



Centre Autonome de Perfectionnement

REPUBLIQUE DU BENIN

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

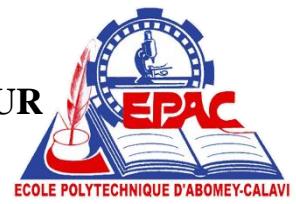
UNIVERSITE D'ABOMEY CALAVI

ECOLE POLYTECHNIQUE D'ABOMEY CALAVI

CENTRE AUTONOME DE PERFECTIONNEMENT

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

FILIERE : GENIE ELECTRIQUE ET INDUSTRIEL : GE-I

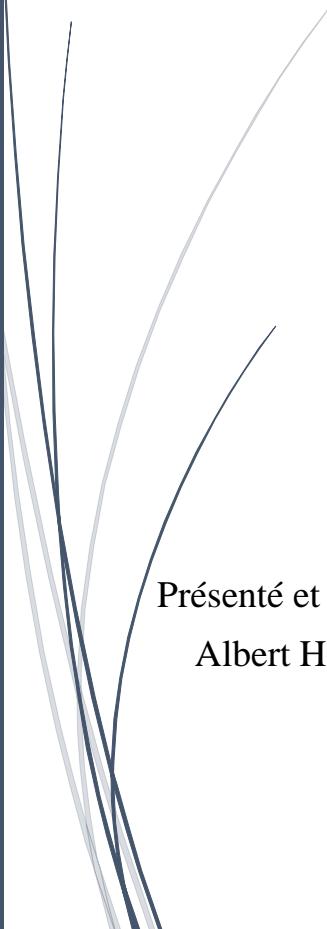


ECOLE POLYTECHNIQUE D'ABOMEY-CALAVI

**RAPPORT DE FIN DE STAGE DE
LICENCE PROFESSIONNELLE**

Thème :

**ETUDE DE L'ENERGIE REACTIVE ET
CORRECTION DU FACTEUR DE PUISSANCE :
CAS DE L'IMPRIMERIE TUNDE**



Présenté et soutenu par :

Albert HOUNTON

Proposé et dirigé par :

Dr Cossi Télesphore NOUNANGNONHOU

PROMOTION : 2020

Sommaire

DEDICACES	5
REMERCIEMENTS	6
RESUME.....	7
INTRODUCTION GENERALE	8
CHAPITRE I : PRESENTATION DU CADRE DE FORMATIONS	9
I-1-Présentation de la structure de formation CAP/EPAC	10
I-2- Présentation de l'Imprimerie TUNDE.....	10
I-2-1- Historique de l'Imprimerie TUNDE.....	10
I-2-2- Situation géographique	11
I-2-3- Objectifs et activités de l'Imprimerie TUNDE.....	11
I-2-3-a Objectifs	12
I-2-3-b Les activités de l'Imprimerie TUNDE	12
I-2-4- Organigramme	13
I-2-5 Description fonctionnelle de l'imprimerie TUNDE.....	15
I-3 - Présentation du service maintenance	16
I-3-1- Travaux effectués au cours du stage	16
Image 1	17
Image 2	18
Image 3	19
I-3-2- Organisation des travaux au niveau du service maintenance	20
I-3-3- Travaux Direct et indirect à la production	21
3-3-a- Travaux non liés à la production	21
3-3-b-Travaux directement liés à la production	21
I-3-4- Procédure de dépannage	22
CHAPITRE II : GENERALITE SUR ENERGIE REACTIVE ET FACTEUR DE PUISSANCE	24
II- INTRODUCTION.....	25
II-1- ENERGIE REACTIVE.....	26
II-1-1- Différentes sortent d'Energie	26

1-1-a- L'énergie active :	26
1-1-b- L'énergie réactive	26
II-1-2- Composantes active et réactive	26
1-2-a- composantes active et réactive du courant	27
1-2- b- Composantes active et réactive de la puissance	27
II-1-3- Importance de la puissance réactive.....	28
1-3-1-Différencier l'énergie active de l'énergie réactive	28
a- L'énergie active	29
b- L'énergie réactive	29
II-1-4- Conséquence de l'énergie réactive pour l'utilisateur	29
1-4-1- Avantages de l'énergie réactive pour l'utilisateur	30
II-1-5- Les principales sources d'énergie réactive	30
1-5-1- L'Alternateur	30
1-5-2- câble souterrain :	30
1-5-3- Lignes aériennes THT ou HT de grandes longueurs:	31
II-1-6- Les appareils qui consomment de l'énergie réactive	31
II-2 : Facteur de puissance	32
2-1- Comprendre le facteur de puissance	32
2-2- Définition	33
2-3- La valeur $\text{tg}\phi$	33
II-2-1 : Importance du facteur de puissance	34
Tableau II-1	34
2-1-1- Inconvénients d'un faible facteur de puissance :	36
2-1-2- Causes du mauvais facteur de puissance :.....	37
II-3- CORRECTION DU FACTEUR DE PUISSANCE	38
II-3-1- But de la correction du facteur de puissance	38
II-3-2- Méthodes corrective du facteur de puissance.....	38
II-3-3- Compensation capacitive	38

3-3-1- Avantages et inconvénients des batteries de condensateurs :	39
a- Avantages.....	39
b- Inconvénients.....	39
II-3-4- Compensateur synchrones.....	40
3-4-1 Avantages et inconvénients des compensateurs synchrones :	41
a- Avantages	41
b- Inconvénients	41
II-3-5- Compensateur statique.....	42
3-5-1- SVC (Static Var Compensator)	42
5-1-1 Avantages et inconvénients des SVC :.....	43
a- Avantages	43
b- Inconvénients.....	43
3-5-2- STATCOM	44
5-2-1-STATCOM : Avantages et Inconvénients	45
a- Avantages.....	45
b- Inconvénients.....	45
II-3-6- Compensation par condensateur	46
3-6-1- Définition	46
3-6-2- Constitution de la batterie de condensateurs.....	46
3-6-3- Choix du branchement des condensateurs	46
a- Montage triangle	47
b- Montage en étoile	47
II-3-7-. Schémas de branchement des batteries de condensateurs	48
3-7-1- Batteries montées en triangle :	48
3-7-2- Batteries en double étoile :.....	49
II-3-8- Les différents types de compensation :.....	50
3-8-1- Batteries fixes :	50
3-8-2- Batteries de condensateurs en gradins automatique :	50
3-8-3- Principe et intérêt de la compensation automatique :	50

II-3-9- Les différents modes de compensation	51
3-9-1-Compensation globale :	52
a- Principe	52
b- Intérêts.....	53
3-9-2- Compensation par secteur :.....	53
a- Principe	53
b- Intérêts.....	54
3-9-3- Compensation individuelle :.....	55
a- Principe	55
b- Intérêts.....	55
Utilisation	56
CHAPITRE III: Travaux de Fin d'étude et Résultat-Analyse	57
III-1 Aperçu du réseau électrique de l'imprimerie TUNDE	58
Tableau III-1- Liste des équipements	63
III-2- Choix du dispositif.....	64
III-3- Option choisir	64
III-4– BILAN ENERGETIQUE	65
III-4-1- Calcul pour relever le facteur de puissance :	65
4-1-a- Méthode 1	66
Tableau III-2	67
III-4-2- Méthode Simplifiée	67
4-2-1-Principe général	67
4-2-a- Méthode 2	68
Tableau III-3	70
III-4-3-Résumé sur la facture d'électricité de l'imprimerie Tunde	70
III-5- Mode d'Installation du dispositif.....	70
III-6- Principe de fonctionnement.....	72
Conclusion	74
Références	75

DEDICACES

Je dédie ce travail :

- A mon feu père
- A ma feue mère
- A mes frères et sœurs
- A mon épouse et à mes enfants
- Au Service Maintenance de l'Imprimerie Tunde.
- A tous mes collègues de l'EPAC/CAP Promotion 2020
- Ainsi qu'à tous ceux qui pensent à moi de près ou de loin.

Je vous remercie tous d'avoir partagé au quotidien mes espoirs et mes inquiétudes.

REMERCIEMENTS

Au terme de mon travail, je tiens à remercier, le Directeur de l'EPAC, le Chef de CAP et le Chef Département de Génie Electrique, l'administration et le corps professoral de CAP et de l'EPAC, pour tous les efforts qu'ils convergent pour le bien être de notre formation de qualité.

Ce parcours de licence professionnelle a été couronné par un enseignement de qualité donné de par des personnes qualifiées. je remercie le professeur **AGBOMAHENA Macaire** président du jury et le Dr **NOUNAGNONHOU Télesphore** dont je remercie d'avoir encadrés avec tant de patience, de disponibilité et de gentillesses, pour son travail et pour les enrichissements qu'il a bien voulu apporter tout au long de ce rapport et également le Dr **ISSIAKO Faras**, d'avoir eu l'amabilité d'examiner mon travail, apporter des corrections et de faire partie du jury sans oublié Mr **ADINI Ligali** chef service Exploitation de l'Imprimerie TUNDE.

A l'ensemble de tout le personnel du groupe TUNDE SA en particulier celui du service maintenance.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à mon mémoire, parmi eux Mr HONFO Isidore, Mr HOUNKPATIN Christ Rocard, et à ma très chère épouse AHOLOUHOUEDÉ Gisèle.

Mes sincères remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont participé à la rédaction de ce rapport, que je n'ai pas pu nommer et ceux qui ont préféré rester dans l'anonymat.

RESUME

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche de solutions techniques pour améliorer la qualité de l'énergie électrique consommée dans les installations industrielles. Il porte spécifiquement sur l'étude de l'énergie réactive et la correction du facteur de puissance, avec une application pratique à l'imprimerie TUNDE SA.

L'énergie réactive, bien qu'indispensable au fonctionnement des équipements à composants inductifs (moteurs, transformateurs, etc.), représente une charge inutile pour le réseau si elle n'est pas maîtrisée. Sa présence excessive entraîne des pertes d'énergie, des chutes de tension, des surdimensionnements d'installations, ainsi que des pénalités financières pour les entreprises.

Dans une première partie, le mémoire présente les notions fondamentales d'énergie électrique, en distinguant l'énergie active, réactive et apparente, ainsi que leurs interactions dans les circuits à courant alternatif. Ensuite, une analyse approfondie du facteur de puissance est menée afin d'en comprendre les causes, les conséquences d'un faible cos et l'intérêt de sa correction.

L'étude met en évidence plusieurs techniques de compensation, notamment l'utilisation de batteries de condensateurs, compensateurs synchrones et compensateurs statiques (SVC, STATCOM), en évaluant leurs avantages et limites. Le choix de la méthode appropriée dépend du contexte industriel, des équipements en place et des objectifs d'optimisation énergétique.

La dernière partie du mémoire est consacrée à l'application concrète à l'imprimerie TUNDE. Un bilan énergétique de son réseau électrique a été réalisé, révélant un facteur de puissance perfectible. Des simulations et calculs de dimensionnement ont permis de proposer une solution de compensation adaptée, visant à améliorer le rendement énergétique global, réduire les pertes et éviter les pénalités.

Ce travail démontre l'importance de la maîtrise de l'énergie réactive dans les milieux industriels et propose des pistes concrètes pour renforcer la performance énergétique des installations.

INTRODUCTION GENERALE

Le facteur de puissance constitue un concept fondamental en électrotechnique, particulièrement important pour les ingénieurs et les techniciens qui travaillent avec des systèmes électriques. Il représente le rapport entre la puissance réactive et la puissance active dans un circuit électrique, et sa maîtrise est essentielle pour optimiser les performances des installations, réduire la consommation énergétique et limiter les coûts d'exploitation. Selon **Csarnecki (1984)**, une compréhension approfondie de la puissance réactive et de ses effets est indispensable pour éviter les mauvaises interprétations des phénomènes électriques en régime non sinusoïdal

L'étude des moyens de corrections du facteur de puissance s'avère donc incontournable. Elle permet non seulement de répondre aux exigences de fonctionnement des réseaux électriques, mais aussi de réduire les pertes par effet joule, de limiter les chutes de tension, d'éviter le surdimensionnement des installations et d'augmenter la capacité de transport de puissance. Comme l'a souligné **EL-Hawary (2001)**, la compensation adéquate de la puissance réactive constitue une étape essentielle pour l'optimisation des systèmes électriques.

Le présent mémoire, consacré à l'étude de l'énergie réactive et à l'analyse des techniques de correction du facteur de puissance, a été structuré en trois chapitres :

Dans le **premier chapitre**, nous avons fait la présentation du cadre de formation et les Travaux effectués au cours du stage.

Le **deuxième** aborde la notion d'énergie réactive et ses inconvénients majeurs, l'étudie du facteur de puissance, en soulignant son importance, ainsi que ses effets directs et indirects sur l'installation et cité les différentes méthodes de correction du facteur de puissance, en détaillant les avantages et inconvénients de la compensation par batteries de condensateurs selon leur emplacement (source, réseau ou charge).

Enfin le **troisième chapitre**, est consacré aux travaux de Fin d'étude et résultat-analyse, mettant en évidence l'impact de la correction sur la performance du réseau.

Nous terminons enfin par une conclusion générale.

CHAPITRE I:

PRESENTATION DU CADRE DE FORMATIONS

I-1-Présentation de la structure de formation CAP/EPAC

Le Centre Autonome de Perfectionnement de l'Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi est un centre de formation continue. Au départ il était nommé Division du Perfectionnement et de la Formation Continue (DPFC) de l'ex Collège Polytechnique Universitaire (CPU).

A l'avènement de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC) et suite à la mutation du CPU intervenue en 2004, la DPFC fut érigée en Centre Autonome de Perfectionnement (CAP). Il est implanté sur le site de l'Université d'Abomey Calavi dans le département de l'Atlantique.

L'entrée au CAP se fait sur étude de dossier des candidats titulaires d'un Baccalauréat scientifique (série F, D, E, C et DTI) ou équivalent ou d'un Brevet de Technicien Supérieur. Il offre des formations à distance et en cours du soir, conduisant aux diplômes de Licence Professionnelle, Ingénieur de conception ou Master Professionnelle.

Les bonnes performances académiques enregistrées par le Centre dès les premières années de fonctionnement ont fait de lui, une structure de référence en matière de formation continue dans les domaines du génie de l'enseignement supérieur technique.

I-2 Présentation de l'Imprimerie TUNDE

I-2-1 Historique de l'Imprimerie TUNDE

Dans le but de participer à la politique de réduction du taux de chômage et l'envie de contribuer à l'enracinement de l'éducation de la jeunesse Béninoise, Monsieur Rasaki Babatundé OLLOFINDJI, Président Directeur Général de la Société TUNDE SA, après son baccalauréat en 1984, et vue la crise de papier survenue à l'époque au Bénin, créa le 05 Juin 1986 la Société TUN2DE "New Business" sous la forme d'une Société à Responsabilité Limitée (SARL). Cette Société est inscrite au registre du commerce de Porto-Novo sous le numéro 1086-B avec un capital de départ de deux

millions (2 000 000) de francs CFA. La société a débuté ses activités le 1^{er} Novembre 1986. Le capital a été porté à dix millions (10. 000. 000) FCFA par la création de 800 nouvelles parts émises au pair et libérées intégralement suite à une Assemblée Générale des Actionnaires le 20 Janvier 1995.

Le 17 décembre 1996, suite à une Assemblée Générale extraordinaire des actionnaires, la société TUNDE devient une Société Anonyme (SA) avec un capital de trois cent cinquante millions (350. 000. 000) de Francs CFA. Cette augmentation rapide du capital a permis la réalisation du projet de modernisation de l'Imprimerie TUNDE qui est l'une des plus grandes imprimeries de la sous-région.

I-2-2 Situation géographique

La société d'imprimerie TUNDE SA à son siège principal à Cotonou Akpakpa au lot numéro 562H, quartier Ahwanléko.



Figure I-1 : Siège de l'imprimerie TUNDE

Elle possède aussi une filiale située au quartier PK10 au bord du goudron à quelques mètres du poste de péage d'èkpè, sans oublier les différentes papeteries.

I-2-3- Objectifs et activités de l'Imprimerie TUNDE

I-2-3-a Objectifs

L'évolution de l'Imprimerie TUNDE appartenant au groupe TUNDE SA est liée à son dynamisme, à la persévérance de ses dirigeants et à leur ferme volonté d'atteindre leurs objectifs à savoir :

- Etre une imprimerie d'envergure sous régionale grâce au dynamisme et à l'assurance d'un service de qualité à la clientèle ;
- Maintenir son slogan publicitaire « Imprimerie TUNDE, la première imprimerie au Bénin, la plus performante de la sous-région » en modernisant ses installations industrielles ;
- Etendre ses activités en créant de nouveaux produits tels que les cahiers « le papillon » et l'ouvrage «le Planificateur» qui s'imposent sur le plan national et qui sont très convoités dans la sous-région ;
- Diversifier ses activités en créant le département TUNDE MOTORS à travers la représentation de la marque de voiture Volkvagen au Bénin et le département de TUNDE Transport pour faciliter le voyage par voie terrestre des personnes.

Cette diversification des activités a l'avantage de permettre désormais à la société de pouvoir couvrir ses charges de fonctionnement pour ne plus être tributaire des fluctuations liées au fonctionnement des imprimeries au Bénin (période de pointe et période morte) et faire face à la concurrence. En outre, l'hégémonie dont dispose aujourd'hui l'Imprimerie TUNDE sur le plan national et qui lui permet de rentrer dans une concurrence sous régionale libre est liée à :

- ✓ La possession d'un matériel hautement performant.
- ✓ La production d'article de qualité supérieure.
- ✓ La sauvegarde d'une bonne image de marque qui lui confère la confiance de la clientèle.

I-2-3-b Les activités de l'Imprimerie TUNDE

L'imprimerie TUNDE est constituée de trois grandes branches d'activités que sont : l'imprimerie, l'usine à cahiers et la division distribution.

L'imprimerie

TUNDE SA possède l'une des imprimeries les plus modernes et les plus puissantes de la sous-région. Cette imprimerie a pour activité la production des manuels scolaires et des cahiers d'activités pour l'enseignement primaire, des calendriers, des cartes (postales, de vœux). Les éditions de magazines et de journaux sont également faites.

