes étapes nécessaires à l' étude et au dimensionnement d' une installation électrique industrielle. L' analyse des récepteurs nous a permis d' évaluer les puissances actives, réactives et apparentes, ainsi que les courants nominaux nécessaires au choix des différents équipements électriques. Nous avons également étudié les caractéristiques des moteurs moyenne tension, notamment leurs paramètres électriques et mécaniques, ainsi que l' utilisation des variateurs de vitesse pour assurer un fonctionnement adapté aux exigences de l' installation. Ces éléments ont contribué à une meilleure appréciation des contraintes liées à l' exploitation des équipements industriels. L' étude réalisée nous a ensuite permis de déterminer les principaux éléments du réseau, de vérifier leur dimensionnement et de contribuer au choix des solutions assurant la continuité de service, la sécurité et la fiabilité de l' installation. Ainsi, ce travail constitue une étape essentielle avant la validation du comportement global du réseau. Le chapitre suivant sera consacré à la simulation de l' installation électrique à l' aide du logiciel ETAP, afin de vérifier les résultats obtenus et d' évaluer les performances du réseau dans différentes conditions de fonctionnement.

Chapitre IV : Simulation et Évaluation Techno-Économique.

IV. Introduction :

La validation d'une installation électrique industrielle ne se limite pas à son dimensionnement technique et réglementaire. Mais, elle doit impérativement intégrer une étude de faisabilité technique et financière en utilisant des logiciels de simulation pour la prise de décision. Ce quatrième chapitre est ainsi structuré en deux grandes parties complémentaires : la première présentera une simulation du fonctionnement sous le logiciel ETAP (conforme à la norme CEI 60909), afin d'homologuer le comportement dynamique de l' installation en régimes permanent, transitoire et harmonique. La deuxième partie dévoilera une évaluation techno-économique simple basée sur les catalogues actuels des entreprises commerciales d' équipements électriques (Schneider Electric…etc.), afin de chiffrer l'investissement capital requis pour la réalisation concrète du réseau électrique interne de ce complexe industriel proposé. (19)

IV.1. Simulation :

Pour garantir la fidélité des résultats numériques par rapport aux articles du cahier de charges proposé au chapitre 3, les caractéristiques nominales des composants clés ont été introduites dans l'environnement ETAP comme suit :

IV.1.1. Caractéristiques de la Source Amont (Réseau Distribution) :

- Tension Nominale : **20KV** ;
- Puissance de Court-circuit (S cc) : **200MVA** ;
- Fréquence industrielle : 50 Hz.

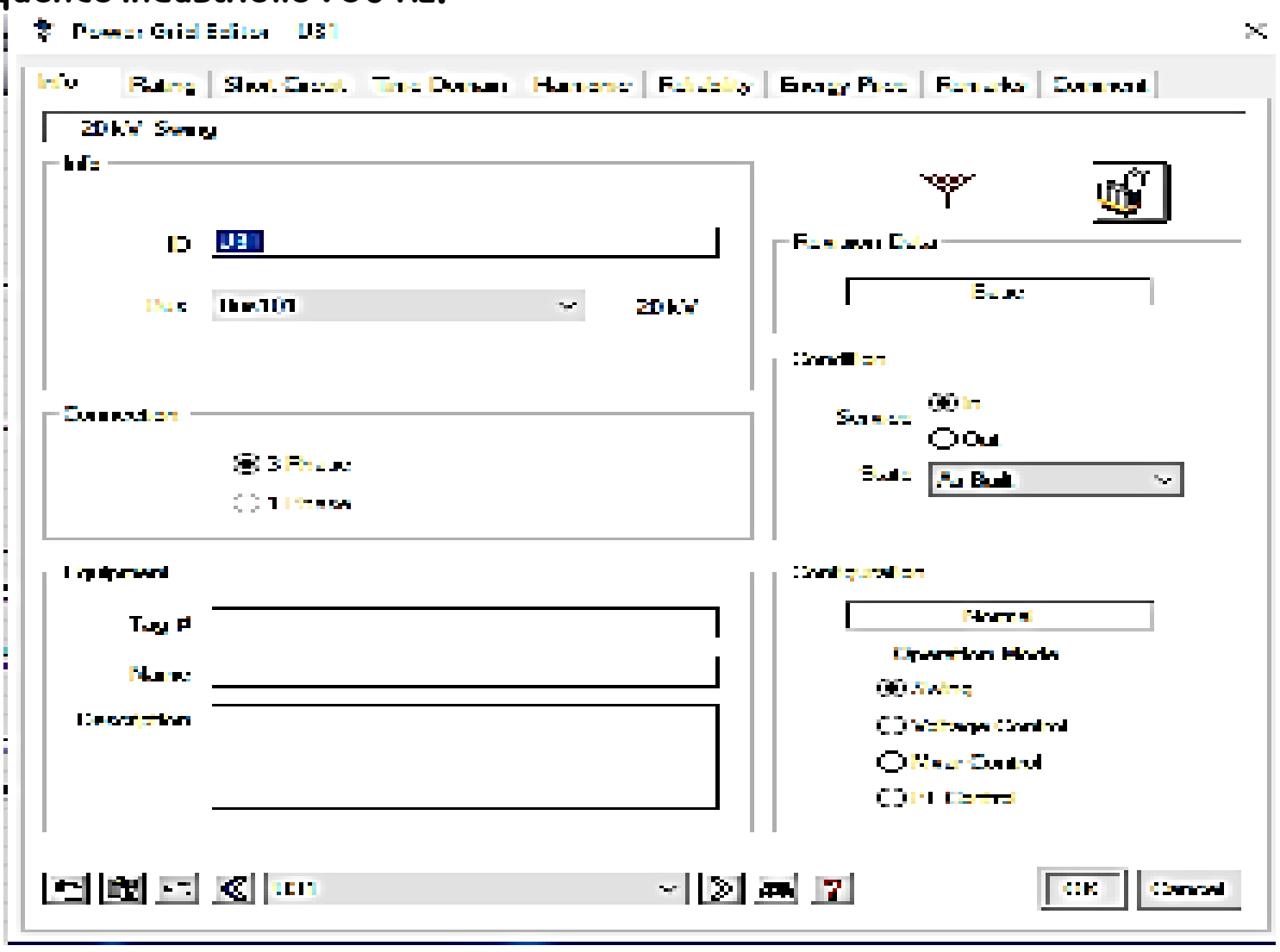


Figure IV.1 : Caractéristiques de la source amont du réseau électrique sous ETAP.

IV.1.2. Configuration des Transformateurs Principaux (Poste de Livraison) :

- Nombre de transformateurs en parallèle : 3 ;
- Puissance unitaire : 7.5 MVA ;
- Rapport de transformation : 20 / 5.5 KV ;
- Tension de court-circuit (Ucc%) : 7.5 ;
- Couplage vectoriel : Dyn11.

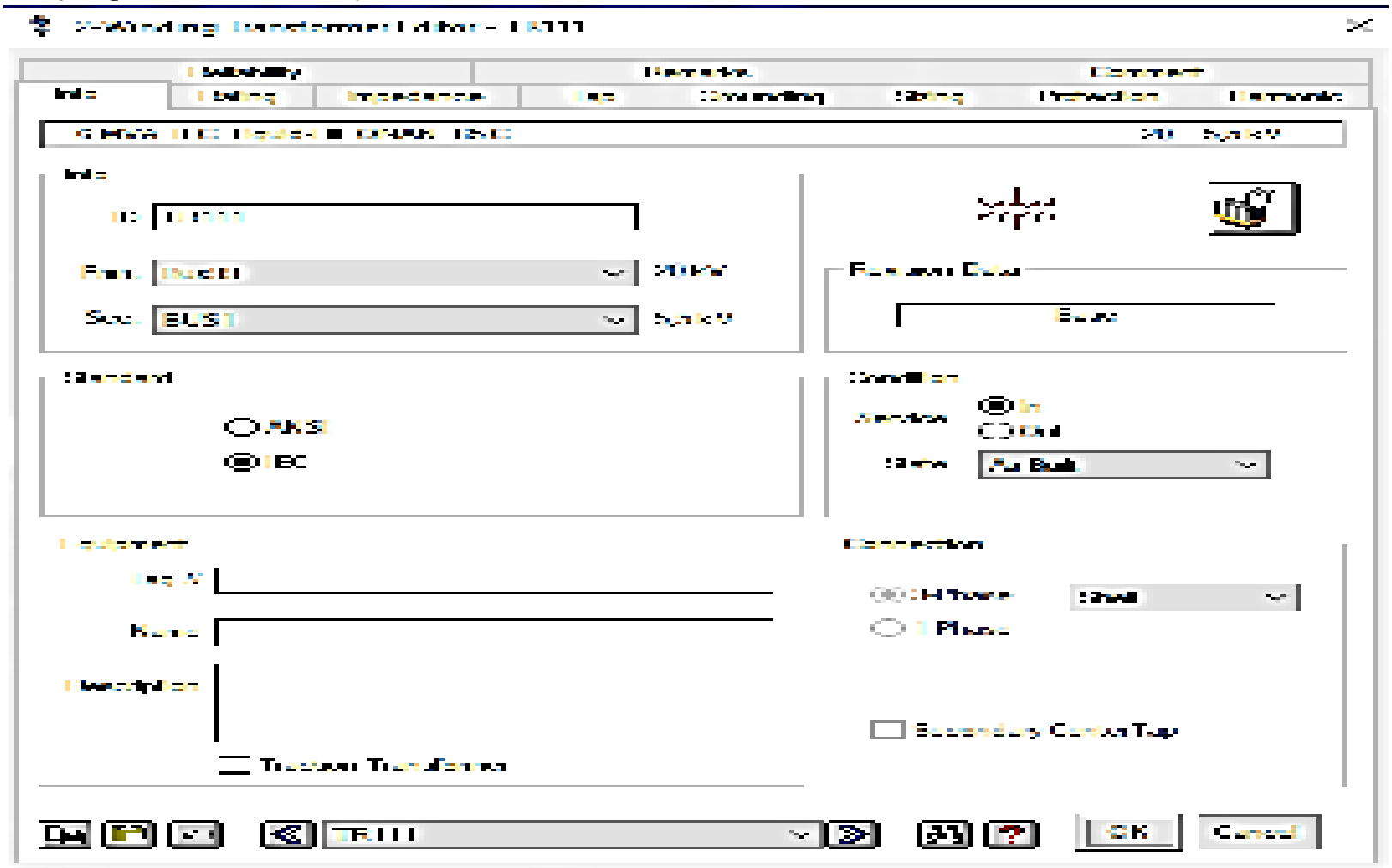


Figure IV.2 : Configuration des transformateurs principaux 20/5,5 kV sous ETAP.

IV.1.3. Configuration des Alternateurs de Secours (Mode Urgence) :

- Nombre d'unités : 3 ;
- Puissance unitaire : 1300KVA (Puissance totale disponible : (3900KVA) ;
- Tension assignée : 5.5KV ;
- Réactance su transitoire (Xd %) : 18.4 % ;
- -- Régime de fonctionnement : Configuré en mode Voltage Control.

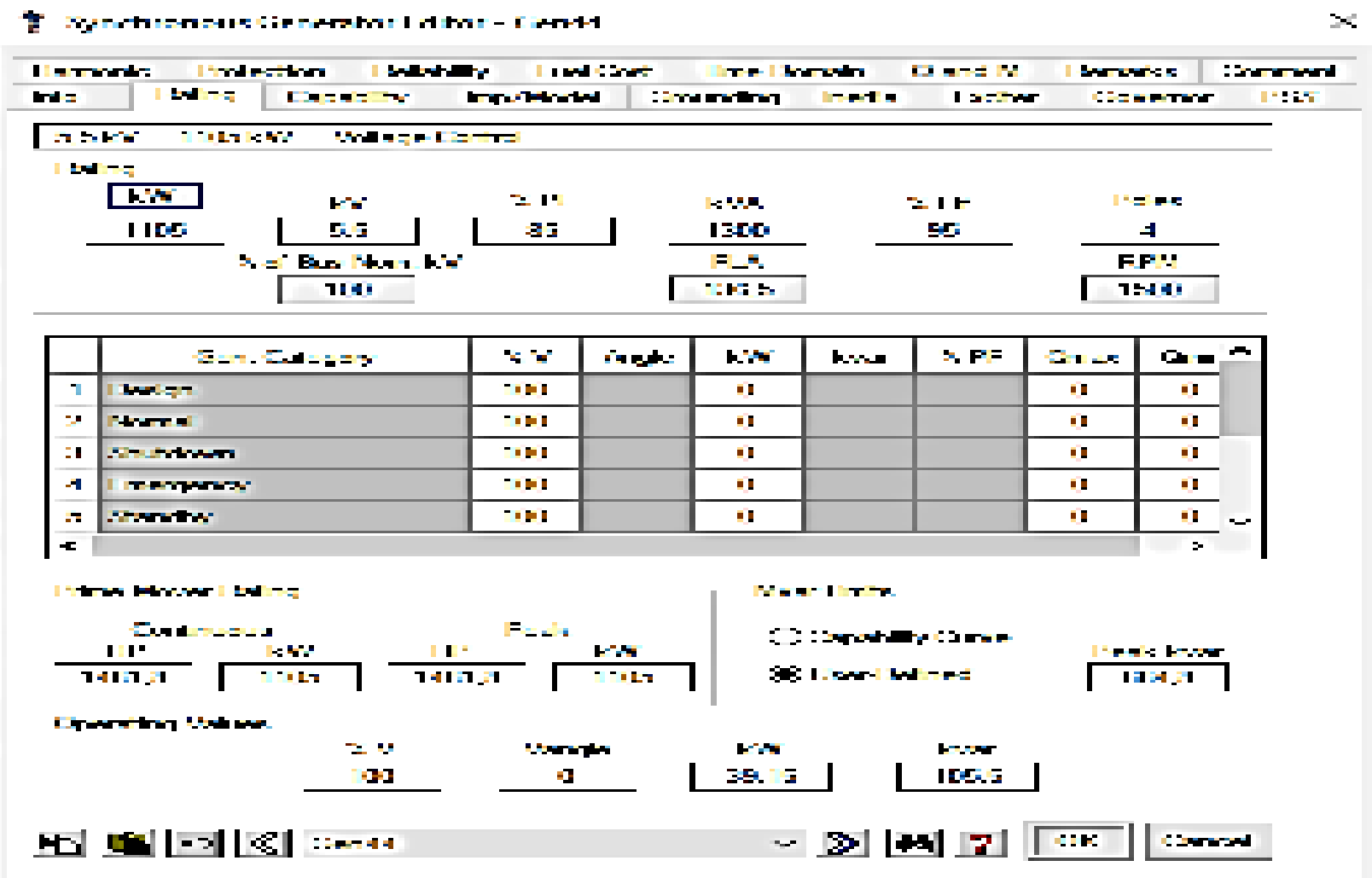


Figure IV.3 : Configuration des groupes électrogènes de secours sous ETAP.

IV.1.4. Spécifications des Canalisations et Câbles Moyenne Tension :

Le dimensionnement des liaisons câblées de la distribution 5.5 kV a été configuré selon les exigences de contrainte thermique de court-circuit (norme CEI 60949) et le mode de pose (caniveaux fermés à 30 ° C).

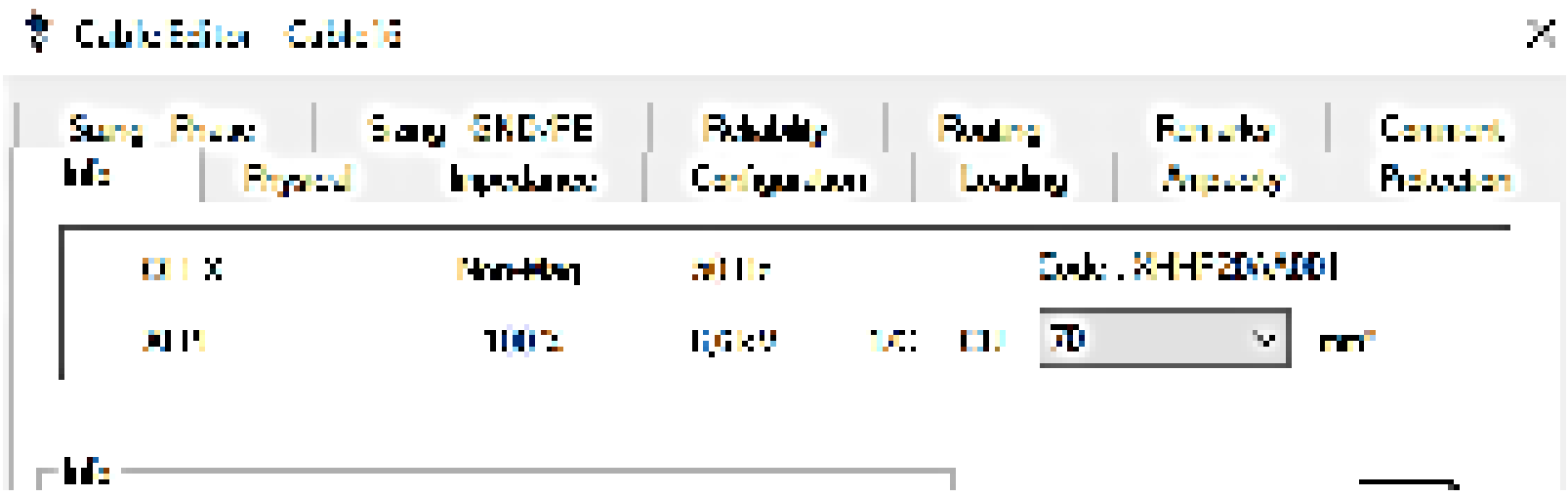


Figure IV.4 : Caractéristiques des câbles et liaisons moyenne tension sous ETAP.

