

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique



Projet de Fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique.

Options : Électrotechnique Industrielle

Thème

Étude et optimisation de la compensation de l'énergie réactive des pompes 5.5 kV du Manifold du Terminal Marine de Bejaia

Préparé par :

- BORDJAH Nassima
- FERHANE Dihia

Encadré par :

HERZINE Mohand Seghir
YAHAIOUI Fayçal

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail. C'est grâce à sa miséricorde que ce projet a pu voir le jour.

Ce mémoire vient clore un chapitre important de mon parcours universitaire au sein de l'Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, « Targa Ouzemmour », une étape marquée par l'apprentissage, les défis, et de précieuses rencontres humaines et académiques.

J'exprime ma profonde gratitude à mon encadrant, Monsieur Herzine Mohand.S, pour sa disponibilité, ses orientations éclairées et son soutien tout au long de ce travail. Ses conseils m'ont permis d'avancer avec confiance et rigueur.

Je remercie également les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour la richesse de leurs remarques et suggestions, qui contribueront sans aucun doute à l'amélioration de mes futurs travaux.

Mes sincères remerciements vont aussi à Monsieur Yahaioui Fayçal, ingénieur à l'entreprise SONATRACH-site de Bejaïa, pour son accueil, son accompagnement et sa disponibilité durant mon stage.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance envers ma famille, pour leur amour, leur confiance et leur soutien inconditionnel tout au long de mon parcours. Leur présence a toujours été un pilier dans ma vie.

Enfin, je remercie chaleureusement toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Que ce soit par un mot d'encouragement, une aide ponctuelle ou un simple sourire, votre contribution m'a été précieuse.

Dédicaces

« Louange à dieu qui nous aidés à accomplir ce travail »

Et me voici aujourd’hui, offrant le fruit de mes efforts en reconnaissance à ceux qui après Dieu, ont été mon soutien et mon appui tout au long de ce parcours.

Je dédie ce travail

À l’âme de ma chère mère

Je prie dieu de t’envelopper de sa vaste miséricorde et de faire du paradis ta demeure éternelle.

À mes frères et sœurs bien-aimés

Je vous remercie du fond du cœur pour votre amour sincère et votre soutien indéfectible à chaque étape de ma vie.

Et à mon grand frère

Tu n’as jamais été seulement un frère, mais un véritable soutien, un cœur généraux, et une main tendue dans chacun de mes moments de faiblesse. Merci pour ton amour inconditionnel et ta présence constante à mes côtés. Merci d’avoir cru en moi quand moi-même j’en doutais, et pour tes sacrifices inestimables. Tu es la lumière qui a éclairé mon chemin et la force dans chacun de mes pas.

Ma reconnaissance envers toi gravée à jamais dans mon cœur.

Qu’Allah te récompense pour tout le bien que tu m’as fait, qu’il te protège et veille toujours sur toi.

Nassima Bordjah

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À ceux qui m'ont accompagnée, soutenue et aimée tout au long de mon parcours.

Ce mémoire est le reflet de leur présence, de leur amour et de leur patience.

À mes chers parents : Mohamed et Messaouda

Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices silencieux, leur patience infinie et leurs prières constantes. Rien de tout cela n'aurait été possible sans vous. Vous êtes ma plus grande fierté et ma source de force.

À mes frères bien-aimés : Moukrane, Karim, Sofiane et Djaafer

Merci pour votre protection, vos encouragements, et votre présence rassurante dans ma vie.

À mes sœurs adorées :

À Kahina, la grande sœur qui ne m'a jamais laissée tomber, toujours là dans les moments difficiles comme dans les moments de joie, et à sa fille, Ayla, ma nièce douce et lumineuse, source d'affection et de sourires.

À Nuorhane et Marame, pour leur tendresse, leurs sourires, et leur soutien quotidien.

À mes amis proches

En particulier à Samir, mon soutien fidèle, toujours présent dans les moments les plus décisifs. Merci pour ta confiance et ta force.

À mes précieuses amies : Ahlam, Hadjer, Tafsout, Houda et Sara,Céline

Avec qui j'ai partagé des instants inoubliables, des rires, des larmes, et tant de souvenirs. Merci d'avoir été là, chacune à votre manière, vous avez embelli ce parcours.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à cette aventure : cette réussite est aussi la vôtre.

Ferhane Dihia

Sommaire

Introduction générale..... 1

Chapitre I: Description générale de l'entreprise SONATRACH Bejaïa

I.1. Introduction.....	3
I.1.1. Présentation de l'entreprise SONATRACH Bejaïa	3
I.1.2. L'historique.....	3
I.1.3. Présentation de la DRGB	4
I.1.3.1. Organisation de la DRGB	4
I.1.4 Présentation de différentes structures de la DRGB.....	6
I.1.5. Terminal marin de Bejaïa (TMB)	8
I.1.5.1. Introduction.....	8
I.1.5.2 Situations géographiques du TMB.....	8
I.1.5.3 Terminal Marin Nord (TMN)	9
I.1.5.4 Terminal Marin Sud (MS)	10
I.1.6 Port pétrolier	12
I.1.6.1 Situations géographique du port pétrolier.....	12
I.2. Présentation de l'installation.....	12
I. 3. Présentation du manifold qui héberge les pompes 5,5 kV.....	14
I.4. Description du fonctionnement du manifold et des pompes.....	16
I.4.1. Fonctionnement du Manifold.....	16
I.4.2. Fonctionnement des pompes.....	16
I.5. Conclusion	17

Chapitre II: Calcul du Bilan de Puissance de l'installation

II.1 Introduction	18
II.2 Présentation du réseau existant.....	18
II.2.1 Terminal Marin Nord.....	18
II.2.1.1 Poste de livraison MT de 30 kV	18
II.3 Différents types de puissance	19
II.3.1 La puissance active P	19
II.3.2 La puissance réactive Q	20
II.3.3 La puissance apparente S.....	20
II.3.4 Facteur de puissance	21
II.3.4.1 Amélioration de $\cos\phi$ d'une installation.....	21
II.3.4.2 Avantages d'un bon facteur de puissance.....	22

II.3.4.3 Inconvénients d'un mauvais facteur de puissance.....	22
II.4 Schéma unifilaire de l'installation.....	22
II.5 Plaque signalétique des groupes électropompes.....	23
II.6 Élaboration du bilan de puissance de l'installation	26
II.6.1 Puissance installée	26
II.6.2 Puissance utilisée	27
II.7 Description des facteurs de correction.....	27
II.7.1 Facteur d'utilisation Ku	27
II.7.2 Facteur de simultanéité Ks.....	27
II.7.3 Facteur d'extension Ke	28
II.8 Calcul du bilan de puissance de l'installation	28
II.8.1 Calcul de la puissance installée	28
II.8.3 Calcul du facteur de puissance de l'installation	33
II.9 Conclusion	33

Chapitre III: Compensation d'énergie réactive

III.1. Introduction	34
III.2. Définition de l'énergie réactive consommée.....	34
III.3. Compensation d'énergie réactive	34
III.3.1. Définition	34
III.3.2. Batterie de condensateurs.....	35
III.3.2.1. Types de batteries.....	36
III.3.2.1.1. Batterie shunt.....	36
III.3.2.1.2. Batterie série.....	37
III.3.2.2. Constitution de la batterie de condensateurs	37
III.3.2.3. Protection des batteries de condensateurs	38
III.3.2.3.1. Condensateur sans fusibles de protection interne	38
III.3.2.3.2. Condensateur avec fusibles de protection interne	38
III.3.2.4. Avantages et inconvénients des batteries de condensateurs.....	38
III.3.3. Principe de compensation.....	39
III.4. Détermination de l'équipement de la compensation	40
III.4.1. Puissance réactive Qc des condensateurs	41
III.4.2. Choix du couplage d'un condensateur	41
III.4.2.1. Couplage triangle	41
III.4.2.2. Couplage étoile.....	42
III.4.3. Choix de la localisation	43

III.4.3.1. Compensation globale	43
III.4.3.2. Compensation partielle (par secteur).....	44
III.4.3.3. Compensation individuelle.....	45
III.4.4. Choix du type de compensation	46
III.4.4.1. Compensation fixe (batterie fixe).....	46
III.4.4.2. Compensation automatique (batterie en gradin)	47
III.4.5. Choix du type de batterie	47
III.5. Dimensionnement des batteries de condensateur à installer (partie pratique)	48
III.5.1. Détermination de la puissance des condensateurs $Q_c(kVAR)$	48
III.5.1.1. Puissance réactive après compensation Q'	48
III.5.2. Détermination du type de montage des batteries des condensateurs	49
III.5.3. Détermination le choix d mode de compensation	49
III.5.4. Détermination du type de compensation	50
III.5.5. Détermination du type de batterie de condensateurs.....	51
III.6. Système de compensation réactive Moyenne Tension(5.5kV)	52
III.6.1. Présentation du système	52
III.6.2. Architecture retenue pour la compensation.....	52
III.6.3. Constitution technique d'un gradin	53
III.6.4. Schéma unifilaire simplifié de la batterie de compensation.....	53
III.6.4.1. Structure du schéma	54
III.6.4.2. Fonctionnement par phases du schéma	55
III.6.4.3. Avantages du système	56
III.7. Conclusion.....	56
Conclusion générale	57
Références Bibliographiques.....	60

Liste des figures

Figure I. 1: Organigramme de DRGB [5]	5
Figure I. 2 : Site de la TMB vue du ciel.....	9
Figure I. 3 : Port pétrolier.....	12
Figure I. 4 : Schéma unifilaire général de distribution électrique de MT dans TMN.....	14
Figure II. 1 : Schéma unifilaire de l'installation.....	23
Figure II. 2 : Moteur P 515KW	26
Figure III. 1 : Batterie de condensateurs [8]	35
Figure III. 2 : Batterie shunt en étoile [8]	36
Figure III. 3 : Batterie shunt en triangle [8].....	37
Figure III. 4 : Batterie série [8].....	37
Figure III. 5 : Diagramme de Fresnel des puissances dans en cas de compensation.....	40
Figure III. 6 : Schéma d'une batterie triangle [9]	42
Figure III. 7 : Schéma d'une batterie en étoile [9]	42
Figure III. 8 : Compensation globale.....	43
Figure III. 9 : Compensation partielle	44
Figure III. 10 : Compensation individuelle.	45
Figure III. 11 : Principe de la compensation fixe	46
Figure III. 12 : Principe de la compensation automatique.....	47
Figure III. 13 : Exemple de plaque signalétique d'un condensateur utilisé dans l'installation étudiée.	51
Figure III. 14 : Regulateur varmétrique [10].....	53
Figure III. 15 : Schéma Unifilaire Simplifié d'un modèle de batterie de compensation.....	54

Liste des Tableaux

Tableau II. 1 : Plaques signalétiques des groupes électropompes.....	25
Tableau II. 2 : Facteur d'utilisation	27
Tableau II. 3 : Facteur de simultanéité selon le nombre de récepteurs.	28
Tableau II. 4 : Bilan de puissance installé de l'installation M, N, O, P, S, T, R.	30
Tableau II. 5 : Bilan des puissances installées de l'installation.	30
Tableau II. 6 : Bilan de puissance utilisé de l'installation M.N.O.P.S.T.R.....	32
Tableau II. 7 : Charge totale de l'installation après l'application du facteur d'extension.....	32
Tableau III. 1 : Solution choisie.....	52



Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction générale

Dans un contexte énergétique mondial de plus en plus exigeant, la maîtrise de la qualité de l'énergie électrique et l'optimisation de son utilisation sont devenues des priorités majeures pour les entreprises industrielles et les exploitants de réseaux. L'un des aspects essentiels de cette qualité est la gestion de l'énergie réactive, souvent méconnue mais ayant un impact considérable sur le rendement des installations électriques [1].

L'énergie réactive, bien qu'elle ne soit pas directement convertie en travail utile, est indispensable au bon fonctionnement des équipements à composants inductifs, tels que les moteurs, transformateurs ou pompes industrielles. Toutefois, une surconsommation de cette énergie peut entraîner des pertes supplémentaires, une surcharge des réseaux de transport et de distribution, ainsi que des pénalités financières imposées par les fournisseurs d'électricité.

Dans cette optique, la compensation de l'énergie réactive s'impose comme une solution technique et économique incontournable. Elle vise à améliorer le facteur de puissance ($\cos \varphi$) d'une installation, à réduire les pertes électriques et à optimiser la capacité du réseau. Cette opération est généralement assurée à l'aide de batteries de condensateurs, qui représentent aujourd'hui la solution la plus répandue pour compenser l'énergie réactive dans les environnements industriels. En tant qu'équipements statiques, elles présentent plusieurs avantages, tels qu'un entretien réduit, une fiabilité accrue, et des pertes énergétiques faibles. Cependant, leur utilisation présente aussi certaines limitations techniques, notamment l'impossibilité de réguler finement la puissance réactive fournie, la variation de leur rendement selon la tension d'alimentation, ainsi que les phénomènes de résonance susceptibles d'amplifier les harmoniques présents sur le réseau [2].

Afin de bien structurer notre travail, nous allons l'organiser en trois chapitres.

Le premier chapitre présentera la Direction Régionale de Bejaïa (DRGB) à travers son historique, ses activités et son organigramme ainsi que ses différentes directions. Nous y décrirons également le terminal marin de Bejaïa (TMB), lieu principal de notre étude. Une attention particulière sera accordée au manifold, qui héberge les pompes alimentées en 5.5 KV. Nous expliquerons brièvement son rôle dans la distribution des fluides, puis nous décrirons le fonctionnement des pompes industrielles et leur importance dans le transfert des hydrocarbures.

Introduction Générale

Le deuxième chapitre sera consacré à l'établissement du bilan de puissance de la consommation électrique en 5.5 KV, qui correspond exclusivement aux pompes industrielles. Ce bilan nous permettra de déterminer la puissance active, la puissance réactive, ainsi que le facteur de puissance ($\cos \varphi$) actuel de l'installation. Enfin, nous mettrons en évidence la problématique liée à la faible performance énergétique due à l'absence de compensation, et proposerons comme solution l'intégration de batteries de compensation, adaptées à la charge actuelle.

Dans le troisième chapitre, nous proposerons un facteur de puissance ($\cos \varphi'$) plus adapté à l'installation, puis procéderons au calcul de la nouvelle valeur à atteindre afin d'améliorer l'efficacité énergétique. À partir de ce facteur, nous dimensionnerons la capacité des batteries de compensation nécessaires. Nous proposerons ensuite les équipements appropriés pouvant assurer cette compensation au niveau du terminal Nord, en tenant compte des contraintes et des spécificités techniques de ce terminal. Ce chapitre se terminera par un schéma unifilaire illustrant la méthode d'installation des batteries de condensateurs dans le système.

Enfin, ce travail se conclura par une conclusion générale.



Chapitre I
Description générale
de l'entreprise
SONATRACH Bejaïa

I.1. Introduction

Dans le but de bien situer le cadre de notre étude, ce premier chapitre propose une présentation générale de l'entreprise SONATRACH, acteur majeur du secteur énergétique en Algérie. Nous mettrons en évidence son rôle stratégique, ses domaines d'activité ainsi que son impact sur l'économie nationale.

L'accent sera ensuite mis sur la Direction Régionale de Bejaïa (DRGB), lieu principal de notre investigation. À travers une description de son organisation interne et de ses principales structures, nous chercherons à comprendre le fonctionnement global de cette entité.

I.1.1. Présentation de l'entreprise SONATRACH Bejaïa

SONATRACH est la compagnie nationale algérienne des hydrocarbures. Elle est aujourd'hui l'une des plus grandes entreprises d'Afrique et un acteur majeur dans le secteur de l'énergie. Elle intervient dans l'ensemble de la chaîne pétrolière et gazière : exploration, production, transport, raffinage et commercialisation. SONATRACH joue un rôle crucial dans l'économie algérienne, représentant la principale source de devises et une part importante du PIB. Elle contribue également à la création d'emplois et au développement industriel. Ces dernières années, elle s'oriente progressivement vers les énergies renouvelables et la transition énergétique [3].

I.1.2. L'historique

SONATRACH a été créée le 31 décembre 1963 pour gérer le transport des hydrocarbures en Algérie.

En 1971, après la nationalisation du secteur, elle devient une entreprise intégrée, « contrôlant l'exploration, la production, le transport et la commercialisation ».

Durant les années (1980 jusqu'à 2000), elle se diversifie dans le gaz naturel, la pétrochimie et développe un vaste réseau de pipelines. Elle devient l'un des leaders mondiaux du gaz naturel liquéfié (GNL). SONATRACH participe à de grands projets internationaux comme « Medgaz » et « Transmed ». Depuis les années 2000, elle modernise ses installations et s'ouvre à des partenariats étrangers. Elle reste cependant majoritairement contrôlée par l'État algérien.

SONATRACH joue un rôle clé dans l'économie nationale. Elle investit aussi dans la transition énergétique. Aujourd'hui, elle est la plus grande entreprise d'Afrique [4].