L'usine à cahiers

Elle produit différents formats de cahiers vendus sous la marque "le papillon"

La division distribution

Cette branche, la plus vieille est fonctionnelle depuis 1986. Elle a pour principal objectif l'achat en vue de la revente en état des articles et fournitures de bureau. C'est donc une branche à vocation essentiellement commerciale disposant d'une boutique et d'un magasin près de l'ancienne maison de la radio nationale et une autre boutique aux quartiers maromilitaire.

I-2-4 Organigramme

La structure organisationnelle est le squelette sur lequel viennent s'appuyer toutes les forces qui la font vivre : inspirations créatives, informations, ordres, liaisons et exécutions. Nous apercevons que la structure ainsi définie revêt une importance capitale. Elle demeure un outil indispensable pour un meilleur rendement des richesses du personnel et des infrastructures investies dans l'entreprise. L'organigramme de l'imprimerie se présente donc comme suit :

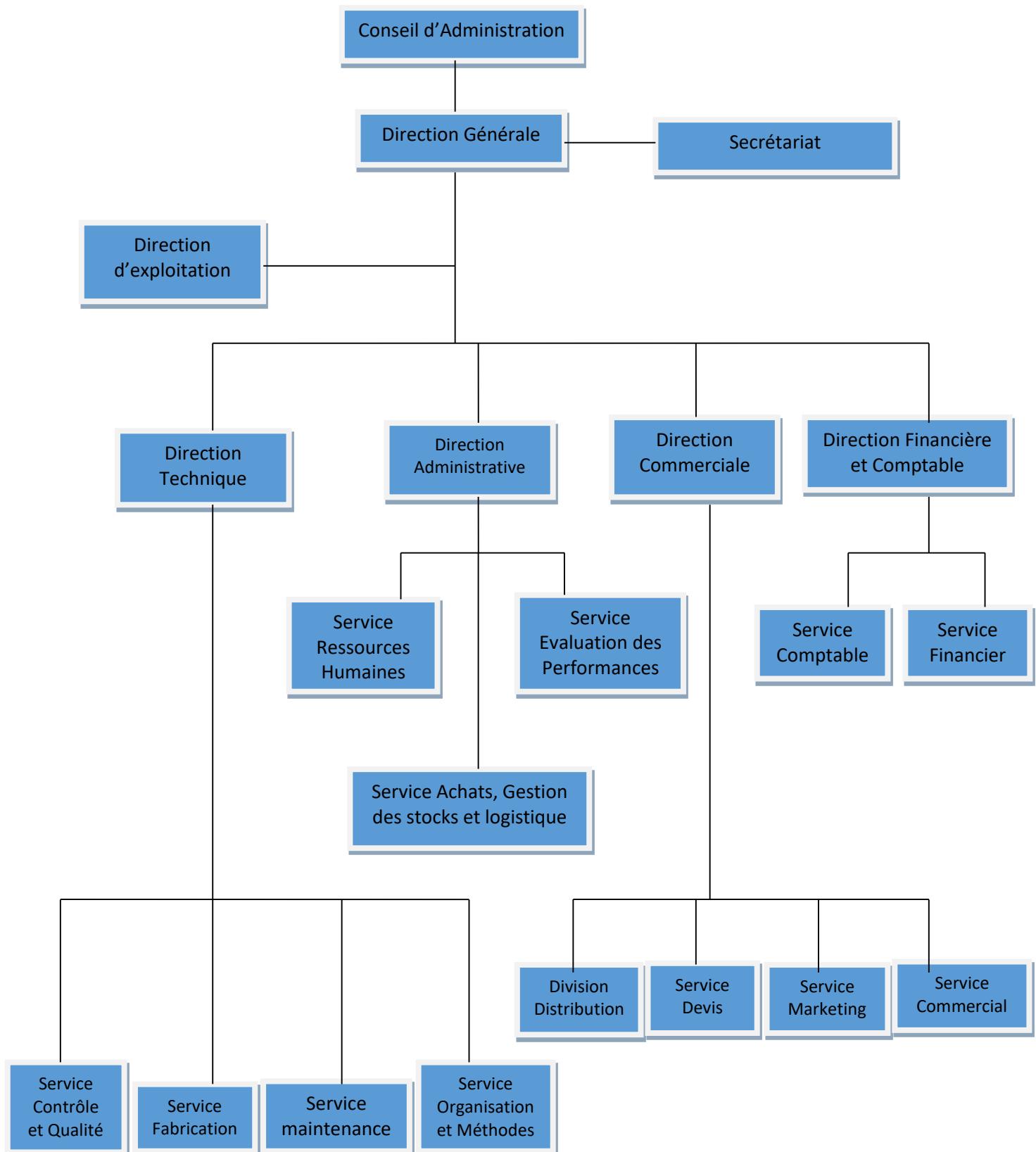


Fig I-2 : Organigramme de l'imprimerie TUNDE

I-2-5 Description fonctionnelle de l'imprimerie TUNDE

L'imprimerie TUNDE est alliage de quatre sessions qui exécutent les travaux à l'engrenage. On dispose donc de :

- La Publication Assistée par Ordinateur (PAO) ;
- Le laboratoire ;
- L'impression ;
- La finition.

C'est donc l'ensemble de ces quatre sessions qui représentent l'imprimerie. Les travaux se font donc d'une session à une autre jusqu'à la livraison. En effet, lorsqu'un client a besoin des services de l'imprimerie, il s'adresse au service commercial tout en ayant le soin de bien préciser les détails de sa demande. Le service commercial transmet la demande au service fabrication qui à son tour prend l'avis de la PAO en ce qui concerne la faisabilité de ce qui a été demandé par le client. Après ce préliminaire, le dossier de fabrication est élaboré par le service fabrication et destiné à la PAO pour la réalisation de la demande. Ce dossier de fabrication comporte toutes les caractéristiques de la demande, ainsi que le nom de l'opérateur (personne chargée à l'exécution du travail à la PAO), puis le nom de la machine à utiliser. La PAO, pour la réalisation de son travail, utilise des logiciels de traitement d'image comme : Photoshop, Adobe Illustrator, Adobe InDesigned et Quart X express. Ainsi, une fois que la réalisation de la demande est effectuée, un exemplaire est imprimé sur format papier et soumis à l'appréciation du client en vue d'obtenir le Bon A Tirer (BAT) ; ce qui permet à la PAO de flasher alors la demande sur des films grâce à la flasheuse. Après cette opération (le flashage), les films sont alors développés grâce à la dévelopeuse afin de rendre leur contenu plus visible. Les films développés sont alors transmis au laboratoire qui constitue la deuxième étape dans le processus de fonctionnement de l'imprimerie. Le laboratoire a donc pour objectif de recopier le contenu des films sur des plaques grâce à l'insolueuse avant de passer aussi à la dévelopeuse. Ces plaques sont ensuite envoyées à l'atelier d'impression afin d'être imprimer sur des papiers formats. Cet atelier est rempli de plusieurs machines qui

servent à imprimer. Ce n'est qu'après l'impression, que l'atelier de finition intervient afin de finaliser la demande pour la livraison. Cet atelier est aussi composé de plusieurs machines destinées à faire les travaux demandés.

I-3 - Présentation du service maintenance

La maintenance industrielle est un système d'organisation permettant le maintien en état des installations. Maintenir c'est donc effectuer des opérations de dépannages, de graissages, visites, réparations et amélioration qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de la production. C'est dans cette logique que l'imprimerie TUNDE SA dispose d'un service de maintenance composé des électrotechniciens (qui s'occupent des pannes électriques) et des mécaniciens (qui s'occupent des pannes mécaniques). Ainsi, pour mener à bien leur travail, des réunions se font généralement au début et à la fin de chaque semaine pour faire le bilan des travaux effectués sur des machines ainsi que ceux en cours. En outre, les objectifs de ce service se résument comme suit :

- ✓ Assurer la production ;
- ✓ Maintenir la qualité du produit fabriqué ;
- ✓ Maintenir l'équipement dans de meilleures conditions et dans un état de bon fonctionnement ;
- ✓ Assurer la disponibilité maximale de l'outil de production ;
- ✓ Fournir un service qui élimine les pannes à tout moment ;
- ✓ Augmenter à la limite la durée de vie de l'outil de production.

Pour atteindre donc ces objectifs, le service maintenance effectue ses travaux suivant un planning bien élaboré, avec une équipe disponible et dévouée à la tâche.

I-3-1 Travaux effectués au cours du stage

Au cours du stage effectués au service maintenance de ladite société, nous avons été impliqué dans plusieurs activés techniques majeures, celle-ci ont porté principalement sur l'installation de machines industrielles, ainsi que sur la réalisation d'opérations de maintenance corrective et préventive. Certaines de ces interventions

ont été effectuées en collaboration avec des techniciens étrangers, ce qui a permis à un enrichissement technique et un transfert de compétences. Les illustrations présentées ci-dessous mettent en évidence quelques exemples significatifs des travaux réalisés.



Image 1 : installation de la machine Continue ST150

L'installation de cette nouvelle machine moderne d'impression modèle : continue ST150, est réalisée avec l'appui des techniciens 2italiens envoyés par le fournisseur. Alimentée en 380V + Neutre, cette machine polyvalente est spécialement conçue pour divers travaux d'impression, notamment la production de timbres et de bulletin de vote. Cette expérience m'a permis de renforcer mes compétences pratiques tout en découvrant les aspects techniques liés à la mise en service d'un équipement industriel de grande envergure.



Image 2 : Passation du document électrique

Après l'installation de la machine d'impression Continue ST150, le technicien électricien italien chargé de la mise en service m'a remis et expliqué le **document électrique officiel de la machine**. Cette étape de passation marque la clôture du processus d'installation et garantit une bonne compréhension du fonctionnement électrique ainsi que des consignes de sécurité liées à l'équipement. Cette transmission de connaissance m'a permis d'approfondir mes compétences techniques en électricité industrielle et de mieux appréhender la maintenance et l'exploitation de la machine dans un cadre professionnel.



Image- 3 : maintenance corrective et préventive sur l'encolleuse PONY

Sur l'image-3; suite à une panne constatée sur la machine, le service maintenance a procédé à un diagnostic afin d'identifier l'origine du problème. L'analyse a révélé la détérioration d'une pièce essentielle au bon fonctionnement de la machine, nécessitant son remplacement. Le service achat a alors pris en charge la commande de la pièce auprès du fournisseur agréé.

Toutefois, le chef maintenance a jugé opportun de ne pas se limiter à une simple réparation, mais plutôt à une révision générale combinant une maintenance corrective et une maintenance préventive (contrôle de l'état des composants mécaniques et électriques, ajustement des paramètres de fonctionnement, et vérification des sécurités intégrées). Cette approche globale visait à assurer une meilleure fiabilité de la machine et à réduire les risques de pannes récurrentes.

Pour renforcer l'efficacité de l'intervention, un technicien étranger, expert du modèle concerné, a été mobilisé. Sa mission consistait non seulement à superviser la

remise en service de la machine, mais également à transmettre son savoir-faire technique à l'équipe locale. Il a ainsi présenté en détail l'architecture de la machine, ses modes de fonctionnement, les points sensibles nécessitant une surveillance régulière, ainsi quelques bonnes pratiques de maintenance. Cette session d'échanges a permis d'accroître les compétences de l'équipe, particulièrement utile puisque la machine avait été installée avant la mise en place du personnel technique actuellement en fonction.

I-3-2- Organisation des travaux au niveau du service maintenance

Pour avoir une maintenance efficace, le service maintenance de l'imprimerie TUNDE dispose d'une politique de maintenance qui est la définition au niveau de l'entreprise des objectifs technico-économiques relatifs à la prise en charge des équipements par le service maintenance. C'est dans le cadre de cette politique, que le responsable du service maintenance met en œuvre les moyens adaptés aux objectifs fixés ; on parlera donc de stratégie pour le moyen terme et de tactique pour le court terme. Deux types de maintenance se font alors dans cette usine, on distingue :

- La maintenance préventive systématique ; c'est la maintenance préventive effectuée selon un échéancier établie selon le temps ou le nombre d'unités d'usages. A cet effet un planning d'entretien de toutes les machines est élaboré par le chef maintenance valable pour une période de dix mois soit généralement une machine par semaine.
- La maintenance corrective ; c'est la maintenance effectuée après une défaillance (altération ou cessation). En effet lorsqu'un opérateur (généralement, sont appelés opérateurs, les agents qui conduisent les machines) constate une panne, il remplit la fiche de signalisation de pannes puis le fait signé respectivement par le chef section de l'atelier et par le chef maintenance. Ce n'est qu'après cela, que les assistants du chef maintenance reçoivent la fiche afin d'intervenir sur la machine. Après intervention, les assistants de la maintenance remplissent à leur tour, la fiche d'intervention qui atteste le travail effectué sur la machine.

Notons qu'en dehors des machines, les deux méthodes de maintenance énumérées ci-dessus, s'appliquent également aux installations électriques de l'usine.

I-3-3- Travaux Direct et indirect à la production

Ces travaux sont répartis en deux catégories :

- Les travaux directement liés à la production ;
- Les travaux non liés à la production.

Les travaux liés à la production sont ceux exécutés sur des machines tandis que ceux non liés à la production sont exécutés dans les bureaux et autres lieux de l'usine. Ainsi les travaux effectués se résument comme suit :

3-3-a- Travaux non liés à la production ;

- Installations et câblages des lampes à ballasts ;
- Installations et câblages des disjoncteurs pour les mesures de sécurités ;
- Câblages pour l'alimentation des évaporateurs et des condenseurs pour les climatiseurs.

3-3-b-Travaux directement liés à la production ;

Ces travaux sont ceux effectuées sur des machines en cas de pannes ou non (prévention). En effet, la réparation est faite dès qu'il y a une panne alors que la révision est pour la prévention des pannes. Dans le cas où, il y a manque de pièces pour la réparation d'une machine, un dépannage est fait afin de ne pas bloquer la production. Ainsi, les travaux liés à la production dans le cas d'une réparation se résument en ces trois points :

- ➡ Connaissances du problème posé par l'opérateur ;
- ➡ Recherches des pannes ;
- ➡ Réparation (solutions).

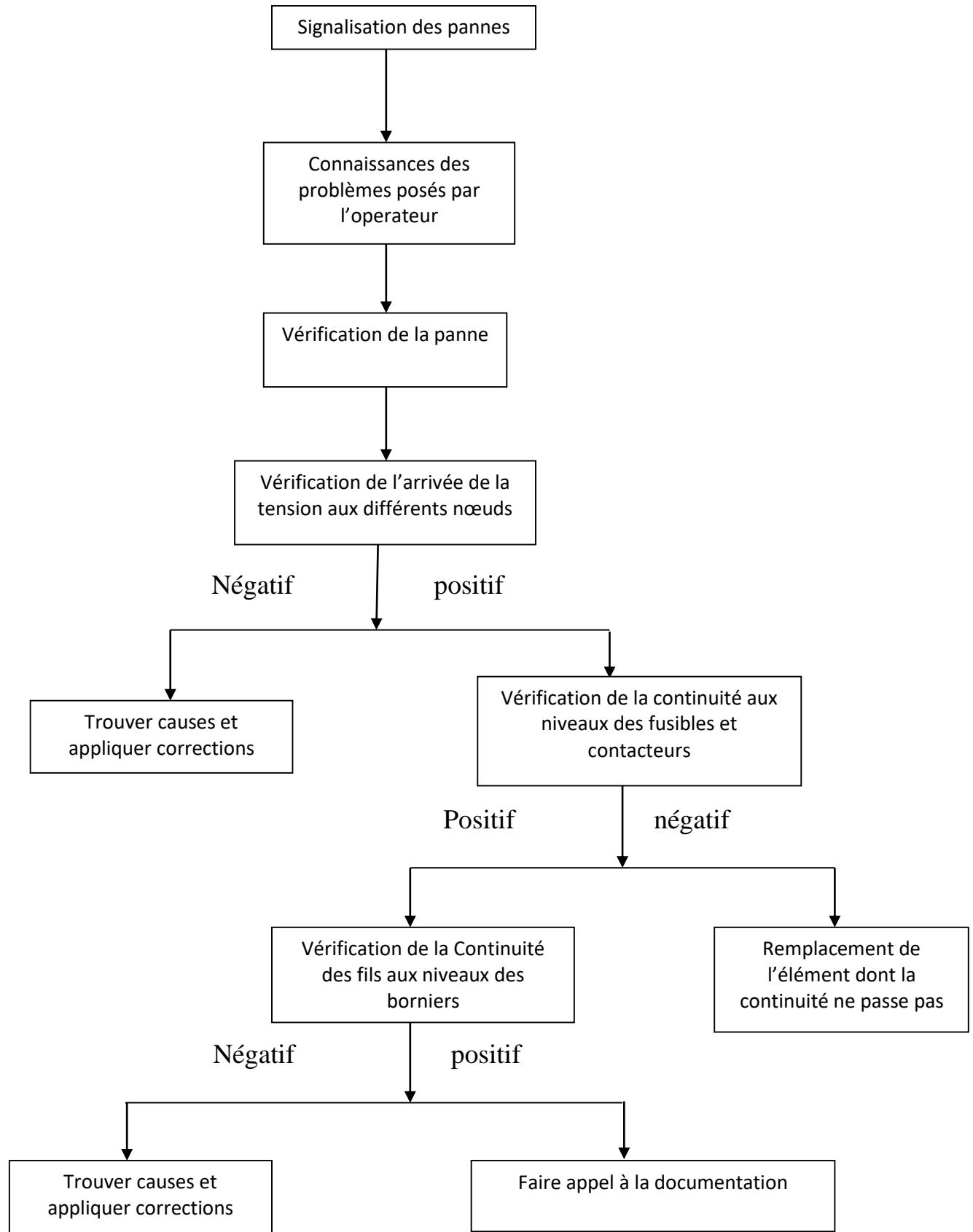
I-3-4- Procédure de dépannage

La connaissance du problème est le fait de recevoir l'information sur la panne chez l'opérateur. Après cela, un diagnostic est établi afin d'apporter une solution. Ainsi, le problème est résolu soit par un réglage technique, soit par un entretien de l'élément concerné où son remplacement. De ce fait, la procédure à suivre pour la recherche de pannes électriques sur une machine qui a un problème de démarrage se résume comme suit :

- Vérification de la panne signalée afin de faire le constat ;
- Vérification de l'arrivée de la tension aux différents nœuds dans l'armoire électrique ;
- Si la tension est disponible, on vérifie alors la continuité des différents fusibles et contacteurs connectés à la machine ;
- Dans le cas où, un fusible ou un contacteur est défectueux, on procède à son remplacement ; dans le cas contraire, on vérifie la continuité entre les fils de connexions dans les borniers afin de voir s'il n'y a pas défaut d'isolement (coupure).