IV.1.5. Équipements de Sécurité (Système ASI&Câble DC) :

IV.1.5.1. Système ASI (UPS) :

Puissance nominale de 300 KVA (Rendement à 98%), alimentant le jeu de barres des charges critiques (Bus21 – 400 V).

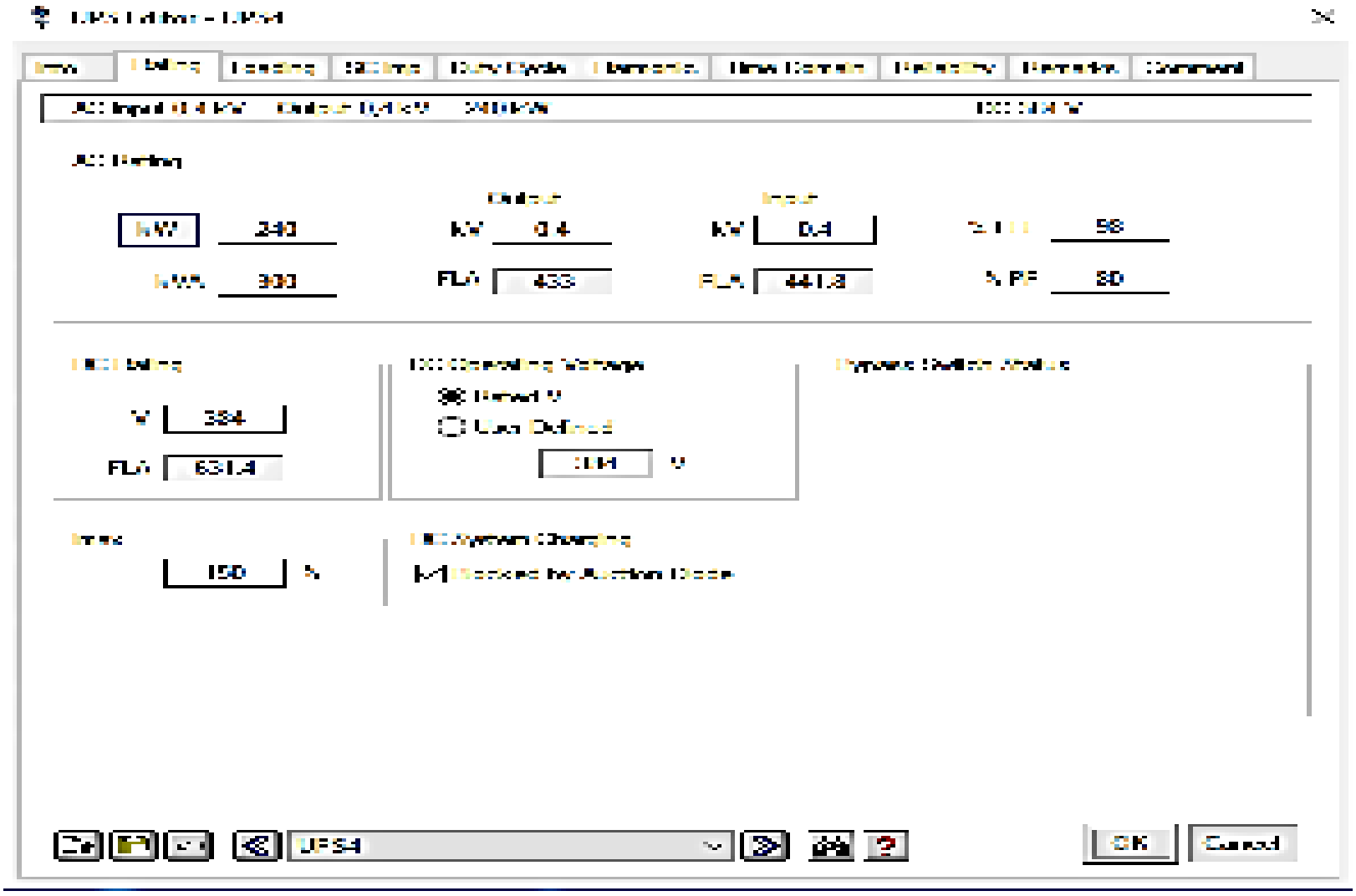


Figure IV.5 : Configuration du système ASI (UPS) sous ETAP

IV.1.5.2. Batterie d'accumulateurs dédiée :

Technologie Plomb-Acide de capacité 410 Ah (192 cellules en série) pour délivrer une tension continue fixe de 400 vdc.

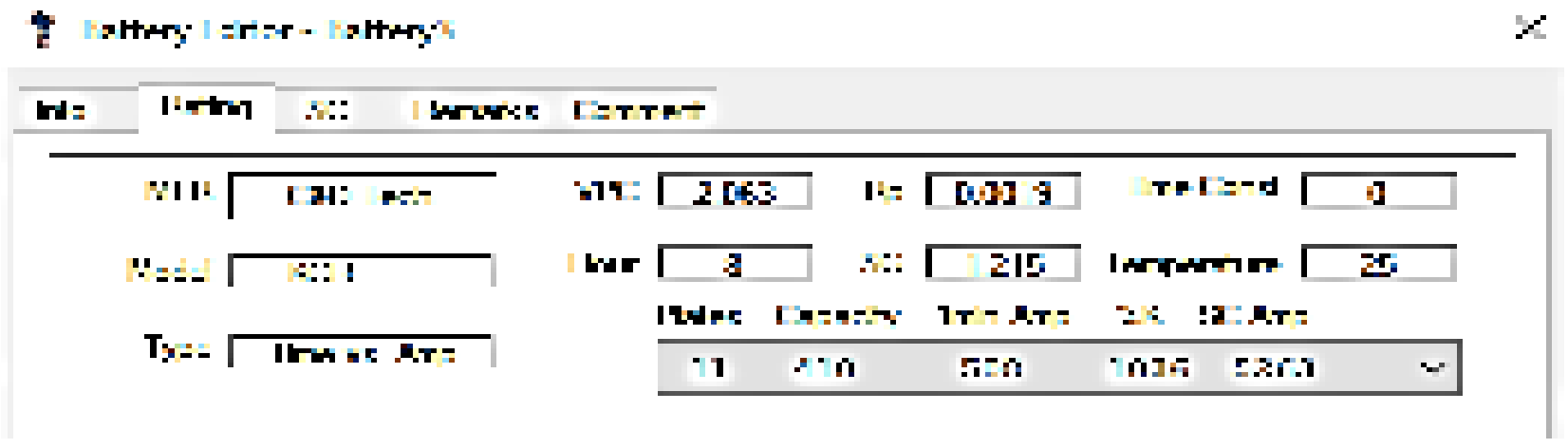


Figure IV.6 : Configuration de la batterie d' accumulateurs sous ETAP.

IV.1.5.3. Câble de liaison DC :

Configuration unipolaire 1/C en Cuivre/XLPE de 25 mm² sur une longueur courte de 5 m pour éliminer toute chute de tension continue entre la batterie et l'ASI.

IV.1.5.4. Groupe électrogène de sécurité dédié :

Puissance de 300KVA / 400 V ;

Configuré en position normalement ouverte (Open).

IV.1.6. Spécifications des Disjoncteurs de Protection (CB) :

Le choix et le calibrage des disjoncteurs ont été effectués à partir de la bibliothèque officielle de Schneider Electric (norme CEI 60909). [20]

Niveau 20 kV : Cellules MCset SF1 (calibre 24 kV / 630 A) avec un pouvoir de coupure de 25 kA sous gaz SF_6 .

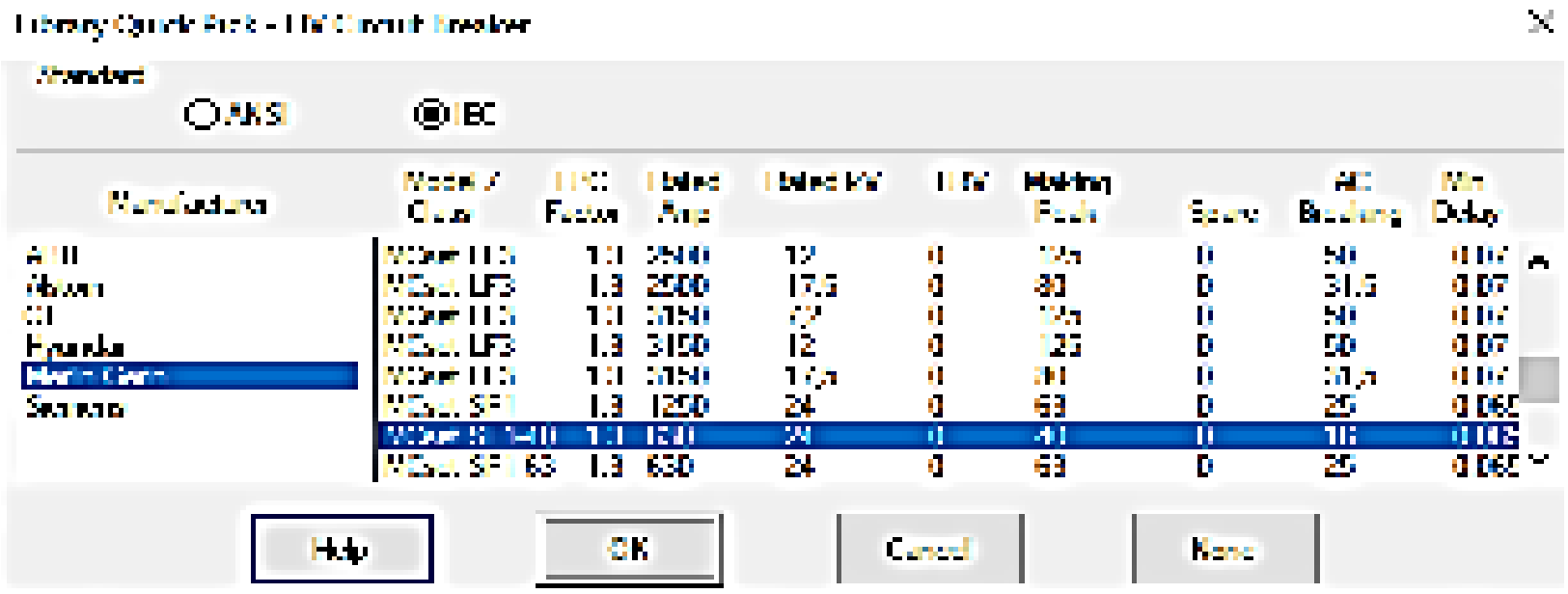


Figure IV.7 : Sélection des disjoncteurs moyenne tension 20 kv.

Niveau 5.5 kV : Cellules MCset (calibre 7.2 kV) réglées à 1250 A pour les arrivées transformateurs et 630 A pour la protection des moteurs.

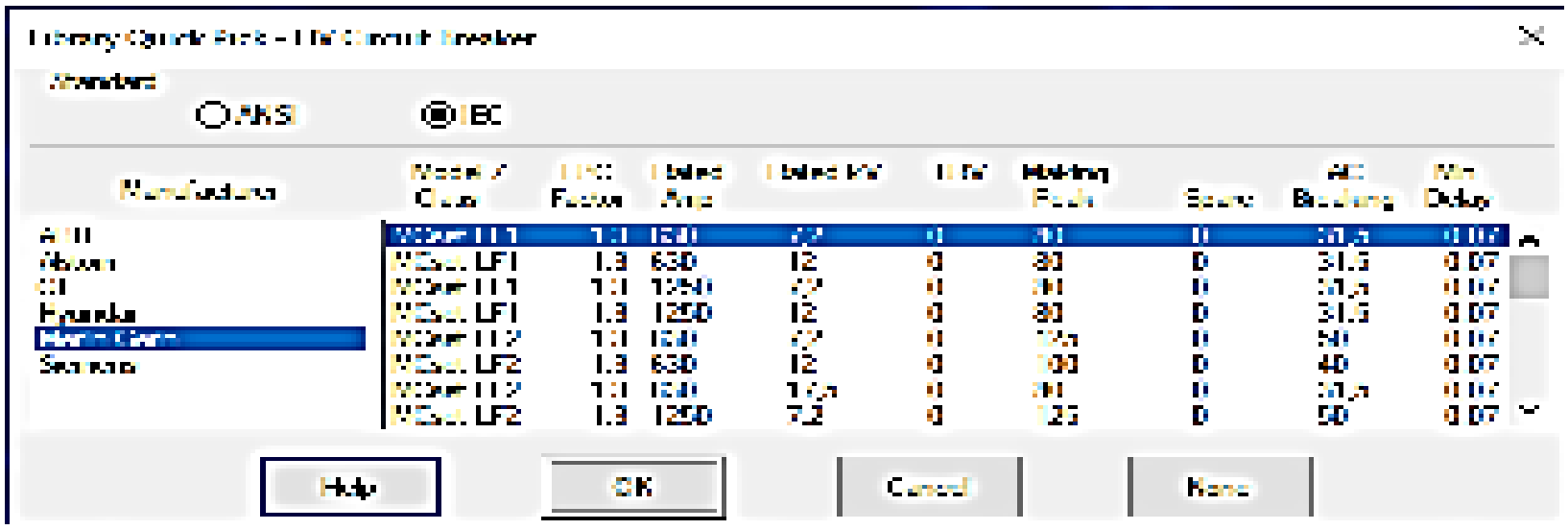


Figure IV.8 : Sélection des disjoncteurs moyenne tension 5.5 kv.

Niveau 400 V : Disjoncteurs Masterpact NW (calibre 2000 A) pour les arrivées TGBT, et type Compact NSX (calibre 200 A / 132 kW) pour la protection des variateurs (VFD) avec un pouvoir de coupure de 50.

IV.1.7. Modélisation du réseau électrique sous ETAP :

Nous avons modélisé l'ensemble du réseau électrique de l'usine (s' étendant sur 32 hectares) selon les normes internationales IEC. Les données des récepteurs basés sur les tableaux du chapitre 3 ont été introduites avec précision, notamment les charges globales (Lumped Loads) à 0.4 kV et les motrices moyennes tensions à 5.5 kV.

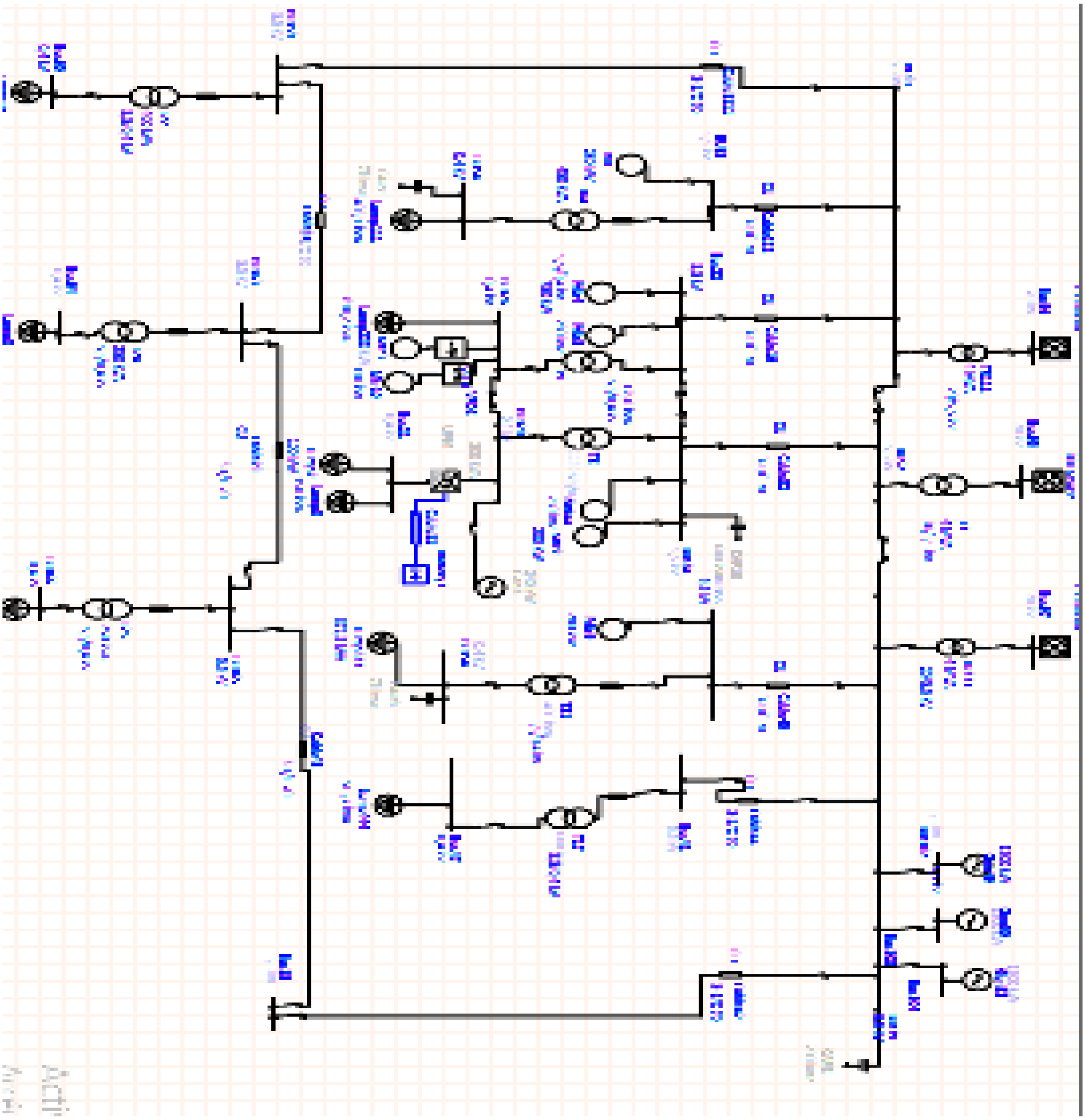


Figure IV.9 : Schéma de modélisation de l' installation électrique sous ETAP.