I.1.3. Présentation de la DRGB

La DRGB (Administration Régionale de Bejaïa) est située à 2 km au sud-ouest de la ville de Bejaïa et est divisée en deux terminaux (Terminal Nord et Terminal Sud), qui comprend également le port pétrolier situé à environ 8 km au nord de ce dernier, où se trouve un autre parc de stockage. Elle est composée de multiples structures de gestion organisées de manière efficace et assez significative, lui permettant de réaliser efficacement les différentes tâches de l'entreprise.

I.1.3.1. Organisation de la DRGB

Les structures et l'organisation de la DRGB est représenté dans l'organigramme suivant

:

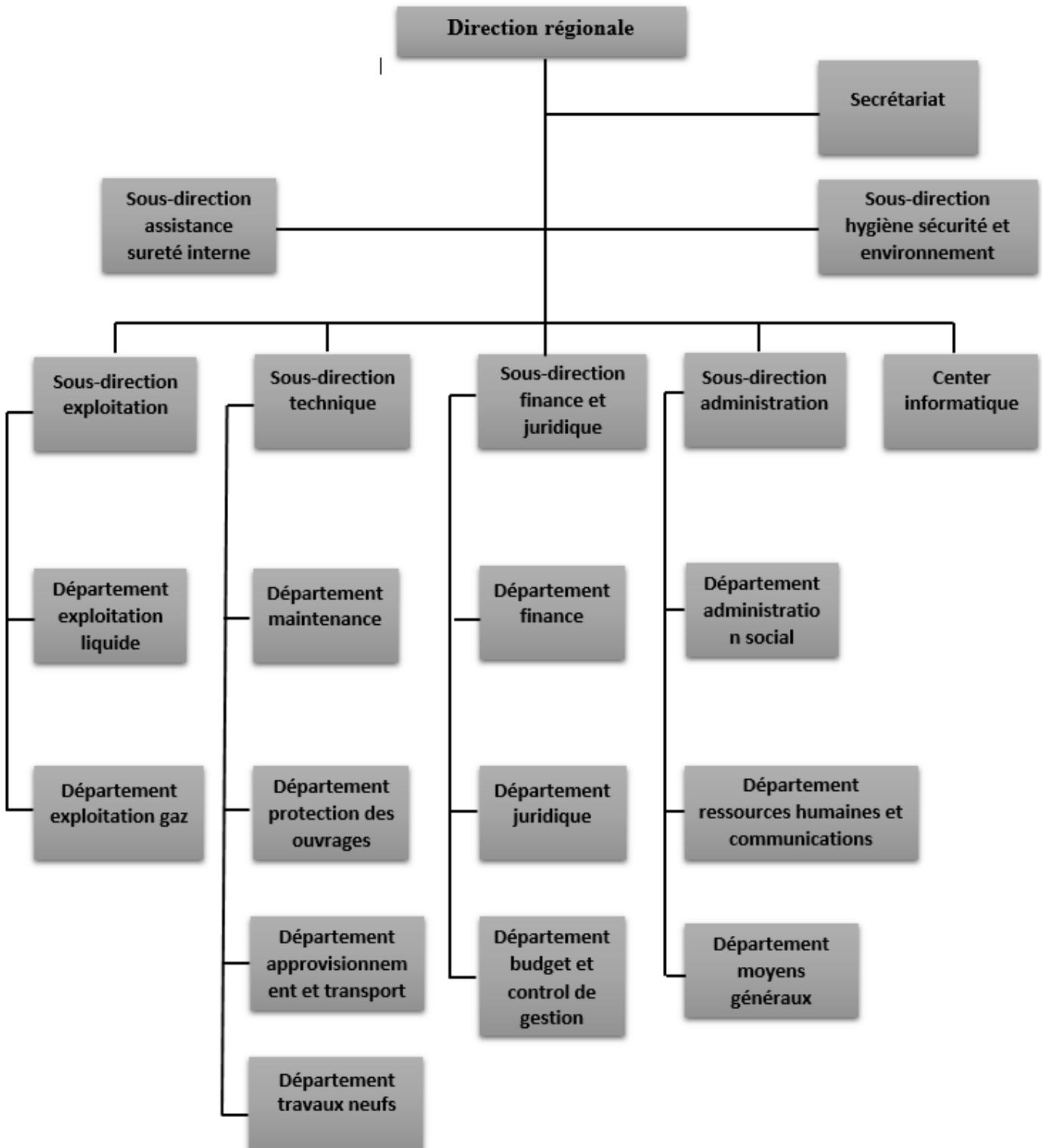


Figure I. 1: Organigramme de DRGB [5]

I.1.4 Présentation de différentes structures de la DRGB

❖ Sous-Direction Exploitation (SDE)

La sous-direction exploitation se compose de deux départements, qui sont :

• Département exploitation liquide (EXL)

Les missions du Département Exploitation Liquide sont les suivantes :

- ✓ Le transport du pétrole brut et du condensat depuis Haoud El Hamra jusqu'au terminal maritime de Bejaïa (TMB).
- ✓ Le stockage du pétrole brut et du condensat.
- ✓ La livraison du pétrole à la raffinerie de Sidi Arcine à Alger.
- ✓ La gestion des stations de pompage et des terminaux.

• Département exploitation Gaz (EXG)

Le rôle du Département Exploitation Gaz consiste à assurer l'exploitation du gaz naturel depuis le site de Hassi R'mel jusqu'à Bordj Menaïel. Le gaz est ensuite livré directement à la SONELGAZ, où il est utilisé pour l'alimentation des centrales électriques ainsi que pour les besoins domestiques.

❖ Sous-Direction administration (SDV)

Elle est composée de trois départements qui sont :

❖ Département ressources humaines et communication (RHC)

La mission de ce département est d'assurer la gestion des carrières du personnel ainsi que la planification des besoins en effectif et en formation, à court et moyen terme. Cela inclut les actions de perfectionnement et de recyclage. Le département dispose également d'un cadre chargé de la communication, qui supervise une cellule dédiée à cet effet.

• Département administratif et social (ASL)

Ce département veille au respect des lois en vigueur qui régissent les relations de travail. Il est également chargé de la gestion du personnel de DRGB

• Département moyens généraux (MOG)

Le département moyen généreux assure le soutien logistique comme hébergement des missionnaires, achat des fournitures de bureau... etc.

❖ Sous-direction finances et Juridique (SDFJ)

La sous-direction finance et juridique est composée de trois départements :

- **Département finances (FIN)**

Ce département est en charge de la gestion comptable et financière de la direction. Il assure notamment l'enregistrement chronologique des opérations comptables ainsi que la gestion financière de l'entreprise.

- **Département budget (BDG)**

Le département budget est chargé :

- ✓ D'élaborer le budget prévisionnel de l'année à venir, en se basant sur les prévisions élaborées par chaque structure de la DRGB.
- ✓ D'élaborer le plan de gestion à court moyen et terme.

- **Département juridique (JUR)**

Le département juridique veille sur la légalité des transactions, il lance des appels d'offre nationaux et Internationaux, il s'occupe aussi des assurances du patrimoine de l'entreprise.

❖ Sous-Direction technique (SDT)

La sous-direction technique se compose de quatre départements qui sont :

- **Département maintenance (MNT)**

L'objectif du département maintenance est de veiller au maintien du bon fonctionnement des équipements et des installations techniques.

- **Département protection des ouvrages (PTO)**

La mission du département protection des ouvrages est de réparer les canalisations et des ouvrages de génie civil, et la protection cathodique des installations

- **Département des travaux neufs (TNF)**

Le département des travaux neufs est chargé de l'étude de l'assistance technique et le suivi de la réalisation des projets d'investissement de la région.

- **Département approvisionnement et transport (ART)**

Le département approvisionnement et transport assure les approvisionnements nécessaires pour la bonne exploitation des installations, et le stockage des pièces de rechange nécessaire

- ❖ **Centre informatique (CI)**

La mission du centre informatique est de développer, installer et exploiter des applications informatiques et la maintenance du parc informatique.

- ❖ **Assistant de sûreté interne (ASI)**

Il veille à la sécurité et à l'intégrité des installations et des personnes Département hygiène sécurité environnement (HSE)

- ❖ **Département hygiène sécurité environnement (HSE)**

Le département HSE a pour mission la protection et la sauvegarde du patrimoine humain et matériel, il veille au respect et à la stricte application des normes et standards en Matière d'hygiène, de sécurité et de protection de l'environnement.

I.1.5. Le terminal marin de Bejaïa (TMB)

I.1.5.1. Introduction

Un terminal est l'extrémité d'un itinéraire de transport, utilisé pour la réception ou l'expédition d'hydrocarbures. Il désigne aussi les installations infrastructures nécessaires à diverses activités. Il peut s'agir d'un parc de stockage ou encore désigner une raffinerie ou un port.

I.1.5.2 Situations géographiques du TMB

Le TMB est situé dans la zone industrielle à deux kilomètres sud-ouest de la ville de Bejaïa, d'une superficie de quatre hectares environ, constituée d'une zone de stockage et d'un port pétrolier qui se trouve à cinq kilomètres environ au nord-est de l'entreprise et du parc de stockage.



Figure I. 2 : Le site de la TMB vue du ciel

Le parc de stockage du TMB est constitué des deux dépôts suivants :

I.1.5.3 Terminal Marin Nord (TMN)

Le TMN est dédié essentiellement au stockage du brut et se composant principalement de :

- **Parc de stockage**

Le parc de stockage contient douze (12) bacs à toit flottant de capacité volumique de 35 000 m³, chaque bac contient une vanne, deux (02) agitateurs un jaugeur (transformateur de niveau et de température). Et un système anti incendie et un bac à toit fixe de capacité

volumique de 29 00 m³, utilise comme un bac de secours en cas d'un nettoyage ou une panne d'un bac.

- **Manifold**

C'est un ensemble de canalisations, de vannes et de pompes de chargements utilisés pour réceptionner les hydrocarbures venant du Sahara pour le stockage. Le manifold est composé :

- ✓ Huit vannes manuelles de transfert du collecteur ;
- ✓ Six vannes de lignes, chacune est reliée à deux réservoirs ;
- ✓ Six vannes pour chaque pompe de remplissages ;
- ✓ Chaque bac est doté d'une vanne motorisée appelée vanne pied de bac.
- ✓ GEP (groupe électropompe) composé de 7 unités ;
- ✓ Quatre pompes à grand débit (2000 m³/h), de tension 5.5kV, de puissance de 515 kW, tournant à une vitesse de 1500 tr/min.
- ✓ Deux pompes à moyen débit (1800 m³/h), de tension 5.5 kV de puissance de 368kW, tournant à une vitesse de 1480 tr/min.
- ✓ Une pompe à faible débit (1800 m³/h), de tension de 5.5kV d'une puissance de 315 kW tournant à une vitesse de 1470 tr/min.

- **Tour contrôle**

Le tour de contrôle est une salle dans laquelle on trouve les tables de commande du terminal nord et du terminal sud pour commander l'ouverture des vannes et la sélection du bac, de la pompe et le chemin de circulation du fluide. La tour a une hauteur importante permettant de visualiser l'état des vannes et des bacs.

I.1.5.4 Terminal Marin Sud (MS)

Le TMS se compose principalement de :

- **Parc de stockage**

Le parc de stockage contient quatre « 4 bacs » à toit flottant de capacité volumique de 50000 m³. Chaque bac contient une vanne, deux agitateurs, un jaugeur, et un système anti incendie pour étouffer le feu.

- **Salle électrique**

L'installation comporte deux arrivées 30 kV SONEL-GAZ redondantes, pour garantir la continuité de service en cas de défaillance d'une des alimentations principales.

- **Moyenne Tension**

Les deux arrivées 30 kV traversent deux cellules de coupure au sein de la sous-station Electrique, chacune des deux cellules est équipée de sectionneur-interrupteur.

Une cellule de comptage est intégrée pour mesurer la consommation d'énergie.

Ces arrivées alimentent deux transformateurs redondants 30/5,5 kV, qui fournissent l'énergie nécessaire aux pompes du manifold fonctionnant en 5,5 kV. Cette redondance garantit la fiabilité de l'alimentation des systèmes critiques.

- **Basse Tension**

Un transformateur 30/0,4 kV est dédié à l'alimentation des charges en basse tension, notamment les bâtiments administratifs, les systèmes d'éclairage, le système de contrôle et les équipements auxiliaires, via un Tableau Général Basse Tension (TGBT).

Le TGBT est équipé d'un système de secours assuré par un groupe électrogène.

Le basculement entre le réseau électrique du SONELGAZ et le groupe électrogène, ainsi que le retour au réseau, est géré par trois disjoncteurs (disjoncteur normal, disjoncteur de couplage et disjoncteur de secours), commandés par un automate S7-200.

Les charges sensibles sont protégées par des onduleurs (UPS) qui garantissent une alimentation stable et sans interruption, même en cas de perturbations sur le réseau principal.

- **Manifold**

Il contient :

- ✓ Quatre vannes de lignes, reliées à chaque réservoir
- ✓ Quatre vannes pour chaque pompe de remplissage
- ✓ 03 pompes placées en parallèle entraînées par des moteurs électriques dont :
- ✓ 02 pompes à grand débit (3500 m³/h).
- ✓ 01 pompe à moyen débit (1280 m³/h) [6].

I.1.6 Port pétrolier

Le port pétrolier de Bejaïa joue un rôle très important dans les transactions internationales vu sa place et sa position géographique. Il est classe deuxième port algérienne en termes d'activité commercial des hydrocarbures. Il est également le premier port du bassin méditerranéen certifié.

I.1.6.1 Situations géographique du port pétrolier

Le port de Bejaïa est situé à une latitude Nord 36 °45' 24" et une longitude est 05 ° 05' 50" son positionnement au cœur de la méditerranée occidentale et au centre de la côte algérienne présente une originale économique et une place de choix sur les routes maritimes.

Le port de Bejaïa jouit d'une situation géographique privilégiée. Bien protégé naturellement, sa rade est l'une des plus sûres.