Ainsi, ces différentes étapes nous conduisent généralement à l'identification des pannes afin d'apporter une solution. Notons que, c'est la détermination des causes qui présente beaucoup de difficultés dans l'élaboration de ce travail.

On peut résumer ces différents points dans le graphe ci-après :



Procédure de recherches de pannes

CHAPITRE II :

GENERALITE SUR ENERGIE REACTIVE ET FACTEUR DE PUISSANCE

II- INTRODUCTION

Depuis de nombreuses années, le fournisseur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de l'énergie électrique. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Le réglage de la tension et l'apport de la puissance réactive sont les paramètres essentiels dans la qualité de l'énergie électrique.

On assiste à une augmentation régulière, dans les réseaux, des taux de déséquilibre des courants et d'harmonique, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive. La circulation de ces mêmes courants va également provoquer des déséquilibres de tension et, des harmoniques, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique. De plus, des incidents du type coups de foudre, court-circuit ou un brusque démarrage d'une machine tournante à forte puissance peuvent causer une chute soudaine et importante de tension. Ces perturbations ont bien entendu des conséquences néfastes sur les équipements électriques, lesquelles peuvent aller d'un fort échauffement ou d'un arrêt soudain des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

La compensation de la puissance réactive vise plusieurs objectifs dont les principaux sont :

- le maintien d'un niveau de tension le plus élevé possible afin de limiter les pertes en ligne tout en restant compatible avec la tenue des matériels.
- garantir un fonctionnement stable pour l'utilisation optimale des appareils et autres récepteurs.

L'étude des moyens de compensation est une étape nécessaire pour l'analyse et l'étude comparative de ces moyens afin de répondre aux exigences de fonctionnement des systèmes électriques.

II-1- ENERGIE REACTIVE

L'énergie réactive est l'énergie nécessaire au fonctionnement d'équipements tels que les moteurs ou les transformateurs, mais qui ne produit pas de travail utile. Les fournisseurs d'électricité pénalisent les professionnels ayant une consommation excessive d'énergie réactive via la Composante Énergie Réactive (CER) du TURPE. Pour éviter les déséquilibres et les surcharges sur les réseaux électriques et ne pas payer ce coût additionnel, l'énergie réactive doit être compensée. Sa compensation, réalisée via les moyens de compensation, permet de neutraliser cette énergie et de réduire le déphasage entre tension et courant, améliorant ainsi l'utilisation de l'énergie électrique.

II-1-1- Différentes sortes d'Energie

Tout système électrique (câble, lignes, transformateurs, moteurs, éclairages, etc.) utilisant le courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive.

1-1-a- L'énergie active :

L'énergie active résulte de l'utilisation de puissance active P exprimée en Watt essentiellement par les récepteurs. Elle se transforme intégralement en énergie mécanique ou lumineuse ou calorifique.

1-1-b- L'énergie réactive :

L'énergie réactive consommée sert essentiellement à l'amélioration des circuits magnétiques des machines électriques. Elle correspond à la puissance réactive Q exprimée en VAR.

L'énergie apparente est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente des récepteurs, somme vectorielle de la puissance active et de la puissance réactive. Elle permet de déterminer la valeur du courant absorbé par un récepteur.

II-1-2- Composantes active et réactive

1-2-a- composantes active et réactive du courant :

A chacune de ces énergies active et réactive correspond un courant I . Le courant actif (I_a) est en phase avec la tension du réseau. Le courant réactif (I_r) est déphasé de 90° par rapport au courant actif, en arrière (récepteur inductif) ou en avant (récepteur capacitif).

Le courant (I) total est le courant résultant qui parcourt le câble (ou la ligne) électrique depuis la source jusqu'au récepteur.

Ce courant est déphasé d'un angle par rapport au courant actif (ou par rapport à la tension), comme indiqué sur la figure II-1.

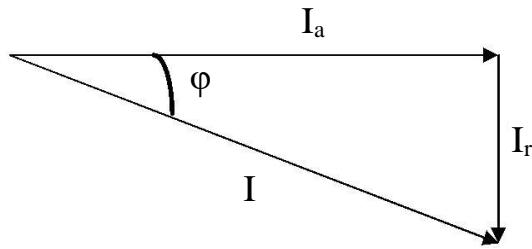


Figure II-1 : Diagramme vectoriel des courants [1]

Les courants actifs, réactifs, total et le déphasage, sont liés par les relations suivantes :

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

$$I_a = I \cos \varphi$$

$$I_r = I \sin \varphi$$

Dans le cas d'absence d'harmoniques, $\cos \varphi$ est appelé facteur de puissance.

1-2-b- Composantes active et réactive de la puissance :

Pour des courants et des tensions ne comportant pas de composantes harmoniques, le diagramme précédent établis pour les courants est aussi valable pour les puissances ; il suffit de multiplier chaque courant par la tension du réseau.

On définit ainsi pour un circuit monophasé :

Puissance active

Puissance réactive

Ces puissances se composent vectoriellement comme indiqué sur la figure II-2

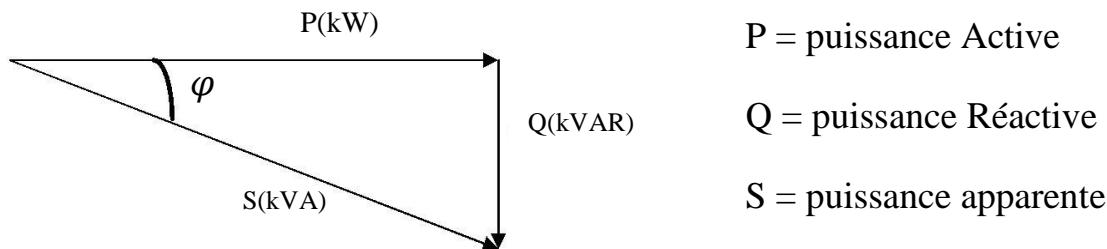


Figure II-2 : diagramme vectoriel des puissances actives, réactives et apparentes

La puissance apparente

$$S=VI \text{ d'où } S= \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Dans ce cas $\cos\varphi = \frac{P}{S}$ est appelé facteur de puissance

II-1-3- Importance de la puissance réactive

L'énergie réactive est un facteur très important qui influe sur la stabilité et l'équilibre du réseau électrique, ainsi que son fonctionnement. Les effets secondaires de ce facteur se résument dans les points suivants:

- ❖ La chute de tension dans les lignes et les postes de transformation ;
 - ❖ Les pertes supplémentaires actives dans les lignes, les transformateurs et les générateurs ;
 - ❖ Les variations de tension du réseau sont étroitement liées à la fluctuation de la puissance réactive dans le système de production.

1-3-1- Différencier l'énergie active de l'énergie réactive

L'énergie qui transite par le **réseau électrique** se divise en deux parties :

L'énergie active (Ea) et réactive (Er).

- a- L'énergie active** (qui s'exprime en kWh) est celle qui est utilisée par les appareils électriques pour les faire fonctionner. Ces derniers transforment l'énergie active en puissance mécanique, qui servira à faire marcher l'appareil, et en chaleur (pertes).
- b- L'énergie réactive** (qui s'exprime en kvarh) est utilisée par les circuits magnétiques de l'appareil en question. C'est elle qui crée par exemple le champ magnétique des bobines ou des transformateurs. L'énergie réactive ne sert donc pas à faire fonctionner l'appareil de manière directe. Toutefois, sans elle, celui-ci ne pourrait pas fonctionner.

II-1-4 Conséquence de l'énergie réactive pour l'utilisateur

Les points négatifs de la circulation de cette énergie dite « improductive » sont nombreux. Par exemple :

- **Surcharge de courant dans les transformateurs ;**
- **Câbles d'alimentation qui chauffent plus que de raison ;**
- **Pertes Joules supplémentaires ;**
- **Chutes de tension ;**
- **Obligation de payer des pénalités ;**
- **Surdimensionnement de l'installation.**
- **Baisse de la qualité générale de l'installation.**

1-4-1- Avantages de l'énergie réactive pour l'utilisateur

Les avantages techniques :

- Augmentation de la puissance disponible au secondaire sur le transformateur.
- Baisse des pertes par échauffement,
- Augmentation de la durée de vie des transformateurs, des équipements d'alimentation.
- Amélioration de la sécurité et du rendement de l'installation.

Les avantages économiques :

- Augmentation du rendement des installations,
- Réduction de la puissance souscrite,
- Baisse des pénalités potentiellement facturées.

II-1-5- Les principales sources d'énergie réactive

1-5-1- L'Alternateur :

L'alternateur fournit en même temps les puissances actives et réactive qui sont ajustées en agissant respectivement sur la puissance mécanique, de la turbine et le courant d'excitation du rotor. En effet la puissance réactive est commandée

1-5-2- câble souterrain :

La capacitance d'une ligne de transport formée de câbles dépasse de beaucoup l'importance de sa résistance et de son inductance. Une telle ligne agit surtout comme une inductance.

C'est cette caractéristique du câble (grande capacitance) qui rend son utilisation limitée surtout pour le transport de l'énergie sur les grandes distances.

1-5-3- Lignes aériennes THT ou HT de grandes longueurs :

Dans les lignes aériennes de transport d'énergie électrique à HT qui sont caractérisées par une longueur considérable, les capacités doivent être prises en considération du fait que leur valeur ne sont pas négligeables devant les réactances de ces lignes mais surtout en régime à vide ou sous-chargé. Ces lignes aériennes deviennent capacitives, par conséquent génératrices de puissance réactive.

II-1-6- Les appareils qui consomment de l'énergie réactive

C'est dans l'industrie que l'on trouve les plus grands consommateurs, de l'énergie réactive qui sont :

- **Machines pour la soudure ;**
- **Fours à chauffage diélectrique, à arc et à induction ;**
- **Moteurs asynchrones ;**
- **Lampes à fluorescence, à décharges et la ballast magnétique ;**
- **Transformateurs ;**
- **Redresseurs de puissance.**

II-2 Facteur de puissance

2-1- Comprendre le facteur de puissance

Le facteur de puissance (PF) est une mesure essentielle de l'efficacité d'un système électrique. Il représente le rapport entre la puissance réelle, exprimée en watts (P), et la puissance apparente, exprimée en voltampères (S). La puissance apparente est une combinaison de puissance réelle et de puissance réactive, mesurée en voltampère réactif (VAR ou Q).

Le facteur de puissance affecte l'efficacité globale du système, des facteurs de puissance plus faibles indiquant une consommation d'énergie moins efficace. Un facteur de puissance de un (unité) représente le fonctionnement le plus efficace, tandis que les charges inductives provoquent un facteur de puissance en retard et les charges capacitatives créent un facteur de puissance avancé. Les charges résistives maintiennent généralement un facteur de puissance unitaire.

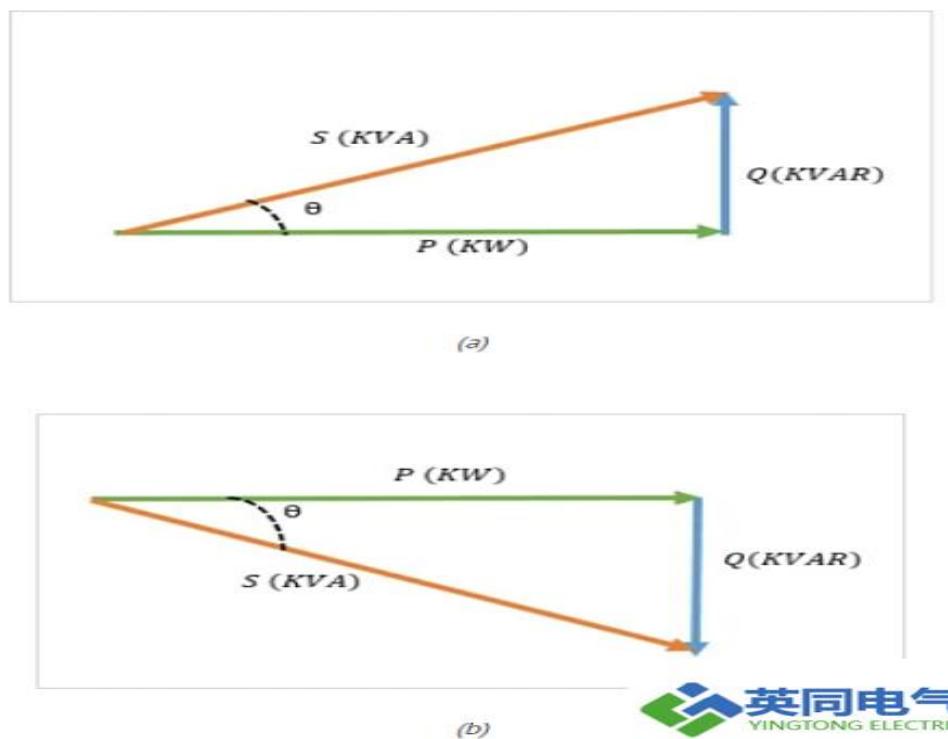


Figure II-3 : (a) facteur de puissance avancé. (b) -facteur de puissance en retard

2-2 Définition :

Le facteur de puissance est défini par le rapport suivant :

$$f = \frac{P}{S} = \frac{\text{Puissance active (kW)}}{\text{Puissance apparente (kVA)}}$$

En l'absence d'harmoniques, le facteur de puissance est directement lié au déphasage en U et I (les signaux sont parfaitement sinusoïdaux), le facteur de puissance est égal à $\cos\phi$.

Par contre, en présence d'harmoniques, le facteur de puissance prend en compte à la fois ce déphasage et la distorsion harmonique, ces deux valeurs peuvent être très différentes :

$$f = F_d \cos\phi$$

F_d : Facteur de distorsion

Facteur de puissance de distorsion

C'est la partie du facteur de puissance qui prend en compte l'effet des harmoniques sur la diminution de la puissance moyenne fournie.

Lien entre les deux facteurs

Les harmoniques augmentent le courant efficace de la charge ce qui diminue le facteur de puissance, ce qui signifie : présence harmonique introduit une inefficacité dans le système électrique.

Le facteur de puissance idéal est le facteur de puissance qui permet de minimiser les harmoniques dans le système électrique. Par des filtres harmoniques.

2-3- La valeur $\operatorname{tg}\phi$

L'énergie est mesurée à l'aide d'appareils de comptage estimant idéalement l'énergie active et réactive consommées ; pour cela en plus du facteur de puissance $\cos\phi$, il a été établi la $\operatorname{tg}\phi$ qui est le rapport entre l'énergie réactive (kVarh) et l'énergie active (kWh) consommées pendant la même durée.

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{Q}{P} = \frac{\text{Puissance réactive (kVAR)}}{\text{Puissance active (kW)}}$$

II-2-1 : Importance du facteur de puissance

Puisque seule la puissance active est transformable en puissance mécanique ou calorifique, le consommateur comme le producteur cherche, pour une installation donnée, à obtenir le maximum de puissance active.

Si le facteur de puissance $\cos\phi$ (diminue, l'intensité appelée augmente, les pertes par effet joule augmentent en raison du carré de cette intensité (RI^2), les chutes de tension sont importantes et le rendement de l'installation diminue ce qui conduit au surdimensionnement des transformateurs, câbles et également les appareils de commande.

Pour avoir une idée concrète de l'importance du facteur de puissance, je propose l'exemple suivant :

	Usine A	Usine B
Puissance active consommée	70 kW	70 kW
$\cos\phi$	0,7	0,9
$\operatorname{tg}\phi$	1,02	0,48
$Q = P \operatorname{tg}\phi$	71,4 kvar	33,9 kVAR
Q non facturé (0,6P)	42 kVAR	42 kVAR
Facturation de l'énergie réactive	29,4 kvar	0
Bonification (énergie réactive remboursée)	0	11,9 kVAR
Puissance apparente S consommée ($\frac{P}{\cos\phi}$)	100 kVA	78 kVA
Reserve de puissance	0	22 kVA
Intensité consommée $I = \frac{S}{U\sqrt{3}}$	151 A	118 A

Tableau II-1 : comparaison de deux Usines consommant la même puissance active

D'après le tableau ci-dessus, on a considéré deux installations A et B alimentées chacune par un transformateur de 100 kVA sous 380 V. Ces deux installations

consomment 70 kW chacune mais, l'une sous $\cos\phi = 0,7$ et l'autre sous $\cos\phi = 0,9$. On constate :

- ✿ L'installation à $\cos\phi=0,7$ payera des pénalités au fournisseur d'énergie électrique.
- ✿ L'installation à $\cos\phi=0,7$ est saturée alors que l'installation à $\cos\phi=0,9$ dispose de 22 k VA en réserve.
- ✿ Dans l'installation à $\cos\phi = 0,7$ transite inutilement 33 A de plus que dans celle où $\cos\phi = 0,9$. Les pertes en ligne (kWh) proportionnelles au carré du courant sont supérieures à 66% donc augmentent d'autant la facture ;
- ✿ La tension au bout de ligne est améliorée à $\cos\phi=0,9$; les chutes de tension étant proportionnelles au courant ;
- ✿ L'utilisateur de l'installation de $\cos\phi=0,9$ peut se contenter d'un abonnement de 80 k VA.

Importance du facteur de puissance

- **Efficacité énergétique** : Un facteur de puissance élevé signifie que la majorité de la puissance qui est fournie au système est utilisée pour produire un travail utile. En revanche, un facteur de puissance bas implique une utilisation inefficace de l'énergie, entraînant des pertes plus élevées.
- **Réduction des coûts** : Améliorer le facteur de puissance permet de réduire les coûts liés à la consommation d'énergie. En effet, des équipements comme les transformateurs et les générateurs sont utilisés plus efficacement, et les pertes d'énergie dans les lignes de transmission sont minimisées.
- **Abréviation des équipements** : Un mauvais facteur de puissance peut provoquer une surcharge des équipements de transmission et de distribution, ce qui diminue leur durée de vie et augmente les coûts de maintenance et de remplacement.
- **Stabilité du réseau** : Un bon facteur de puissance aide à maintenir la stabilité et la qualité de l'alimentation électrique, réduisant ainsi les fluctuations de tension et améliorant la fiabilité globale du réseau électrique.