IV.1.7.1. Analyse de l'Écoulement de Puissance (Load Flow) :

Définition et configuration du Scénario :

Le calcul de l'écoulement de puissance (Load Flow Analysis) en régime permanent normal permet de vérifier la répartition des puissances active (MW) et réactive (Mvar) dans l'ensemble de l'installation industrielle, ainsi que les niveaux de tension à chaque nœud du réseau.

Dans ce premier scénario, l'usine est alimentée à 100% par la source externe principale à travers le réseau public de distribution 20 kV. Les trois transformateurs de couplage principaux de 4 MVA (20 / 5.5 kV) fonctionnent en parallèle pour alimenter le jeu de barres principal en moyenne tension (MT). Les trois groupes électrogènes de secours (Gen30, Gen31, Gen32) sont maintenus à l'arrêt en mode Standby, avec leurs disjoncteurs associés configurés en position OUVERTE (Open).

Présentation des Résultats de Simulation :

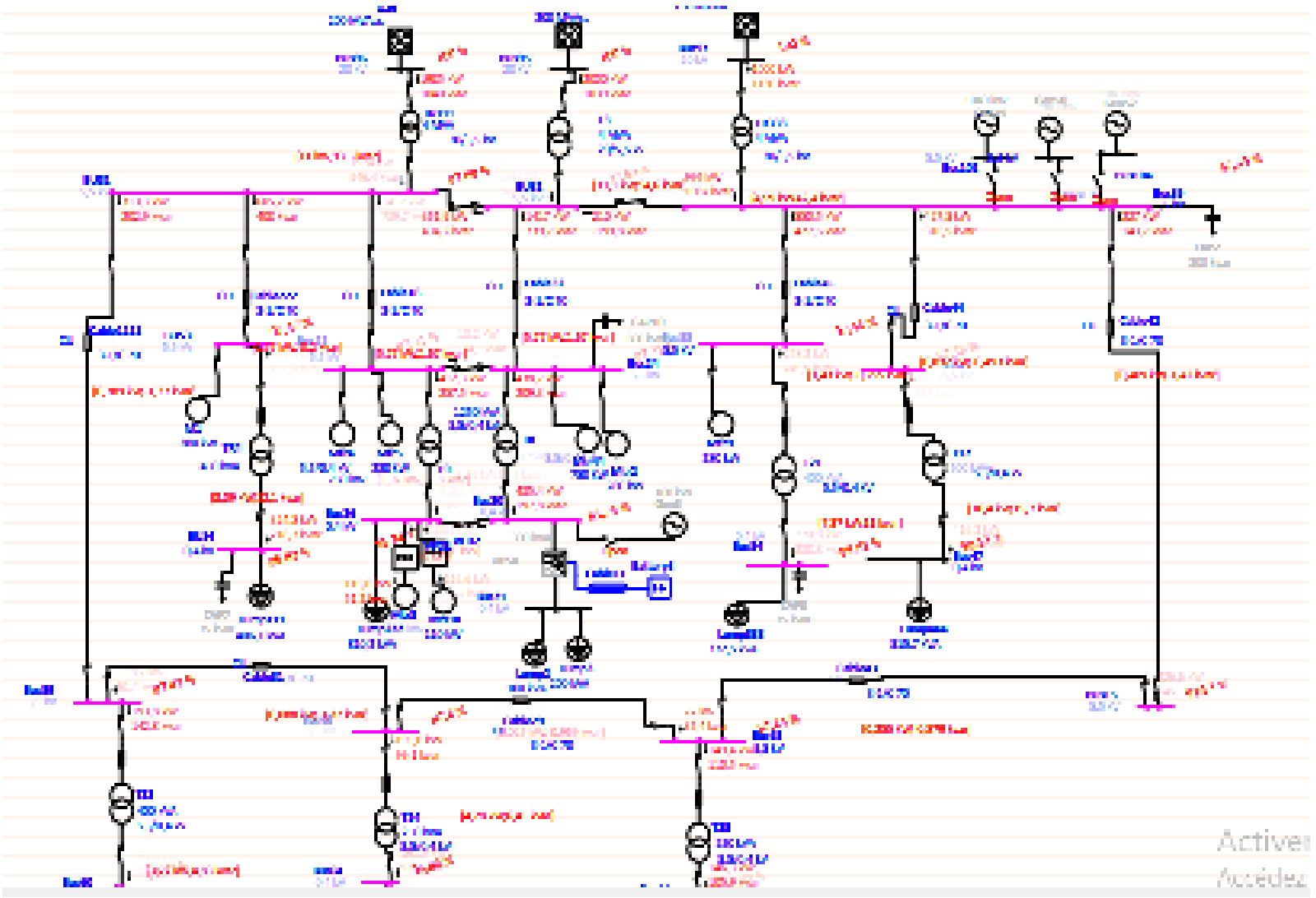


Figure IV.10 : Résultats de l'écoulement de puissance (Load Flow Analysis).

Synthèse des Pertes en Ligne et Chutes de Tension (Branch Losses) :

D' après le tableau l'exploitation des résultats du Branch Losses Report d'ETAP permet de valider directement les choix technologiques arrêté en du Chapitre 3.

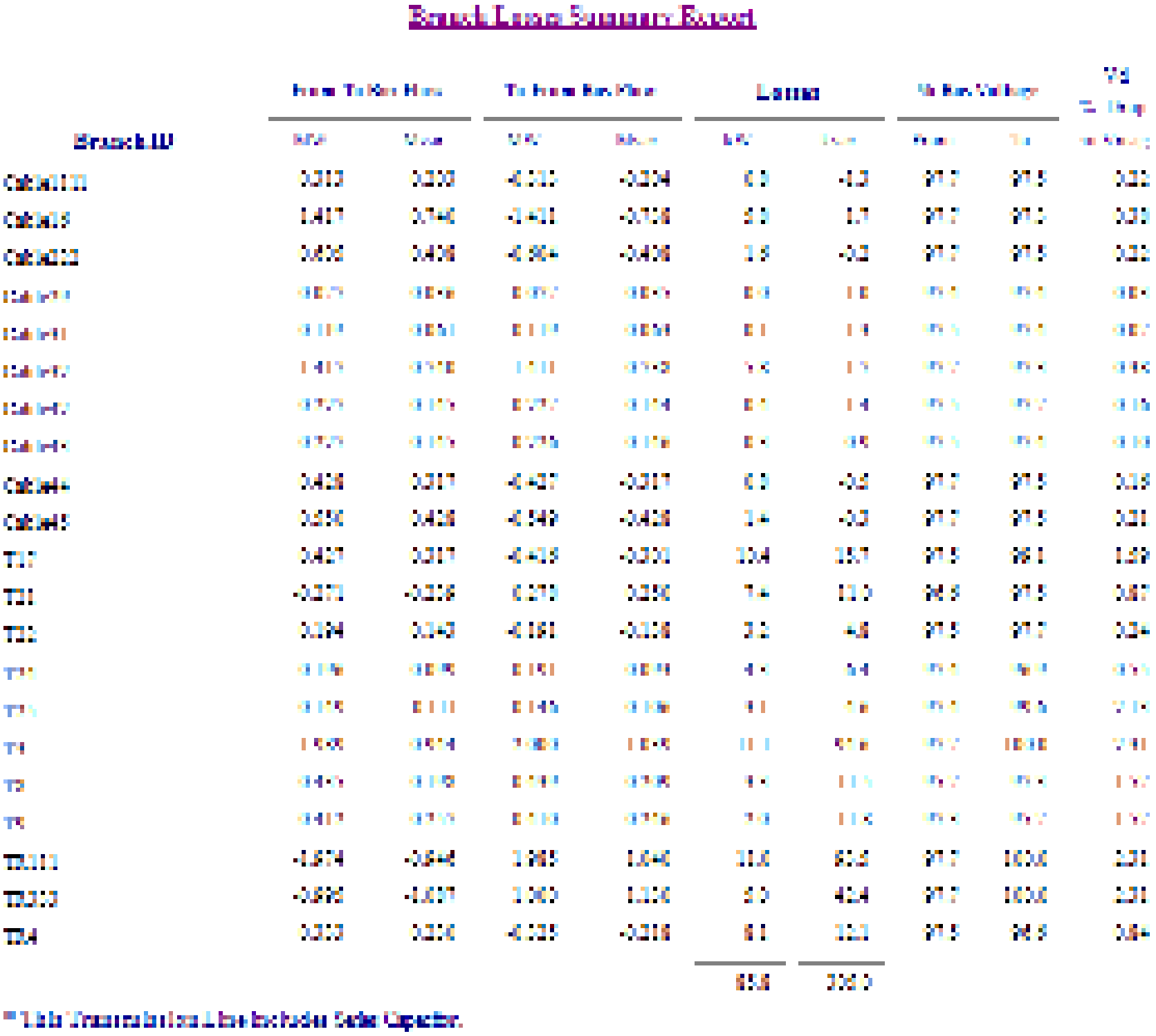


Figure IV.11 : Rapport des pertes dans les branches de l' installation

Tableau IV.1 : synthèse des résultats du calcul de puissance, des pertes et de chute de tension.

Branch ID	VD%	losses (MW)	power (MW)
Cable1111	0,22	0.0008	0.313
Cable16	0,38	0.0058	1.417
Cable222	0,22	0.0016	0.605
Cable29	0,03	0	−0.077
Cable31	0,07	0,001	0.119
Cable32	0,38	0.0058	1.417
Cable42	0,16	0,0004	−0.227
Cable43	0,10	0, 0003	0.227
Cable44	0,16	0.0008	0.428

Cable45	0,21	0.0014	0.55
T17	1,59	0.0104	0.427
T21	0,87	0.0074	-0.271
T22	0,24	0.0032	0.194
T24	0,55	0.0043	0.196
T25	2,13	0.0031	0.149
T3	2,31	0.0111	-1.989
T8	1,57	0.0033	-0.435
T9	1,57	0.002	0.412
TR111	2,31	0.0011	-1.974
T333	2,31	0.005	-0.995
TR4	0,84	0.008	0.333

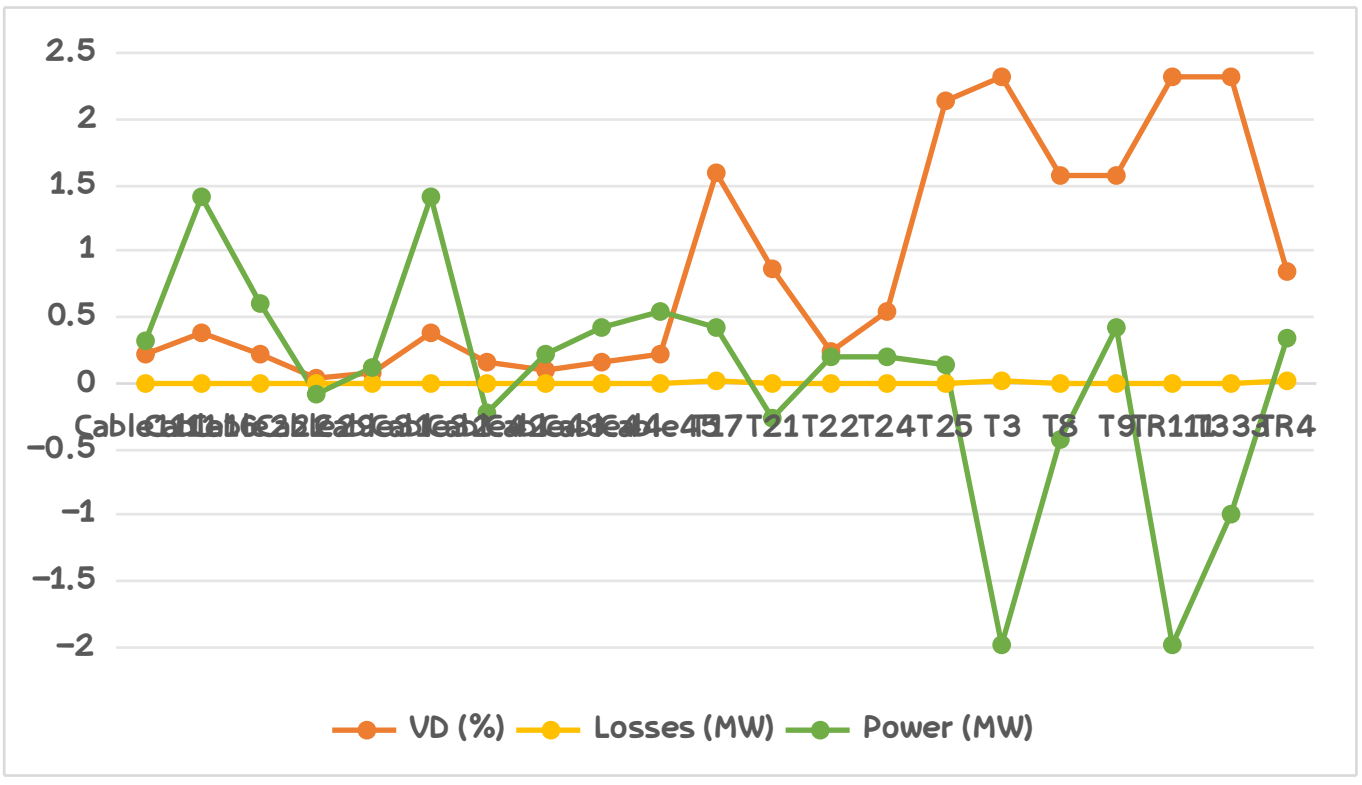


Figure IV.12 : Courbe des résultats du Load Flow

Remarque : Les pertes étant très faibles, leur représentation graphique reste peu visible à l' échelle adoptée

Interprétation :

Les résultats obtenus montrent que les pertes actives totales dans les branches de l' installation sont de 85.8 kW, tandis que les pertes réactives atteignent 305 kvar. Les pertes varient selon les branches en fonction de leur niveau de charge et de leurs caractéristiques électriques. La chute de tension reste globalement faible, avec une valeur maximale de 2,31 %.

IV.1.7.2. Analyse de Contingence (Critère de Sécurité N-1) :

IV.1.7.2.1. Le cas de Perte d'une source (*transformateur principal 20 kV/5.5kV*) :

Ce scénario de contingence teste la robustesse de l'usine en cas de perte ou de maintenance de l'un des trois transformateurs principaux de 4 MVA (Configuration N-1).

Le transformateur TR111 est mis hors service (Out of Service – Open), et la charge totale de l'usine est instantanément basculée sur les deux transformateurs restants TR3 et T333

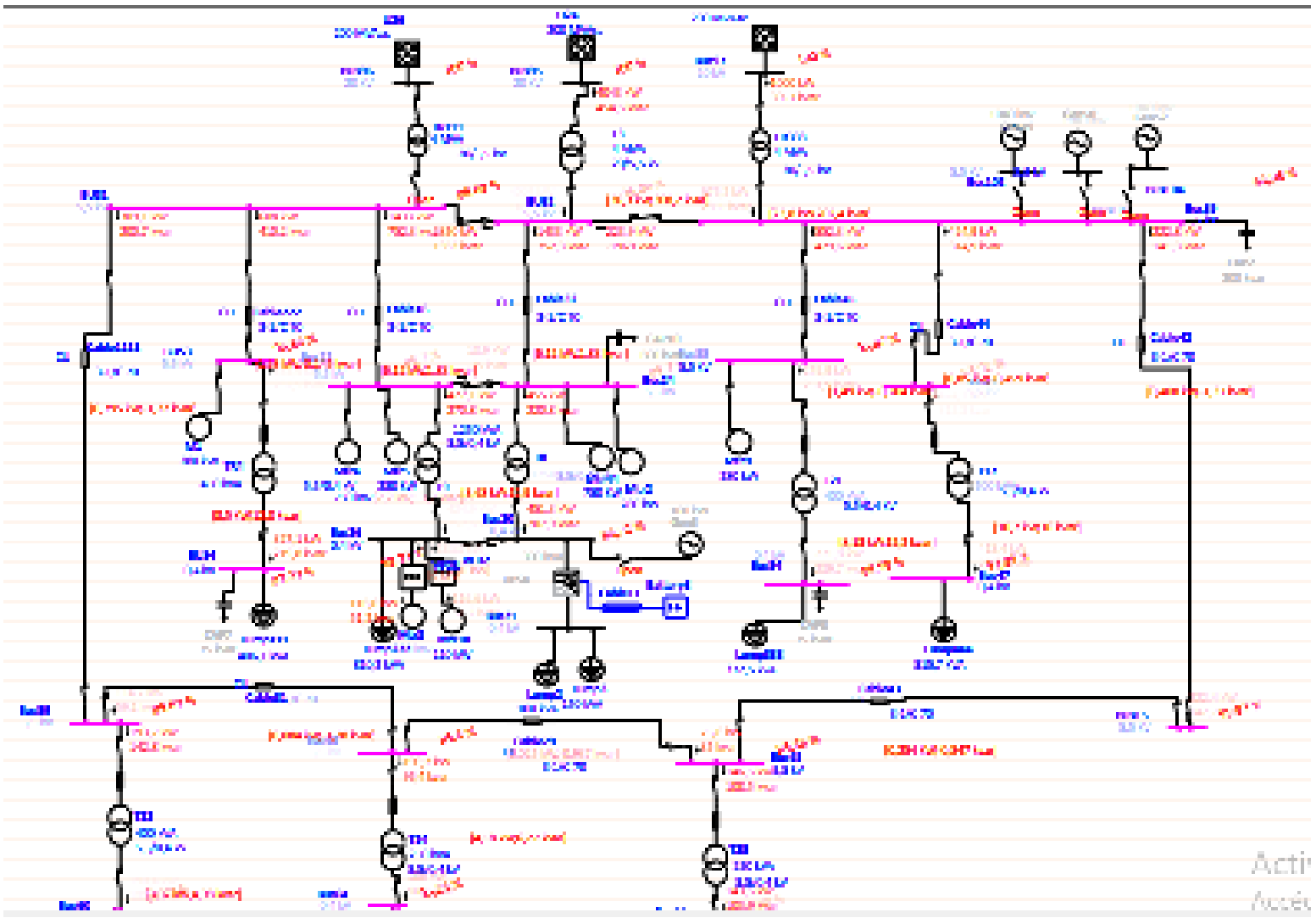


Figure IV.13 : Écoulement de puissance en mode contingence N-1 (Fonctionnement avec deux transformateurs).