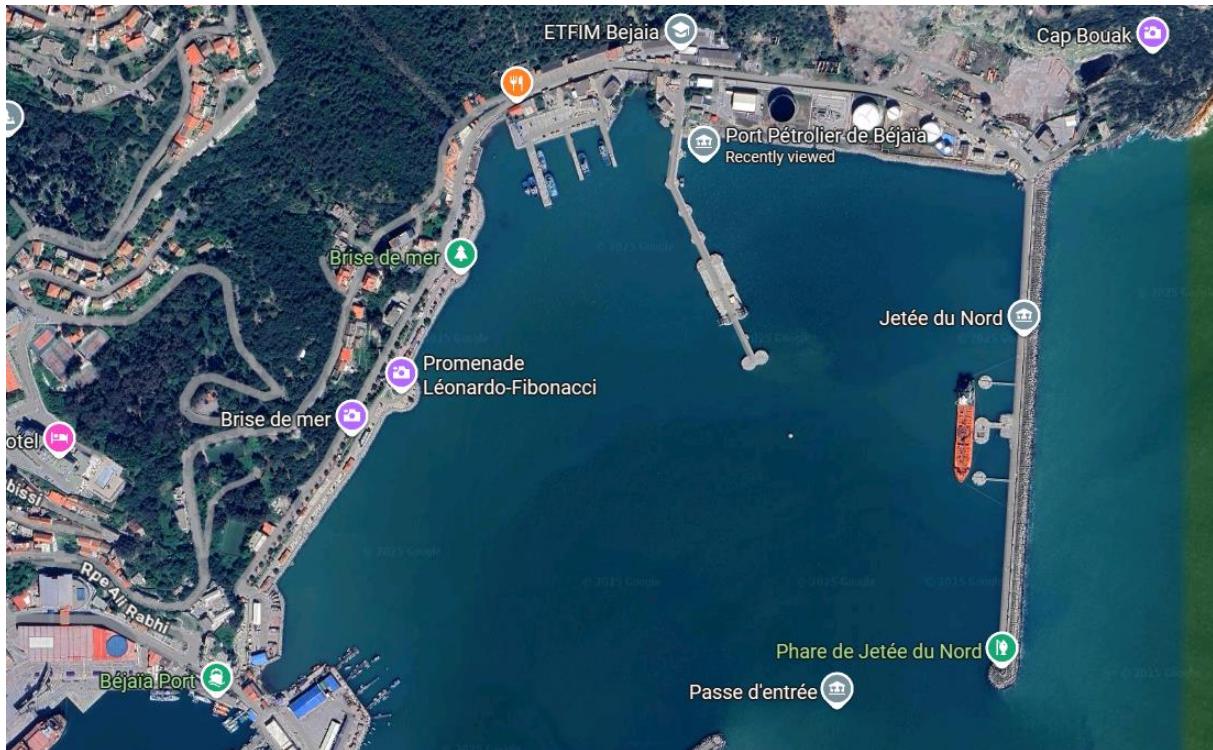
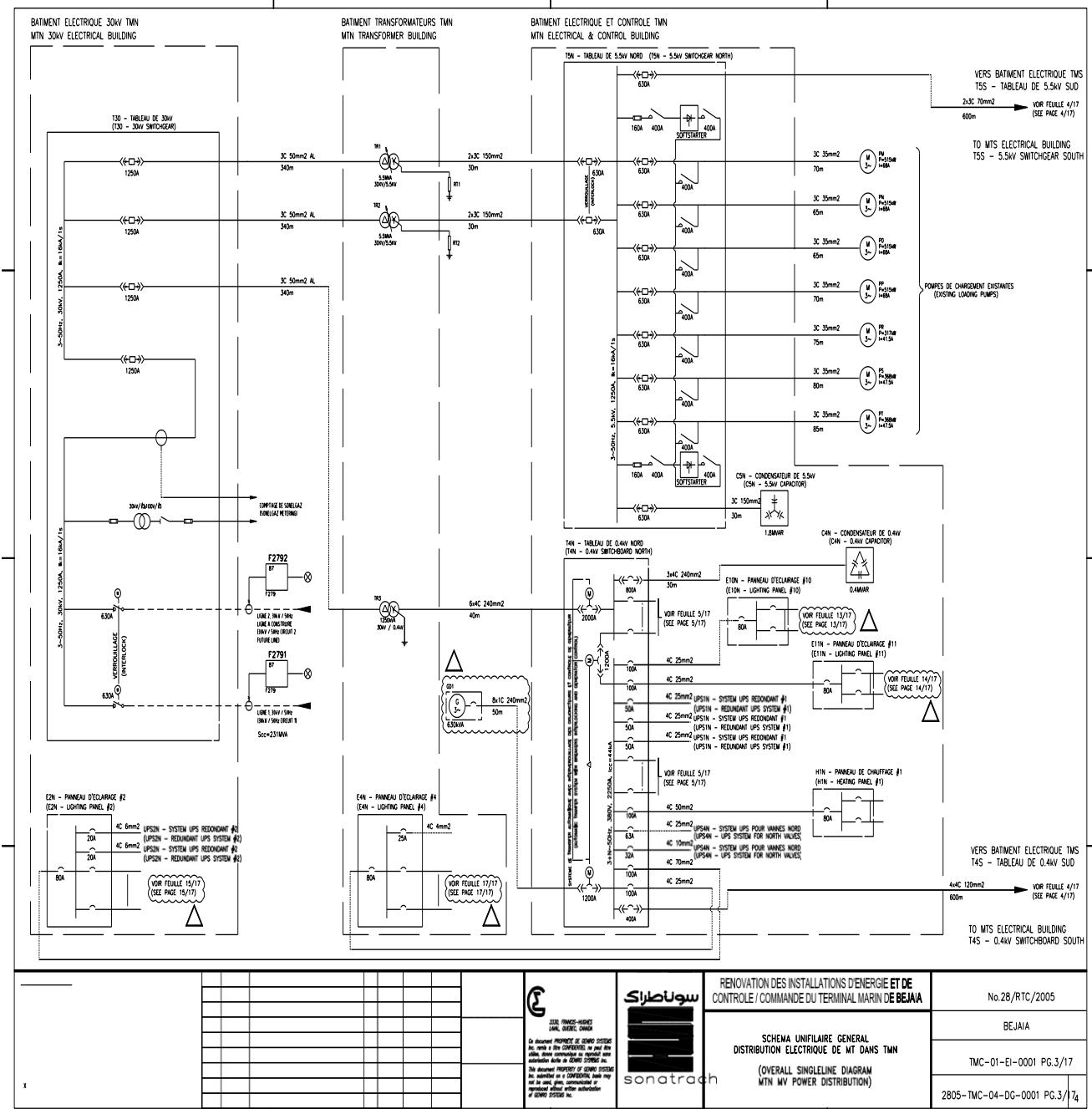


Figure I. 3 : Port pétrolier

I.2. Présentation de l'installation

La figure suivante représente le schéma unifilaire général de distribution électrique de MT dans TMN :



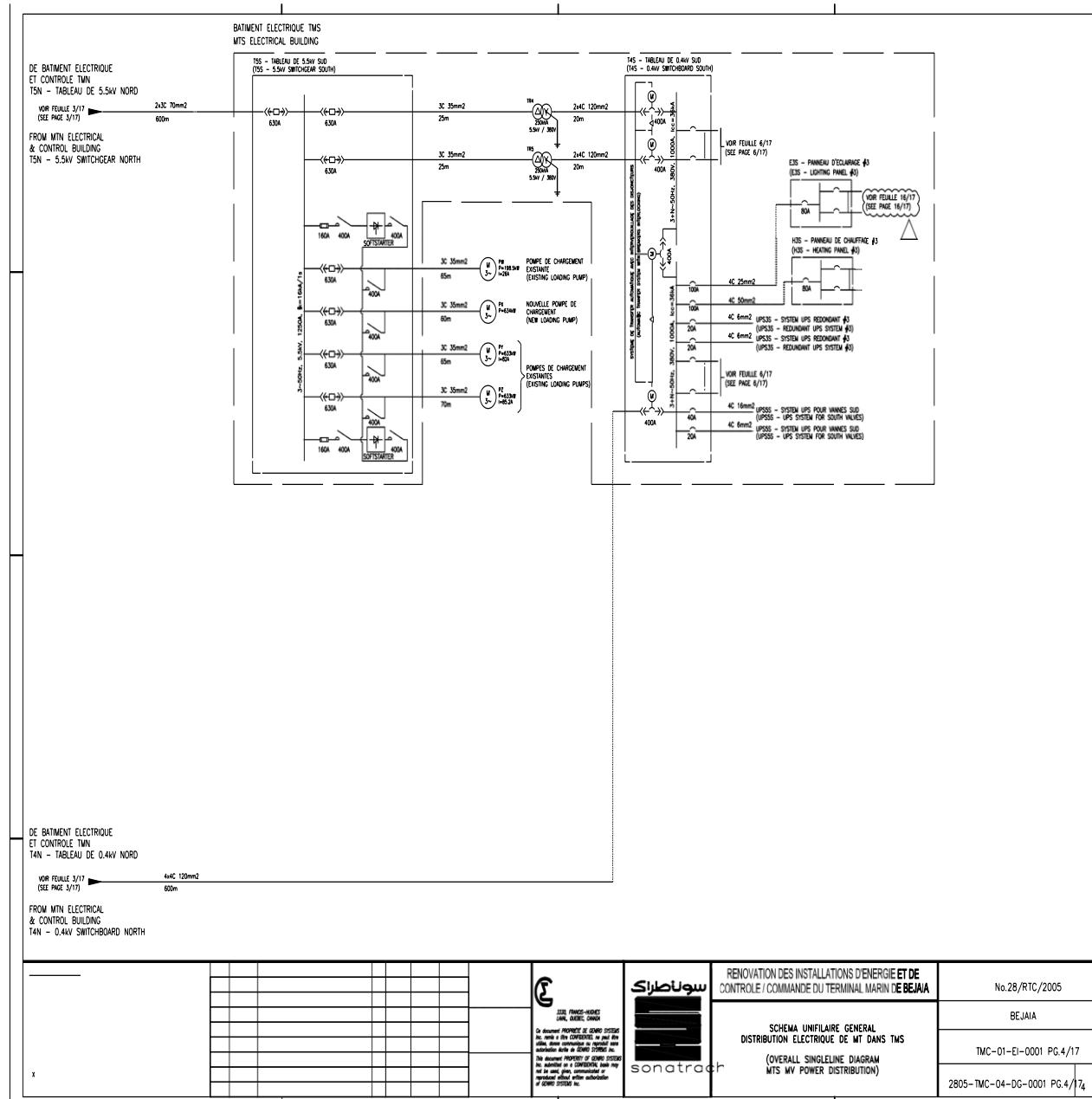


Figure I. 4 : Schéma unifilaire général de distribution électrique de MT dans TMN

I. 3. Présentation du manifold qui héberge les pompes 5,5 kV

Le manifold constitue une composante essentielle et stratégique de l'infrastructure pétrolière exploitée par SONATRACH. Il s'agit d'un système complexe, composé de canalisations, de vannes, de capteurs et d'équipements électromécaniques, conçu pour permettre la distribution, le transfert et l'orientation contrôlée du pétrole brut entre les bacs de stockage et les pipelines conduisant vers le port pétrolier de Bejaïa.

Ce manifold se distingue par l'intégration de pompes de transfert alimentées en haute tension 5,5 kV, spécifiquement installées pour répondre aux exigences d'un débit élevé et d'une pression constante, conformément aux contraintes du transport d'hydrocarbures. Ces pompes jouent un rôle central dans le fonctionnement global du système, en assurant l'acheminement efficace et sécurisé du pétrole brut depuis les zones de stockage vers les points d'expédition.

Les pompes 5,5 kV sont conçues pour fonctionner en continu, même en conditions de charge sévères. Leur conception permet une maintenance préventive simplifiée et une haute fiabilité, limitant ainsi les arrêts non planifiés. Le Terminal Nord est équipé de sept de ces pompes, tandis que le Terminal Sud en compte quatre, permettant une répartition optimale des efforts de pompage selon les besoins opérationnels.

En complément, le manifold comprend des vannes motorisées, qui permettent une gestion entièrement automatisée du flux pétrolier. Commandées électriquement depuis des armoires de commande, ces vannes peuvent être actionnées soit à distance via un système SCADA, soit localement en cas de maintenance ou d'intervention. Ce double mode de commande garantit une grande flexibilité d'exploitation.

Afin de garantir un suivi en temps réel du réseau, le manifold est également équipé de capteurs et d'instruments de mesure. Ces dispositifs surveillent en continu des paramètres critiques tels que la pression, la température, le débit, le niveau de vibration des pompes, ainsi que l'intensité et la tension d'alimentation électrique de chaque moteur. L'ensemble de ces données est transmis en temps réel vers un centre de supervision, pour permettre une gestion proactive et sécurisée des opérations.

Un aspect technique majeur associé à ce type de manifold réside dans l'installation d'un système de compensation d'énergie réactive, indispensable pour les moteurs de forte puissance. En effet, les pompes 5,5 kV, à caractère inductif, génèrent une quantité importante d'énergie réactive. Pour éviter les pénalités énergétiques et optimiser le rendement global de l'installation, des batteries de condensateurs ou des compensateurs synchrones sont mis en œuvre, maintenant ainsi un facteur de puissance généralement supérieur à 0,95.

Ce dispositif contribue non seulement à réduire la consommation énergétique globale, mais aussi à améliorer la stabilité du réseau électrique interne, à soulager les transformateurs d'alimentation et à prolonger la durée de vie des équipements électriques.

Enfin, l'ensemble du manifold est intégré à un système de contrôle centralisé, qui centralise toutes les données opérationnelles. Ce système assure la traçabilité des opérations, la détection anticipée des anomalies, ainsi que la mise en sécurité rapide de l'installation en cas de situation critique. L'automatisation complète du processus, couplée à des équipements de dernière génération, garantit une exploitation optimale du réseau de transfert, conforme aux normes de sécurité et de performance de l'industrie pétrolière. [7]

I.4. Description du fonctionnement du manifold et des pompes

I.4.1. Fonctionnement du Manifold

Le manifold agit comme un collecteur ou répartiteur central de fluide (liquide ou gaz) dans un système de pompage. Il est constitué d'un ensemble de tuyauteries connectées à plusieurs pompes, permettant soit de récupérer le fluide venant de différentes sources, soit de le distribuer vers plusieurs destinations.

Lorsqu'il est utilisé avec des pompes électriques, le fonctionnement s'organise comme suit :

- ✓ Le fluide entre dans le manifold par une ou plusieurs entrées.
- ✓ Les pompes connectées au manifold assurent la mise en pression et le déplacement du fluide.
- ✓ Le fluide est ensuite dirigé vers les sorties du manifold, selon les besoins du procédé industriel.

Le manifold permet ainsi de :

- ✓ Centraliser le contrôle du débit et de la pression.
- ✓ Assurer une distribution homogène du fluide.
- ✓ Isoler facilement une pompe pour maintenance sans arrêter tout le système.

I.4.2. Fonctionnement des pompes

Dans les installations pétrolières et gazières, les pompes industrielles hautes tension jouent un rôle essentiel dans le transfert et la mise en pression des fluides tels que le pétrole brut, le gaz, l'eau ou les produits raffinés.

- **Objectif principal**

Ces pompes sont utilisées pour :

- ✓ Acheminer les fluides entre les différentes unités de production, de traitement ou de stockage.
- ✓ Maintenir un débit constant dans les pipelines.
- ✓ Assurer la pression nécessaire au bon fonctionnement des équipements en aval (unités de séparation, de raffinage, etc.).

- **Principe de fonctionnement**

La majorité des pompes utilisées sont de type centrifuge, entraînées par des moteurs électriques fonctionnant en haute tension (souvent 5.5 kV). Le fonctionnement général se déroule comme suit :

- ✓ Aspiration : Le fluide est aspiré dans le corps de la pompe par la conduite d'entrée.
- ✓ Mise en pression : L'énergie électrique alimente le moteur, qui fait tourner une roue (ou impulsioneer). Cette rotation transmet de l'énergie cinétique au fluide, augmentant ainsi sa pression.
- ✓ Refoulement : Le fluide est ensuite évacué par la conduite de sortie sous une pression suffisante pour atteindre l'unité suivante.

- **Spécificités techniques**

- ✓ Alimentation électrique : Les pompes sont alimentées via des réseaux moyens ou haute tension, avec des cellules de protection, des transformateurs, et parfois des variateurs de vitesse pour un meilleur contrôle énergétique.
- ✓ Automatisation : Elles sont intégrées dans un système automatisé de supervision (SCADA ou DCS), avec des capteurs de pression, température et vibration.
- ✓ Maintenance et fiabilité : Les systèmes sont surveillés en temps réel afin de garantir la disponibilité continue, d'éviter les arrêts imprévus et d'optimiser la maintenance [8].

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la direction régionale de Bejaïa d'une manière générale. Nous avons procédé à la description du TMB ainsi que ces deux terminaux TMN et TMS (nord et sud) et leurs équipements, dans le but de bien mener ce travail.



Chapitre II
Calcul du Bilan de
Puissance de
l'installation

II.1 Introduction

Ce chapitre expose la démarche de calcul menant à l'établissement du bilan de puissance d'un système électrique. Celui-ci est réalisé à partir des données techniques des récepteurs, ce qui permet de calculer la puissance d'utilisation, de déterminer la puissance apparente, et d'en déduire le facteur de puissance global du réseau.

L'élaboration du schéma unifilaire constitue le point de départ de toute étude d'une installation électrique industrielle.

II.2 Présentation du réseau existant

La SONATRACH de Bejaia est alimentée par SONELGAZ par deux lignes électriques de 30 KV :

Le réseau interne de l'entreprise est composé de :

- Poste de livraison MT.
- Trois transformateurs MT/MT et MT/BT (TR1 et TR2 de 5500 kVA, TR3 de 1250 kVA)
- Générateur de secours de 630 kVA.

Il existe trois niveaux de tension 30KV, 5.5 kV et 0,4 kV.

II.2.1 Terminal Marin Nord

II.2.1.1 Poste de livraison MT de 30 kV

Le poste de livraison est équipé de diverses cellules qui sont :

- Cellule de protection générale équipée d'un disjoncteur.
- Cellule de comptage équipée d'un appareil de comptage MT.
- Cellule de départ équipé de disjoncteurs.
- Jeux de barres de raccordement entre l'arrivée et les différentes cellules.

Le TMN est composé aussi de :

- Deux transformateur 30/5 ,5 kV de puissance de 5,5 MVA couplé en ΔyN .
- Deux transformateur 30/0 ,4 kV de puissance de 1,25 MVA couplé en ΔyN .
- Un tableau général MT de 5 ,5 kV.

- Générateur de secours de 630 kVA.

a) Jeu de barre 30 KV

Il comporte un seul jeu de barre de 30 kV où se concentre toute l'énergie électrique et l'organisation des transits de puissance vers les diverses lignes ou transformateur raccordés.

Sur ce jeu de barre se raccorde une travée de transformation 30/5,5 kV.

b) Jeu de barre 5,5 KV

Il comporte un seul jeu de barre où se raccorde :

- Trois travées de pompes principales.
- Deux travées de transformateurs 5,5 kV /380 V.

Il possède deux départs :

- Un départ qui alimente les pompes de chargement de dépôt nord protégé par un disjoncteur.
- Un départ qui alimente un tableau 5,5 kV pour le dépôt sud protégé par un disjoncteur.

c) Jeu de barre 0,4 kV

Il est destiné à alimenter les différents départ basse tension du terminal marin nord.

II.3 Différents types de puissance

II.3.1 La puissance active P

La puissance active P est absorbée par les récepteurs de nature résistif (four électrique, radiateur, lampe...). Ces récepteurs électriques transforment cette énergie sous diverses formes (ex : thermique, mécanique, lumineuse).