2-1-1 Inconvénients d'un faible facteur de puissance :

La circulation de l'énergie réactive a une influence importante sur le choix des matériaux et le fonctionnement des réseaux. Elle a, par conséquent, des incidences économiques. En effet, pour une même puissance active P utilisée, la figure II-4 montre qu'il faut fournir d'autant plus de puissance apparente ($S_2 > S_1$) quand le $\cos\phi$ est faible, c'est-à-dire, quand l'angle est élevé.

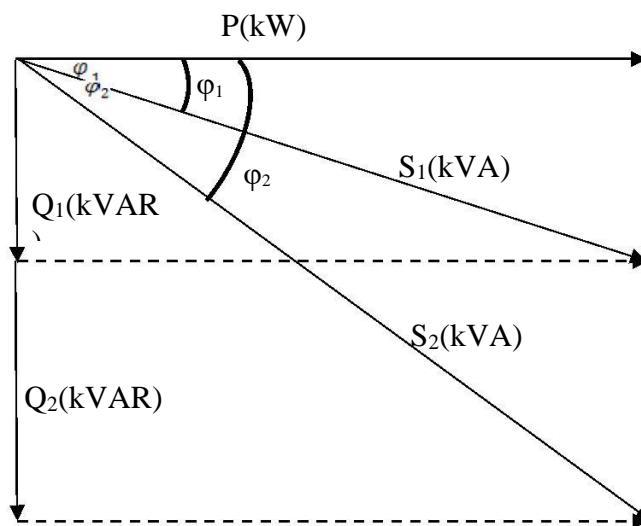


Figure II-4 : Influence du $\cos\phi$ sur la valeur de la puissance apparente

De façon identique pour un même courant actif utilisé I_a (pour une tension U constante) il faut fournir d'autant plus de courant ($I_2 > I_1$) que le $\cos\phi$ est faible (l'angle ϕ est élevé)

Ainsi, en raison de l'augmentation du courant, la circulation d'énergie réactive provoque :

- Des surcharges et des échauffements supplémentaires dans les transformateurs et les câbles qui ont pour conséquence des pertes d'énergie active.
- Des chutes de tension.

Les conséquences de la circulation d'énergie réactive conduisent donc à surdimensionner les équipements électriques du réseau.

2-1-2- Causes du mauvais facteur de puissance :

Dans une installation bien dimensionnée, un bon facteur de puissance est obtenu lorsque chaque machine consomme une puissance active proche de sa valeur nominale. Mais il reste toujours que cette installation consomme une certaine puissance réactive due au courant magnétisant des transformateurs et des moteurs asynchrones. Cette puissance est indépendante de la puissance active consommée par les éléments de l'installation.

Maintenant, le mauvais facteur de puissance est obtenu lorsque la puissance active absorbée diminue, c'est-à-dire que les éléments de l'installation consomment des puissances actives loin de leurs valeurs nominales. Donc $\cos\phi$ diminue, ce qui risque de pénaliser le consommateur.

En pratique, un mauvais facteur de puissance est souvent le résultat d'une mauvaise utilisation du matériel, c'est le cas des exemples suivants :

- ▶ Un fonctionnement à faible charge ou à vide d'un transformateur.
- ▶ Un fonctionnement à niveau de tension d'alimentation élevée ou à des marches à vide ou à faible charges pour les moteurs asynchrones
- ▶ Une mauvaise conception de l'éclairage fluorescent

II-3- CORRECTION DU FACTEUR DE PUISSANCE

II-3-1- But de la correction du facteur de puissance

L'importance de corriger le facteur de puissance réside dans la nécessité d'optimiser la consommation d'énergie, de réduire les pertes en énergie réactive, et d'améliorer ainsi l'efficacité énergétique globale. Dans le contexte actuel de changement climatique et de coûts énergétiques croissants, la correction efficace du facteur de puissance est devenue un enjeu majeur pour les entreprises et les particuliers.

L'une des principales préoccupations est que de nombreux composants électroniques de puissance utilisés dans les installations consomment de la puissance réactive, ce qui entraîne un faible facteur de puissance et une instabilité du système. En conséquence, les méthodes de correction du facteur de puissance ont suscité un regain d'intérêt. Ce chapitre décrit les méthodes les plus couramment utilisées pour la compensation de puissance réactive.

II-3-2- Méthodes corrective du facteur de puissance

Le facteur de puissance est un élément clé dans le domaine de l'énergie électrique, indiquant l'efficacité avec laquelle l'énergie électrique est convertie en travail utile. Voici trois méthodes de correction de facteur de puissance électrique couramment utilisées :

Correction du facteur de puissance par :

- Compensation capacitive :
- Compensateur synchrones :
- Compensateur statique :

II-3-3 Compensation capacitive

Une batterie de condensateur est un groupe de condensateurs unitaires connectés électriquement les uns aux autres (mise 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, fusible,...etc), cet ensemble de gradins est appelé : Batterie. Les batteries de condensateurs peuvent être montées en étoile ou en triangle

Citons un exemple d'un gradin de condensateurs couplés en étoile sur une ligne triphasée

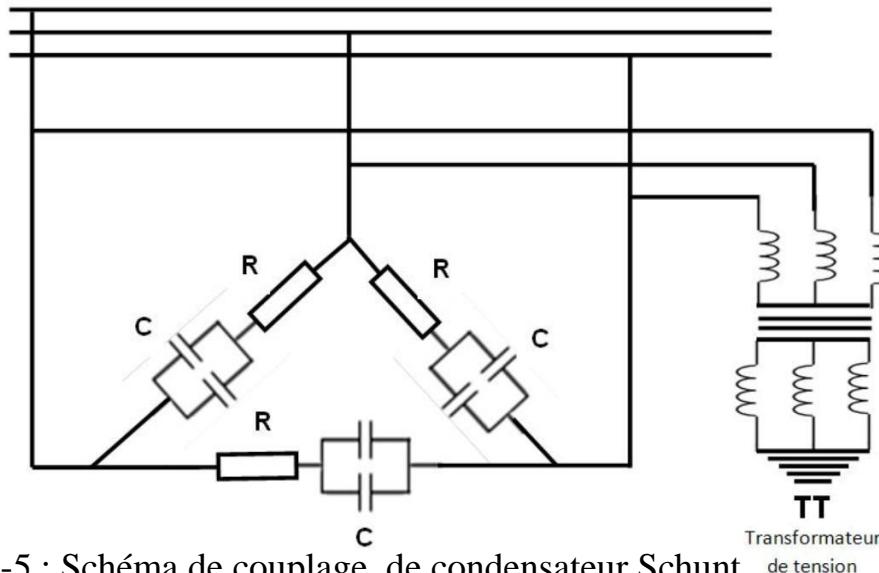


Figure II-5 : Schéma de couplage de condensateur Schunt

3-3-1-Avantages et inconvénients des batteries de condensateurs :

a- AVANTAGE

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

- Absence d'usures mécaniques ;
- Entretien réduit ;
- Pertes faibles ; elles occupent un faible volume ;
- Installation facile.

b- INCONVENIENTS

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

- Les condensateurs sont très sensibles aux surtensions et aux surcharges, ce qui peut résulter d'un vieillissement prématûre et parfois de claquage.
- Les condensateurs n'ont pas la rapidité de réponse nécessaire pour répondre aux phénomènes transitoires.

II-3-4- Compensateur synchrones

Le compensateur synchrone Cs est un moteur synchrone fonctionnant à vide c'est-à-dire il n'entraîne aucune charge, donc il n'absorbe aucune puissance active aux pertes près et dont l'excitation est réglable. Le Cs génère de la puissance réactive lors du régime de surexcitation (il se comporte comme une capacité) et absorbe de l'énergie réactive quand il est sous-excité (il se comporte comme une bobine). Donc, le Cs fonctionne dans l'un ou l'autre des régimes en fonction du régime de charge et de la ligne.

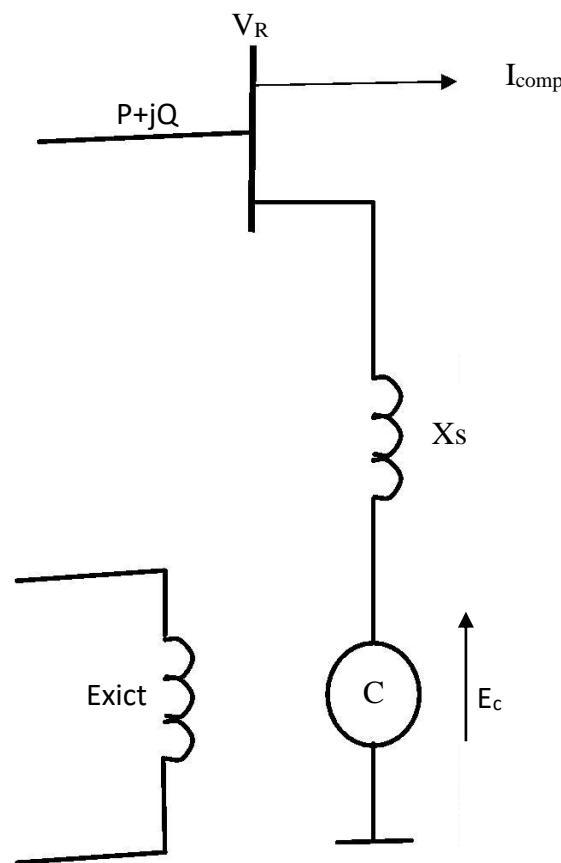


Figure II-6 : Schéma simplifié d'un compensateur synchrone

Au régime de charge de la ligne, il est surexcité et au régime de sous-charge, il est excité par la puissance. Le Cs consomme une faible puissance active. E_c sera en phase avec la tension en jeu de barres V_R

$$I_{comp} = \frac{|U_R| - |E_c|}{\sqrt{3}jX_s} \quad \text{et} \quad Q_S = |U_R| \frac{|E_c| - |U_R|}{X_s}$$

En régime surexcité : $E_c > U_r$ $Q_c (+)$ capacitive.

En régime sou-excité : $E_c < U_r$ $Q_c (-)$ inductive.

3-4-1 Avantages et inconvénients des compensateurs synchrones :

a- Avantage

Les compensateurs synchrones présentent les avantages suivants :

- ils permettent une régulation locale de la tension près du besoin, donnent une certaine inertie et permettent d'augmenter le transit de puissance.
- ils procurent une plage de variation de puissance réactive, ce qui réduit le nombre de manœuvre d'élément shunt (condensateur, ou inductance)
- on peut les alimenter directement à des tensions élevées.
- l'emplacement de ces équipements permet des gains tant au niveau de la stabilité transitoire qu'au niveau de la stabilité de tension tout en offrant une flexibilité d'exploitation.
- ce type de compensateur est beaucoup performant sur les longues distances (cas de transport d'énergie HT ou THT)
- ces compensateurs ont pour apanage de réguler la fourniture par l'alternateur de puissance réactive ou d'estimer la tension en certains points du réseau.

b- Inconvénients

Les compensateurs synchrones présentent les inconvénients suivants:

- le coût onéreux de ces compensateurs ainsi que leur entretien
- il a besoin d'un générateur à courant continu pour assurer son excitation ; cet organe supplémentaire augmente le prix du moteur.
- on ne peut démarrer qu'à très faible charge en exigeant soit un moteur auxiliaire de lancement, soit le démarrage en asynchrone avec un réducteur de tension de démarrage.
- le compensateur synchrone contribue également à l'alimentation de la puissance de court- circuit au point de branchement.
- le temps de réponse aux événements sévère, (par exemple : pertes d'un groupe- court-circuit triphasés) est relativement lent.

II-3-5- Compensateur statique

3-5-1 SVC (Static Var Compensator)

Afin d'assurer un bon fonctionnement des réseaux électriques et des récepteurs, et pour une bonne qualité de service, au cours de ces dernières années, des compensateurs statiques d'énergie réactives ont été conçus ; les éléments les plus usuels sont :

- ▶ R.C.T : Réactance Commandée par Thyristor / Thyristor Controlled Reactor (TCR)
- ▶ C.C.T: Condensateur Commandé par Thyristor / Thyristor Swiched Capacitor. (TSC)
- ▶ C.C.M : Compensateur Commuté Mécaniquement / Mechanically Swiched Capacitor (M.S.C)

Différentes configurations de compensateurs statiques :

Dans les systèmes électriques, la compensation se fait aisément à l'aide des configurations illustrées par la figure II-7

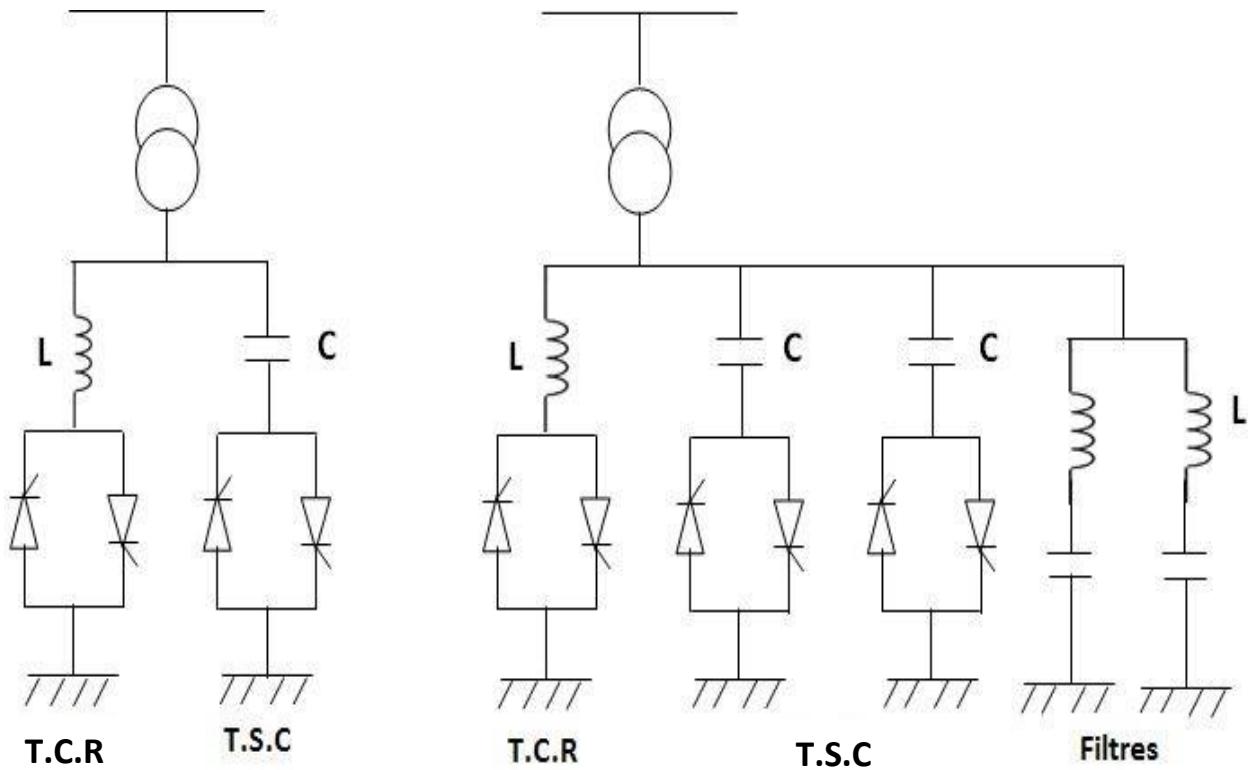


Figure II-7 : Configuration des S.V.C utilisées pour la commande de la puissance réactive

5-1-1 Avantages et inconvénients de la compensation par SVC :

a- Avantages

Ce compensateur présente les avantages suivants :

Parmi les bénéfices de la compensation statique, on peut citer :

- amélioration des niveaux de tension dans le réseau
- augmentation de la capacité de transit de puissance active du réseau
- augmentation de la marge de stabilité transitoire
- augmentation de l'amortissement des oscillations électromécaniques
- réduction des surtensions temporelles

b- Inconvénients

Ce compensateur présente les inconvénients suivants :

- les systèmes qui fonctionnent à leurs limites d'exploitation sont fortement dépendants de la compensation par SVC, donc peuvent souffrir facilement d'un effondrement de

la tension.

- la puissance réactive générée est en fonction du carré de la tension, alors le SVC ne peut maintenir le niveau de tension requis par le réseau.
- les interactions entre le SVC et les autres éléments de types FACTS ou d'autres éléments d'électronique de puissance utilisés dans les réseaux peuvent être gênantes. Donc il est nécessaire de faire une coordination entre les dispositifs connectés en différents lieux en s'assurant que leur action est positive et fiable dans les réseaux.
- le SVC ne peut contrôler qu'un seul paramètre important qui est la tension, pour le contrôle de l'angle et de l'impédance, d'autres dispositifs seront indispensables.
- enfin le SVC est très cher et demande beaucoup de place au sol pour son installation

3-5-2- STATCOM

Compensateur STATCOM : Static Synchronous Compensator.

C'est en 1990 que le premier STATCOM a été conçu, c'est un convertisseur de tension à base de GTO (Gate Turn Off) ou de IGBT (Transistor bipolaire à grille isolée) alimenté par des batteries de condensateur, l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage. Ce dispositif est l'analogue d'un compensateur synchrone ; car il n'a pas d'inertie mécanique présente alors des meilleures caractéristiques telles que sa dynamique rapide, son faible coût d'installation et de sa maintenance devant les compensateurs synchrones.

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension au jeu de barres (nœud de connexion) est très faible, d'après sa caractéristique on constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud.

Le fonctionnement peut être décrit de façon suivante :

Si $VS < E$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $+2\pi$ par rapport à la tension E ce qui donne un courant capacitif (Figure II-8).

Si $VS > E$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de -2π par rapport

à la tension E ce qui donne un courant inductif (Figure II-9).

Si $VS = E$, le courant circulant dans l'inductance est nul, et par conséquent il n'y a pas d'échange d'énergie.