Afin d' évaluer le comportement de l' installation en situation de défaut ou d' indisponibilité d' un équipement, une étude de contingence N-1 a été réalisée sous ETAP. Dans cette étude, le transformateur T111 est mis hors service afin d' observer la répartition de la charge sur les transformateurs restants et de vérifier leurs niveaux de chargement.

Tableau IV .2 : Résultats du chargement des transformateurs après la perte de T111.

Transformateur	MW flow	Mvar flow	Loading (%)
T 3	4.043	0 ,455	94,6
T333	1	3.057	80 ,4

Interprétation :

Les résultats de la contingence N-1 montrent qu' après la mise hors service du transformateur T111, la charge est reprise par les transformateurs T3 et T333 de manière non uniforme. Le transformateur T3 présente un taux de chargement de

94 .6 %, tandis que T333 atteint 80.4 %. Ces valeurs restent inférieures à la capacité nominale de 100 %.

IV.1.7.2.2. Fonctionnement en Mode d'urgence (Analyse de Contingence N-1 et Délestage) :

Ce scénario de contingence simule la perte totale et critique de la source amont de distribution (Sonelgaz). Les trois transformateurs principaux de 4 MVA sont isolés du réseau (Out of Service), déclenchant le démarrage instantané des trois alternateurs de secours de 1500KVA couplés sur le jeu de barres Bus1 (5.5 kV).

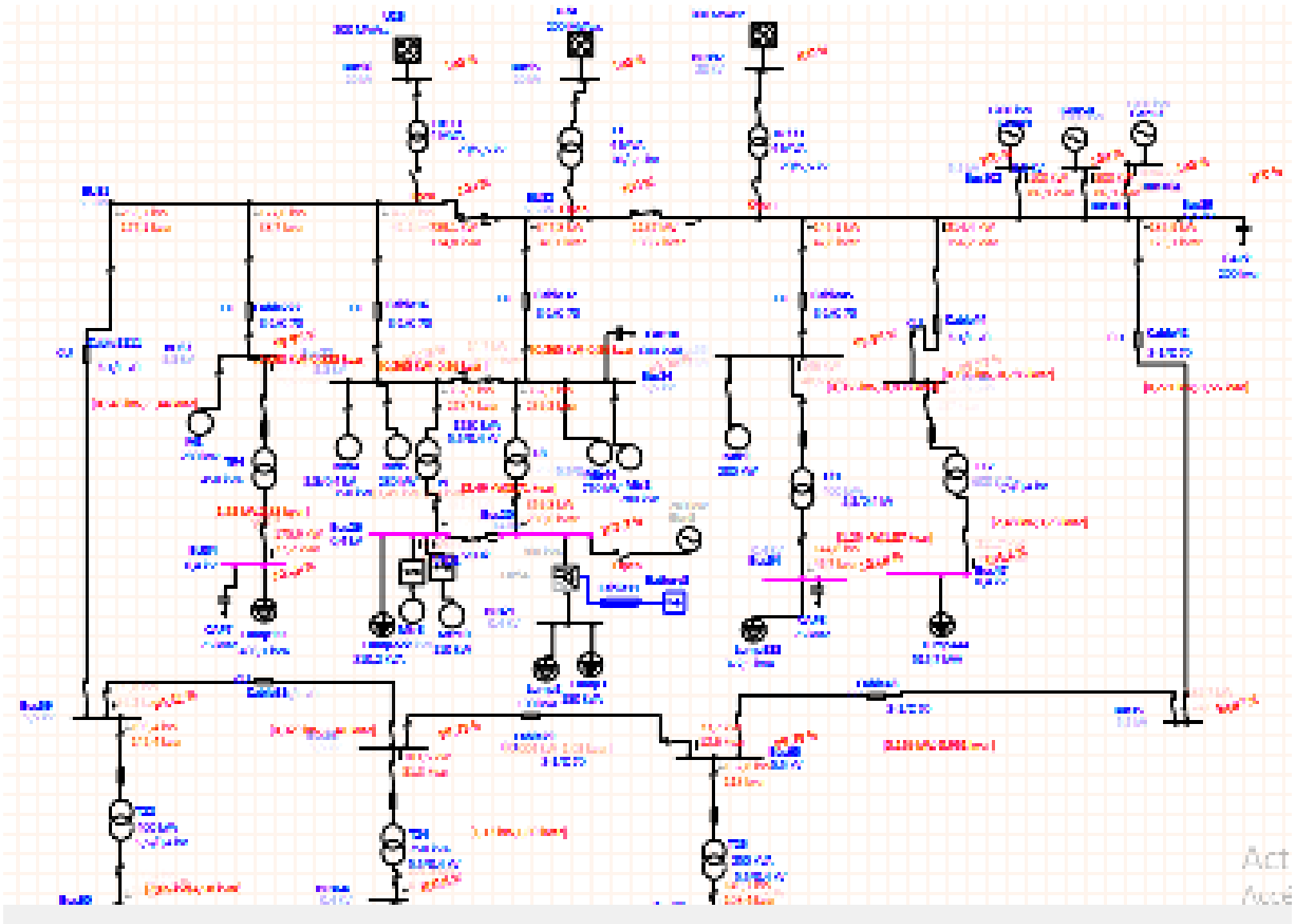


Figure IV.14 : Écoulement de puissance en mode d'Urgence avec groupes de secours actifs.

- **Application du Plan de Délestage :**

Afin de prémunir les alternateurs contre toute surcharge thermique destructrice, un plan de délestage automatique de 50 % a été appliqué exclusivement sur les jeux de barres basse tension des charges secondaires (Bâtiment administratif, ateliers de maintenance et stockage) Les charges hautement prioritaires (Process de production, station de pompage et d'épuration) sont maintenues à 100 % de leur capacité nominale Comportement du Système ASI (UPS) :

Pendant la phase transitoire de basculement, le système ASI de 300 kVA maintient une alimentation ininterrompue sur le jeu de barres critique Bus21 (400 V). La batterie de 410 Ah assure l'alimentation continue du réseau de contrôle-commande sans aucune chute de tension ou divergence numérique.

Tableau IV .3 : Résultat de l' écoulement de puissance du générateur en mode secours.

ID	Rating	Tension	P (KW)	Q(Kvar)	I(A)
Gen49	1200	5,5	500	411	67.9
Gen50	1200	5,5	500	411	67.9
Gen52	1200	5,5	944	411	91.7

Interprétation des résultats :

Après le délestage des charges non prioritaires, les trois groupes électrogènes assurent l' alimentation des charges essentielles sans dépasser leur capacité nominale. Le taux de charge maximal est de 68,6 %, ce qui confirme que les groupes supportent les charges restantes en mode secours.

IV.1.7.3. Étude de la Protection :

IV.1.7.3.1Sélectivité (Module ETAP Star) :

L' étude de la sélectivité permet de vérifier la coordination entre les différents dispositifs de protection. Dans ETAP, cette étude est normalement réalisée à l' aide des courbes temps-courant (TCC), en comparant les caractéristiques des protections en amont et en aval. Dans notre cas, les paramètres détaillés des relais de protection ne sont pas définis dans le modèle. La simulation complète des courbes de sélectivité ne peut donc pas être réalisée de manière fiable. La méthode de coordination est néanmoins présentée, tandis que les courants de défaut sont déterminés dans l' étude de court-circuit.

IV.1.7.3 .2 court-circuit :

L' étude de court-circuit est réalisée sous ETAP en appliquant un défaut triphasé au niveau des principaux jeux de barres de l' installation. Les courants de court-circuit sont ensuite déterminés par simulation afin d' identifier les niveaux de défaut aux différents points étudiés. [21]

2 Points étudiés

- Bus192 → 5,5 KV.
- Bus20 → 400 V de l' atelier de production.

Résultats :

Tableau IV.4 : Courants de court-circuit obtenus par simulation.

Jeu de barre	Niveau de tension (KV)	Type de défaut	Icc symétrique à ½ cycle (KA)
Bus1	5,5	Triphasé	15,781

Bus 26	0,4	Triphasé	20 ,997

Interprétation des résultats :

Les résultats de la simulation montrent que le courant de court-circuit symétrique au niveau du Bus1 à 5,5 kV atteint 15.781 kA à 1/2 cycle. Cette valeur représente le courant de défaut disponible au niveau du jeu de barres moyenne tension étudié. Au niveau du Bus26à 400 V, correspondant à l' atelier de production, le courant de court-circuit symétrique obtenu à 1/2 cycle est de 20.997 kA. Cette valeur est supérieure à celle obtenue au niveau du réseau 5,5 kV, ce qui traduit la contribution des différentes sources et équipements connectés au réseau basse tension. Ces résultats sont utilisés comme données de référence pour la vérification des équipements de protection et pour l' étude du plan de protection de l' installation

IV.1.7.4. Étude des Harmoniques et Pollution du Réseau :

IV.1.7.4.1. Objectif de l'Étude :

L'introduction des variateurs de vitesse (VFD) et des équipements d'électronique de puissance dans l'usine génère des courants non sinusoïdaux susceptibles de provoquer une distorsion harmonique du réseau. Cette simulation, réalisée sous le module Harmonic Analysis (HA) d'ETAP, a pour objectif d'évaluer le niveau de distorsion harmonique au niveau des jeux de barres moyenne et basse tension. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à la valeur de référence de 5 % pour la distorsion harmonique totale de tension (THDv). [21]

IV.1.7.4.2. Configuration du Spectre Harmonique :

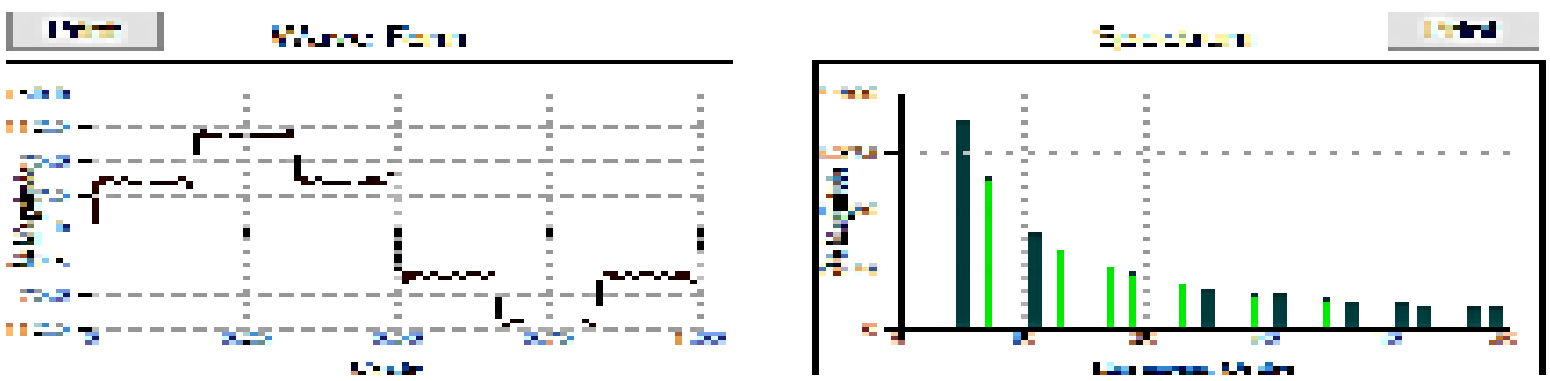


Figure IV.15 : Forme d' onde et spectre harmonique d' une charge non linéaire à 6 impulsions.

IV.1.7.4.3. Présentation des Résultats et Analyse :

Après l'exécution du calcul de l'écoulement de charge harmonique (Harmonic Load Flow), les résultats graphiques et numériques se présentent comme suit :

- **Scénario 1** : Distributeur Seul (Régime Normal)

En régime permanent normal, la forte puissance de court-circuit de Sonelgaz absorbe efficacement la pollution, Le taux de distorsion se stabilise à un niveau excellent de 0.65 % THD sur le jeu de barres principal Bus1 (5.5 kV), et atteint 2,4 % THD sur le jeu de barres basse tension Bus26 (0.4 kV)

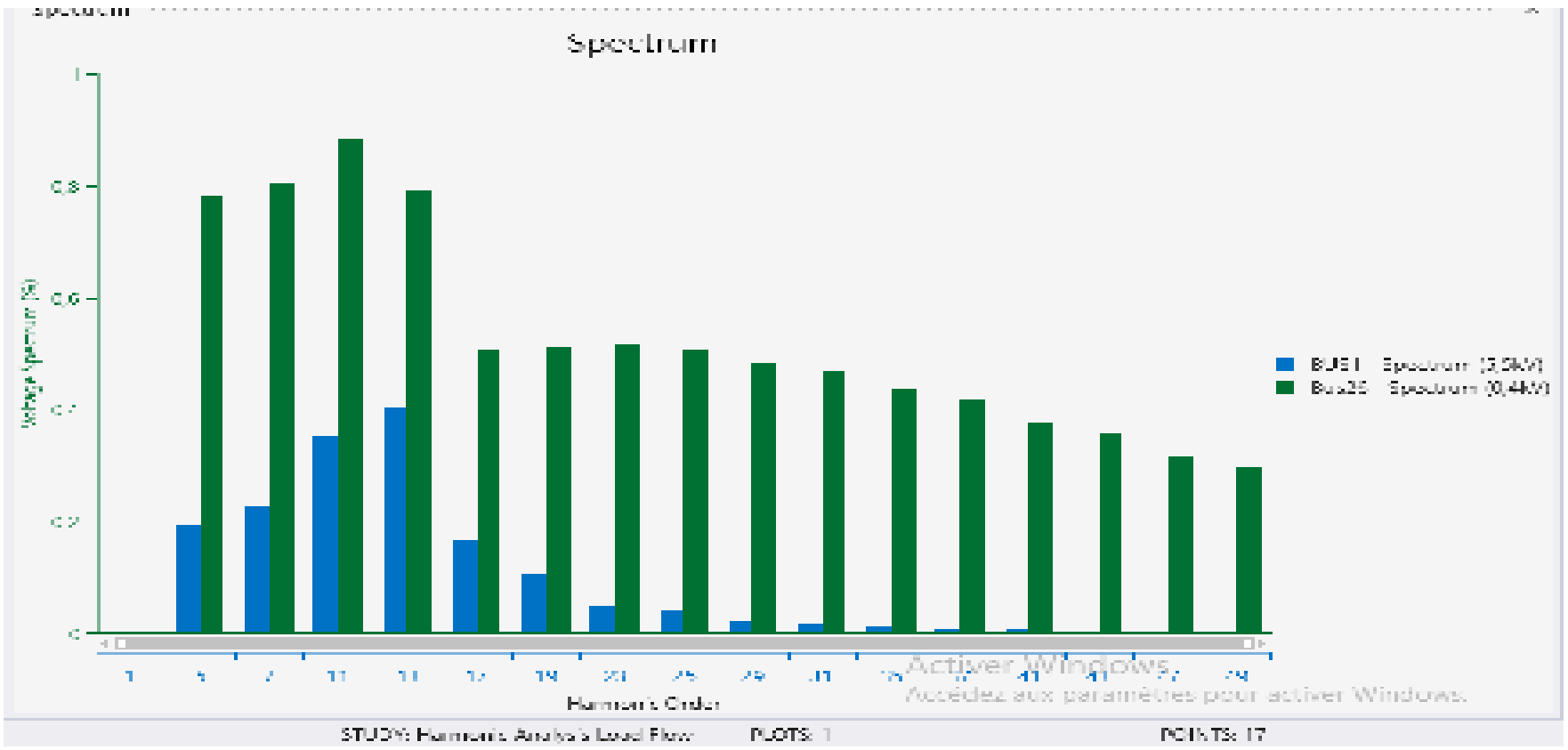


Figure IV.16 : Forme spectre fréquentiel (Spectrum) du courant harmonique.