Elle est définie à partir du produit des valeurs de la tension U et l'intensité du courant I en phase avec U par la relation suivante [9] :

$$\bullet \text{ Monophasé : } P = V \times I \times \cos\varphi \quad (\text{II.1})$$

$$\bullet \text{ Triphasé : } P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi \quad (\text{II.2})$$

P : Puissance active en W (watts)

U : Tension en volte (V)

I : Courant en Ampère (A)

φ : Déphasage entre la tension et le courant ($^{\circ}$)

II.3.2 La puissance réactive Q

L'énergie fournie pour l'excitation magnétique des récepteurs réactifs (machine électrique, transformateur, les moteurs), cette puissance circule entre la source et le récepteur sans être convertie en travail utile. Elle est définie par la relation suivante [9] :

- Monophasé :
$$Q = V \times I \times \sin\varphi \quad (\text{II.3})$$

- Triphasé :
$$Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin\varphi \quad (\text{II.4})$$

Q : Puissance réactive en VAR (voltampères réactif)

On distingue les puissances réactives inductives et capacitives :

- **Inductive** : il s'agit d'une puissance absorbée dans les circuits où le courant est en retard par rapport à la tension, elle est typiquement observée dans des équipements tels que les moteurs asynchrones, les transformateurs, lignes électriques aériennes, machines synchrones sous dimensionnées
- **Capacitive** : C'est une puissance fournie dans les circuits où le courant est en avance par rapport à la tension, son application est destinée pour les condensateurs, les câbles, a, lignes à haute-tension non chargées....

II.3.3 La puissance apparente S

La puissance apparente est la somme vectorielle de la puissance active et réactive, représente la puissance totale fournie par la source à un récepteur en courant alternatif, elle détermine la charge du réseau ainsi que celles des câbles d'alimentation, elle est donnée par la relation suivante [9] :

- Monophasé :
$$S = V \times I \quad (\text{II.5})$$

- Triphasé :
$$S = \sqrt{3} \times U \times I \quad (\text{II.6})$$

- En fonction des puissances actives et réactives :
$$S = \sqrt{Q^2 + P^2} \quad (\text{II.7})$$

Elle se mesure en VA (voltampère)

II.3.4 Facteur de puissance

C'est le rapport entre la puissance apparente et la puissance active, il est donné par la relation suivante :

$$FP = \cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (\text{II.8})$$

Il sert à évaluer le rendement électrique d'une installation. Il est défini comme le rapport entre la puissance active consommée et la puissance apparente délivrée à cette installation.

Sa valeur est comprise entre 0 et 1, et un bon rendement est caractérisé par un $\cos\varphi$ proche de 1 [9].

Il permet ainsi d'identifier facilement les appareils plus ou moins consommateurs d'énergie réactive.

- Un facteur de puissance égal à 1 ne conduira à aucune consommation d'énergie réactive (résistance pure).
- Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation d'énergie réactive d'autant plus importante qu'il se rapproche de 0 (inductance pure).

Dans une installation électrique, le facteur de puissance pourra être différent d'un atelier à un autre selon les appareils installés et la manière dont ils sont utilisés (fonctionnement à vide, plein charge, ...).

A l'inverse du $\cos\varphi$, on s'aperçoit facilement que la valeur du $\tan\varphi$ doit être le plus petit possible afin d'avoir le minimum de consommation d'énergie réactive [10].

II.3.4.1 Amélioration de $\cos\varphi$ d'une installation

L'énergie réactive absorbée par les moteurs et les transformateurs varie peu entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement en charge, alors que l'énergie active augmente avec la puissance fournie. À vide ou à faible charge, leur facteur de déphasage sera par conséquent très mauvais, il convient donc :

- D'éviter la marche à vide des moteurs ;
- D'éviter le surdimensionnement des moteurs et des transformateurs.

Ces règles ne sont pas suffisantes dans la plupart des installations. Dans tous les cas la mise en place d'une batterie de condensateurs est un moyen souple et vite amorti de relever le facteur de déphasage [10].

II.3.4.2 Avantages d'un bon facteur de puissance

- Réduction des surcouts des factures d'électricité.
- Meilleure utilisation et rendement optimisé des équipements électriques.
- Diminution des chutes de tension dans les câbles.
- L'apport de puissance supplémentaire au niveau des récepteurs.

II.3.4.3 Inconvénients d'un mauvais facteur de puissance

- Facturation élevée de l'énergie réactive.
- Surcharge des transformateurs, réduisant leur durée de vie et leur efficacité.
- Intensité de courant importante dans la ligne, ce qui augmente les pertes d'énergie active.
- Altération de la qualité de l'installation électrique, pouvant conduire à des dysfonctionnements ou à une usure prématuée.
- Accroissement de la puissance apparente souscrite, ce qui peut nécessiter des équipements plus dimensionnés et plus coûteux.

II.4 Schéma unifilaire de l'installation

Avant d'entamer les phases de notre travail de calcul, la figure ci-dessous illustre le schéma unifilaire de l'installation.

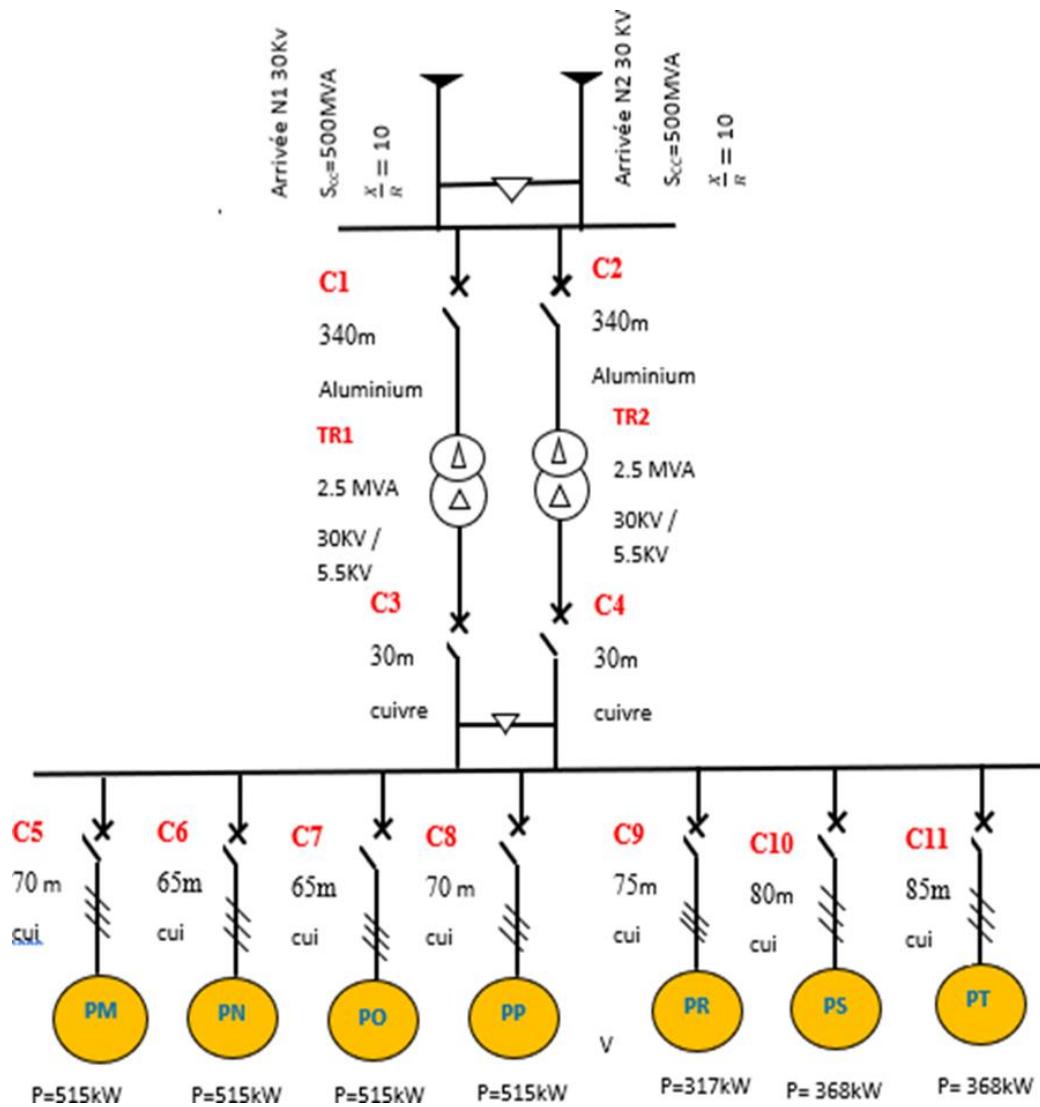


Figure II. 1 : Schéma unifilaire de l'installation.

II.5 Plaque signalétique des groupes électropompes

Les caractéristiques suivantes sont extraites des plaques signalétiques des groupes électropompes :

Electro Pompe M	
Puissance moteur	515 Kw
Tension	5500 V
Type Moteur	CS 4 3222
Code Autotransformateur	C 223 017603
Code EMA	C 223 005 336
N° Série	769 S 73
Type	VB185030
Marque	GUINARD
Date d'acquisition	01/06/1961
Emplacement	Terminal Nord
Débit	2500 m ³ /h

Electro Pompe N	
Puissance moteur	515 Kw
Tension	5500 V
Type Moteur	CS 4 3222
Code Autotransformateur	C 223 017602
Code EMA	C 223 005 337
N° Série	796 572
Type	VB185030
Marque	GUINARD
Date d'acquisition	01/11/1961
Emplacement	Terminal Nord
Débit	2500 m ³ /h

Electropompe O	
Puissance moteur	515 kW
Tension	5500 V
Type Moteur	CS 43 222
Code Autotransformateur	C 223 017598
Code EMA	C 223 005 338
N° Série	796 S71
Type	VB 1850 30
Marque	GUINARD
Date d'acquisition	01/11/1961
Emplacement	Terminal Nord
Débit	2 500 m ³ /h

Electropompe P	
Puissance moteur	515 Kw
Tension	5500 V
Type Moteur	CS 4 3222
Code Autotransformateur	C 223 017599
Code EMA	C 223 005 339
N° Série	796 S 71
Type	VB185030
Marque	GUINARD
Date d'acquisition	01/11/1961
Emplacement	Terminal Nord
Débit	2500 m ³ /h

Electropompe R	
Puissance moteur	317 kW
Tension	5500 V
Type Moteur	B 500 A
Code Autotransformateur	C 223 018102
Code EMA	C 223 005 340
N° Série	T 796 74
Type	VB 1150-253 ^E
Marque	GUINARD
Date d'acquisition	01/11/1959
Emplacement	Terminal Nord
Débit	1800 m ³ /h

Electropompe S	
Puissance moteur	368 kW
Tension	5500 V
Type Moteur	B 500 M
Code Autotransformateur	C 223 018101
Code EMA	C 223 005 341
N° Série	T 846 108
Type	VB 1850-302E
Marque	GUINARD
Date d'acquisition	01/02/1962
Emplacement	Terminal Nord
Débit	2 200 m ³ /h

Electropompe T	
Puissance moteur	368 Kw
Tension	5500 V
Type Moteur	B 500 M
Code Autotransformateur	C 223 018101
Code EMA	C 223 005 341
N° Série	T 846 108
Type	VB 1850-302E
Marque	GUINARD
Date d'acquisition	01/02/1962
Emplacement	Terminal Nord
Débit	2 200 m ³ /h

Tableau II. 1 : plaques signalétiques des groupes électropompes.

Vue réelle de Moteur PM :



Figure II. 2 : Moteur PM 515KW

II.6 Élaboration du bilan de puissance de l'installation

La puissance d'une installation n'est pas la somme arithmétique de celle des récepteurs. Sa détermination nécessite de connaître la puissance et localisation des récepteurs pour accéder à la puissance d'utilisation et à la détermination de la puissance apparente [15].

II.6.1 Puissance installée

La puissance active installée dans une entreprise correspond à la somme des puissances actives nominales de l'ensemble des récepteurs électriques. Ces valeurs sont généralement indiquées sur les fiches techniques ou les plaques signalétiques des appareils.

Il est important de noter que la puissance nominale ne correspond pas toujours à la consommation réelle. Par exemple, dans le cas d'un moteur, elle représente la puissance délivrée à l'arbre de sortie, et non celle réellement absorbée.

La puissance active installée constitue une base de calcul pour déterminer les puissances effectivement consommées. Pour cela, on applique des facteurs d'utilisation et de simultanéité adaptés à chaque niveau de l'installation et dont les définitions sont données ci-après [13].

$$P_n = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi \quad (\text{II.9})$$

II.6.2 Puissance utilisée

Elle représente la puissance réellement demandée au point source par les divers circuits d'une installation électrique. Elle est plus faible que la puissance installée vu que les récepteurs n'absorbent pas tous simultanément leurs puissances nominales.

Son estimation permet d'évaluer la puissance réellement utilisée. Néanmoins sa détermination nécessite la connaissance des trois facteurs suivants : d'utilisation (K_u), de simultanéité (K_s) et d'extension (K_e) [13].

$$P_u = K_u \times P_n \quad (\text{II.10})$$

II.7 Description des facteurs de correction

II.7.1 Facteur d'utilisation K_u

En général, les récepteurs électriques ne fonctionnent pas à leurs puissances nominales d'où l'introduction du facteur d'utilisation pour le calcul de la puissance absorbée.

Sachant que pour chaque type de récepteur est associé un facteur d'utilisation bien déterminé.

Dans une installation électrique, ce facteur peut être estimé en moyenne à 0.75 pour les moteurs, et 1 pour l'éclairage (voir le tableau II.2) [13].

Utilisation	Facteur d'utilisation K_u
Eclairage, conditionnement d'air	1
Chauffage électrique, chauffage d'eau	1
Prise de courant (n : nombre de prise de courant alimenter par le même circuit)	Si : $n > 6 \rightarrow 0.6$ $n < 6 \rightarrow 0.1 + \left(\frac{0.9}{n}\right)$
Moteur électrique	0.75

Tableau II. 2 : Facteur d'utilisation

II.7.2 Facteur de simultanéité K_s

Les récepteurs d'une installation ne fonctionnent pas simultanément. C'est pourquoi il est permis d'appliquer aux différents ensembles des récepteurs (ou de circuit) des facteurs de simultanéité.

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 [13].

Nombre de récepteurs	Facteur de simultanéité K_s
1 à 3	0.9
4 à 6	0.8
7 à 9	0.7
10 et plus	0.6

Tableau II. 3 : Facteur de simultanéité selon le nombre de récepteurs.

II.7.3 Facteur d'extension K_e

Le rôle du facteur d'extension appelé aussi facteur de réserve est de prévoir une augmentation de la puissance absorbée. Rarement utilisé sur des circuits terminaux mais plutôt sur un ensemble de plusieurs départs comme un coffret ou une armoire électrique. Le coefficient K_e varie d'un TGMT et un autre de 1 à 1.3 pour les installations électriques, on prend généralement 1.2 qui sera le cas pour notre travail [13].

II.8 Calcul du bilan de puissance de l'installation

II.8.1 Calcul de la puissance installée

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \times U_n \times \cos \varphi} \quad (\text{II.11})$$

$$U_n = \sqrt{3} \times U_n \times I_n \times \sin \varphi \quad (\text{II.12})$$

$$S_n = \sqrt{3} \times U_n \times I_n \quad (\text{II.13})$$

$$P_a = \frac{P_n}{\eta} \quad (\text{II.14})$$

$$I_a = \frac{P_a}{\sqrt{3} \times U_n \times \cos \varphi} \quad (\text{II.15})$$

$$Q_a = \sqrt{3} \times U_n \times I_a \times \sin\varphi \quad (\text{II.16})$$

$$S_a = \sqrt{3} \times U_n \times I_a \quad (\text{II.17})$$

Un exemple de calcul pour l'électropompe M :

$$I_n = \frac{515 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 5.5 \times 10^3 \times 0.87} = 62.14A$$

$$Q_n = \sqrt{3} \times 5.5 \times 10^3 \times 62.14 \times 0.5 = 295.98kVAR$$

$$S_n = \sqrt{3} \times 5.5 \times 10^3 \times 62.14 = 591.963kVA$$

$$P_a = \frac{515 \times 10^3}{0.98} = 525.52kW$$

$$I_a = \frac{525.52}{\sqrt{3} \times 5.5 \times 0.87} = 63.41A$$

$$Q_a = \sqrt{3} \times 63.41 \times 5.5 \times 10^3 \times 0.5 = 302.03kVAR$$

$$S_a = \sqrt{3} \times 5.5 \times 10^3 \times 63.41 = 604.061kVA$$

Les résultats de calcul de la puissance installée de l'installation sont donnés dans (Tableau II.4) ci-dessous :

Récepteurs	U (kV)	P_n (kW)	$\cos\varphi$	η	I_n (A)	Q_n (kVAR)	S_n (kVA)	P_a (kW)	I_a (A)	Q_a (kVAR)	S_a (kVA)
Electropompe M	5.5	515	0.87	0.98	62.14	295.98	591.96	525.51	63.41	302.03	603.13
Electropompe N	5.5	515	0.87	0.98	62.14	295.98	591.96	525.51	63.41	302.03	603.13
Electropompe O	5.5	515	0.87	0.98	62.14	295.98	591.96	525.51	63.41	302.03	603.13
Electropompe P	5.5	515	0.87	0.98	62.14	295.98	591.96	525.51	63.41	302.03	603.13
Electropompe S	5.5	368	0.87	0.98	44.4	211.48	422.96	375.51	45.31	215.82	430.97
Electropompe T	5.5	368	0.87	0.98	44.4	211.48	422.96	375.51	45.31	215.82	430.97
Electropompe R	5.5	317	0.87	0.98	38.25	182.19	364.38	323.46	39.01	185.81	371.19

Tableau II. 4 : Bilan de puissance installée de l'installation M, N, O, P, S, T, R.