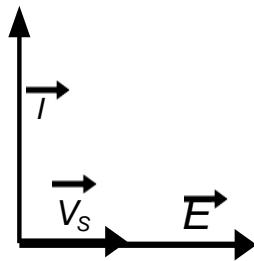


Figure II-8 : Courant capacitif

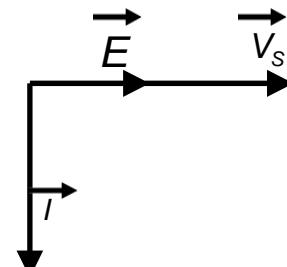


Figure II-9 : Courant inductif

5-2-1-STATCOM : Avantages et Inconvénients

a- Les avantages :

L'avantage primordial du système STATCOM est sa réponse rapide et son niveau de sortie consistant qui présentent le plus grand intérêt pour limiter les conséquences des perturbations du réseau électrique ;

- la réduction de l'espace nécessaire pour l'installation à cause de l'absence de réactance et des batteries de condensateurs ;
- l'utilisation d'onduleurs à plusieurs niveaux permet de ne pas utiliser de filtres d'harmonique sur la partie alternative ;
- des performances dynamiques améliorées ;
- le STATCOM peut continuer, pendant un court temps, de produire une certaine énergie électrique comme un compensateur synchrone qui stocke l'énergie dans sa masse de rotation.

b- Les inconvénients :

- la nécessité d'utiliser des dispositifs de type GTO. Actuellement ces dispositifs sont plus chers et ils ont, comparativement aux thyristors classiques, des pertes plus grandes, des tensions et des courants plus faibles. sa commande est relativement complexe, et demande un personnel très qualifié

II-3-6- Compensation par condensateur

3-6-1- Définition

Les condensateurs génèrent de l'énergie réactive avec un très bon rendement. Les critères fondamentaux des choix des condensateurs sont la tension et la température. Les condensateurs sont classés en catégories de températures. La valeur minimum est la température de l'air ambiante à laquelle le condensateur peut-être mis sous tension. La valeur maximum est celle à laquelle il peut être utilisé.

Les caractéristiques nominales devant figurer sur la plaque signalétique :

- ✿ La puissance nominale Qn en (kVAR)
- ✿ La tension nominale Un en (Volt ou kV).
- ✿ La fréquence f en (Hz).
- ✿ La catégorie de la température.

Les surtensions et l'échauffement abrègent la vie des condensateurs.

3-6-2- 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.

3-6-3- Choix du branchement des condensateurs :

Pour le branchement des batteries de condensateurs, on a le choix entre les montages triangle et étoile pour un même courant de ligne I.

a) Montage triangle :

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

La puissance réactive fournie par les batteries de condensateur est :

$$Q_{c\Delta} = 3C_{\Delta}\omega U^2$$

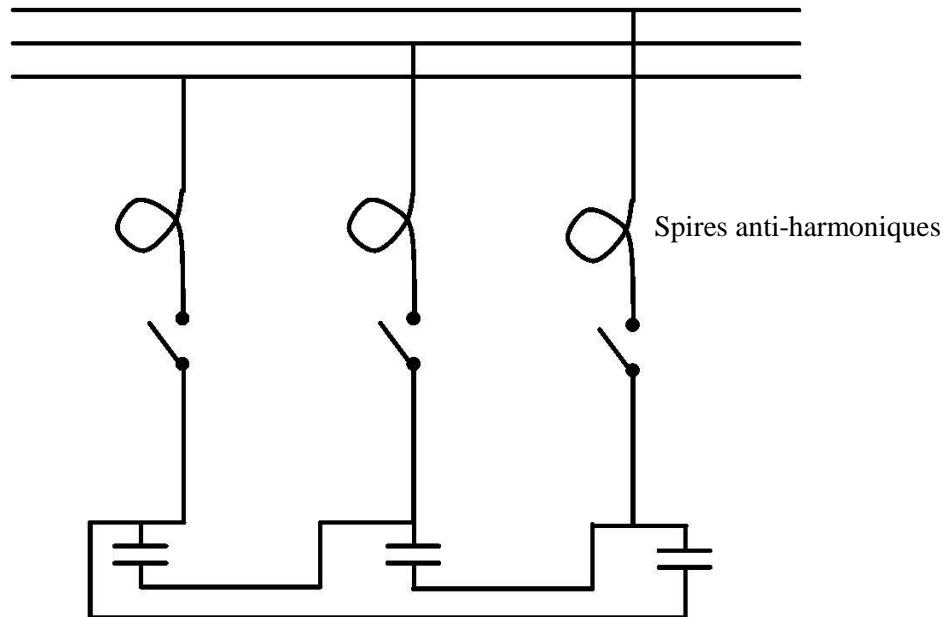


Figure II-10 : Schéma de raccordement des batteries en triangle

b) Montage en étoile :

Dans le couplage en étoile, les tensions composées sont $\sqrt{3}$ fois plus grandes que les tensions simples ($U = \sqrt{3}V$).

La puissance réactive fournie est :

$$Q_{c\lambda} = 3 \cdot C_{\lambda} \omega \left(\frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 = C_{\lambda} \omega U^2$$

$$\begin{aligned} \text{Puisque } Q_{c\lambda} = Q_{c\Delta} \Rightarrow 3C_{\Delta}\omega U^2 &= C_{\lambda} \omega U^2 \\ \Rightarrow C_{\lambda} &= 3 \cdot C_{\Delta} \end{aligned}$$

Remarque :

Pour une même puissance réactive en étoile, nous devons utiliser une capacité 3 fois plus grande qu'en triangle. Il est donc plus économique de brancher une batterie de condensateurs en triangle qu'en étoile

II-3-7- Schémas de branchement des batteries de condensateurs :

3-7-1- Batteries montées en triangle :

Pour ce type de batteries, une protection contre les surtensions est nécessaire. Soit par fusible HPC, soit par relais à maximum de courant en TI sur chaque phase.

Important :

On choisira des fusibles HPC avec un calibre au minimum de 1,7 fois le courant nominal de la batterie. Le choix du calibre sera fait selon le cahier technique.

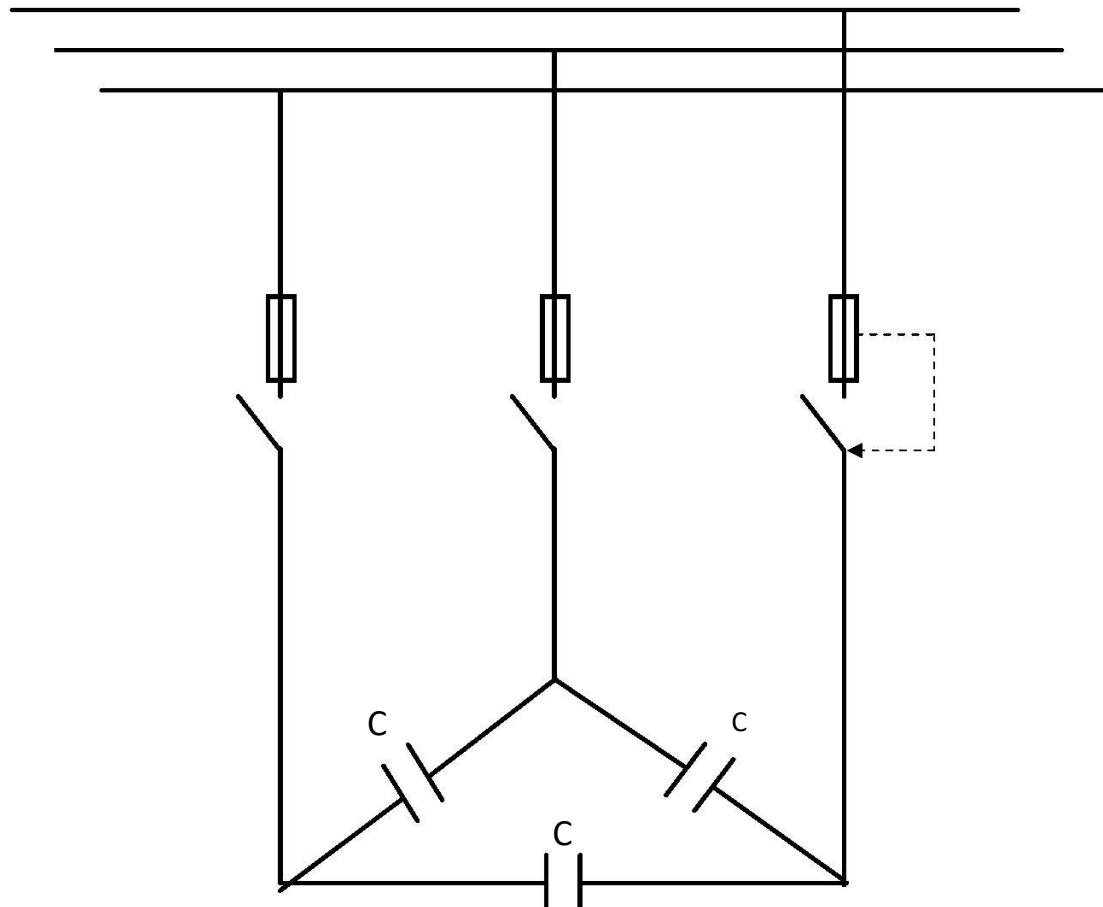


Figure II-11 : Schéma d'une batterie triangle

3-7-2-Batterie en double étoile :

La batterie est divisée en deux étoiles, permettant de détecter un déséquilibre entre les deux neutres par un relais approprié. On peut le concevoir pour tout type de réseau jusqu'aux réseaux THT.

On utilisera le schéma suivant pour grandes puissances à installer essentiellement en batteries fixes.

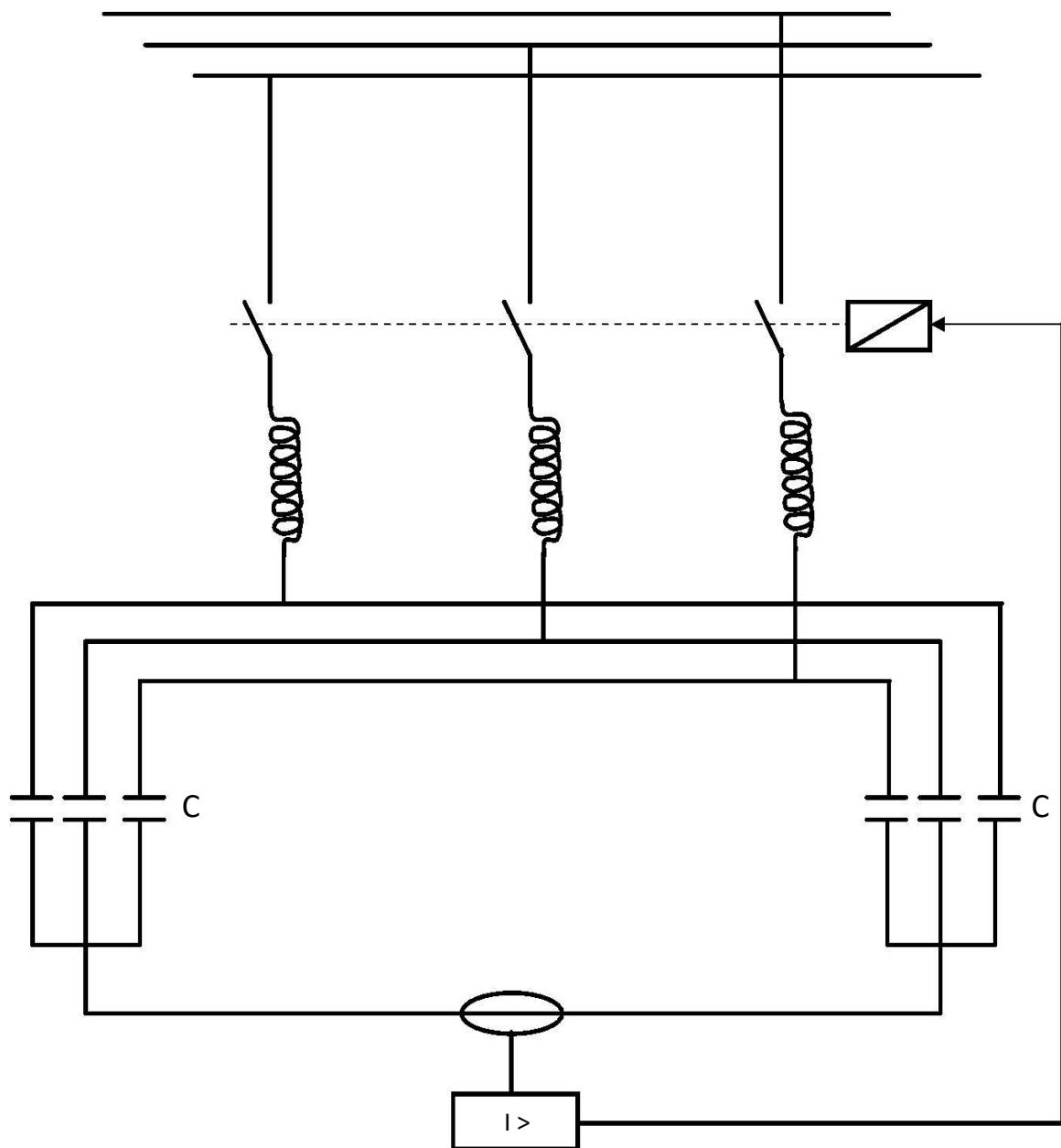


Figure II-12 : Schéma d'une batterie en double étoile

II-3-8- Les différents types de compensation :

La compensation peut être réalisée avec deux familles de produits :

- Les condensateurs de valeurs fixes ou batteries fixes ;
- Les batteries de condensateurs en gradins avec régulateur (ou batterie automatique)

Qui permettent d'ajuster la compensation aux variations de consommation de l'installation.

3-8-1-Batteries fixes :

La batterie de condensateurs a une puissance constante. Ces batteries sont utilisées de préférence :

- Aux bornes des récepteurs ;
- Sur les jeux de barres dont la fluctuation de charge est faible

3-8-2-Batterie de condensateurs en gradins avec régulation automatique :

Ce type d'équipement permet d'ajuster la puissance réactive fournie aux variations de consommation, et ainsi de maintenir le $\cos\phi$ à la valeur désirée.

Il s'utilise dans les cas où la puissance réactive consommée est forte vis-à-vis de la puissance du transformateur et varie dans les proportions importantes, c'est-à-dire essentiellement :

- aux bornes des tableaux généraux BT ;
- sur les départs de puissance importante.

3-8-3- Principe et intérêt de la compensation automatique :

Les batteries de condensateurs sont divisées en gradins (voir Figure II-13). La valeur de $\cos\phi$ est détectée par un relais varmétrique qui commande automatiquement l'enclenchement et le déclenchement des gradins en fonction de la charge et du $\cos\phi$ désiré. Le transformateur de courant doit être placé en amont des récepteurs et des batteries de condensateurs.

La surcompensation est néfaste car elle augmente anormalement la tension de service.

La compensation automatique permet donc d'éviter les surtensions permanentes résultant d'une surcompensation lorsque le réseau est peu chargé.

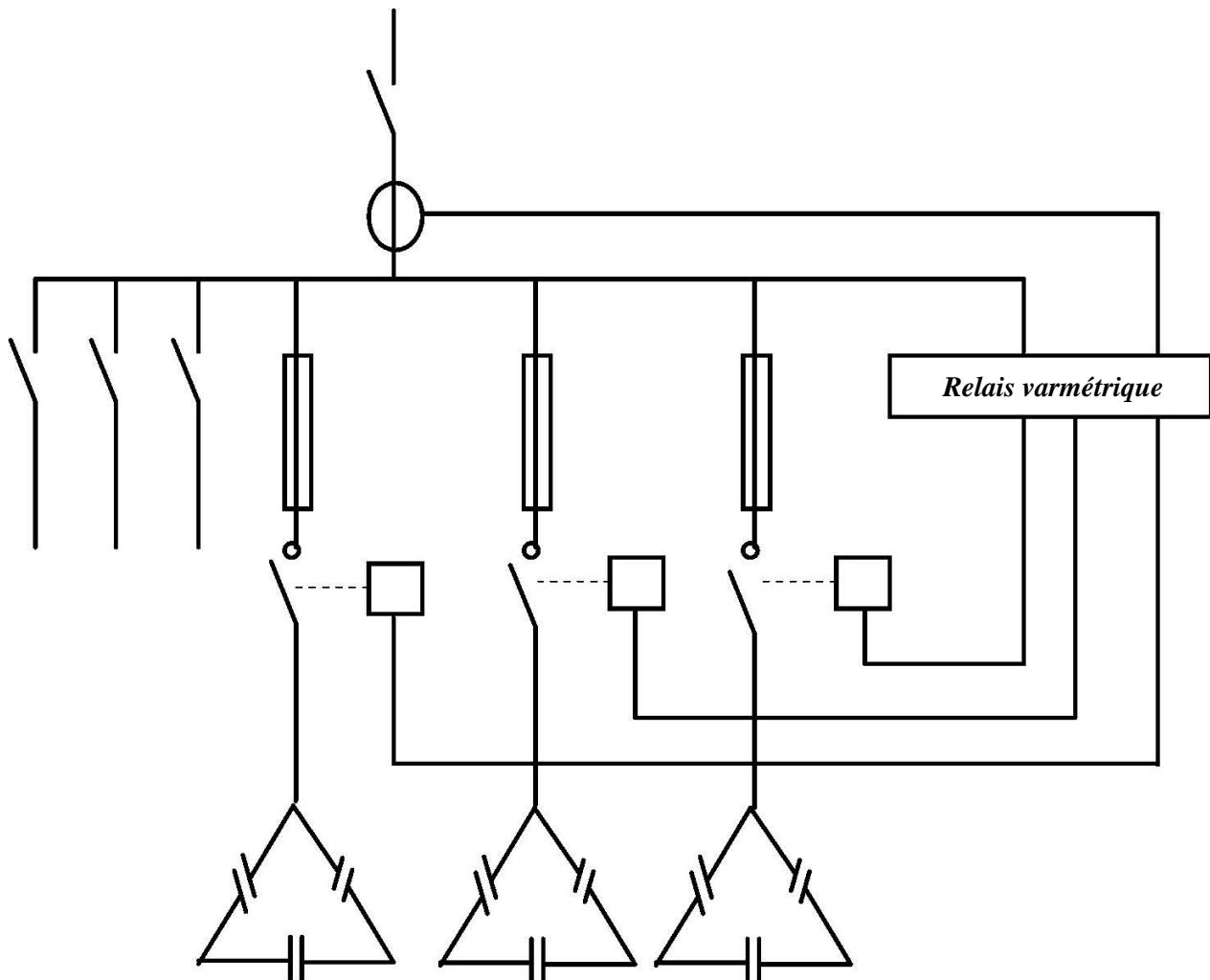


Figure II-13 : Principe de la compensation automatique d'une installation

On maintient ainsi une tension de service régulière tout en évitant de payer de l'énergie réactive au distributeur en période de forte consommation.