- **Scénario 2** : (Mode Autonome de Secours)

En mode d'urgence, l'alimentation par les alternateurs (dont la réactance interne est plus élevée) fait grimper la distorsion. Le taux s'établit à 1.91 % THD au niveau du Bus1 (5.5 kV) et se maintient à 2.92% THD au niveau du Bus26 (0.4 kV)

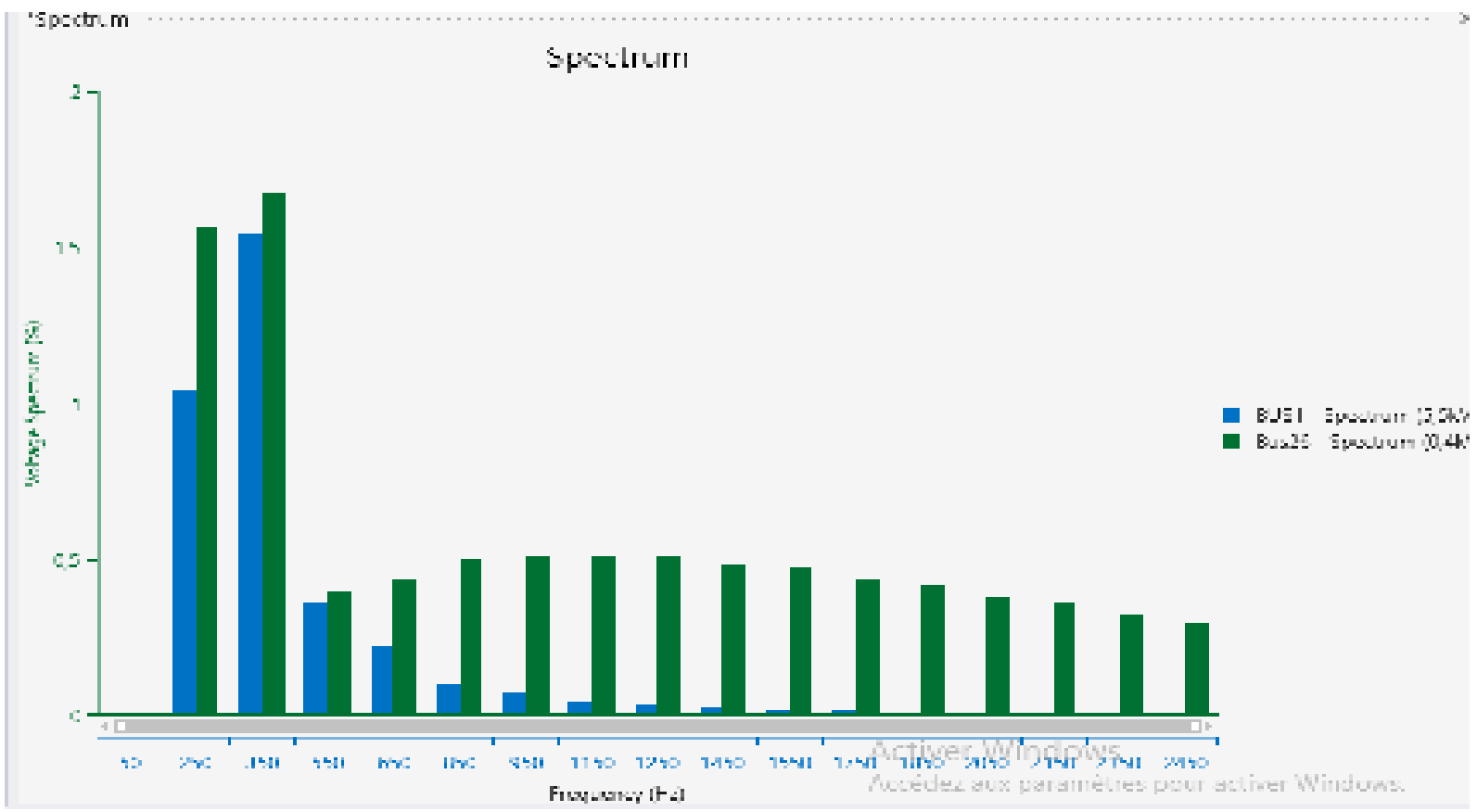


Figure IV.17 : Forme spectre fréquentiel (Spectrum) du courant harmonique.

- **Scénario 3** : 3 Source en parallél.

L'interconnexion simultanée de toutes les sources augmente massivement la puissance de court-circuit équivalente. Cela étouffe la distorsion qui chute à 0.504 % THD sur le Bus1 (5.5 kV) et se stabilise à 2,11 % THD sur le Bus26 (0.4 kV)

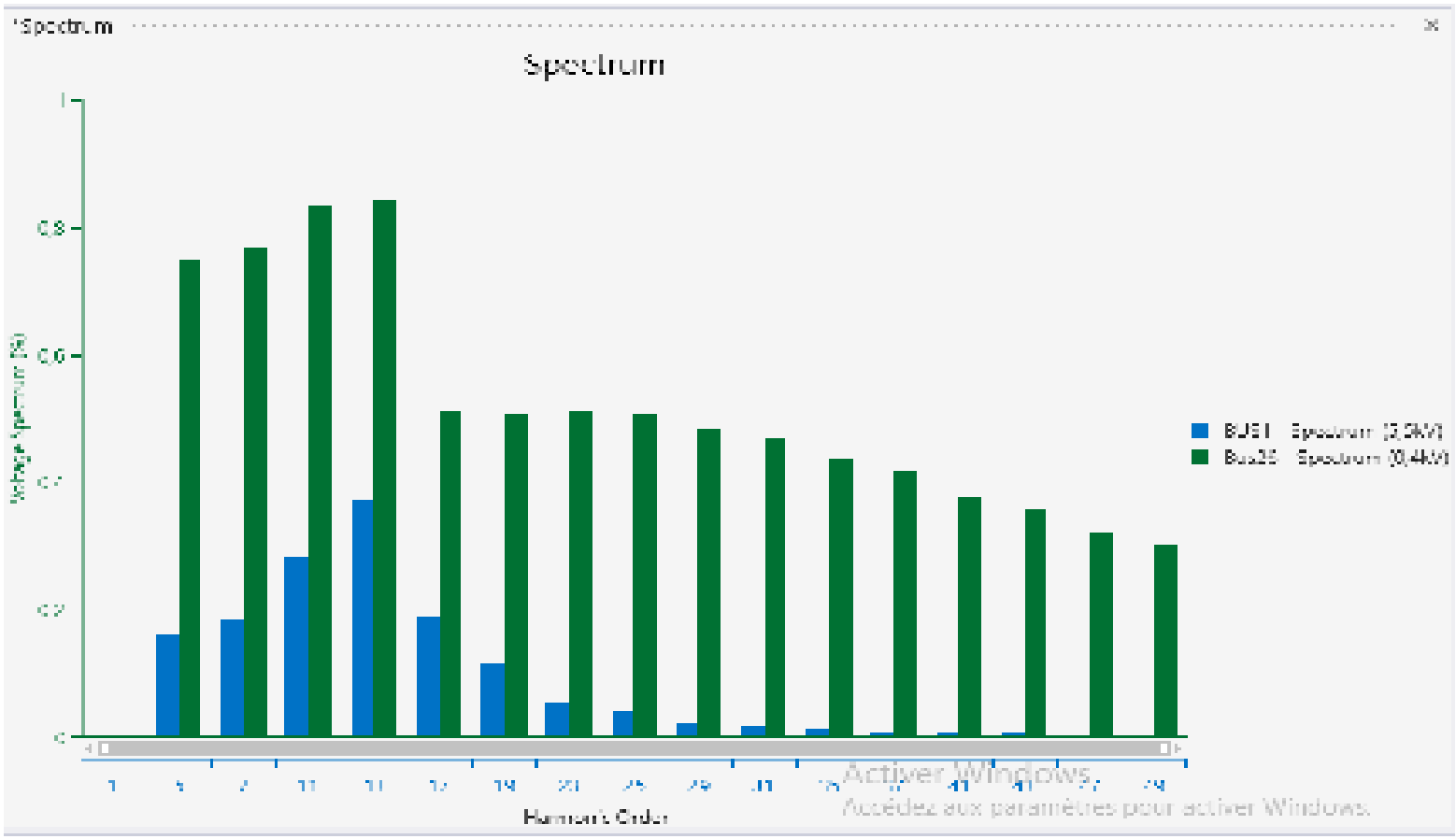


Figure IV.18 : Forme spectre fréquentiel (Spectrum) du courant harmonique.

Interprétation :

La simulation réalisée sous ETAP nous a permis de mettre en évidence le comportement du réseau électrique étudié et de vérifier son fonctionnement à travers les différents résultats obtenus. L' exploitation de ces résultats permet de confirmer la cohérence des paramètres retenus pour les équipements et de mettre en évidence les éventuelles contraintes du réseau. Cette étape constitue donc un moyen de validation du dimensionnement effectué précédemment et contribue à assurer une conception fiable…

Évaluation Techno-Économique de l'Installation :

IV.2 Introduction à l'Étude Économique :

Après avoir validé l' intégralité des choix technologiques et des calibres d'équipements par la simulation numérique sous ETAP, nous procédons à l'estimation financière du projet. L' objectif de cette section est de chiffrer le coût global d'investissement de l'installation électrique. Cette étude budgétaire est structurée autour de trois piliers principaux conformes aux exigences du cahier des charges : le coût d'acquisition du matériel électrique standard Schneider Electric, le coût d'exécution des travaux de montage sur le site de 32 hectares, et le coût des études d'ingénierie et d'intégration.

IV.2.1 Objectif de l' étude techno-économique :

L' étude techno-économique permet d' évaluer le coût nécessaire à la réalisation de l' installation. Elle regroupe les équipements électriques utilisés dans les différents ateliers et bâtiments, ainsi que les dépenses liées aux travaux et à l' étude technique. Cette évaluation permet d' obtenir une estimation globale du projet.

IV.2.2. Coût du matériel :

Le coût du matériel est déterminé à partir de la quantité et du prix unitaire de chaque équipement. Les principaux équipements pris en compte sont les transformateurs, disjoncteurs, sectionneurs, jeux de barres, fusibles, moteurs, groupe électrogène, système ASI, éclairage, prises, câbles et différents équipements des ateliers.

IV.2.2.1 Les coûts d' achat par atelier :

Pour chaque équipement, le coût total est calculé par :

$C_i = Q_i \times P_i$. (TV.1)

Avec :

C_i : coût total de l' équipement,

Q_i : quantité et P_i : prix unitaire.

Le coût total du matériel correspond à la somme des coûts de tous les équipements.

IV.2.2.2 Le poste d' alimentation :

Le tableau (IV.1) illustre les différents prix d' achats estimatifs du poste sources, sans la construction génie civil.

Tableau IV.5 : Investissement du poste d' alimentation (JDB 20/5.5 KV)

Matériels	Quantités	Prix Unitaire (DA)	Prix Total (DA)
Transformateur Principal 20/5.5 KV	3	12 000 000	36 000 000
Disjoncteur	3	6 000 000	18 000 000
Sectionneur	3	500 000	1 500 000
Groupe de Secours (1300 KVAR)	3	12 000 000	36 000 000
Disjoncteur	3	6 000 000	18 000 000
Sectionneur	3	500 000	1 500 000
Coût total	18	37 000 000	111 000 000

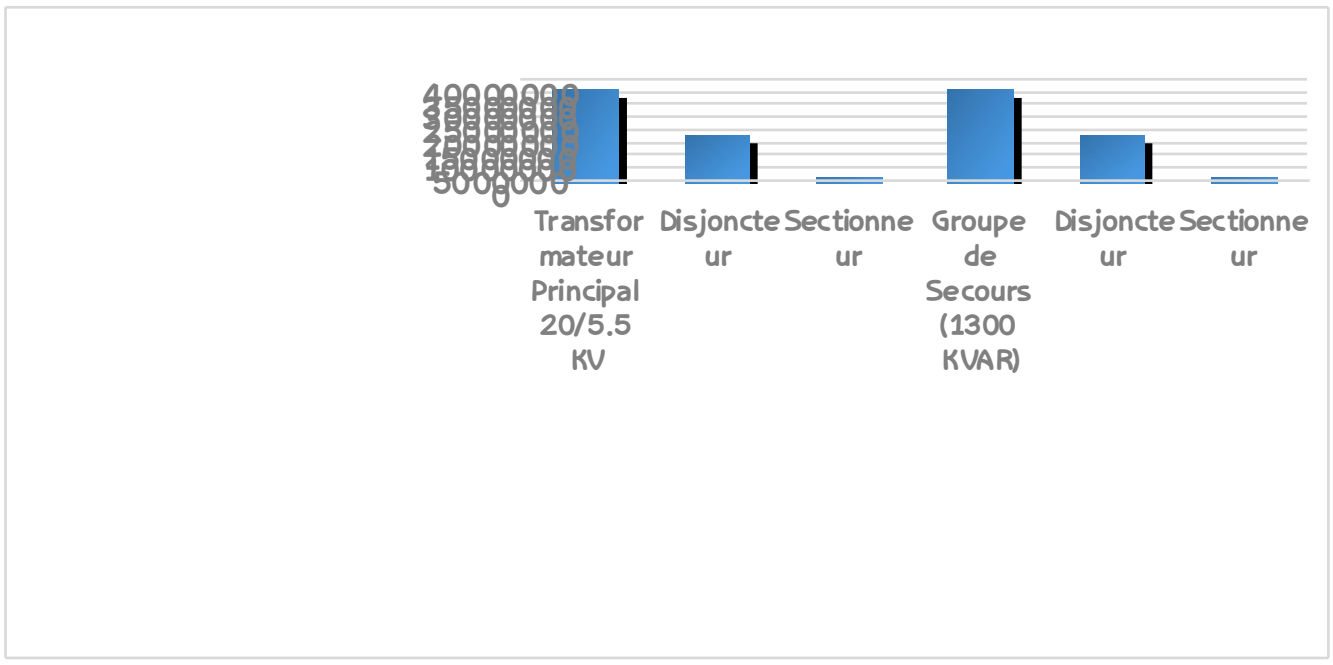


Figure IV.19 : Histogramme des coûts d' investissement du poste d' alimentation 20/5,5 Kv.

Interprétation :

Le graphe de la figure (IV.19) met en évidence le coût élevé des transformateurs principaux et des groupes électrogènes de secours, qui représentent les équipements les plus onéreux d'un poste de transformation source. Les disjoncteurs et sectionneurs complètent le système de protection et de manœuvre, avec un coût inférieur à celui des équipements machines.

IV.2.2.3 Atelier de préparation :

Chaque usine de production dispose d'une zone dédiée à la préparation et au conditionnement des matières premières avant leur envoi pour une transformation à valeur ajoutée ou un traitement ultérieur.

Le tableau (IV.6), montre les prix d' achat des équipements d' un atelier standard de préparation.

Tableau IV.6 : Le coût total de l'atelier de préparation.

Matériels	Quantités	Prix Unitaire(DA)	Prix Total (DA)
JDB	1	500 000	500 000
Disjoncteur	3	4 000 000	12 000 000
Sectionneur	3	500 000	1 500 000000
Fusible	1	8 000	8 000
Transformateur 450 KVA	1	6 000 000	6 000 000
Moteur 280 KW	1	3 000 000	3 000 000
Moteur 140 KW	1	1 500 000	1 500 000
Eclairage	3	12 000	36 000
Chauffage	2	80 000	160 000
Prise	5	1 000	5 000
Câble BT	80	250	20 000
Câble MT	260	3 500	910 000
Coût total	361	15 604 750	25 639 000

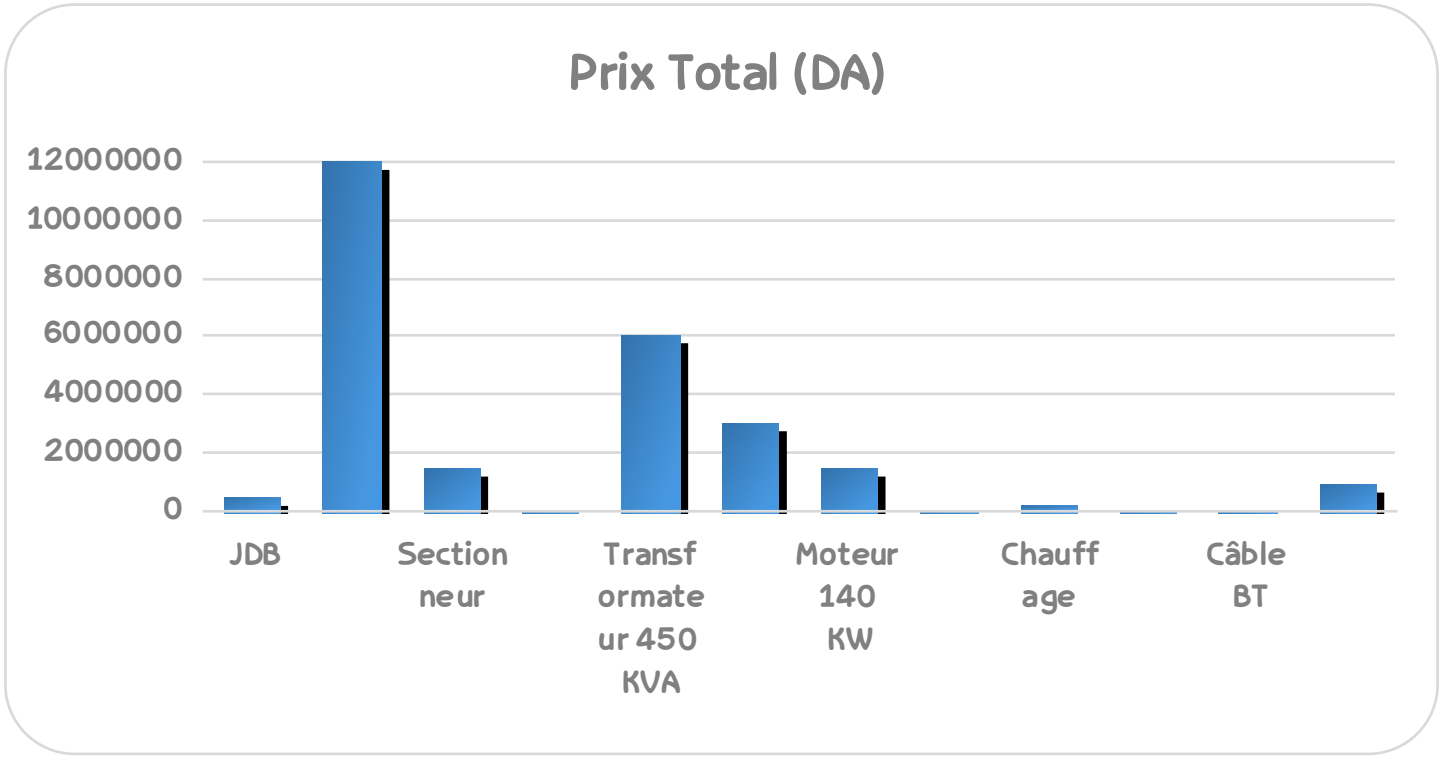


Figure IV.20 : Histogramme des coûts d' investissement de l' atelier de préparation.