On a donc le bilan des puissances installées de l'installation résumer dans le (Tableau II.5) suivant

Récepteurs	I_a (A)	P_a (kW)	Q_a (kVAR)	S_a (kVA)
TOTAL	383.27	3176.52	1825.55	3663.739

Tableau II. 5 : Bilan des puissances installées de l'installation.

II.7.2. Calcul de la puissance d'utilisation

La détermination de cette puissance nécessite une bonne connaissance du facteur d'utilisation.

Elle est donnée par la relation suivante :

$$P_u = K_u \times P_n \quad (\text{II.18})$$

$$Q_u = K_u \times Q_n \quad (\text{II.19})$$

$$S_u = K_u \times S_n \quad (\text{II.20})$$

$$P_{ua} = \frac{P_u}{n} \quad (\text{II.21})$$

$$Q_{ua} = \frac{Q_u}{n} \quad (\text{II.22})$$

$$S_{ua} = \sqrt{P_{ua}^2 + Q_{ua}^2} \quad (\text{II.23})$$

P_u : Puissance active utile demandée.

Q_u : Puissance réactive utile demandée.

S_u : Puissance apparente utile demandée.

P_n : Puissance active nominal.

Q_n : Puissance réactive nominal.

S_n : Puissance apparente nominal.

K_u : Facteur d'utilisation.

P_{ua} : Puissance active absorbé.

Q_{ua} : Puissance réactive absorbé.

S_{ua} : Puissance apparente absorbé.

Un exemple de calcul pour l'électropompe M :

$$P_u = 0.75 \times 515 = 386.25(kW)$$

$$Q_u = 0.75 \times 295.98 = 221.985(kVAR)$$

$$S_u = \sqrt{386.25^2 + 221.985^2}$$

$$P_{ua} = \frac{386.25}{0.98} = 394.13(kW)$$

$$Q_{ua} = \frac{221.985}{0.98} = 226.52(kVAR)$$

$$S_{ua} = \sqrt{394.13^2 + 226.52^2} = 454.5875(kVA)$$

Les résultats de calculs sont dans (Tableau II.6) ci-dessous

Récepteurs	P_n (kW)	K_u	K_s	η	P_u (kW)	Q_u (kVAR)	S_u (kVA)	P_{ua} (kW)	Q_{ua} (kVAR)	S_{ua} (kVA)
Electropompe M	515	0.75	/	0.98	386.25	221.985	445.495	394.13	226.52	454.587
Electropompe N	515	0.75	/	0.98	386.25	221.985	445.495	394.13	226.52	454.587
Electropompe O	515	0.75	/	0.98	386.25	221.985	445.495	394.13	226.52	454.587
Electropompe P	515	0.75	/	0.98	386.25	221.985	445.495	394.13	226.52	454.587
Electropompe S	368	0.75	/	0.98	276	158.61	318.323	281.63	161.85	324.821
Electropompe T	368	0.75	/	0.98	276	158.61	318.323	281.63	161.85	324.821
Electropompe R	317	0.75	/	0.98	135.642	136.64	192.533	143.41	139.43	200.02
TOTAL					2232.64	1341.80	2604.81	2283.19	1369.21	2662.27
$K_s=0.7$					1562.848	939.26	1823.36	1598.233	958.447	1863.59

Tableau II. 6 : Bilan de puissance utilisée de l'installation M.N.O.P.S.T.R

En introduisant un facteur d'extension qui est égal à 1.2 on obtient les résultats suivants :

Récepteurs	$P_{ua(t)}$ (kW)	$Q_{ua(t)}$ (kVAR)	$S_{ua(t)}$ (kVA)
TOTAL	1598.330	958.447	1863.590
$K_e=1.2$	1917.876	1150.136	2236.308

Tableau II. 7 : Charge totale de l'installation après l'application du facteur d'extension.

Avec :

$P_{ua(t)}$: Puissance active absorbé total après l'utilisation de facteur d'extension.

$Q_{ua(t)}$: Puissance réactive absorbé total après l'utilisation de facteur d'extension.

$S_{ua(t)}$: Puissance apparente absorbé total après l'utilisation de facteur d'extension.

II.8.3 Calcul du facteur de puissance de l'installation

Le facteur de puissance de toute l'installation est le quotient de la puissance active totale consommée sur la puissance apparente totale fournie c'est-à-dire :

$$\cos\varphi = \frac{P_{ua(t)}}{S_{ua(t)}} \quad (\text{II.24})$$

$$\cos\varphi = \frac{1917.876}{2236.308} = 0.86$$

$$\cos\varphi = 0.86 \quad \text{D'où} \quad \operatorname{tg}\varphi = 0.59$$

On désire améliorer le facteur de puissance de cette installation à une valeur cible de

$\cos\varphi' = 0.92$ Ce qui correspond à $\operatorname{tg}\varphi' = 0.43$.

Pour atteindre cette correction, nous utiliserons une batterie de condensateurs, dont le dimensionnement sera présenté au chapitre III.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi le bilan de puissance de l'installation. Après avoir identifié les caractéristiques des récepteurs et appliqué les différents coefficients, nous avons pu estimer les puissances utiles et le facteur de puissance globale.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que l'installation présente un facteur de puissance moyen, qui peut être amélioré. Pour cela, nous allons utiliser un système de compensation par batteries de condensateurs. Ce dispositif permettra de limiter les surcoups liés à la consommation d'énergie réactive et d'optimiser l'exploitation des réseaux électriques.



Chapitre III
Compensation
d'énergie réactive

III.1. Introduction

L'amélioration du facteur de puissance représente un enjeu fondamental dans la recherche de performance énergétique, tant sur le plan technique qu'économique. Un facteur de puissance faible se traduit par une surconsommation d'énergie réactive, engendrant des pertes, des surcharges sur les équipements et une baisse du rendement global des installations électriques.

Parmi les solutions les plus efficaces pour améliorer le facteur de puissance figure la compensation de l'énergie réactive. Ce procédé consiste à fournir localement l'énergie réactive nécessaire au fonctionnement des équipements inductifs, réduisant ainsi la sollicitation du réseau électrique principal. Cette problématique est particulièrement marquée dans l'installation industrielle étudiée, où la présence de plusieurs moteurs asynchrones génère une demande importante en énergie réactive.

Dans ce chapitre, nous allons explorer le principe de la compensation de l'énergie réactive, ses objectifs et son impact sur la qualité de l'énergie. Nous présenterons également les différents types de compensateurs notamment les batteries de condensateurs ainsi que les techniques de compensation adaptées aux réseaux industriels. Une attention particulière sera accordée aux méthodes de dimensionnement et aux critères de choix des dispositifs, afin d'assurer une solution optimisée et durable.

III.2. Définition de l'énergie réactive consommée

C'est une forme de puissance mise en jeu par un réseau où une installation possédant une capacité, elle est transformée par les équipements électriques pour leurs propres champs électromagnétiques. De plus, les lignes et les câbles consomment ou produisent de la puissance réactive suivant leur charge. C'est une énergie parasite pour le réseau, son unité c'est le kVarh [8].

III.3. Compensation d'énergie réactive

III.3.1. Définition

C'est l'installation d'une source d'énergie réactive afin de produire une quantité d'énergie réactive au plus près des charges pour éviter qu'elle ne circule sur le réseau électrique du

distributeur afin de diminuer la quantité d'énergie réactive fournie par la source et améliorer la stabilité du réseau électrique [8].

III.3.2. Batterie de condensateurs

Une batterie de condensateur est un groupe de condensateurs unitaires raccordée directement aux bornes du récepteur en série ou en parallèles, groupement triangles ou étoiles. Les condensateurs sont généralement reliés aux réseaux par l'appareillage (fusible, contacteurs, interrupteurs, ...).

Un groupe de condensateurs reliés aux réseaux par les mêmes appareillages est appelé gradin. Chaque gradin constitue donc l'ensemble autonome. Un ensemble de gradins peut posséder les mêmes organes de protection (disjoncteurs, etc...), cet ensemble de gradins est appelé : Batterie. Les batteries de condensateurs peuvent être montées en étoile ou en triangle.

La puissance réactive fournie par la batterie est constante quelles que soient les variations du facteur de puissance de la charge et de la consommation d'énergie réactive de l'installation électrique.

Cette compensation produit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajusté au besoin [8].

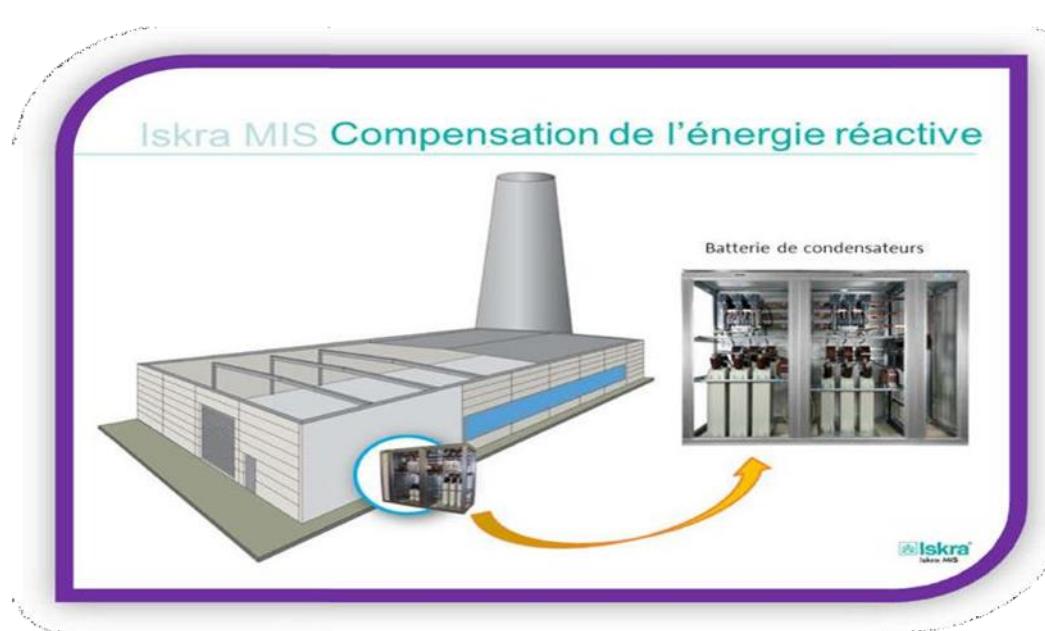


Figure III. 1 : Batterie de condensateurs [8]

III.3.2.1. Types de batteries

On distingue deux types de batteries suivant leur raccordement [8] :

- Le branchement en dérivation pour les batteries shunt.
- Le branchement en série entre la source et la charge pour les batteries en série.

III.3.2.1.1. Batterie shunt

Une batterie de condensateurs shunt est une installation en dérivation du réseau. Elle est raccordée entre phases, ou entre phase et neutre. Les batteries peuvent être installées en simple étoile ou en double étoile, quand elles sont raccordées entre phase et neutre ou terre. Elles sont installées en triangle, quand elles sont entre phases. Les batteries shunts sont le plus souvent utilisées sur les réseaux [8].

Elles peuvent être :

- Uniques : lorsque leur puissance réactive est faible et la charge relativement stable.
- Multiples ou fractionnées : ce type de compensation est communément appelé en « gradins » (condensateur + disjoncteur). Ce type de batterie est très utilisé par certains grosses industries (forte puissance installée) et les distributeurs d'énergie (dans les postes sources). Il permet une régulation pas par pas de l'énergie réactive.

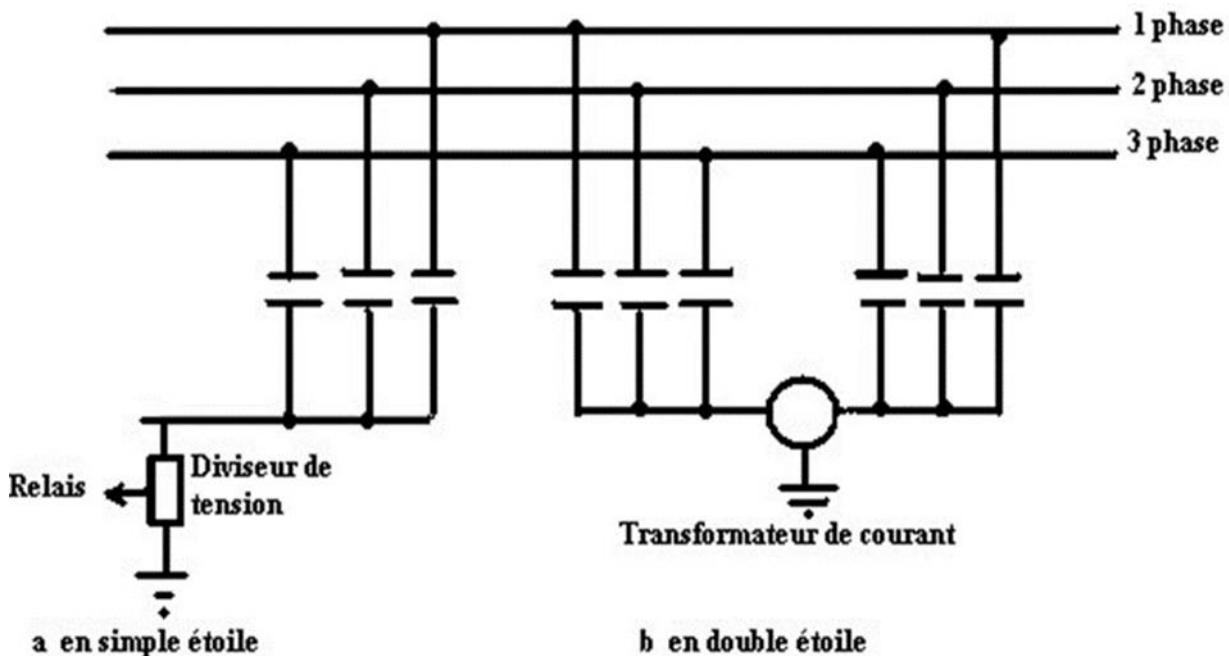


Figure III. 2 : Batterie shunt en étoile [8]

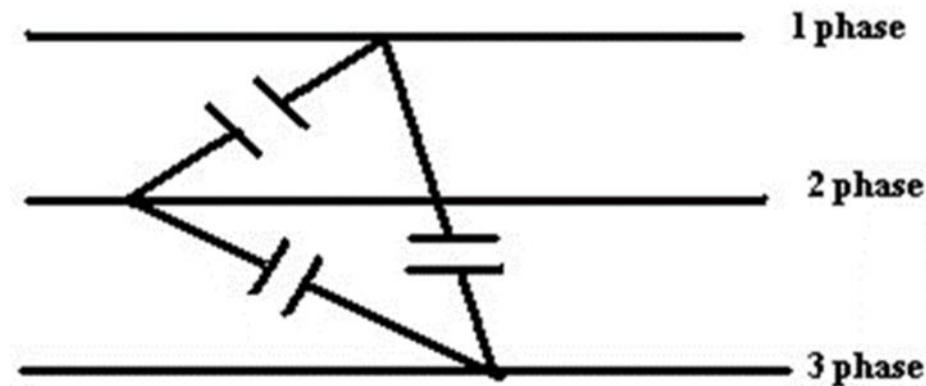


Figure III. 3 : Batterie shunt en triangle [8]

III.3.2.1.2. Batterie série

Les batteries en série sont peu utilisées sur les réseaux, surtout à moyenne et basse tension. Par contre, sur les lignes de transport à grande distance, sous des tensions supérieures à 220KV, leur utilisation est fréquente et leur puissance réactive est toujours importante. Ces batteries jouent, en plus de l'amélioration de la capacité de transport d'énergie du réseau d'autres rôles :

- Maintien de la tension d'un réseau à facteur de puissance normal.
- Répartition des charges, dans le cas de lignes fonctionnant en parallèle.

Les puissances des batteries en série atteignent quelques centaines de méga vars. Elles comportent des plates-formes isolées, à la même tension que la ligne [8].

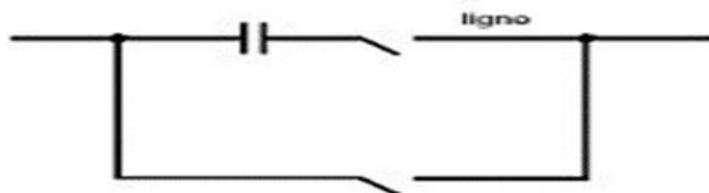


Figure III. 4 : Batterie série [8]

III.3.2.2. Constitution de la batterie de condensateurs

Chaque élément est formé de feuilles d'aluminium entre lesquelles est inséré un ensemble de trois ou quatre feuilles d'un papier spécial imprégné d'huile minérale, le tout est plié en accordéon ou en roulé. Dans le premier cas, l'élément est parallélépipédique, dans le second il est cylindrique.