Règle usuelle en basse tension :

Si la puissance des condensateurs (kVAR) est inférieure à 15% de la puissance du transformateur, on choisit une batterie en gradins avec régulation automatique.

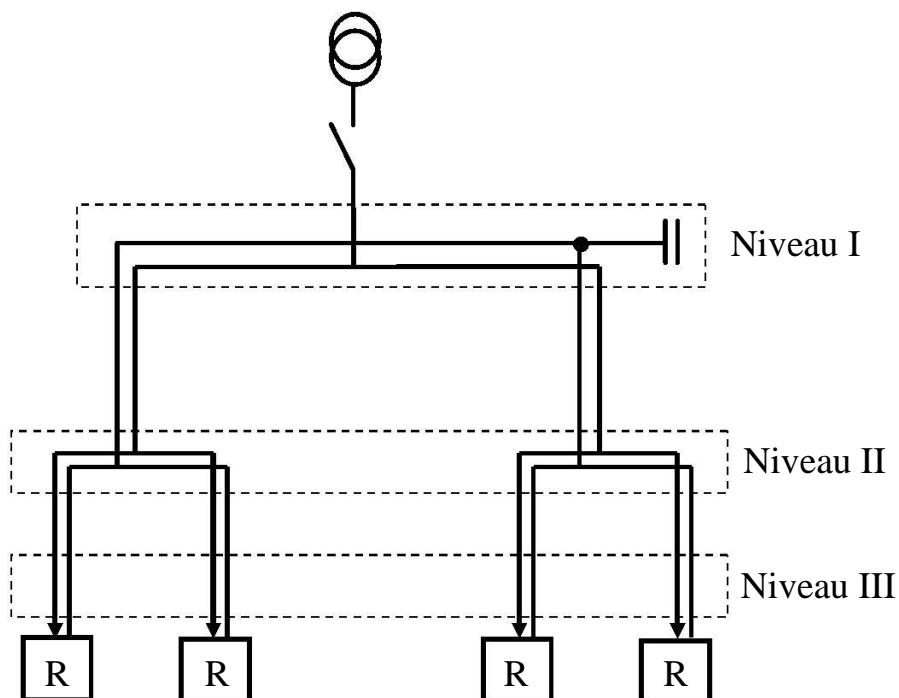
II-3-9- Les différents modes de compensation

(Emplacement des condensateurs)

La compensation peut être globale, par secteur ou individuelle. En principe, la compensation idéale est celle qui permet de produire l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande. Ce mode de compensation est très coûteux, on cherchera donc dans la pratique, un optimum technico-économique.

3-9-1-Compensation globale :**a- Principe :**

La batterie est raccordée en tête d'installation (voir figure II-14), et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation. Elle reste en service de façon permanente pendant la période de facturation de l'énergie réactive pour un fonctionnement normal de site



→ Circulation de l'énergie réactive.

Figure II-14 : Compensation globale

b-Intérêt :

Le foisonnement naturel des charges permet un dimensionnement faible de la batterie. Elle est en service en permanence, elle est donc amortie encore plus rapidement.

Ce type de compensation peut, suivant le cas :

- Supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive.
- Diminuer la puissance apparente en l'ajustant au besoin en puissance active de l'installation.
- Augmenter la puissance active disponible du transformateur de livraison.

Remarque :

- Le courant réactif circule dans l'installation du niveau 1 jusqu'aux récepteurs.
- Les pertes par effet Joule (kWh) et les chutes de tension dans les canalisations situées en aval de la batterie ne sont pas diminuées.

Utilisation :

Lorsque la charge est régulière, une compensation globale convient.

3-9-2-Compensation par secteur :**a-Principe :**

La batterie est raccordée au tableau de distribution (Voir figure II-15) et fournit l'énergie demandée au secteur de l'installation.

Une grande partie de l'installation est soulagée, en particulier les canalisations alimentant chaque secteur.

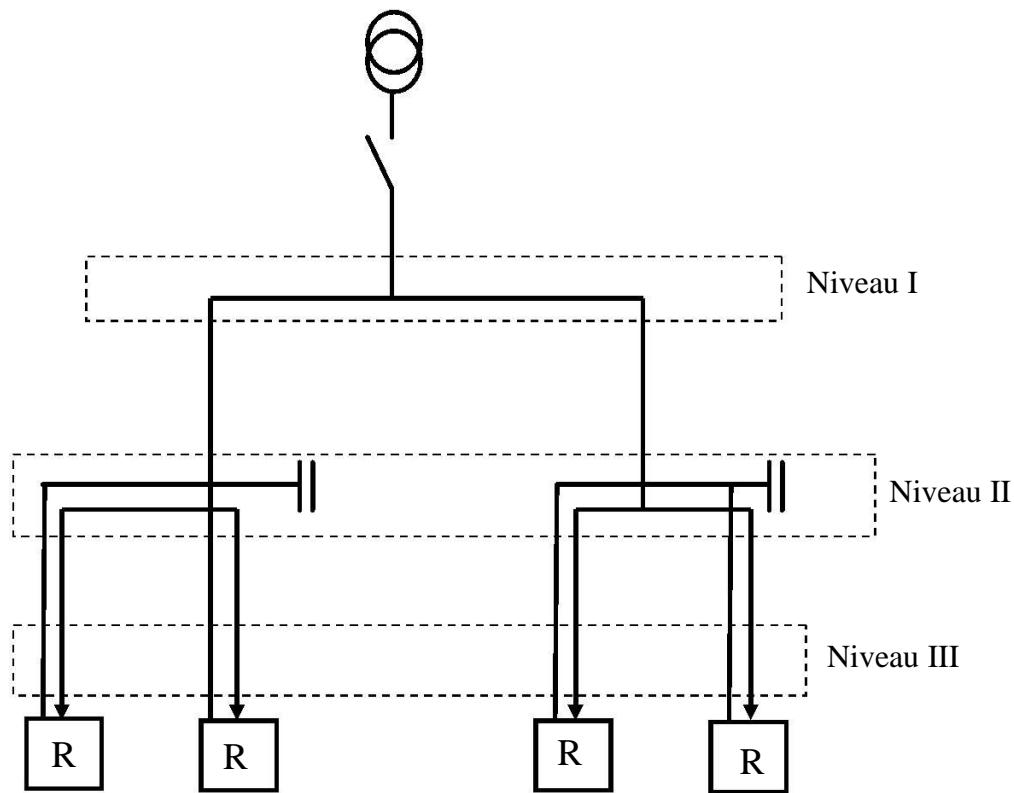


Figure II-15 : Compensation par secteur

b-Intérêts :

Ce type de compensation permet de :

- Supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive.
- Optimiser une partie du réseau, le courant réactif n'étant pas véhiculé entre le niveau 1 et 2.
- Augmenter la puissance active disponible du transformateur et la puissance active qui peut être véhiculée dans les canalisations situées en amont du secteur compensé.

Remarque :

- Le courant réactif circule dans l'installation du niveau 2 jusqu'aux récepteurs.
- Les pertes par effet Joule (kWh) et les chutes de tension dans les canalisations reliant le niveau 2 au niveau 1 sont diminuées.
- Il y a un risque de surcompensation en cas de variations importantes de la charge (ce risque peut être éliminé par l'installation de batteries en gradins).

Utilisation :

Une compensation par secteur est conseillée lorsque l'installation est étendue et comporte des secteurs à forte consommation d'énergie réactive.

3-9-3- Compensation individuelle :

a- Principe :

La batterie est raccordée directement aux bornes du récepteur (Voir figure II-16) La compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance du récepteur est importante par rapport à la puissance du transformateur

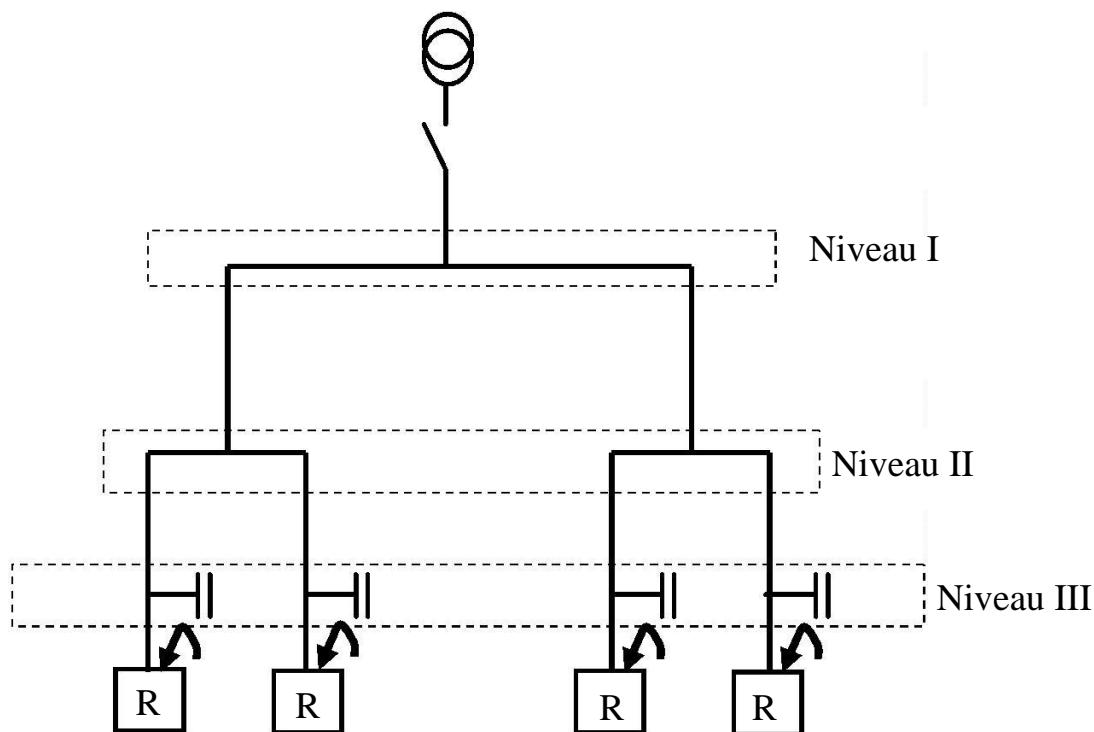


Figure II-16 : Compensation individuelle

Lorsqu'elle est possible, cette compensation produit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée aux besoins. Un complément en tête de l'installation peut être nécessaire.

b- Intérêt :

Ce type de compensation permet de :

- 9Supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive

- Augmenter la puissance active disponible du transformateur et la puissance active qui peut être véhiculée dans les canalisations situées en amont du récepteur.
- Réduit les pertes par effet Joule (kWh) et les chutes de tension dans les canalisations entre le niveau 3 et le niveau 1.

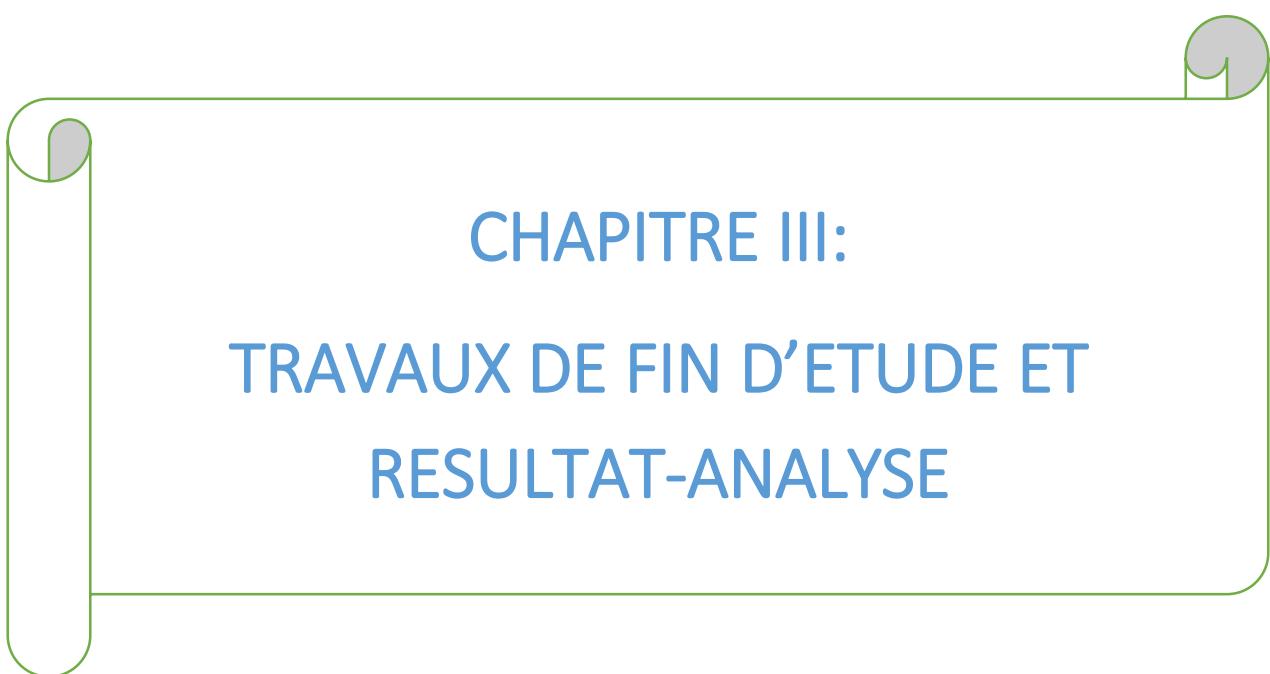
Remarque :

Le courant réactif n'est plus véhiculé dans les canalisations de l'installation.

Utilisation :

Une compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance de certains récepteurs est importante par rapport à la puissance du transformateur.

C'est le type de compensation qui offre le plus d'avantage mais qui est le plus coûteux.



CHAPITRE III: TRAVAUX DE FIN D'ETUDE ET RESULTAT-ANALYSE

III-1 Aperçu du réseau électrique de l'imprimerie TUNDE SA

Le circuit électrique de l'Imprimerie TUNDE, utilise la basse tension (BT) qui prend sa source depuis le réseau électrique de la Société Béninoise d'Energie Electrique (SBEE). Ce circuit est relayé par un groupe électrogène dont le transfert de source d'alimentation s'effectue de façon automatique par un inverseur de source, afin d'assurer l'énergie électrique à toute l'usine en cas de coupure de l'électricité du réseau électrique de la SBEE. En effet, le point de départ du réseau électrique, est l'arrivée de la tension sur un premier transformateur qui a pour rôle de compenser les pertes en lignes (pertes par effet joule) compte tenu du transport de l'énergie. La sortie de ce dernier est couplée à un second transformateur qui a pour rôle d'abaisser la tension à la sortie afin d'alimenter les différents équipements de l'entreprise. Le secondaire de ce transformateur est monté sur un disjoncteur compact principal qui est une propriété de la SBEE.



Figure III-1 : Les transformateurs de l'usine

Après ce disjoncteur vient alors celui de l'usine, à partir duquel sont interconnectés les différents ateliers à travers une armoire de répartition TGBT (Tableau Général Basse Tension).

Les conséquences de l'énergie réactive sont nombreuses, notamment l'augmentation de la puissance, des pertes Joule et des chutes de tension dans les circuits. L'ensemble de ces phénomènes entraîne une dégradation de la qualité de

l'installation électrique ainsi que des pénalités sur la facturation, d'où la nécessité de la compensation d'énergie réactive. Un coffret de condensateur est ainsi connecté au réseau de l'imprimerie pour l'amélioration du facteur de puissance. Il s'agit d'une compensation automatique. La batterie de condensateurs est fractionnée en gradins, avec possibilité de mettre en service plus ou moins de gradins, en général de façon automatique. Il est installé en tête de la distribution Basse Tension (BT). La compensation est alors globale et assure la compensation pour l'ensemble des charges. Elle convient lorsqu'on cherche essentiellement à supprimer les pénalités et à soulager le poste de transformation. Elle permet une régulation pas-à-pas de l'énergie réactive. L'enclenchement et le déclenchement des gradins sont piloté par un relais varmétrique, tout utilisé pour corriger le facteur de puissance du réseau. Ce type de compensation supprime les facturations complémentaires pour consommation excessive d'énergie réactive. Elle diminue la puissance apparente ou l'appelée, en l'ajustant au besoin réel en kW de l'installation, soulage le poste de transformation (puissance disponible en kW) ; mais laisse présent le courant réactif dans l'installation, ce qui ne diminue pas les pertes par effet Joule (kWh) dans les câbles. De plus, en cas de fréquence croissante, l'impédance d'un condensateur connaît clairement une courbe sous forme de V (soit d'abord une baisse, puis une hausse). Le condensateur aspirera de ce fait les courants harmoniques, injectés par des charges non-linéaires proches. Le courant passant par le condensateur augmente ainsi de manière indésirable, éventuellement au-delà de la valeur nominale, ce qui entraîne des court-circuit et dommages. Aussi, la batterie de condensateurs forme, avec l'impédance du réseau, un circuit résonant en série (courants accrus en cas de commutation en série ; distorsion de la tension du réseau en cas de commutation parallèle). Ainsi, pour éviter ces perturbations survenues dans le réseau, il est impératif d'ajouter un filtre harmonique au dispositif de compensation installé sur le réseau afin de dissiper les courants harmoniques.