Interprétation :

Le coût de cet atelier est principalement lié aux équipements de puissance, notamment le transformateur d' alimentation de 450 kVa et les moteurs de 280 kW et 140 kW. Les équipements de protection, les câbles et les auxiliaires assurent respectivement la sécurité, la distribution et les besoins secondaires de l' installation.

IV.2.2.4 Atelier de production :

Cette zone est le cœur de tout complexe industriel. Cet atelier doit abriter tous les équipements lourds nécessaires au traitement et au mélange des matières premières, conformément aux objectifs de l'usine. Le coût des équipements proposés dans le tableau (IV.7) représente un investissement important par rapport aux autres ateliers du complexe. Non, tout investissement alloué à ce domaine est considéré comme une amélioration de la qualité de la production.

Tableau IV.7 : Le coût total de l'atelier de production.

Matériels	Quantités	Prix Unitaire (DA)	Prix Total (DA)
JDB	1	500 000	500 000
Disjoncteur	10	15 00 000	15 000 000
Sectionneur	10	500 000	5 000 000
Transformateur 5500/400 KV (1250)KVA	2	6 500 000	13 000 000
Moteur 750 KW	2	5 000 000	10 000 000
Moteur 280 KW	2	3 000 000	6 000 000
Groupe électrogène 300 KVA	1	7 000 000	7 000 000
Système ASI	1	500 000	500 000

Eclairage	4	12 000	48 000
Chauffage	3	80 000	240 000
Prise	10	1 000	10 000
Câble BT	100	250	25 000
Câble MT	260	3 500	910 000
Coût total	406	24 596 750	58 233 000

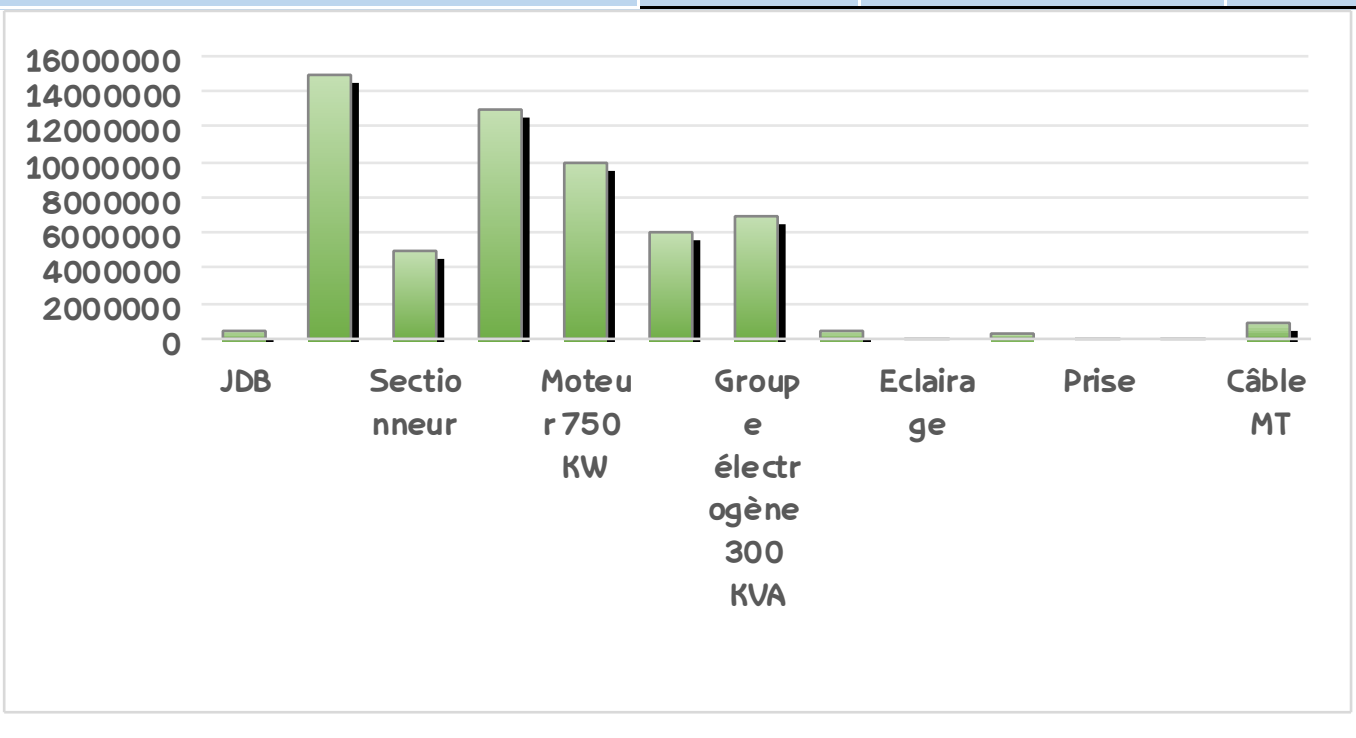


Figure IV.21 : Histogramme des coûts d' investissement de l' atelier de production.

Interprétation :

Cet investissement important s'explique principalement par les besoins élevés en énergie électrique de l'atelier. De nombreux disjoncteurs et moteurs de forte puissance, ainsi que des transformateurs de 1250 kVA, représentent la part importante du cout. En plus le générateur et un système alimentation sans interruption qui garantissent une alimentation électrique de secourt.

IV.2.2.5 Atelier de maintenance :

Afin d' éviter les arrêts de production et les frais supplémentaires de de réparation, l' usine doit contenir un atelier de maintenance bien équipée. Le tableau (IV.8) illustre les équipements proposés et leurs prix d' achat.

Tableau IV.8 : Le coût total de l'atelier de maintenance.

Matériels	Quantités	Prix Unitaire (DA)	Prix Total (DA)
JDB	1	500 000	500 000
Disjoncteur	2	4 000 000	8 000 000
Sectionneur	2	500 000	1 000 000
Transformateur (600 KVA)	1	8 000 000	8 000 000
Moteur 250 KW	2	3 000 000	6 000 000

Eclairage	2	12 000	24 000
Ventilation	2	10 000	20 000
Compresseur	2	450 000	900 000
Four a résistance	2	300 000	600 000
Fluos	6	5 000	30 000
Prise	12	1 000	12 000
Presseuse	2	180 000	360 000
Tour	1	250 000	250 000
Presse	2	150 000	300 000
Poste de soudure	2	80 000	160 000
Pont roulant	2	1 800 000	3 600 000
Fraiseuse	2	350 000	700 000
Rectifieuse	2	180 000	360 000
Meule	2	25 000	50 000
Etau limeur	2	180 000	360 000
Rouleuse	2	450 000	900 000
Plieuse	2	400 000	800 000
Scie à ruban	2	120 000	240 000
CâbleBT	120	250	30 000
CâbleMT	260	3 500	910 000
Coût total	437	20 946 750	34106000

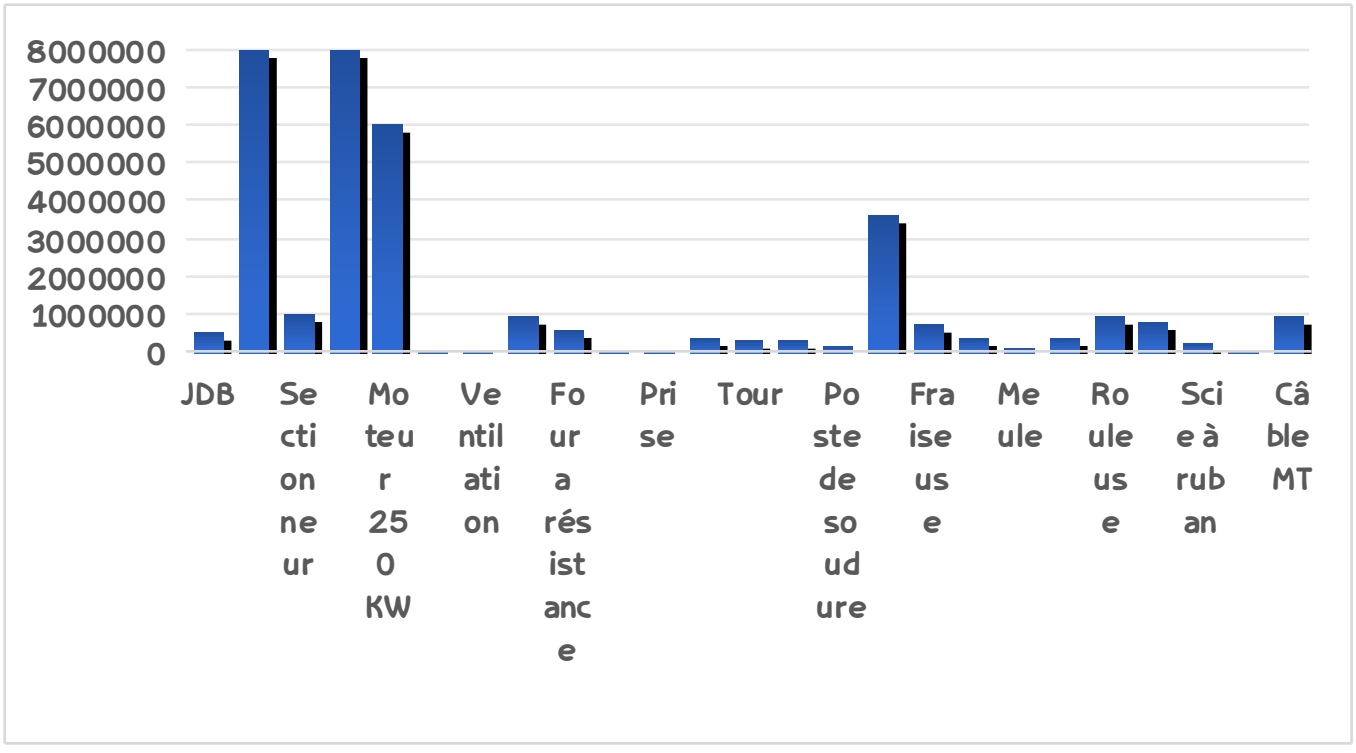


Figure IV.22 : Histogramme des coûts d' investissement de l' atelier de maintenance.

Interprétation :

La diversité des machines présentes dans l'atelier nécessite une répartition des investissements entre transformateurs, moteurs et équipements mécaniques tels que les ponts roulants et les machines d'exploitation. Les dispositifs de protection et le câblage garantissent une alimentation électrique sécurisée pour tous les circuits.

IV.2.2.6. Parc de Stockage :

De toute évidence, tout complexe de production doit comporter un espace de stockage pour les matières premières et les produits finis. Le coût de l' équipement indiqué dans le tableau (IV.9) représente un investissement standard proposé. Toutefois, l'investissement nécessaire en espace de stockage dépend du produit stocké.

Tableau IV.9 : Le coût total du parc de Stockage.

Matériels	Quantités	Prix Unitaire (DA)	Prix Total (DA)
JDB	1	500 000	500 000
Disjoncteur	2	4 000 000	8 000 000
Sectionneur	2	500 000	1 000 000
Fusible	1	8 000	8 000
Transformateur 400 KVA	1	6 000 000	6 000 000
Moteur 280 KW	1	3 000 000	3 000 000
Moteur 150 KW	1	1 500 000	1 500 000
Eclairage	2	12 000	24 000
Chauffage	2	80 000	160 000
Ventilation	2	10 000	20 000
Prise	10	1 000	10 000
Climatiseur	2	150 000	300 000
Câble BT	100	250	25 000
Câble MT	260	3 500	910 000
Coût total	**387**	**15 764 750**	**21 457 000**

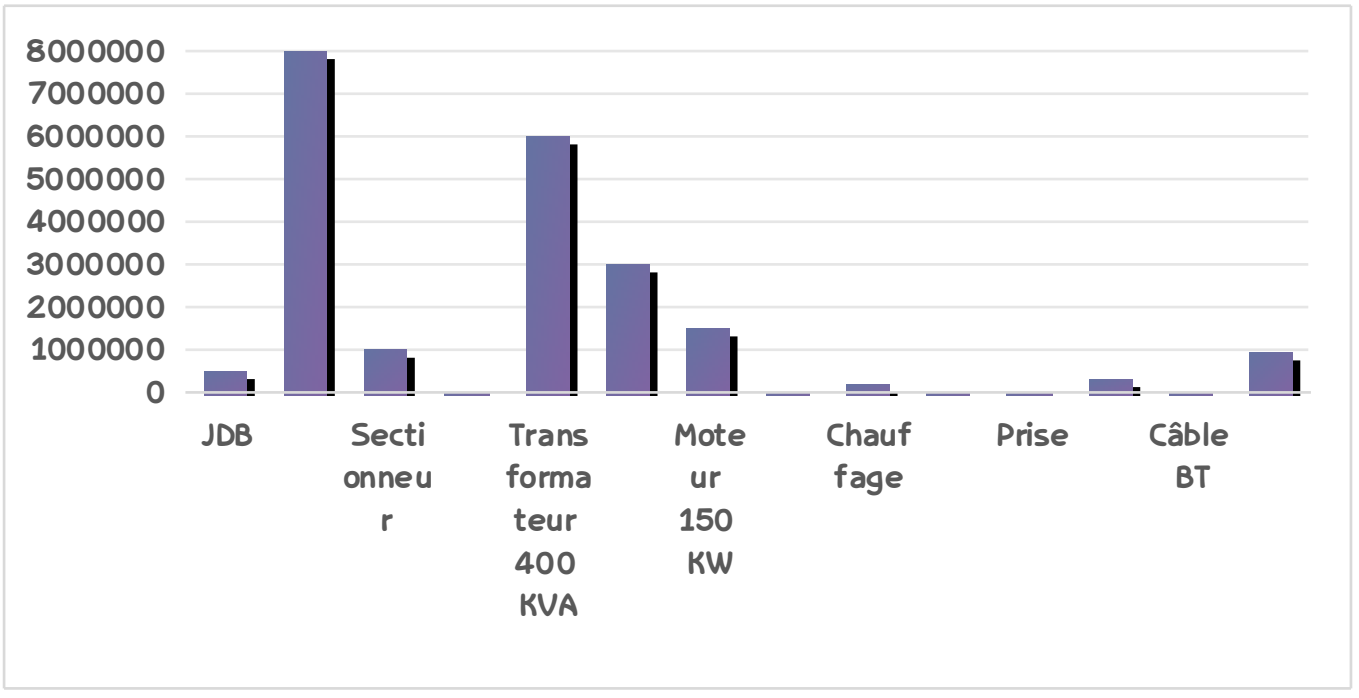


Figure IV.23 : Histogramme des coûts d' investissement du parc de stockage

Interprétation : :

L' investissement du parc est principalement déterminé par le transformateur de 400 kVA et les moteurs nécessaires au fonctionnement des équipements de stockage. Les systèmes d' éclairage, de chauffage, de ventilation et de climatisation présentent des coûts plus faibles mais restent nécessaires au fonctionnement de l' installation.

IV.2.2.7. Bâtiments administratif :

Le bâtiment administratif est un lieu de rencontre et d'échanges entre les cadres et les dirigeants de l'entreprise ; il doit donc disposer de toutes les commodités nécessaires pour faciliter le travail de ses utilisateurs. Le tableau (IV.10) montre les prix des équipements proposés.

Tableau IV.10 : Le coût total du Bâtiments administratif.