Ces éléments sont disposés en série puis en parallèle et sont placés dans une cuve métallique remplie d'huile susceptible d'assurer le refroidissement. Cela constitue une unité, ces unités peuvent aussi être associées en série, en parallèle, en triangle ou en étoile [9].

III.3.2.3. Protection des batteries de condensateurs

Les condensateurs sont constitués à partir d'éléments mis en série pour tenir la tension, et mis en parallèle pour obtenir la capacité voulue. Il existe deux types de condensateurs selon qu'ils possèdent ou non des fusibles de protection internes [9].

III.3.2.3.1. Condensateur sans fusibles de protection interne

La défaillance du condensateur est due au claquage d'un élément interne. Le défaut d'un élément provoque la mise en court-circuit d'un groupe d'éléments en parallèle, par conséquent les autres groupes d'éléments en parallèle seront soumis à une tension élevée.

Il n'y a pas de dispositif de protection à l'intérieur du condensateur, le défaut ne sera donc éliminé que par la mise hors tension de la batterie défectueuse.

Ce type de condensateur est utilisé :

- En batterie triangle protégée par des fusibles ou des protections à maximum de courant.
- En batterie en double étoile avec une protection contre les déséquilibres entre les neutres [9].

III.3.2.3.2. Condensateur avec fusibles de protection interne

Chaque élément est protégé par un fusible. En cas de défaut d'un élément. Celui-ci est isolé. Il s'ensuit une faible variation de la capacité, et le courant augmente légèrement. Ce type de condensateur n'est utilisé qu'en montage étoile. Le relais de déséquilibre est réglé afin que la défaillance d'éléments condensateurs provoque le déclenchement de la batterie lorsque la tension sur les autres éléments devient très importante. La protection par fusibles internes augmente la fiabilité des batteries de condensateurs car la défaillance d'un élément ne conduit pas systématiquement au déclenchement de la batterie [9].

III.3.2.4. Avantages et inconvénients des batteries de condensateurs

Les batteries de condensateurs présentent les avantages de tous les éléments statiques :

- ✓ Absence d'usures mécaniques,
- ✓ Entretien réduit,

- ✓ Pertes faibles,
- ✓ Elles occupent un faible volume,
- ✓ Installation facile.

Les inconvénients que présentent les batteries de condensateurs peuvent être résumés comme suit :

- La quantité de la puissance réactive produite par les batteries ne peut être contrôlée qu'en pas discrets,
- Les condensateurs sont très sensibles aux surtensions et aux surcharges, Ce qui peut provoquer leur vieillissement prématué et parfois en claquage de l'isolant.
- Si les batteries des condensateurs sont branchées au réseau via un disjoncteur, ce disjoncteur introduit son propre bruit dans le réseau.
- Les batteries des condensateurs n'ont pas la possibilité de la réponse rapide aux phénomènes transitoires dans le réseau [9].

III.3.3. principe de compensation

Le principe de la compensation consiste à installer une source d'énergie réactive qui permet d'améliorer le facteur de puissance de l'installation, la réalisation de la compensation peut être effectuée avec plusieurs composants électriques.

Le condensateur est un dispositif qui permet de fournir cette énergie, il se constitue de deux électrodes séparées par un isolant, ce récepteur a la propriété lorsqu'il est soumis à une tension sinusoïdale de déphasier son intensité de courant de 90° en avant sur la tension.

A l'inverse, tous les autres récepteurs (moteur, transformateur) déphasent leur composante réactive d'un angle φ en retard sur la tension.

La compensation vectorielle de ces intensités ou puissances réactives (inductive et capacitive) conduit à une puissance résultante réactive inférieure à celle existante avant l'installation des condensateurs [2].

La figure ci-dessous représente la présentation vectorielle de la compensation [2] :

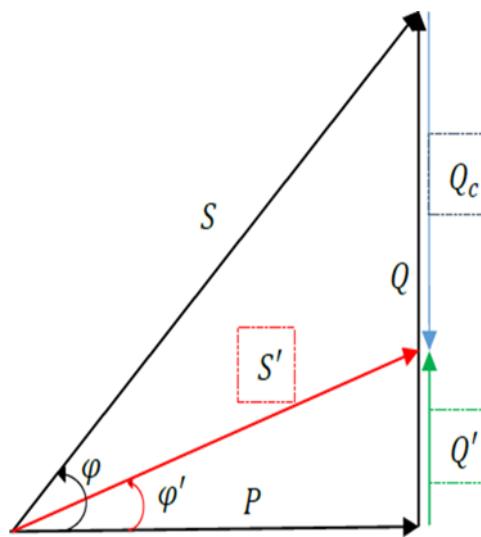


Figure III. 5 : Diagramme de Fresnel des puissances dans en cas de compensation.

	Avant compensation	Après compensation
Puissance active	P	P
Puissance réactive	S	S'
Puissance apparente	Q	Q'
Facteur de puissance	$\cos\varphi$	$\cos\varphi'$
Compensation	0	Q_c

Le condensateur est le plus utilisé en raison [10] :

- De sa non-consommation en énergie active.
- De son cout d'achat.
- De sa facilité de mise en œuvre.
- De sa durée de vie (environ 10 ans).
- De son faible besoin d'entretien (appareil statique).

III.4. Détermination de l'équipement de la compensation

Dans une installation électrique Moyen Tension la détermination de la solution de compensation de l'énergie réactive nécessite plusieurs étapes.

III.4.1. puissance réactive Q_c des condensateurs

La relation entre la puissance des condensateurs et l'amélioration du $\cos\varphi$ consiste à déterminer la puissance réactive à installer pour obtenir le $\cos\varphi$ désiré.

Supposons qu'en un point du réseau de puissance active P et réactive Q, on désire améliorer $\cos\varphi$ pour obtenir $\cos\varphi'$, ou passer de $\tg\varphi$ à $\tg\varphi'$.

On installe des condensateurs de puissance réactive Q_c , on a alors [5] :

$$\tg\varphi = \frac{Q}{P} \quad (\text{III.1})$$

$$\tg\varphi' = \frac{Q'}{P} \quad (\text{III.2})$$

$$Q' = Q - Q_c \quad (\text{III.3})$$

On en déduit

$$Q_c = P(\tg\varphi - \tg\varphi') \quad (\text{III.4})$$

III.4.2. Choix du couplage d'un condensateur

L'intégration de ces batteries de condensateurs au réseau électrique peut se faire selon deux types de couplage : en triangle (Δ) ou en étoile (Y), en fonction de la configuration du réseau et des besoins en compensation.

III.4.2.1. Couplage triangle

Dans ce cas, les tensions composées sont égales aux tensions simples ($U = V$). [9]

La puissance réactive fournie par la batterie de condensateur couplé en triangle est donnée par la formule suivante :

$$Q_c = 3 \cdot C_\Delta \cdot \omega \cdot U^2 \quad (\text{III.5})$$

La pulsation de signale ω est donné : $\omega = 2 \cdot \pi \cdot F$ (III.6)

La capacité de chaque condensateur est donnée par la relation suivante :

$$C_\Delta = \frac{P(\tg\varphi - \tg\varphi')}{\omega \cdot 3 \cdot U^2} \quad (\text{III.7})$$

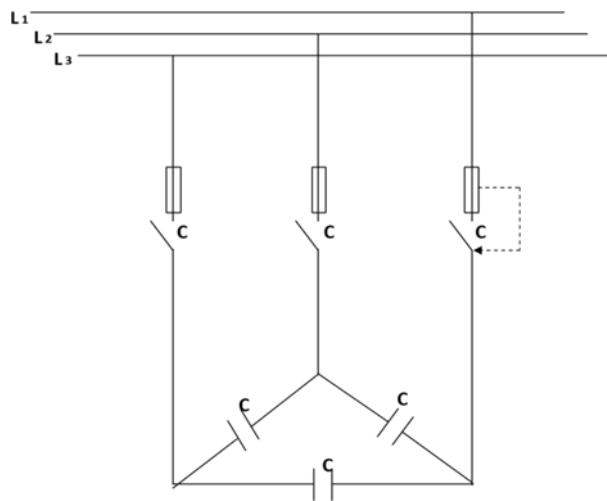


Figure III. 6 : Schéma d'une batterie triangle [9]

III.4.2.2. Couplage étoile

Dans le couplage en étoile, les tensions composées sont 3 fois plus grandes que les tensions simple ($U=3V$).[9]

La puissance réactive fournie par la batterie de condensateur couplé en étoile est donnée par la formule suivante :

$$Q_c = C_y \cdot \omega \cdot U^2 \quad (\text{III.8})$$

La capacité de chaque condensateur est donnée par la relation suivante :

$$C_y = \frac{P(\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi')}{\omega \cdot U^2} \quad (\text{III.9})$$

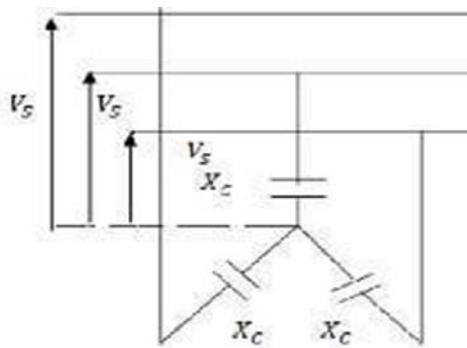


Figure III. 7 : Schéma d'une batterie en étoile [9]

D'après les équations de capacité des condensateurs, on peut définir la relation entre le montage triangle et étoile par cette équation :

$$C_{\Delta} = 3 \times C_y \quad (\text{III.10})$$

Le choix du mode de couplage dépend [9] :

Des caractéristiques, tension de réseau et puissance de la batterie. Du type de compensation, fixe ou automatique (en gradin), du type de protection :

- Condensateur avec ou sans fusible interne,
- Différentielle (de déséquilibre) ou avec fusibles MT,
- Des impératifs économiques.

III.4.3. Choix de la localisation

La compensation peut être globale, par secteur ou individuelle. En principe, la compensation idéale est-elle qui permet de produire l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande.

III.4.3.1. Compensation globale

La batterie est raccordée en tête d'installation et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation, elle reste en service permanent pendant le fonctionnement normal de l'installation.

La compensation globale convient lorsque la charge est stable et continue. [5]

La figure suivante représente la compensation globale [3] :

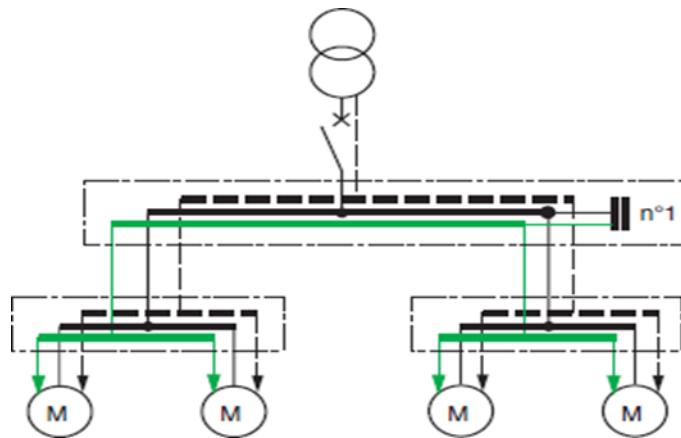


Figure III. 8 : Compensation globale

Avantages

- ✓ Evite la facturation liée à l'énergie réactive.
- ✓ Libère davantage de puissance au secondaire du transformateur.
- ✓ Solution centralisée, plus économique et simple à entretenir.

Inconvénient

- Ne réduit pas la charge des installations en aval, car le courant réactif circule intégralement jusqu'aux récepteurs.

III.4.3.2. Compensation partielle (par secteur)

La batterie est connectée au tableau de distribution et fournit l'énergie réactive requise par une zone de l'installation. Cette méthode permet d'alléger une part importante de l'installation. Ce type de compensation est recommandé lorsque l'installation est vaste et comprend des ateliers aux régimes de charges variés [5].

La figure suivante représente la compensation partielle [3] :

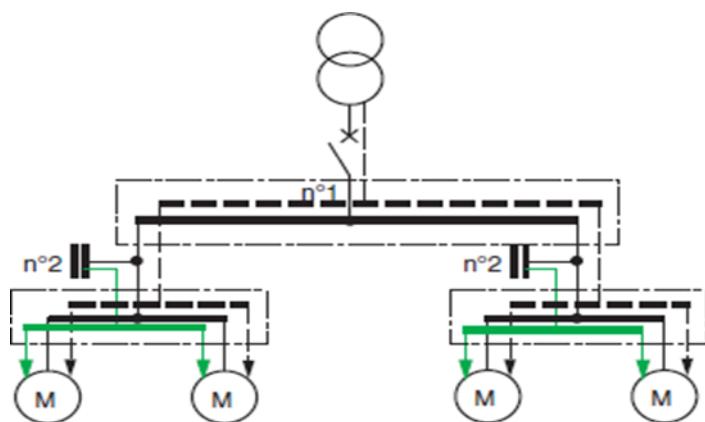


Figure III. 9 : Compensation partielle

Avantages

- ✓ Diminution des pénalités tarifaires liées à une consommation excessive d'énergie réactive.
- ✓ Réduction de la puissance apparente utilisée.
- ✓ Allègement de la charge du transformateur d'alimentation.
- ✓ Possibilité de réduire la section des câbles en amont du tableau de distribution.
- ✓ Diminution des pertes en ligne dans ces mêmes câbles.

Inconvénients

- Valable uniquement pour les utilisateurs regroupés.
- Nécessite de prévoir une protection pour les batteries, ce qui engendre un surcout.

III.4.3.3. Compensation individuelle

La batterie est connectée directement aux bornes de la charge inductive (généralement moteur). La compensation individuelle doit être envisagée lorsque la puissance du moteur est importante par rapport à la puissance souscrite de l'installation.

Cette compensation fournit l'énergie réactive précisément l'a où elle est consommée et en quantité adaptée aux besoins [5].

La figure suivante représente la compensation individuelle [4] :

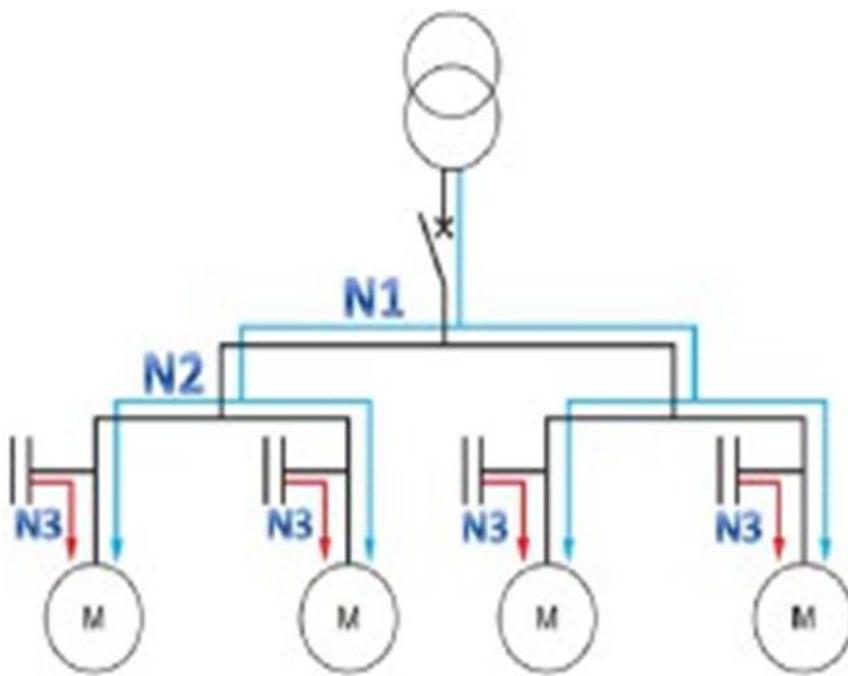


Figure III. 10 : Compensation individuelle.

Avantages

- ✓ Réduit les pénalités tarifaires dues à une consommation excessive d'énergie réactive.
- ✓ Réduit la puissance apparente consommée.
- ✓ Réduit la section des câbles et les pertes en ligne.

Inconvénient

- Système couteux (nombre de condensateur important).

III.4.4. Choix du type de compensation

La compensation est réalisée par :

- Des condensateurs de valeur fixes ou batteries fixes.
- Des batteries de condensateurs en gradins avec régulateur (ou batteries automatiques) qui permettent d'ajuster la compensation aux variations de consommation de l'installation.

III.4.4.1. Compensation fixe (batterie fixe)

On met en service l'ensemble de la batterie, dans un fonctionnement tout ou rien. La mise en service peut être manuelle (par disjoncteur ou interrupteur), semi-automatique (par contacteur), asservie aux bornes des moteurs. Ce type de compensation est utilisé lorsque la puissance réactive est faible (15% de la puissance de transformateur) et la charge relativement stable [4].