Le coffret déjà installé au réseau de l'imprimerie se présente donc comme suit :



Figure III-2 : Coffret C2 de compensation de type standard

Il s'agit des batteries Rectimat 2, type standard qui sont des équipements de compensation automatique et qui se présentent sous la forme de coffret selon la puissance. Les batteries Rectimat 2, type standard conviennent pour les réseaux peu pollués ($Gh/Sn < 15\%$) contrairement à une usine d'imprimerie. Ces caractéristiques se présentent comme suit :

- tension assignée : 400 V, triphasée 50Hz ; 75kva
- équipée d'un régulateur varmétrique, de contacteurs spécifiques pour la commande des condensateurs ;
- fréquence : 50 ou 60Hz ;
- tolérance sur valeur de capacité : -5 %, +10% ;
- courant maximal admissible : $1,3 \times In$, avec $In = \frac{Qc}{U\sqrt{3}}$
- température maximale : 40 °C
- transformateur 400/230 V intégré :
- raccordement des câbles de puissance par le bas sur plages.

Sa décomposition est la suivante :

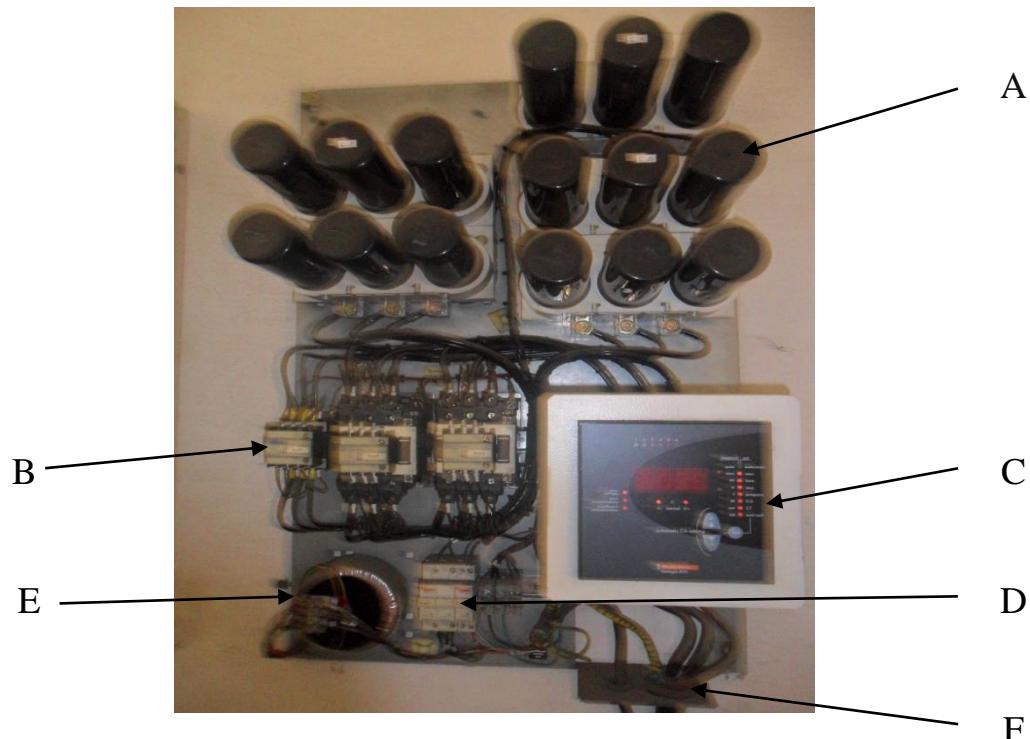


Figure III-3 Décomposition du coffret de compensation

A : Condensateurs ;

B : Contacteurs commande gradins ;

C : Circuit De Commande ;

D: fusibles de protection du circuit de commande ;

E : transformateur de tension ;

F : plages de raccordement des câbles de puissances ;

Le réseau électrique de l'imprimerie se présente donc comme suit :

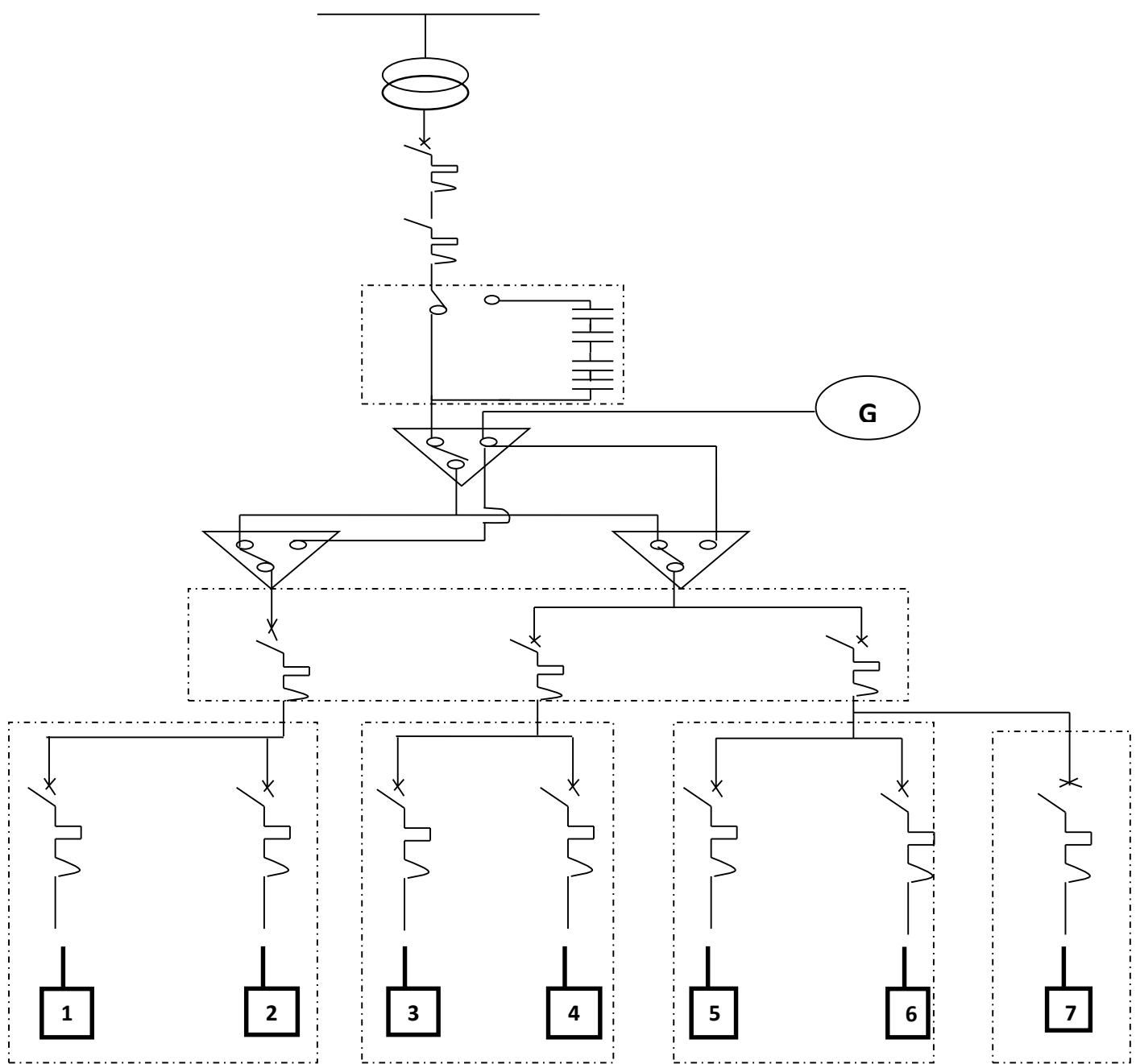


Figure III-4 Schéma du réseau électrique de l'imprimerie TUNDE SA

LEGENDE

Numéro	Ateliers	Noms des charges
01	IMPRESSION	Lumière
		Speed 1,2,3
		Sord Z 1 et 2
		Sors 1 et 2
		Massicot
02	BATIMENT A	Lumière, climatiseur, ordinateur, appareils informatique
03	FINITION	Trilame1,2,3 ; Jud Mr 500-1,2 ; pony ; plieuse 1,2,3 ; freçia, Kolbus, massicot, garido1,2,3 ; Pelliculeuse Encartuseuse, emballeuse, Lumière ; Climatisation ; Compresseur
04	BATIMENT B	Lumière, climatiseur, ordinateur, appareils informatique
05	USINE CAHIER	Piétra I, II, et III, affuteuse, massicot, compresseur, emballeuse I et II, lumière et Climatisation
06	DIRECTION PDG	Lumière, climatiseur, ordinateur, appareils informatique.
07	RESERVE	Balancée sur AGRIC TV

Tableau III-1: Liste Des Equipements

Ainsi sur l'ensemble du réseau, les mesures de protections pour la sécurité des biens et des personnes se résument à l'installation des dispositifs ci-après :

✓ Les fusibles

Ce sont des appareils destinés à protéger les installations contre le court-circuit. Son élément principal est le fil fusible qui se fond lors du passage d'un courant élevé. Les matériaux les plus utilisés pour le fil fusible sont le cuivre et le zinc

✓ Les relais

Un relais est un composant qui reçoit des informations analogiques (température, tension, courant...) et transmet des commandes binaires (fermeture ou ouverture) d'un

circuit de commande lorsque les informations remplissent certaines conditions fixées d'avance.

✓ Les disjoncteurs

Le disjoncteur est un appareil électromagnétique capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans des conditions normales, mais surtout dans celles dites "anormales", c'est-à-dire : surcharge, court-circuit. Il s'ouvre alors automatiquement. Après élimination du défaut, il suffit de le réarmer par une action manuelle sur la manette.

III-2- Choix du dispositif

Pour faire face aux nombreux incidents qui peuvent se produire dans un réseau électrique et perturber son bon fonctionnement mais aussi pour la sécurité des biens et des personnes, il est vraiment important de concevoir ou d'installer un dispositif ou un matériel de protection efficace. Le système de correction a pour but de :

- ▶ Supprimer les pénalités pour un mauvais facteur de puissance.
- ▶ Diminuer la puissance apparente en l'ajustant au besoin la puissance active de l'installation.
- ▶ Augmenter la puissance active disponible au secondaire du transformateur
- ▶ Assurer le bon fonctionnement du réseau et la disponibilité de l'énergie,
- ▶ protéger des personnes et matériels,
- ▶ Améliorer la durée de vie du réseau et des équipements.

Comme déjà mentionné précédemment, l'étude consiste à la correction du facteur de puissance : cas de l'imprimerie TUNDE.

III-3- Option choisir

De ce fait, l'option, pour la compensation globale automatique par l'utilisation d'une armoire de correction du facteur de puissance a été notre choix, sur ces critères :

- ▶ Supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive.

- ▶ Diminuer la puissance apparente en l'ajustant au besoin en puissance active de l'installation.
- ▶ Augmenter la puissance active disponible du transformateur de livraison.
- ▶ Solution la plus économique
- ▶ Et l'installation des TGBT ne sont pas étendu

En vue d'assurer de meilleures performances dynamiques du système avec plus de rentabilité et d'efficacité. Car la compensation globale nous donne les avantages qui correspondent aux deux objectifs fixé au début du travail comme :

- Supprimer les pénalités pour mauvais facteur de puissance.
- Diminuer la puissance apparente en l'ajustant au besoin en puissance active de l'installation.

Ainsi donc, puisque la compensation est de type global c'est-à-dire à la tête de l'installation, on possédera à la détermination de la puissance réactive à compenser; ce qui nous permettra de déterminer par la suite la puissance réactive des batteries de condensateurs (Qc). La formule nécessaire pour déterminer la puissance réactive à compenser par les batteries de condensateurs est donnée par la formule suivante :

$$Q_{COMP} = P \times [\text{tangente } \phi_1 - \text{tangente } \phi_2]$$

Avec : **P**, la puissance active du réseau à compenser ;

phi₁, l'angle de déphasage du réseau à compenser ;

phi₂, l'angle de déphasage souhaité.

Le facteur de puissance du réseau est égal à 0,84 donc inférieur à 0,90, ce qui n'est pas recommandé ; d'où la nécessité d'amélioration du dispositif de compensation.

III-4- BILAN ENERGETIQUE

III-4-1- Calcul pour relever le facteur de puissance :

4-1-a- Méthode 1

D'après les données relever sur la ligne d'alimentation de l'imprimerie, nous avons un courant de 500 A sous une tension de 390 V. le cos phi relever est $\cos_1 \phi = 0,84$. Et le souhait est de le ramener à un $\cos \phi_2$ de 0,95 par l'installation des batteries de condensateurs.

$$\cos_1 \phi = 0,84 \leftrightarrow \phi = 33^\circ \leftrightarrow \sin \phi_1 = 0.55 \leftrightarrow \tan \phi_1 = 0.65$$

$$\cos_2 \phi = 0,95 \leftrightarrow \phi = 18,2^\circ \leftrightarrow \sin \phi_2 = 0.31 \leftrightarrow \tan \phi_2 = 0.33$$

→ Puissance réactive : $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin_1 \phi = 1,73 \times 390 \times 500 \times 0.55 = 186 \text{ kvar}$

→ Puissance active : $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos_1 \phi = 1,73 \times 390 \times 500 \times 0.84 = 284 \text{ kw}$

→ Puissance apparente : $S = \sqrt{3} \times U \times I = 1,73 \times 390 \times 500 = 337 \text{ kVA}$

→ Puissance de compensation Q_c

$$Q_c = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) = 284 \text{ 000} \times (0,65 - 0,33) = 91 \text{ kVAr. } \mathbf{Q_c = 91 \text{ kVAR}}$$

→ Le courant devient : $P = 284 \text{ kW} = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos_2 \phi \Rightarrow I_2 = P / \sqrt{3} \times U \times \cos \phi$
 $= 284.000 / 1,73 \times 390 \times 0,95 = 443 \text{ A.}$

→ La nouvelle puissance réactive : $Q = \sqrt{3} \times U \times I_2 \times \sin \phi_2$
 $= 1,73 \times 390 \times 443 \times 0,31 = 93 \text{ kVAr ou } Q = Q_1 - Q_c = 186 - 92 = 94 \text{ kvar.}$

→ La puissance souscrite $S = \sqrt{3} \times U \times I = 1,73 \times 390 \times 443 = 300 \text{ kva.}$

D'après les calculs nous pouvons établir les avantages après la correction du facteur de puissance dans le tableau suivant, tout en rappelant que la facture prend en compte les quantités d'énergie réactive consommées (en pointe ou en base) supérieures de 40% au volume d'énergie active (0,4P) .

	Avant compensation	Après compensation
Tension	390 V	390 V
Cosφ	0,84	0,95
Courant I	500 A	443
Puissance active $P = \sqrt{3}UICos\varphi$	8284 kW	284 kW
$Q = Ptg\varphi = \sqrt{3}UISin\varphi$	186 Kvar	93 kVAR
Q_{nf} non facturé (0,4P)	114 kVAR	114 kVAR
Facturation de $Q_f = Q - Q_{nf}$	72 Kvar	0
Bonification (énergie réactive remboursée)	0	21 kVAR
Puissance apparente S consommée ($\frac{P}{cos\varphi}$)	337 kVA	300 kVA
Reserve de puissance	0	37 Kva

Tableau III-2 : Tableau du bilan énergétique avant et après compensation

III-4-2-Méthode Simplifiée

4-2-1-Principe général

Un calcul très approché peut suffire.

Il consiste à considérer que le cos φ d'une installation est en moyenne 0,8 (en retard) sans compensation. On considère qu'il faut "relever" le facteur de puissance à cos φ = 0,93 pour supprimer les pénalités et compenser les pertes usuelles en énergie réactive de l'installation.

Pour «relever» ainsi le cos φ le **tableau III-3** indique que pour passer de cos φ = 0,8 à cos φ = 0,93, il faut fournir 0,355 kvar par kW de charge.

La puissance de la batterie de condensateurs à installer (en tête d'installation) est de ce fait :

$$Q (\text{kvar}) = 0,355 \times P (\text{kW}).$$

Cette approche simple permet une détermination rapide des condensateurs à installer, que ce soit en mode 2global, partiel ou individuel.

Exemple

Comment augmenter le facteur de puissance d'une installation de 666 kVA de 0,75 à 0,93 ?

La puissance active consommée est $P = S \times \cos\phi$ $P = 666 \times 0,75 = 500 \text{ kW}$.

Sur le **Tableau III-3**, l'intersection de la ligne $\cos\phi = 0,75$ (avant compensation) avec la colonne $\cos\phi = 0,93$ (après compensation) indique une valeur de 0,487 kVar de compensation par kW de charge.

Pour une puissance de charge de 500 kW, la puissance de la batterie de compensation est de $500 \times 0,487 = 244 \text{ kvar}$.

Note : la méthode est valable quel que soit le niveau de tension.

4-2-a- Méthode 2

Dans notre étude nous avons un facteur de puissance de $\cos\phi_1 = 0,84$ que nous souhaitons ramené à un facteur de puissance $\cos\phi_2 = 0,95$ avec une puissance active de 284kW.

D'après le tableau nous avons 0.317 kVar de compensation par kW de charge, la puissance réactive de la batterie de compensation est de $0,317 \times 284 = \mathbf{91 \text{ kVar}}$

Qc = 91 kVAR.

Cette valeur correspond exactement à la valeur de la puissance réactive des batteries de compensation calculée à la méthode1 **Qc =91 kVAR.**

(D'après WIKI PEDIA installation électrique de Schneider [Comment déterminer le niveau optimal de compensation ? — Guide de l'Installation Electrique](#)) nous avons ce tableau de la méthode simplifiée.