Matériels	Quantités	Prix Unitaire (DA)	Prix Total (DA)
JDB	1	500 000	500 000
Disjoncteur	2	4 000 000	8 000 000
Sectionneur	2	500 000	1 000 000
Fusible	1	8 000	8 000
Transformateur 400 KVA	1	6 000 000	6 000 000
Eclairage	1	12 000	12 000
Chauffage	1	80 000	80 000
Climatiseur	1	150 000	150 000
Prise de bureau	4	1 000	4 000
Prise quotidien	3	1 000	3 000
Ascenseur	1	700 000	700 000

Câble BT	80	250	20 000
Câble MT	310	3 500	1 085 000
Coût total	408	11 955 750	17 562 000

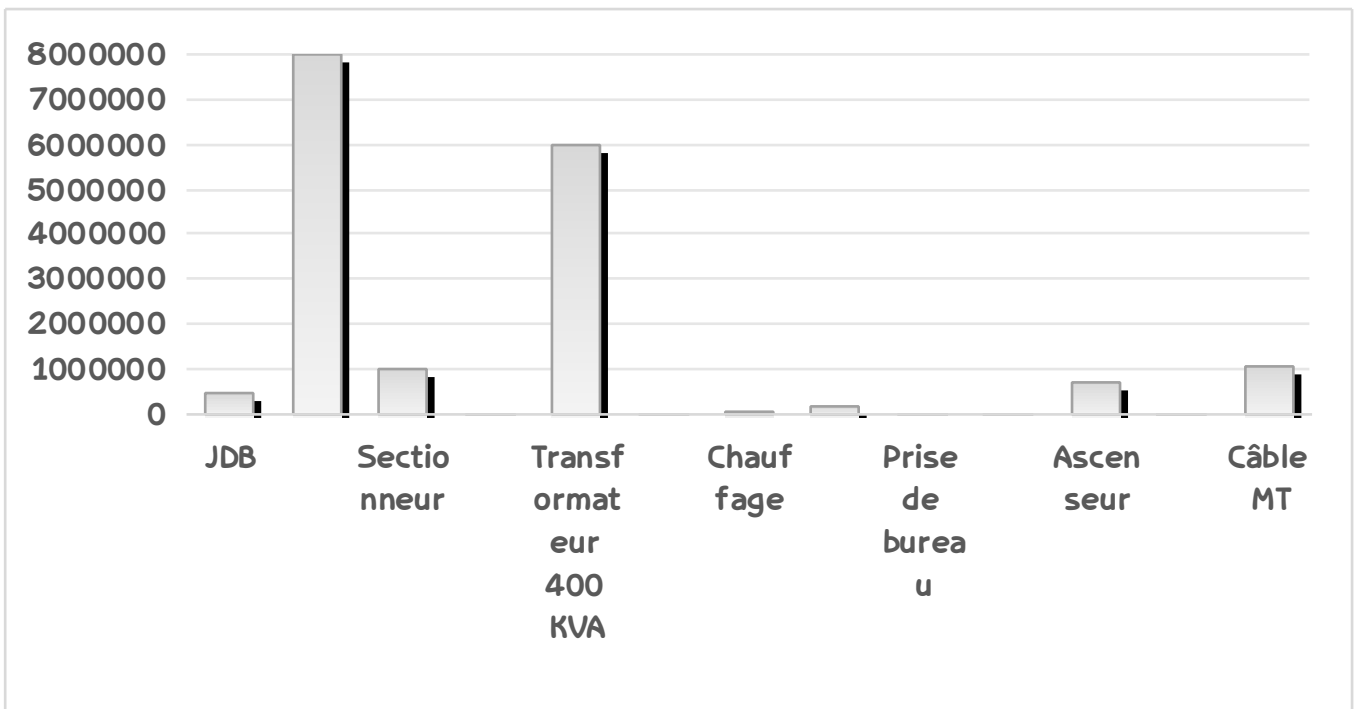


Figure IV.24 : Histogramme des coûts d' investissement du bâtiment administratif.

Interprétation :

La répartition des coûts est dominée par les équipements assurant l' alimentation et la protection électrique, notamment le transformateur de 400 kVA. Les équipements destinés au confort et à l' utilisation du bâtiment, comme l' éclairage, la climatisation, le chauffage, les prises et l' ascenseur, représentent des investissements complémentaires.

IV.2.2.8. Atelier d' épuration d' eau :

Les grands complexes industriels sont tenus d'intégrer des stations d'épuration. L'eau traitée peut être utilisée pour le nettoyage ou la production d'énergie. Le tableau (IV.11) présente les équipements et leurs prix recommandés pour une station d'épuration dans les grandes usines.

Tableau IV.11 : Le coût total de l' atelier d' épuration d' eau.

Matériels	Quantités	Prix Unitaire (DA)	Prix Total (DA)
JDB	1	500 000	500 000
Disjoncteur	2	4 000 000	8 000 000
Sectionneur	2	500 000	1 000 000
Fusible	1	8 000	8 000
Transformateur 250 KVA	1	3 000 000	3 000 000
Moteur 80 KW	1	1 000 000	1 000 000

Eclairage	2	12 000	24 000
Chauffage	2	150 000	300 000
Compresseur l'air	2	10 000	20 000
Mélangeurs	2	36 000	72 000
Câble BT	100	250	25 000
Câble MT	310	3 500	1 085 000
Coût total	426	9 219 750	15 034 000

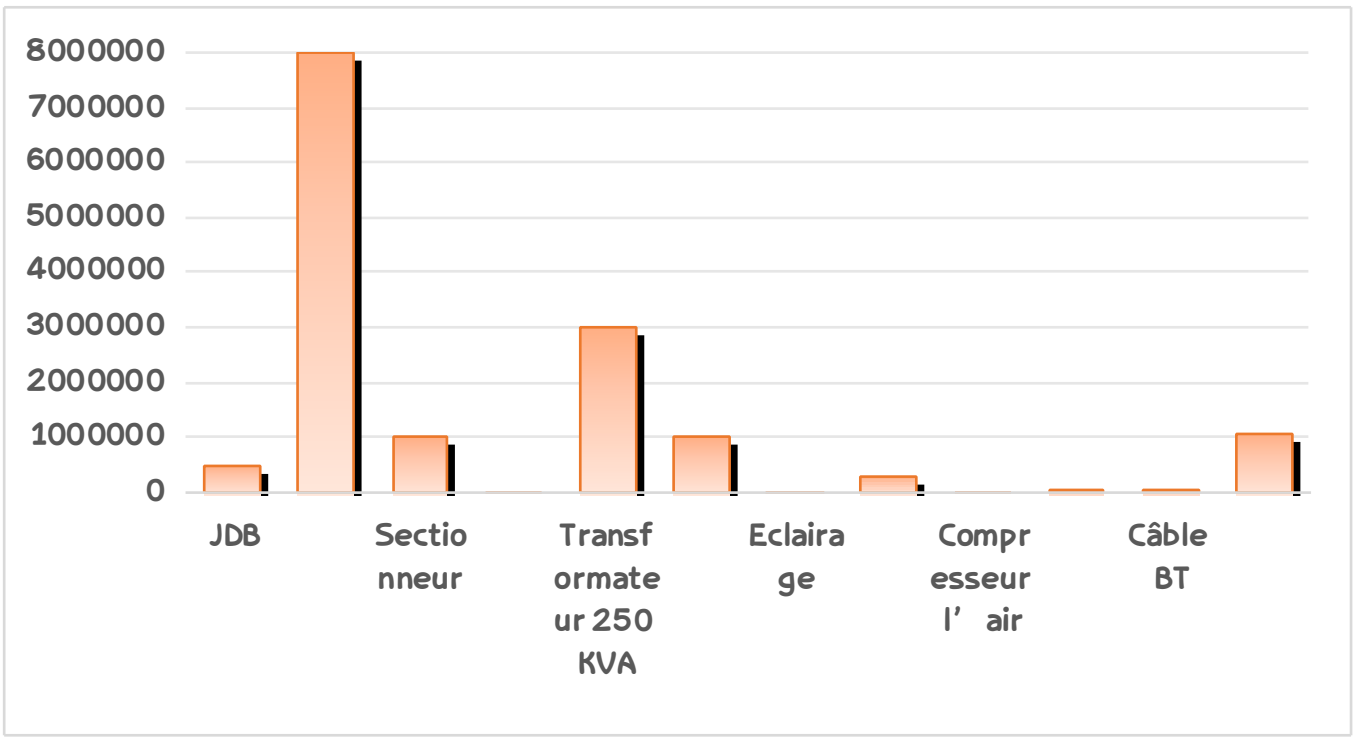


Figure IV.25 : Histogramme des coûts d'investissement de l'atelier d'épuration d'eau.

Interprétation : :

Le transformateur de 250 kVA et le moteur de 80 kW constituent les principaux équipements de puissance de l'atelier d'épuration d'eau. Les dispositifs de protection, les systèmes d'éclairage, de chauffage et les équipements de mélange complètent l'installation en fonction des besoins du traitement de l'eau.

IV.2.2.9. La station de pompage :

Du fait de leur forte consommation d'eau, les grands complexes industriels nécessitent leurs propres stations de pompage. Le tableau (IV.12) présente les équipements et les prix recommandés pour une station de pompage dans les grandes usines, hors coûts de forage.

Tableau IV.12 : Le coût total de la station de pompage.

Matériels	Quantités	Prix Unitaire (DA)	Prix Total (DA)
JDB	1	500 000	500 000
Disjoncteur	2	4 000 000	8 000 000

Sectionneur	2	500 000	1 000 000
Fusible	1	8 000	8 000
Transformateur 250 KVA	1	3 000 000	3 000 000
Pompe150 KW	2	1 500 000	3 000 000
CâbleBT	150	250	37 500
CâbleMT	430	3 500	1 505 000
Coût total	589	9 511 750	17 050 500



Figure IV.26 : Histogramme des coûts d' investissement de la station de pompage.

Interprétation :

Les deux pompes de 150 kW constituent les principales charges de puissance de la station et nécessitent une alimentation adaptée. Le transformateur de 250 kVA assure leur alimentation, tandis que les dispositifs de protection et les câbles permettent une distribution électrique sûre.

IV.2.2.10. L' ensemble des prix d' achat du réseau interne du complexe :

Le tableau (IV.13) regroupe les coûts totaux de l' installation électrique industrielle globale d' un complexe de production de grande échelle.

Tableau IV.13 : Le coût total de l' installation électrique du complexe.

les ateliers	TOT DA
JDB 20/5.5KW	111 000 000
Préparation	25 639 000
Production	58 233 000
Maintenance	34 106 000
Stockage	21 457 000

Bâtiment	17 562 000
Epuration d'eau	15 034 000
Station de pompage	17 050 500
Coût total	300 081 500

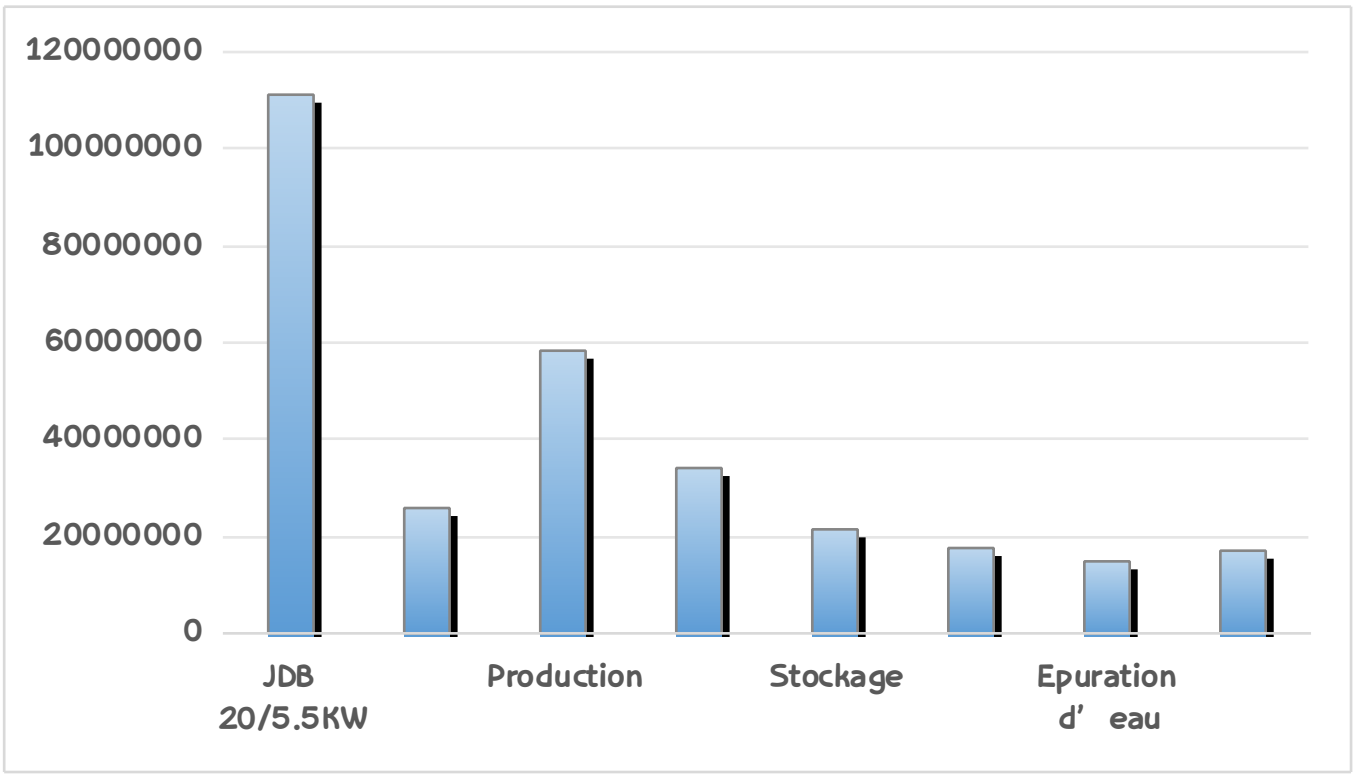


Figure IV.27 : Histogramme des coûts totaux de l' installation électrique industrielle.

Interprétation

La comparaison révèle une forte concentration des investissements dans le poste d' alimentation et l'atelier de production. Cette différence s'explique par la présence d' équipements de transformation, de moteurs de forte puissance et de systèmes de protection plus importants de tous les ateliers. L'analyse du graphe de la figure (IV.9) montre que la répartition des investissements financiers pour chaque atelier correspond à son importance fonctionnelle pour le complexe. Par conséquent, il s'agit d'un bon indicateur pour cette étude.

IV.3 Coût des travaux :

Les coûts de main-d'œuvre comprennent principalement l'installation, le câblage, les connexions, l'assemblage, les tests et la mise en service des équipements. Pour estimer le coût initial de notre projet, nous utilisons 15 % du coût des équipements. Sur cette base, nous obtenons le montant suivant : (22)

$$Ct_{15\%} = 45\,012\,225\ DA$$

IV.4 Coût de l' étude :

Pour l' estimation préliminaire, le coût des études d' ingénierie est retenu à 5 % du coût du matériel. Cette valeur est adoptée comme hypothèse simplifiée, en s'

appuyant sur les pratiques d' estimation des coûts d' ingénierie utilisées dans les études de faisabilité. Sur cette base, nous obtenons le montant suivant :

$$Cé_{5\%} = 15\ 004\ 075\ DA$$

IV.5 Coût global de l' installation :

Le coût global est obtenu en additionnant le coût du matériel, le coût des travaux et le coût de l' étude comme il illustré sur le tableau suivant.

Tableau IV.14 : les Coût global de l' installation.

Désignation	Montant (DA)
Coût du matériel	300 081 500
Coût des travaux (15 % du coût matériel)	45 012 225 DA
Coût de l'étude (5 % du coût matériel)	15 004 075 DA
Coût total	*360 097 800 DA*

IV.6 Interprétation économique :

Dans cette section du chapitre 4, nous avons réalisé une étude de faisabilité technique et économique du projet d'installation électrique, en nous appuyant sur des documents scientifiques. Cette étude nous a permis d'évaluer le coût total de divers équipements électriques sélectionnés, notamment les tableaux de distribution, les disjoncteurs, les transformateurs, les câbles et les dispositifs de protection et de contrôle.

Le coût des travaux d'installation et des études a également été intégré à l'évaluation économique grâce à des taux estimés appliqués au coût des équipements. Cette approche nous a permis de déterminer l'investissement total nécessaire à la mise en œuvre du projet d'installation industrielle.

L' analyse économique complète ainsi l' étude technique présentée dans les chapitres précédents et permet de vérifier la faisabilité globale du projet.

Cette étude nous a appris que le choix des équipements est crucial car il représente un compromis satisfaisant entre le coût d'investissement, la sécurité, la fiabilité, les performances et la continuité de service, tout en répondant aux exigences techniques de l'installation concernée.

IV.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, la modélisation et la simulation sous ETAP ont permis de vérifier le comportement de l' installation électrique dans différentes conditions de fonctionnement. Les études réalisées, notamment le Load Flow, la contingence N-1, le court-circuit et l' analyse harmonique, ont permis de contrôler les performances du réseau et de vérifier la cohérence des choix effectués lors du dimensionnement.

Par ailleurs, l' évaluation techno-économique a permis d' estimer le coût global du projet en prenant en compte les principaux équipements, les travaux d' installation ainsi que les études d' ingénierie.

Ainsi, l' ensemble de la démarche suivie dans ce travail, depuis l' établissement du cahier des charges et l' identification des besoins jusqu' au dimensionnement, à la simulation et à l' évaluation économique, permet de structurer les différentes étapes d' une étude d' installation électrique industrielle. Cette démarche constitue donc une base méthodologique utile pour la conception et la réalisationde projets industriels similaires.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de ce travail, nous avons réalisé un cahier des charges destiné à faciliter l' étude et la conception d' une installation électrique industrielle. L' objectif principal était de regrouper, dans un même document, les différentes informations et étapes nécessaires à une personne ou à une entreprise qui souhaite générée un bureau d' étude technique pour la conception et la réalisation des installations électriques industrielles ou les tronçons de réseau pour les zones industrielles.