Le principe est présenté dans la figure suivante [11] :

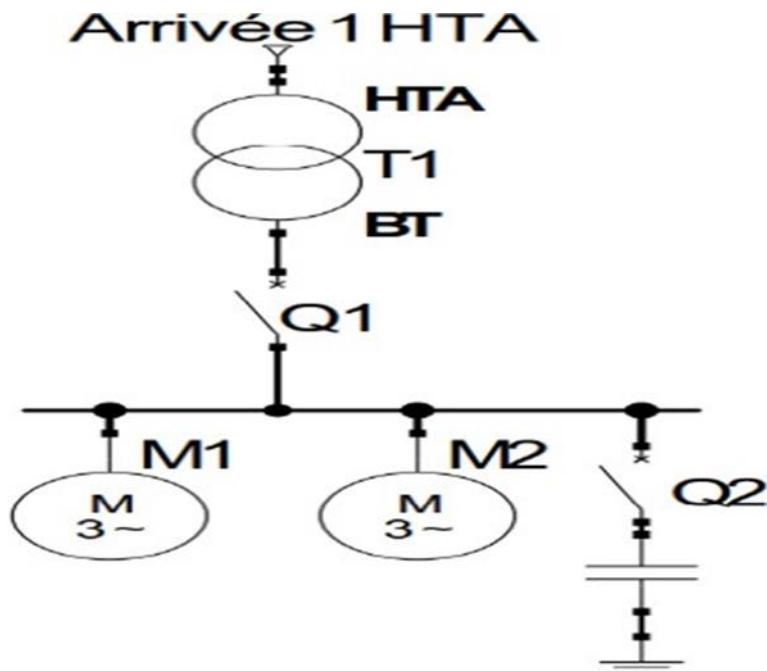


Figure III. 11 : Principe de la compensation fixe

III.4.4.2. Compensation automatique (batterie en gradin)

La batterie de condensateurs est fractionnée en gradins, avec possibilité de mettre en service plus ou moins de gradins, en générale de façon automatique. Ce type de batterie est installé en tête de la distribution BT où d'un secteur important. Elle permet une régulation pas à pas de l'énergie réactive.

L'enclenchement et le déclenchement des gradins sont piloté par un relais var métrique.

Ce type de compensation est utilisé lorsque la puissance réactive est supérieure (15% de la puissance de transformateur) [4] ;

Le principe de la compensation automatique est présenté dans la figure ci-dessous [11] :

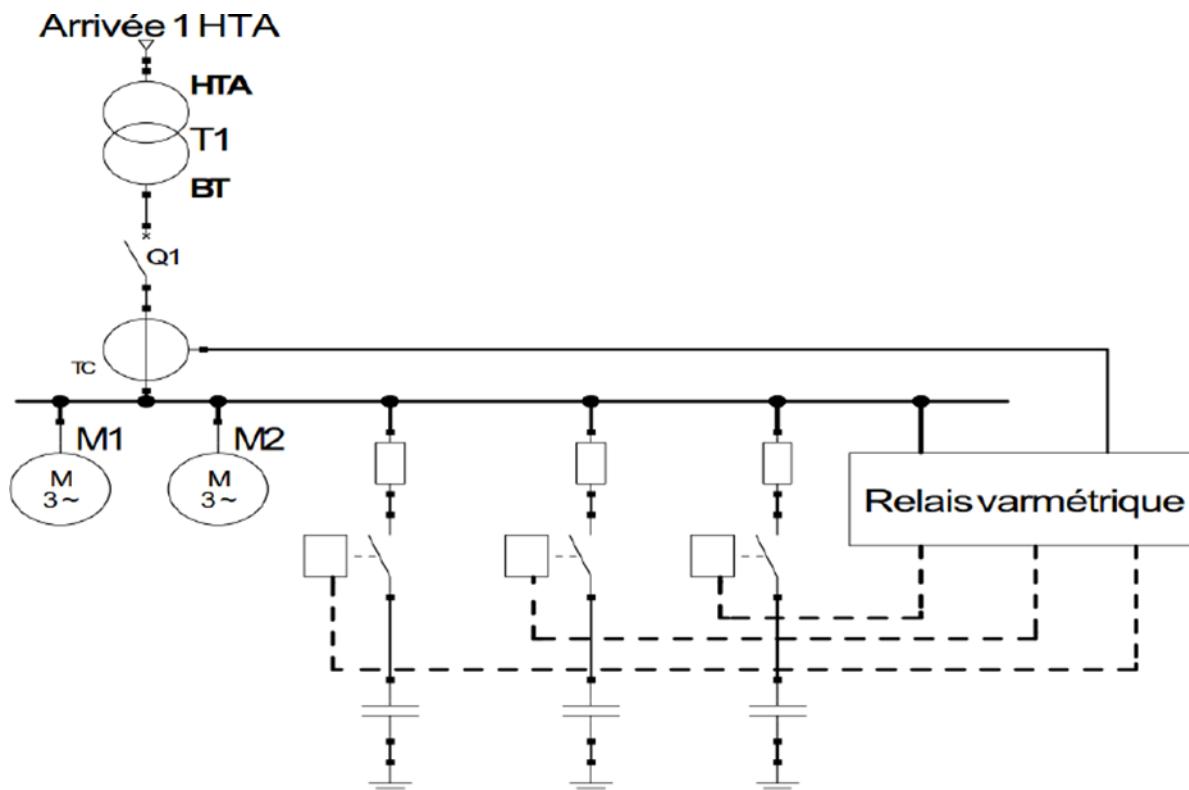


Figure III. 12 : Principe de la compensation automatique

III.4.5. Choix du type de batterie

Détermination du type de batterie. Il existe trois types de batteries de compensation (standard, type H, type SAH), et chaque type est adapté à un niveau de pollution harmonique du réseau défini. [6]

Le rapport Gh/Sn permet de déterminer le type d'équipement approprié :

- Standard : si $Gh/Sn < 15\%$
- Type H : si $15\% < Gh/Sn < 25\%$
- Type SAH : si $25\% < Gh/Sn < 50\%$

III.5. Dimensionnement des batteries de condensateur à installer (partie pratique)

Après avoir traité l'aspect théorique nécessaire pour répondre aux exigences de notre pratique en termes d'exploitation de cet aspect, on procède à la réalisation de l'objet de notre projet qui consiste à dimensionner le système de compensation adéquat par le dimensionnement des batteries de condensateur à installer. Pour obtenir des résultats fiables et concevoir un travail pertinent, nous avons subdivisé cette partie.

III.5.1. Détermination de la puissance des condensateurs Q_c (kVAR)

La puissance réactive Q_c nécessaire à la compensation se calcule à partir de la puissance active mesurée $P_{ua(t)}$ et de $tg\varphi$ mesurée de l'installation.

Pour : $P_{ua(t)} = 1917.876\text{ kW}$ et $tg\varphi = 0.59$, $tg\varphi' = 0.43$

Application numérique :

$$Q_c = 1917.876 \times (0.59 - 0.43)$$

$$Q_c = 306.86 \text{ (kVar)}$$

III.5.1.1. La puissance réactive après compensation Q'

La puissance réactive totale après compensation, notée Q' , correspond à la différence entre la puissance réactive totale $Q_{ua(t)}$ et celle fournie par le condensateur (Q_c). Autrement dit, en valeur algébrique, la compensation se traduit par la relation :

$$Q' = Q_{ua(t)} - Q_c \quad (\text{III.11})$$

Application numérique :

Pour $Q_{ua(t)} = 1150.136$ kvar

$$Q' = 1150.136 - 306.86$$

$$Q' = 843.276 \text{ (kVAR)}$$

III.5.2. Détermination du type de montage des batteries des condensateurs

Concernant le couplage des condensateurs de compensation, le choix s'est porté sur une configuration en étoile. Cette décision est motivée par le niveau élevé de la tension entre phases, qui atteint 5.5kV dans l'installation. Un couplage en triangle exposerait directement chaque triplet de condensateur à cette tension, ce qui pourrait entraîner une dégradation accélérée de leurs composants et réduire significativement leur durée de vie. En revanche, le couplage en étoile permet à chaque condensateur de ne recevoir que la tension entre phase et neutre, nettement inférieure, assurant ainsi une meilleure tenue dans le temps et une exploitation plus fiable.

La capacité de condensateur en montage étoile est donnée par la relation suivante :

$$C_y = \frac{Qc}{\omega \times U^2} \quad (\text{III.12})$$

Application numérique :

Pour $Qc = 306.86 \text{ kVAR}$ et $\omega = 314 \text{ rad/s}$

$U = 5.5 \text{ kV}$

$$C_y = \frac{306.86 \times 10^3}{314 \times 5500^2}$$

$$C_y = 32,3 \mu\text{F}$$

III.5.3. Détermination le choix d mode de compensation

Pour déterminer le mode de compensation qu'on doit utiliser on doit s'assurer que la puissance de la batterie vérifie la relation suivante [5] :

$$Q_c \leq 0.9 \times \sqrt{3} \times U_n \times I_0 \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$$I_0 = 2 \times I_n \times (1 - \cos\varphi_n) \quad (\text{III.14})$$

I_0 : Le courant à vide du moteur

I_n : Valeur du courant nominal du moteur

$\cos\varphi_n$: Facteur de puissance du moteur en régime nominale

U_n : Tension composée nominale

Application numérique :

Pour l'électropompe M :

$$I_n = 62.41A \text{ Et } \cos\varphi_n = 0.87$$

$$I_0 = 2 \times 62.41 \times (1 - 0.87)$$

$$I_0 = 16.22A$$

Alors :

$$0.9 \times \sqrt{3} \times 5.5 \times 16.22 = 139.06 \leq Q_c$$

La relation précédente n'est pas vérifiée de ce fait on ne peut pas utiliser la compensation individuelle aux bornes des électropompes. Donc nous allons réaliser une compensation globale.

III.5.4. Détermination du type de compensation

Pour le choix du système de compensation on calcule le rapport Q_c/S_n .

S_n : La puissance apparente du transformateur.

Application numérique :

$$Q_c/S_n = 306.86 \times 10^3 / 2.5 \times 10^6$$

$$Q_c/S_n = 12.35\%$$

On a le rapport $Q_c/S_n = 12.35\%$ qui est inférieur à 15%, donc la compensation fixe est la mieux adaptée.

Mais suivant le système d'exploitation de notre jeu de barre on ne fait pas fonctionner toutes les pompes au même moment, de ce fait, une compensation automatique (gradins) est suggérée pour une meilleure utilisation des batteries de compensation et aussi éviter les risques de surtensions sur le jeu de barre.

Avec $Q_c = 306.86kVAR$ on installe une armoire de condensateurs à 2 gradins de 150kVAR chacun qui fourniront l'énergie réactive nécessaire pour assurer la compensation.

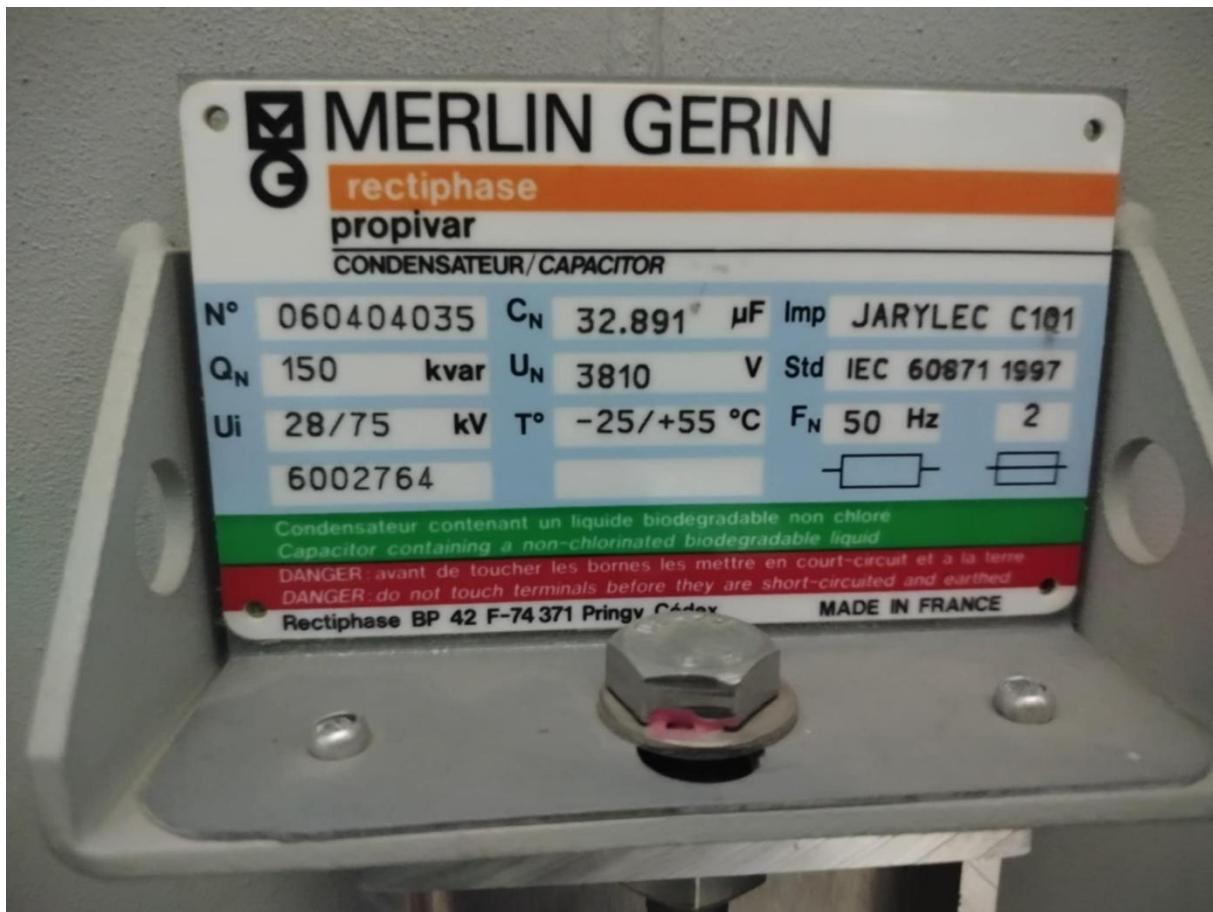


Figure III. 13 : Exemple de plaque signalétique d'un condensateur utilisé dans l'installation étudiée.

III.5.5. Détermination du type de batterie de condensateurs

Le choix du type de batterie de compensation s'est basé sur l'analyse des caractéristiques du réseau étudié. L'installation est principalement constituée de moteurs asynchrones sans présence significative de convertisseurs électroniques tels que des variateurs de vitesse ou onduleurs. Cette configuration implique un niveau harmonique faible, généralement inférieur à 5% , ce qui limite les risques de résonance et de surcharge harmonique sur les condensateurs.

Pour le dimensionnement pratique, il a été décidé d'utiliser des condensateurs de puissance unitaire 25kVAR, une valeur standard largement disponible sur le marché pour les applications moyenne tension. Ce choix présente un bon compromis entre efficacité, disponibilité et facilité d'entretien.

Chaque gradin de compensation devant fournir une puissance réactive de 150 kVar, le nombre de condensateurs nécessaires par gradin est calculé comme suit :

$$N = \frac{Q_{gradin}}{Q_{condensateur}} = \frac{150}{25} = 6$$

On retient donc 6 condensateurs de 25kVAR par gradin, alors 12 condensateurs pour les deux gradins.

III.6. Système de compensation réactive Moyenne Tension (5.5kV)

III.6.1. Présentation du système

L'installation électrique étudiée comprend sept électropompes industrielles alimentées sous 5.5kV, dont la puissance varie entre 317kW et 515kW. En fonctionnement nominal, trois à quatre pompes sont sollicitées, mais la configuration permet d'en activer jusqu'à sept en cas de besoin opérationnel.

Cette variabilité de charge entraîne une fluctuation du facteur de puissance ($\cos\varphi$) du système, en raison de la composante inductive inhérente aux moteurs asynchrones. Une étude préalable a révélé que, sans compensation, le $\cos\varphi$ pouvait chuter en dessous des seuils recommandés, causant des pertes énergétiques, une augmentation de la puissance apparente transitant sur le réseau et des pénalités économiques.

L'analyse a conclu à la nécessité d'un dispositif de compensation capacitive globale de 306kVAR, équivalent à 32 μF à 5.5kV. L'objectif est de maintenir un facteur de puissance proche de 1, et ainsi améliorer le rendement énergétique de l'installation.

III.6.2. Architecture retenue pour la compensation

Pour répondre aux exigences de souplesse d'exploitation et de fiabilité, la solution choisie repose sur une batterie de compensation répartie en deux gradins équivalents, activés de manière indépendante donnée dans le (tableau III.1) suivant :

Gradin	Capacité (μF)	Puissance (kVAR)	Tension nominale (kV)
Gradin1	16	≈ 150	5.5
Gradin2	16	≈ 150	5.5

Tableau III. 1 : Solution choisie

Chaque gradin peut être enclenché automatiquement selon le besoin de compensation détecté par un régulateur automatique de facteur de puissance (RAPQ). Le système est ainsi capable d'ajuster dynamiquement la puissance réactive injectée, tout en assurant une protection efficace des équipements.

III.6.3. Constitution technique d'un gradin

Chaque gradin de compensation comprend les éléments suivants :

- Condensateurs HT (isolation > 12kV),
 - Fusibles HT pour la protection individuelle,
 - Contacteur motorisé HT (KM1 ou KM2),
 - Régulateur de facteur de puissance (RAPQ),
 - Transformateur de courant (TC) pour la mesure du courant et le calcul du $\cos\varphi$.

Le régulateur est programmé pour activer les gradins dès que le facteur de puissance descend sous un seuil défini (0.92), et les désactive en cas de surcompensation lors de la baisse de charge.



Figure III. 14 : Régulateur varmétrique [10].

III.6.4. Schéma unifilaire simplifié de la batterie de compensation

Le schéma unifilaire ci-dessous illustre la connexion de la batterie de compensation au tableau 5.5kV (T5N) via un disjoncteur de départ dédié.

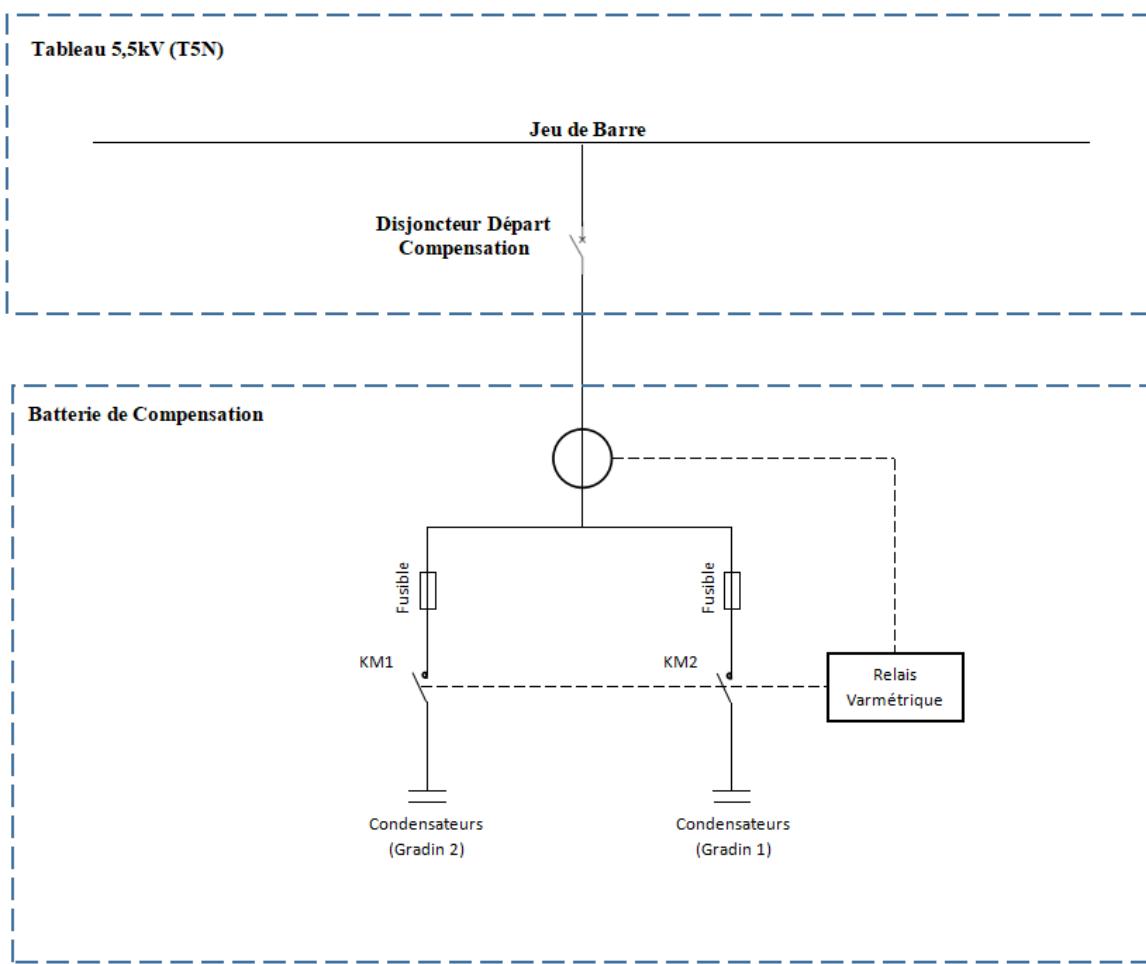


Figure III. 15 : Schéma Unifilaire Simplifié d'un modèle de batterie de compensation

III.6.4.1. Structure du schéma

- Jeu de barres 5.5kV : point d'alimentation principal,
- Disjoncteur de départ compensation : protection et isolement de la ligne,
- Relais var métrique : mesure et régulation automatique,
- KM1 & KM2 : contacteurs HT pilotant respectivement le gradin 1 et le gradin 2,
- Fusibles HT : protection des condensateurs,
- Condensateurs : répartis en deux gradins pour un total de 306 kVAR.

Ce schéma met en évidence la topologie d'une installation de compensation réactive moderne, adaptée à une exploitation industrielle avec variations de charge.

III.6.4.2. Fonctionnement par phases du schéma

Le fonctionnement dynamique du système peut être décomposé en plusieurs phases successives, en fonction du niveau de charge du système et de la valeur du facteur de puissance. Voici ce qui se passe dans chaque phase :

Phase 1 : Mise sous tension du système

- Le régulateur initialise la surveillance du $\cos\varphi$

Phase 2 : Fonctionnement normal Sans compensation

- Si seulement première pompe fonctionne, le $\cos\varphi$ peut rester acceptable.
- Le régulateur n'active aucun gradin de compensation.
- Les deux gradins restent hors service (condensateurs non alimentés, contacteurs ouverts).

Phase 3 : Activation automatique du premier gradin

- Lorsque le nombre de pompes augmente (2 à 4 en fonctionnement), la puissance réactive absorbée devient plus importante.
- Le $\cos\varphi$ mesuré chute en dessous du seuil défini.
- Le régulateur enclenche le contacteur HT du premier gradin :
- Les condensateurs de 16 μF sont mis sous tension.
- Ils injectent environ 150 kVar sur la barre 5,5 kV.
- Cela compense la charge réactive des moteurs et corrige le $\cos\varphi$ vers la valeur cible.

Phase 4 : Activation du second gradin (pleine charge)

- Si la charge continue d'augmenter (5 à 7 pompes en service), le $\cos\varphi$ chute de nouveau.
- Le régulateur détecte une nouvelle déviation du facteur de puissance.
- Il enclenche le deuxième gradin :
- Le deuxième contacteur HT se ferme,
- Les condensateurs du second gradin (16 μF) sont mis sous tension,
- La compensation totale devient 306 kVar.
- Le $\cos\varphi$ est ainsi ramené très proche de 1, ce qui optimise le fonctionnement énergétique du site.

Phase 5 : Déclenchement progressif à la baisse de charge

- Lorsque la charge diminue (moins de pompes en service), la puissance réactive devient excessive.
- Le régulateur désactive progressivement les gradins
- Le second gradin est coupé
- Si nécessaire, le premier gradin est aussi déclenché

Ce système permet ainsi de maintenir un facteur de puissance proche de 1, tout en assurant une grande souplesse d'exploitation et une réduction significative des pertes réactives sur le réseau.

III.6.4.3. Avantages du système

Ce système de compensation présente de nombreux avantages :

- ✓ Amélioration du facteur de puissance (proche de 1),
- ✓ Réduction des pertes actives dans les transformateurs et câbles,
- ✓ Allégement de la charge sur les sources HTA,
- ✓ Economie d'énergie et optimisation de la facture électrique,
- ✓ Automatisation complète, réduisant les risques d'erreur humaine.

III.7. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a démontré l'importance de la compensation d'énergie réactive pour optimiser les performances des réseaux électriques. Les batteries de condensateurs, offrent une solution efficace pour produire l'énergie réactive nécessaire tout en réduisant les pertes et en améliorant le facteur de puissance. Les différentes méthodes de compensation permettent de s'adapter aux spécificités des installations, tandis que le dimensionnement précis des condensateurs garantit un fonctionnement fiable et durable.

L'étude pratique présentée ici souligne l'impact positif d'un système de compensation bien conçu, tant sur le plan énergétique qu'économique. En définitive, la maîtrise de ces techniques est un atout majeur pour les ingénieurs et techniciens en électrotechnique, contribuant à des réseaux plus stables et plus efficaces.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans un contexte industriel marqué par une exigence croissante en matière de performance énergétique, la gestion optimale de l'énergie réactive devient un enjeu stratégique. Ce mémoire s'inscrit dans cette logique, en s'intéressant à une installation industrielle alimentant sept électropompes sous une tension de 5,5 kV, dans laquelle la maîtrise du facteur de puissance est cruciale, à la fois pour la performance technique de l'installation et pour la réduction des coûts d'exploitation.

Notre travail s'est articulé en plusieurs étapes complémentaires, qui ont permis de construire une solution de compensation efficace, fiable et adaptée aux besoins spécifiques de l'installation étudiée.

Dans la première partie, un bilan de puissance détaillé a été réalisé afin d'identifier les différentes composantes de la consommation électrique : puissance active, puissance réactive, puissance apparente, ainsi qu'un facteur de puissance insuffisant, traduisant une consommation excessive d'énergie réactive. Ce déséquilibre impactait non seulement l'efficacité énergétique de l'installation, mais risquait également d'engendrer des pénalités financières imposées par le fournisseur d'électricité.

Dans la deuxième partie, nous avons procédé au dimensionnement de la compensation, en fixant un nouvel objectif de performance énergétique. À partir du facteur de puissance cible, nous avons calculé la puissance réactive à compenser, soit 306,86 KVAR. Ce dimensionnement s'est appuyé sur des formules normalisées et a permis de déterminer les besoins exacts en matière de capacité capacitive.

Ensuite, un soin particulier a été apporté au choix du montage et de la technologie de compensation. Le montage en étoile a été retenu pour sa compatibilité avec les niveaux de tension en jeu (5,5 kV) et sa simplicité de mise en œuvre. Par ailleurs, nous avons opté pour une compensation automatique par gradins, en deux niveaux ($2 \times 150 \text{ kVAR}$), afin de permettre une adaptation continue de la compensation en fonction de la variation des charges. Ce choix garantit à la fois flexibilité d'exploitation et régulation dynamique du facteur de puissance.

Le choix des équipements a également été un élément clé de l'étude. Nous avons sélectionné 12 condensateurs de 25kvar, répartis sur deux paliers, ainsi qu'un ensemble de composants assurant la sécurité et la régulation : fusibles pour la protection contre les surintensités. Contacteurs motorisés pour la mise en service automatique des batteries, et un régulateur de

Conclusion Générale

facteur de puissance de type RAPO pour le pilotage intelligent du système. Ces éléments garantissent une exploitation fiable et durable, tout en facilitant la maintenance du système.

L'étude s'est également intéressée à la qualité de l'énergie électrique, notamment à la présence d'harmoniques. Les mesures effectuées ont montré un taux d'harmoniques inférieur à 5%, ce qui a permis d'écartier le recours à des condensateurs filtrants, souvent plus coûteux, au profit de batteries classiques ne présentant pas de risque significatif de résonance.

Les résultats obtenus tout au long de cette étude confirment que la solution proposée permet une amélioration notable du facteur de puissance, une réduction des pertes énergétiques, et une meilleure stabilité du réseau. De plus, cette solution s'intègre parfaitement dans les contraintes de fonctionnement de l'installation, sans perturber les cycles de production.

Bilan et apports du projet

Ce mémoire met en évidence plusieurs apports techniques et méthodologiques :

- Une démarche rigoureuse de diagnostic énergétique et de calcul du besoin capacitatif ;
- Une solution sur mesure, tenant compte des contraintes techniques réelles ;
- Une réflexion globale, intégrant le dimensionnement, le choix des équipements et l'étude de la qualité d'énergie ;
- Une approche durable, orientée vers la fiabilité, la sécurité et l'efficacité énergétique.

Perspectives d'amélioration

Plusieurs pistes peuvent être envisagées pour approfondir ce travail :

- Intégration d'un système de supervision en temps réel, permettant de suivre en continu le facteur de puissance, les conditions de charge et l'état des batteries, et d'optimiser dynamiquement la compensation ;
- Évaluation de l'impact environnemental du système compensé, en tenant compte du cycle de vie des composants de la réduction des émissions indirectes liées à la baisse des pertes électriques ;
- Déploiement d'une stratégie de maintenance préventive, basée sur des capteurs intelligents et l'analyse de données, pour anticiper les défaillances et améliorer la disponibilité du système ;
- Prévision de l'évolution de la charge à moyen et long terme, notamment en cas d'intégration de variations de vitesse, d'onduleurs ou d'autres équipements

Conclusion Générale

électroniques non linéaires susceptibles d'introduire des distorsions harmoniques plus importantes.

Références Bibliographiques

- [1] : Jean-Claude sabonnadière, Qualité de l'énergie électrique, Dunod, 2008.
- [2] : Schneider Electric, Cahier Technique n°158 – Compensation de l'énergie réactive, 2007.
- [3] : Khelil 2010, Document académique l'Algérie face aux défis énergétiques publié aux éditions Casbah à Alger.
- [4] : Khelil 2010, Document institutionnel du Ministère de l'énergie 2022.
- [5] : Documentation interne de la DRGB – Sonatrach 2022.
- [6] : Ali pacha islam abdelhamid, « Dimensionnement et compensation de l'énergie réactive en HTA (5.5KV) du système de chargement TMB- Sonatrach », Mémoire fin d'étude (master), Année Universitaire 2018.
- [7] : SONATRACH – Direction Régionale de Béjaïa (DRGB) documents techniques internes, Observations personnelles et entretiens 2024.
- [8] : Bourdon, P. « Pompes et systèmes de pompage : Sélection, mise en œuvre, maintenance », Paris : Dunod 2018.
- [9] : M.TEC ENERGY, fabricant belge des batteries automatiques de condensateurs, « cours technique sur la correction du facteur de puissance ».
- [10] : Abderrahmane Abdeslam « Réseaux électriques industriels », cours, Université Tahri Mohamed de Béchar 2018/2019.
- [11] : Groupe Schneider électrique, « guide de l'installation électrique installation », édition 2010.
- [12] : Merlin Gerin, Schneider Electric, guides experts basse tension N°6 « Guide de la compensation d'énergie réactive et du filtrage des harmoniques », 12 juin 2009.
- [13] : Christophe Prévé et Robert Jeannot, Schneider Electric, « guide de conception des réseaux électriques industriels » Février 1997.
- [14] : Schneider Electric, catalogue distribution électrique, « guide de la distribution basse et moyenne tension », 2002.
- [15] : Abdelli Amina « Dimensionnement de batterie de compensation de l'énergie réactive pour la station de pompage des hydrocarbures de Beni Mansour », Mémoire de fin d'étude(master), Université de Béjaia, 2015.

[16] : BOUDJEMA Aimane & REMADI Amine, « Études des moyens de compensation d'énergie Réactive », Mémoire fin d'étude (master), Université Saad Dahlab de Blida (Blida 1), Année universitaire 2019-2020.

[17] : A. NAAS, A. MEZOUAR « Étude et dimensionnement des batteries de compensation de puissance réactive dans l'unité de COJEK CEVITAL LAKSEUR », Mémoire de fin d'étude (master), Université de Béjaïa 2023.

[18] : H. SEMAOUI, Compensation de l'énergie réactive d'une installation industrielle MT/BT (HTA/BTB) Mémoire fin d'étude (master), Université Mohamed Boudiaf - M'Sila 2016.

[19] : A. BELKESSIR, A. BELABED, « Compensation de l'énergie réactive au niveau de la nouvelle unité Général Emballage », Mémoire de fin d'étude (master), Université A. Mira Béjaïa 2020/2021.

Résumé

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude et l'optimisation de l'énergie réactive dans une installation industrielle comportant plusieurs pompes électriques fonctionnant sous une tension de 5,5kV, au sein du Terminal Marin de la société Sonatrach à bejaia. Une Baisse du facteur de puissance a été constatée, due à une forte consommation d'énergie réactive par ces pompes, ce qui entraîne des pertes techniques et une augmentation des couts énergétiques.

L'étude repose sur la collecte et l'analyse des données réelles de fonctionnement des pompes, ainsi que sur des calculs précis liés à l'architecture électrique, incluant la tension le courant, la puissance apparente, et la détermination du facteur de puissance ($\cos \varphi$) actuel. Les résultats ont montré que le réseau souffrait d'une surcharge en énergie réactive non compensée, impactant négativement le rendement énergétique global de l'installation.

Afin de corriger ce déséquilibre, il a été proposé de compenser l'énergie réactive à l'aide de condensateurs fixes installés à proximité des groupes de pompes. La puissance de compensation requise a été déterminée dans le but d'atteindre un facteur de puissance proche de 0,95. Le choix des équipements techniques a ensuite été effectué spécifiquement pour la zone nord, sur la base des charges enregistrées sur le terrain.

Les résultats des calculs ont montré une amélioration significative des performances électriques, notamment une réduction des courants dans le réseau, une baisse de la consommation d'énergie à la source, et une meilleure stabilité de la tension. Ces solutions contribuent à la réduction des pertes, à la diminution de la facture énergétique, et l'amélioration de la continuité du service dans une installation stratégique du secteur des hydrocarbures.