Le cahier des charges proposé comprend un sommaire de six thèmes principaux, chacun divisé en plusieurs articles. Ces axes ont été inspirés et organisés selon les méthodologies de dimensionnement des réseaux électriques industriels, comme suit :

- Collecte de données : Dans ce domaine, le concepteur peut distinguer plusieurs éléments, tels que les conditions environnementales, la corrélation géographique des récepteurs fonctionnels, les classifications des récepteurs, ainsi que les extensions et les limitations du réseau public ;
- Élaboration du premier schéma unifilaire : Cette partie comprend le bilan de puissance, le choix des niveaux de tension, les sources d' énergie, le choix des régimes de neutre et choix de la structure du réseau ;
- Études techniques et approbation du schéma unifilaire : Cette section contient plusieurs éléments tels que le calcul du courant, la détermination des sections transversales des conducteurs, la sélection des transformateurs, des générateurs et de la puissance réactive, ainsi que la coordination de l'isolation dans les installations électriques industrielles ;
- Choix du matériel : Cet aspect comprend l'application des normes actuelles et des caractéristiques du réseau ;
- Définition du plan de protection : Cette section contient plusieurs articles, parmi lesquels on trouve le fonctionnement normal de l'installation, la sélectivité de la protection et le rôle des mesures de protection en cas de défaillance ;
- La dernière section est consacrée au système de contrôle et à la simulation.
- Cette section porte sur la vérification du comportement de l' installation, sur l' optimisation des coûts liés aux équipements, à l'énergie, à la gestion et à la maintenance.

Notre travail du cas d' application a commencé par la collecte des informations concernant le projet et la proposition d' un schéma unifilaire de l' installation, afin de bien identifier les besoins, les différents équipements, les puissances utilisées ainsi que les contraintes du site. À partir de ces données, le cahier des charges permet de suivre progressivement les différentes étapes de l' étude, depuis la définition des besoins jusqu' au choix des équipements électriques.

Conclusion générale

Nous avons également intégré dans cette démarche le dimensionnement de l' installation, le choix des câbles et des équipements, ainsi que l' étude des protections électriques. Ces éléments permettent de mieux organiser le réseau interne et de garantir une installation adaptée, sûre et fiable. Le schéma unifilaire occupe également une place importante, car il permet de visualiser clairement l' organisation du réseau et les différents niveaux de distribution.

Après homologation du schéma proposé, nous avons réalisé une simulation sur ETAP pour vérifier le fonctionnement de l' installation et de comparer les résultats obtenus avec les calculs réalisés. La simulation peut également aider à repérer certains problèmes et à apporter des améliorations avant la réalisation réelle du projet.

Ainsi, le résultat principal de notre travail est la mise en place d' un cahier des charges qui peut servir de guide pratique pour une future étude. Une personne qui possède une idée de projet industriel peut s' appuyer sur ce document pour savoir quelles informations recueillir, quelles études réaliser, quels équipements prendre en compte et quelles étapes suivre pour arriver à une installation électrique cohérente et adaptée à son projet.

En fin, notre travail ne se limite donc pas à présenter des notions sur les réseaux électriques industriels, mais cherché surtout à proposer une démarche claire et utilisable, permettant de transformer une idée de projet en une étude électrique organisée, tout en facilitant le travail des bureaux d' études et des personnes qui souhaitent se lancer dans un projet industriel.

Conclusion générale

V : Startup

V : Startup

Description du projet :

ELECPRO est un projet de création d' un bureau d' études spécialisé dans la conception et le dimensionnement des installations électriques industrielles. Il propose des services d' études techniques, de calcul et de simulation des réseaux électriques, ainsi que l' analyse des systèmes de protection. Son objectif est d' accompagner les entreprises industrielles dans la réalisation de leurs projets en leur proposant des solutions électriques fiables, sécurisées et adaptées à leurs besoins.

Business Model Canvas :

Le Business Model Canvas présente de manière synthétique le modèle économique proposé pour la création d' un bureau d' étude spécialisé dans les installations électriques industrielles. Il permet d' identifier les principaux clients, la proposition de valeur, les ressources et activités nécessaires, ainsi que les partenaires, les canaux, les sources de revenus et la structure des coûts.

Tableau V.1 : Business Model Canvas du projet.

PARTENAIRES CLÉS	ACTIVITÉS CLÉS	PROPOSITION DE VALEUR	RELATIONS AVEC LES CLIENTS	SEGMENTS DE CLIENTS
• Entreprises d' installation électrique • Fournisseurs de matériel électrique	• Études et conception des installations électriques • Calcul, simulation et vérification du réseau • Étude de protection et de sécurité électrique	• Proposer plusieurs scénarios de conception électrique pour un même projet • Comparer les solutions sur les plans technique et économique • Accompagner le client dans le choix de la solution la plus adaptée à ses priorités	• Accompagnement personnalisé • Communication directe avec le client • Assistance après l' étude	• Entreprises industrielles • Investisseurs et porteurs de projets industriels • Nouvelles usines et unités de production

V : Startup

RESSOURCES CLÉS

Ressources matérielles : Bureau, ordinateurs, logiciels d' étude
Financières : capital du départ, fonds de fonctionnement
Humain:ingénieurs génie électrique,technicien,responsables commerciales

CANAUX

Direct :
- Site web
- Réseaux sociaux

Indirect :
- Accueil des clients au bureau
- Prospection directe auprès des entreprises

STRUCTURE DES COÛTS

- Coûts fixes : loyer du bureau, salaires du personnel, abonnements internet et télécommunication, frais administratifs
- Coûts variables : prestations externes, déplacements et visites chez les clients

SOURCES DE REVENUS

- Direct : réalisation des études
- Indirect : formation technique

Le modèle proposé repose sur la réalisation d' études électriques industrielles et l' accompagnement des clients dans leurs projets. Une particularité du projet consiste à proposer plusieurs scénarios techniques et économiques pour une même installation, permettant au client de comparer les solutions et de choisir celle qui répond le mieux à ses besoins et à ses contraintes.

Business Plan :

Dans le cadre de notre projet de création d' un bureau d' études spécialisé dans les installations électriques industrielles, l' élaboration d' un Business Plan permet d' étudier les aspects économiques et financiers du projet. Il consiste à déterminer les investissements nécessaires, à estimer les charges liées au fonctionnement du bureau et à prévoir l' évolution du chiffre d' affaires sur une période de cinq ans. Cette démarche permet d' évaluer la viabilité du projet et d' examiner ses perspectives de rentabilité et de développement.

Tableau V.2 : **Investissement** du projet.

INVESTISSEMENT					
				Année 01	Total Période
SDE		Computer		200 000	200 000
		Computer pc		300 000	300 000
		Computer secrétair		60 000	60 000
		Smartphone		240 000	240 000

V : Startup

		Bureau		150 000	150 000
		Grand table		60 000	60 000
		Chaise ING		75 000	75 000
		petit chaise		30 000	30 000
		Grand imprimante		100 000	100 000
		Petit imprimante		34 000	34 000
		Climatiseur		100 000	100 000
		TV plan		10 000	10 000
		Camera		20 000	20 000
		Matériel N° 14		0	0
		Matériel N° 15		0	0
		Matériel N° 16		0	0
		Matériel N° 17		0	0
		Matériel N° 18		0	0
		Matériel N° 19		0	0
		Sous-Total (01)		1 379 000,00	1379000

Tableau V. 3 : Achat directs

Achat directs					
Achats directs		Prestation			Total
		Produit/Service N° 01			0
		Produit/Service N° 02			0
		Produit/Service N° 03			0
		Produit/Service N° 04			0
		Produit/Service N° 05			0
		Sous-Total (03)			0

Tableau V. 4 : Masse salariale.

MASSE SALARIALE

V : Startup

			ETP	Total
PERMANENTS		Chef de projet	1,00	917 400
			0,00	0
		ING réseau électrique	1,00	825 600
		ING réseau électrique	1,00	825 600
		Secrétaire	1,00	554 040
		Responsable marketing	1,00	554 040
		ING logiciel	1,00	733 800
		Poste N°07	1,00	0
		Poste N°08	0,00	0
		0	0,00	0
		Sous-Total (2)		4 410 480

Tableau V. 5 : Charges externes

		Libellé		Total
Charges externes		Frais de constitution		30000
		Location d'un local		720000
		Energie/eau/gaz		67000
		Frais d'entretien		25000
		Internet		36000
		Smartphone		90000
		enregistrement d'une marque		20000
		assurances sociales		300000
		Frais de marketing		30000
		cout de formation		30000

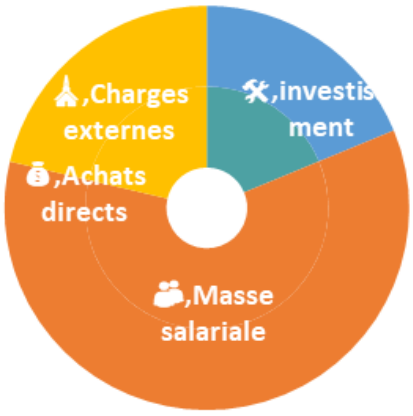
V : Startup

		services de comptabilité		120000
		autre frais		100000
		0		0
		Sous-Total (04)		1 568 000,00

SYNTHESE				
Catégorie			Montant	
🛠️		investissement	1 379 000	19%
👥		Masse salariale	4 410 480	60%
💰		Achats directs	0	0%
⛪		Charges externes	1 568 000	21%
			7 357 480	









V : Startup

La synthèse du Business Plan présente un budget prévisionnel total de 7 357 480 DA pour la création et le fonctionnement du bureau d' études. La masse salariale représente la part la plus importante des dépenses (60 %), suivie des charges externes (21 %) et des investissements initiaux (19 %). Les achats directs sont nuls, car l' activité repose principalement sur les prestations intellectuelles et les études techniques.

Cette répartition met en évidence l' importance des ressources humaines et des moyens matériels nécessaires au fonctionnement du bureau d' études. La réalisation des études électriques constituera la principale source de revenus du projet. La maîtrise des dépenses et l' acquisition de nouveaux clients seront donc essentielles au développement et à la pérennité de l' activité.

Bibliographiques

Bibliographiques

(1) : Schneider Electric Guide de l'Installation Electrique 2017

(2) : J. Marie BROUST, `` Appareillages et installations électriques industriels``, Dunod, Paris, 2008

(3) : « Postes électriques », 11/05/2020. Disponible sur : www.exoco_lmd.com.

(4) : G. VALENTIN, « Techniques d' ingénieur », D4600 Poste moyenne tension.

(5) : C. PRÉVÉ, R. JEANNOT, « Guide de conception des réseaux électriques industriels », Schneider Electric (Février 1997).

(6) : GUENTRI Hocine, Les réseaux électriques industriels, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila, 2021/2022

(7) : SIEMENS S.A : solution and service « La connaissance de l' intensité du court– circuit aux différents points

(8) : K. IFIRES, N. KACED et R. SELILIA « dimensionnement de protection d' un départ moyenne tension application issu de TIZI MEDDEN » Mémoire d' ingénieur UMMTO 2007.

(9) : A. CHIBAH, « Etude de la protection du réseau moyenne tension de L' ENEL" »2008.

(10) : WILDI, G. SYBILLE<<Electrotechnique 4eme édition>>, De Boeck, Septembre 2005.

(11) : M. BAHIDDINE "Protection des réseaux électriques MT et HT », 2012.

(12) : P. LAGONOTTE « Installations électriques », Edition HERMES, 2000.

(13) : S. THEOLEYRE, « Les Techniques de Coupure en MT », cahier technique N° 193, Schneider Electric.

(14) :<<SPECIFICATION TICHNIQUE ONE ST N° D22–P66>>, edition Out 2010.

(15) : A. MELLAL, M HADIM « Présentation d' un poste d' interconnexion » Mémoire de fin d' études DEUA en électrotechnique. UMMTO, 1997.

(16) : MERLIN GERIN<<Guide de protection>>Schneider électrique, edition2006.

(17) : Guide de la protection ,2003.

(18) : id–8993.

(19) : Operation Technology, Inc., "ETAP 19.0 User Guide: Load Flow, Short Circuit, and Harmonic Analysis Modules", Irvine, California, USA, 2019.

(20) : Schneider Electric. (2023). Catalogue Général : Solutions pour la Distribution Électrique Basse et Moyenne Tension. Schneider Electric Industries SAS.

(21) : Commission Électrotechnique Internationale. (2016). CEI 60909–0 : Courants de court–circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif. Genève, Suisse

(22) : Japan International Cooperation Agency (JICA), "Mega Manila ITS Integration Project.

Annexe

Annexe

Tableau A.1: Détermination de la lettre de sélection.

Type d'élément conducteur	Mode de pose	Lettre de sélection
Conducteurs et câbles multiconducteur	Sous conduit, profilé ou goulotte, apparent ou encastré sous vide de construction, faux plafond sous caniveau, moulures, plinthes, chambranles	B
	• En apparent contre mur ou plafond • Sur chemin de câble ou tablettes mon perforées	C
Câbles multiconducteurs	• Sur échelle, corbeaux, chemin de câbles perforé • Fixé en apparent, espacés de la paroi • Câbles suspendus	E
Câbles mono conducteur	• Sur échelle, corbeaux, chemin de câbles perforé • Fixé en apparent, espacés de la paroi • Câbles suspendus	F

Tableau A.2: Le facteur de correction K1.

Lettre de sélection	Cas d'installation	K1
B	– câbles dans des produits encastrés directement dans des matériaux thermiquement isolants	0,70
	– conduits encastrés dans des matériaux thermiquement isolants	0,77
	– câbles multiconducteurs	0,90
	– vide de construction et caniveaux	0,95
C	– sous plafond	0,95
B, C, E, F	– autres cas	1

Tableau A.3: Le facteur de correction K2.

Lettre de sélection	Disposition des câbles jointifs	Nombre de circuits ou de câbles multiconducteurs									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	12
B, C	Encastré ou noyés dans les parois	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45
C	Simple couche sur les murs ou sur les planchers ou tablettes non perforées	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70	0,70
	Simple couche au plafond	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61	0,61
E, F	Simple couche sur des tablettes horizontales perforées ou tablettes verticales	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72	0,72
	Simple couche sur des échelles à câbles, corbeaux, etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78
Facteur	Deux couches de câble										

Tableau A.4 : Le facteur de correction K3.

Température			
Ambiante en ° C	Elastomère (Caoutchouc)	Polychlorure de Vinyle (PVC)	Polyéthylène réticulé (PR) butyle, éthylène, propylène (EPR)
10	1,29	1,22	1,15
15	1,22	1,17	1,12
20	1,15	1,12	1,08
25	1,07	1,07	1,04
30	1,00	1,00	1,00
35	0,93	0,93	0,96
40	0,82	0,87	0,91

45	0,71	0,79	0,87
50	0,58	0,71	0,82
55		0,61	0,76
60		0,50	0,71

Tableau A.5: Sections des conducteurs pour les canalisations non enterrées.

		isolant et nombre de conducteurs chargés (3 ou 2)								
		caoutchouc ou PVC			butyle ou PR ou éthylène PR					
Lettre desélection	B	PVC 3	PVC 2		PR 3		PR 2			
	C		PVC 3		PVC 2	PR 3		PR 2		
	E			PVC 3		PVC 2	PR 3		PR 2	
	F				PVC 3		PVC 2	PR 3		PR 2
Section	1,5	15,5 A	17,5 A	18,5 A	19,5 A	22 A	23 A	24 A	26 A	A
cuivre	2,5	21	24	25	27	30	31	33	36	
(mm²)	4	28	32	34	36	40	42	45	49	
	6	36	41	43	48	51	54	58	63	
	10	50	57	60	63	70	75	80	86	
	16	68	76	80	85	94	100	107	115	
	25	89	96	101	112	119	127	138	149	161
	35	110	119	126	138	147	158	169	185	200
	50	134	144	153	168	179	192	207	225	242
	70	171	184	196	213	229	246	268	289	310
	95	207	223	238	258	278	298	328	352	377
	120	239	259	276	299	322	346	382	410	437
	150		299	319	344	371	395	441	473	504
	185		341	364	392	424	450	506	542	575
	240		403	430	461	500	538	599	641	679
	300		464	497	530	576	621	693	741	783
	400					656	754	825		940
	500					749	868	946		1083
	630					855	1005	1088		1254
Section	2,5	16,5	18,5	19,5	21	23	25	26	28	
aluminium	4	22	25	26	28	31	33	35	38	
(mm²)	6	28	32	33	36	39	43	45	49	
	10	39	44	46	49	54	59	62	67	
	16	53	59	61	66	73	79	84	91	
	25	70	73	78	83	90	98	101	108	121
	35	86	90	96	103	112	122	126	135	150
	50	104	110	117	125	136	149	154	164	184
	70	133	140	150	160	174	192	198	211	237
	95	161	170	183	195	211	235	241	257	289
	120	186	197	212	226	245	273	280	300	337
	150		227	245	261	283	316	324	346	389
	185		259	280	298	323	363	371	397	447
	240		305	330	352	382	430	439	470	530

Annexe

	300		351	381	406	440	497	508	543	613
	400					526	600	663		740
	500					610	694	770		856
	630					711	808	899		996

Description de bâtiment administrative :

Le bâtiment administratif se compose de quatre bureaux, d&#39 ; une salle de réunion, d&#39 ; un hall d&#39 ; accueil et d&#39 ; un ascenseur répartis sur deux niveaux. Les différents récepteurs alimentés sont l&#39 ; éclairage, les prises de bureau, les prises de service, la climatisation, le chauffage et l&#39 ; ascenseur.