Avant compensation		Puissance de condensateur en kvar à installer par kW de charge, pour relever le facteur de puissance $\cos \phi$ ou $\tan \phi$ à une valeur donnée													
		$\tan \phi$	0,75	0,59	0,48	0,46	0,43	0,40	0,36	0,33	0,29	0,25	0,20	0,14	0,0
$\tan \phi$	$\cos \phi$	$\cos \phi$	0,80	0,86	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1
2,29	0,40		1,557	1,691	1,805	1,832	1,861	1,895	1,924	1,959	1,998	2,037	2,085	2,146	2,288
2,22	0,41		1,474	1,625	1,742	1,769	1,798	1,831	1,840	1,896	1,935	1,973	2,021	2,082	2,225
2,16	0,42		1,413	1,561	1,681	1,709	1,738	1,771	1,800	1,836	1,874	1,913	1,961	2,022	2,164
2,10	0,43		1,356	1,499	1,624	1,651	1,680	1,713	1,742	1,778	1,816	1,855	1,903	1,964	2,107
2,04	0,44		1,290	1,441	1,558	1,585	1,614	1,647	1,677	1,712	1,751	1,790	1,837	1,899	2,041
1,98	0,45		1,230	1,384	1,501	1,532	1,561	1,592	1,628	1,659	1,695	1,737	1,784	1,846	1,988
21,93	0,46		1,179	1,330	1,446	1,473	1,502	1,533	1,567	1,600	1,636	1,677	1,725	1,786	1,929
1,88	0,47		1,130	1,278	1,397	1,425	1,454	1,485	1,519	1,532	1,588	1,629	1,677	1,758	1,881
1,83	0,48		1,076	1,228	1,343	1,370	1,400	1,430	1,464	1,497	1,534	1,575	1,623	1,684	1,826
1,78	0,49		1,030	1,179	1,297	1,326	1,355	1,386	1,420	1,453	1,489	1,530	1,578	1,639	1,782
1,73	0,50		0,982	1,232	1,248	1,276	1,303	1,337	1,369	1,403	1,441	1,481	1,529	1,590	1,732
1,69	0,51		0,936	1,087	1,202	1,230	1,257	1,291	1,323	1,357	1,395	1,435	1,483	1,544	1,686
1,64	0,52		0,894	1,043	1,160	1,188	1,215	1,249	1,281	1,315	1,353	1,393	1,441	1,502	1,644
1,60	0,53		0,850	1,000	1,116	1,144	1,171	1,205	1,237	1,271	1,309	1,349	1,397	1,458	1,600
1,56	0,54		0,809	0,959	1,075	1,103	1,130	1,164	1,196	1,230	1,268	1,308	1,356	1,417	1,559
1,52	0,55		0,769	0,918	1,035	1,063	1,090	1,124	1,156	1,190	1,228	1,268	1,316	1,377	1,519
1,48	0,56		0,730	0,879	0,996	1,024	1,051	1,085	1,117	1,151	1,189	1,229	1,277	1,338	1,480
1,44	0,57		0,692	0,841	0,958	0,986	1,013	1,047	1,079	1,113	1,151	1,191	1,239	1,300	1,442
1,40	0,58		0,665	0,805	0,921	0,949	0,976	1,010	1,042	1,076	1,114	1,154	1,202	1,263	1,405
1,37	0,59		0,618	0,768	0,884	0,912	0,939	0,973	1,005	1,039	1,077	1,117	1,165	1,226	1,368
1,33	0,60		0,584	0,733	0,849	0,878	0,905	20,939	0,971	1,005	1,043	1,083	1,131	1,192	1,334
1,30	0,61		0,549	0,699	0,815	0,843	0,870	0,904	0,936	0,970	1,008	1,048	1,096	1,157	1,299
1,27	0,62		0,515	0,665	0,781	0,809	0,836	0,870	0,902	0,936	0,974	1,014	1,062	1,123	1,265
1,23	0,63		0,483	0,633	0,749	0,777	0,804	0,838	0,870	0,904	0,942	0,982	1,030	1,091	1,233
1,20	0,64		0,450	0,601	0,716	0,744	0,771	0,805	0,837	0,871	0,909	0,949	0,997	1,058	1,200
1,17	0,65		0,419	0,569	0,685	0,713	0,740	0,774	0,806	0,840	0,878	0,918	0,966	1,007	1,169
1,14	0,66		0,388	0,538	0,654	0,682	0,709	0,743	0,775	0,809	0,847	0,887	0,935	0,996	1,138
1,11	0,67		0,358	0,508	0,624	0,652	0,679	0,713	0,745	0,779	0,817	0,857	0,905	0,966	1,108
1,08	0,68		0,329	0,478	0,595	0,623	0,650	0,684	0,716	0,750	0,788	0,828	0,876	0,937	1,079
1,05	0,69		0,299	0,499	0,565	0,593	0,620	0,654	0,686	0,720	0,758	0,798	0,840	0,907	1,049
1,02	0,70		0,270	0,420	0,536	0,564	0,591	0,625	0,657	0,691	0,729	0,769	0,811	0,878	1,020
20,99	0,71		0,242	0,392	0,508	0,536	0,563	0,597	0,629	0,663	0,701	0,741	0,783	0,850	0,992
0,96	0,72		0,213	0,364	0,479	0,507	0,534	0,568	0,600	0,634	0,672	0,712	0,754	0,821	0,963
0,94	0,73		0,186	0,336	0,452	0,480	0,507	0,541	0,573	0,607	0,645	0,685	0,727	0,794	0,936
0,91	0,74		0,159	0,309	0,425	0,453	0,480	0,514	0,546	0,580	0,618	0,658	0,700	0,767	0,909
0,88	0,75		0,132	0,82	0,398	0,426	0,453	0,487	0,519	0,553	0,591	0,631	0,673	0,740	0,882
0,86	0,76		0,105	0,255	0,371	0,399	0,426	0,460	0,492	0,526	0,564	0,604	0,652	0,713	0,855
0,83	0,77		0,079	0,229	0,345	0,373	0,400	0,434	0,466	0,500	0,538	0,578	0,620	0,687	0,829
0,80	0,78		0,053	0,202	0,319	0,347	0,374	0,408	0,440	0,474	0,512	0,552	0,594	0,661	0,803
0,78	0,79		0,026	0,176	0,292	0,320	0,347	0,381	0,413	0,447	0,485	0,525	0,567	0,634	0,776
0,75	0,80			0,150	0,266	0,294	0,321	0,355	0,387	0,421	0,459	0,499	0,541	0,608	0,750
0,72	0,81			0,124	0,240	0,268	0,295	0,329	0,361	0,395	0,433	0,473	0,515	0,582	0,724
0,70	0,82			0,098	0,214	0,242	0,269	0,303	0,335	0,369	0,407	0,447	0,489	0,556	0,698
0,67	0,83			0,072	0,188	0,216	0,243	0,277	0,309	0,343	0,381	0,421	0,463	0,530	0,672
0,65	0,84			0,046	0,162	0,190	0,217	0,251	0,283	0,317	0,355	0,395	0,437	0,504	0,645
0,62	0,85			0,020	0,136	0,164	0,191	0,225	0,257	0,291	0,329	0,369	0,417	0,478	0,620
0,59	0,86				0,109	0,140	0,167	0,198	0,230	0,264	0,301	0,343	0,390	0,450	0,593
0,57	0,87				0,083	0,114	0,141	0,172	0,204	0,238	0,275	0,317	0,364	0,424	0,567
0,54	0,88				0,054	0,085	0,112	0,143	0,175	0,209	0,246	0,288	0,335	0,395	0,538
0,51	0,89				0,028	0,059	0,086	0,117	0,149	0,183	0,230	0,262	0,309	0,369	0,512
0,48	0,90					0,031	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,234	0,281	0,341	0,484

Tableau III-3 : – Puissance de condensateur (kvar) à installer par kW de charge,
pour augmenter le facteur de puissance de l'installation

III-4-3- Résumé sur la facture d'électricité de l'imprimerie Tunde

La puissance apparente **S** souscrite sur la facture est de 630 Kva. L'administration a toujours demandé des études sur la puissance car sur la facture mensuelle les frais de la puissance souscrite s'élève (frais fixe) à 3 780 000 fcfa ce qui dépasse toujours même les frais de consommation, et les pénalités sur le mauvais facteur de puissance est à un montant de 170 000 francs cfa chaque fin du mois.

D'après l'étude nous pouvons conclut que la puissance souscrite est surdimensionnée. Dès lors nous pouvons demander la réduction de la puissance souscrite à 300 Kva, afin de pouvoir réduire considérablement les frais fixe et le facteur de puissance étant compensé avec les batteries de condensateur, les frais de pénalités seront nul dès l'installation de l'armoire de compensation automatique à gradin.

III-5- Mode d'Installation du dispositif

La compensation globale est celle approprié pour le réseau de l'imprimerie. Elle convient lorsque l'installation n'est pas étendue. Le coffret sera donc installé en tête de l'installation. En effet, plusieurs types de coffret ont été déjà conçus et qui varie d'un type à un autre. Nous distinguons ainsi trois types de coffret : **Type standard, type H ou type SAH**, adaptés au niveau de pollution harmonique du réseau. Le rapport Gh/Sn permet de déterminer alors le type d'équipement approprié. **Sn** est la puissance apparente du transformateur et **Gh** la puissance apparente des moteurs produisant des harmoniques (moteurs à vitesses variables,...). En effet la classification est la suivante :

- ▶ $Gh/Sn < 15\%$ → équipement de type Standard ;
- ▶ $15\% < Gh/Sn < 25\%$ → équipement de type H ;
- ▶ $25\% < Gh/Sn < 50\%$ → équipement de type SAH.

Une usine d'imprimerie étant essentiellement composé des moteurs à vitesses variables, le rapport Gh/Sn est supérieur à 25%, et par conséquent le type d'équipement

de compensation est le type SAH. Les informations reçues sur les machines de l'usine ne nous ont pas permis de calculer le rapport Gh/Sn , mais les recherches effectuées sur le sujet montrent que l'équipement de compensation installé dans une imprimerie doit être de type SAH (selfs anti harmoniques), ce qui n'a pas été le cas à l'imprimerie TUNDE. Ainsi le choix s'est porté sur l'armoire A2 du compensateur Ractimat 2 de type SAH.

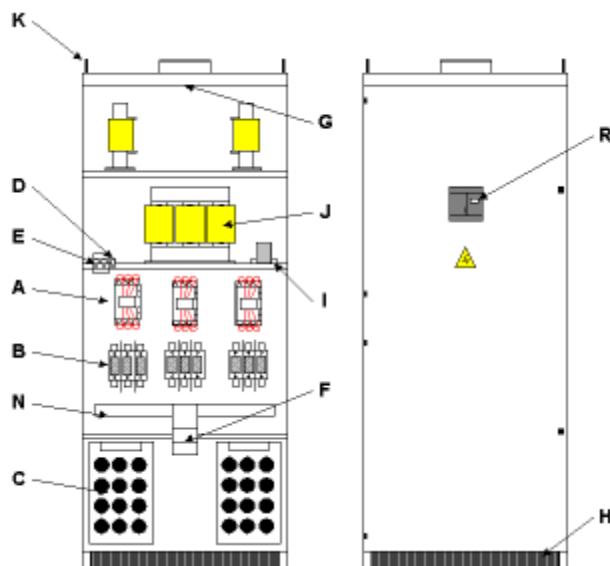


Figure III-5 : Armoire de compensation A2 de type SAH

Ce compensateur est composé des éléments suivants :

- A** : contacteurs commande gradins
- B** : fusible HPC protection gradins
- C** : condensateurs
- D** : bornier de raccordement du transformateur de courant
- E** : fusibles de protection du circuit de commande
- F** : plages de raccordement des câbles de puissance
- G** : ventilateur selon puissance
- H** : trous d'aérations
- I** : transformateur de tension
- J** : selfs anti harmoniques

K : anneaux de levage

N : jeu de barres principal

R : régulateur varmétrique

III-6- Principe de fonctionnement

Cette armoire de compensation automatique type SAH est destinée à corriger le facteur de puissance d'une installation électrique en ajoutant ou en retirant automatiquement des batteries de condensateurs. Son objectif principal est de réduire la puissance réactive circulant dans le réseau, d'améliorer le rendement énergétique et d'éviter les pénalités liées à un mauvais facteur de puissance.

Le système est alimenté par les trois phases du réseau (L1, L2, L3). Des transformateurs de courant et/ou capteurs de tension mesurent en permanence l'intensité et la tension. Ces signaux sont envoyés au régulateur, qui calcule le facteur de puissance ($\cos \varphi$) en temps réel.

Le régulateur compare la valeur mesurée du facteur de puissance à une valeur de consigne (souvent comprise entre 0,95 et 1). Si le $\cos \varphi$ est trop faible (présence importante d'énergie réactive inductive), il déclenche l'ajout de batteries de condensateurs dans le circuit. Si au contraire il est trop élevé (excès capacatif), il déconnecte certaines batteries.

Les batteries de condensateurs sont connectées ou déconnectées au moyen de contacteurs (KM), chacun protégeant un groupe de condensateurs. Les circuits de puissance intègrent des fusibles (FU) pour protéger les condensateurs et des inductances (L) pour limiter les courants d'appel et réduire les risques de résonances harmoniques avec le réseau.

Le processus est entièrement automatique :

- Mesure du facteur de puissance.
- Comparaison avec la consigne.
- Ajout ou retrait de batteries par le régulateur via les contacteurs.
- Répétition continue pour maintenir le $\cos \varphi$ optimal, quelles que soient les variations de charge de l'installation.

En résumé, l'armoire type SAH agit comme un régulateur intelligent d'énergie réactive, adaptant en temps réel la capacité capacitive installée pour maintenir le facteur de puissance proche de la consigne, assurant ainsi un fonctionnement optimal et économique de l'installation électrique.

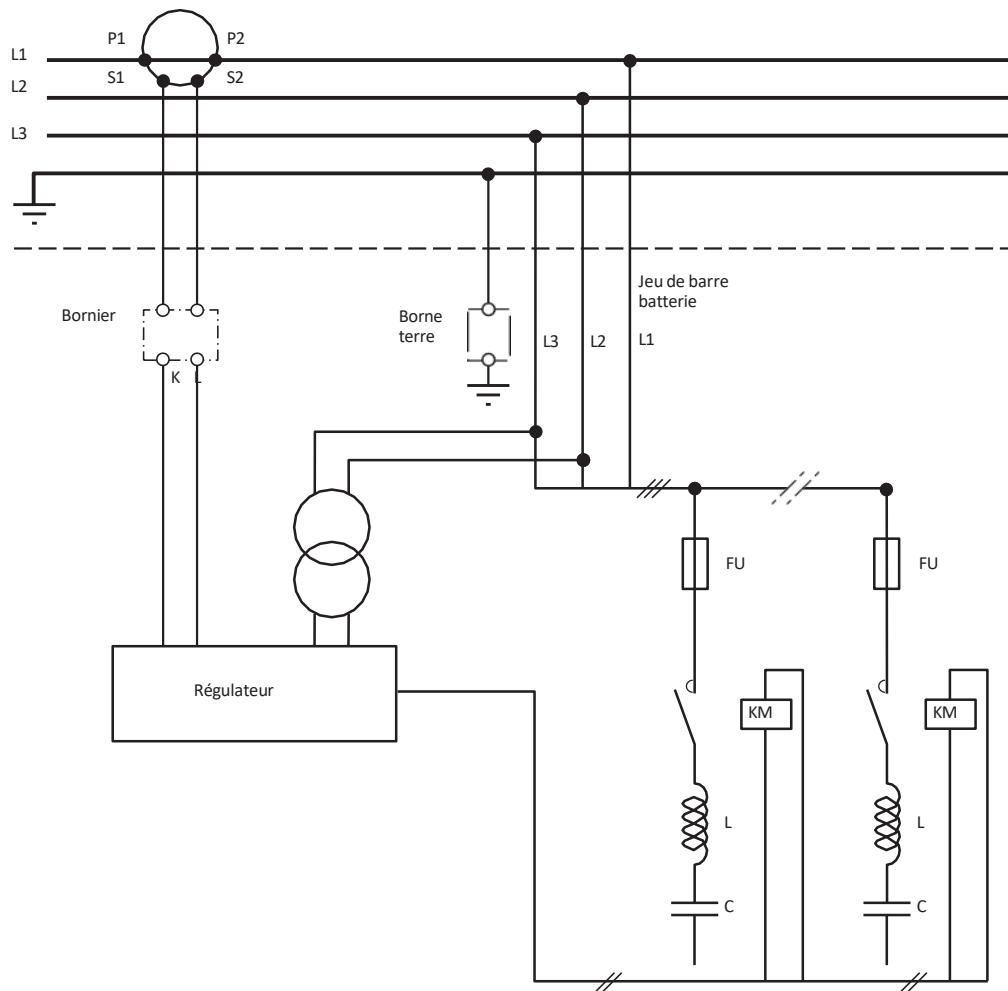


Figure III-6 : Schéma électrique de principe, armoires type SAH

Conclusion

La correction du facteur de puissance est cruciale pour garantir une utilisation efficace de l'énergie électrique et pour réduire tant les coûts opérationnels que l'impact environnemental. Les méthodes variées de correction, telles que l'utilisation de condensateurs, de bancs de condensateurs, de réacteurs, de variateurs de vitesse, l'optimisation de la charge, l'emploi de régulateurs de facteur de puissance, et l'adoption de systèmes de gestion de l'énergie, offrent des solutions adaptées aux divers besoins et contextes.

En fin de compte, l'application adéquate de ces méthodes permet non seulement une réduction significative des coûts énergétiques, mais contribue également à la protection de l'environnement en minimisant la consommation inutile d'énergie et en optimisant la production et l'utilisation de l'énergie électrique. L'importance de maintenir un facteur de puissance élevé et d'appliquer des méthodes de correction adéquates ne saurait être sous-estimée dans le monde énergétique d'aujourd'hui.

Notre étude est générale, et nous espérons que notre travail serait d'un support utile pour toute étude approfondie de chaque moyen de correction du facteur de puissance.

Références

1. SI AHMED, T. (2010). Étude comparative des différents moyens de compensation de l'énergie réactive. Mémoire de fin d'étude, UMMTO.
2. MEGHAND, P. (1986). Compensation de l'énergie réactive et tenue de la tension dans les installations industrielles. Techniques de l'ingénieur.
3. MERLIN GERIN. (2007). Guide de la compensation d'énergie réactive et filtrage d'harmonique. Groupe Schneider.
4. Idelec Plus. (s.d.). Solutions et services électriques. Disponible sur : www.idelecplus.com Selectra. (s.d.).
5. Énergie et services aux entreprises. Disponible sur : www.entreprisesselectra.info/energie
6. UEM Metz. (s.d.). Entreprise d'énergie. Disponible sur : www.entreprise.uem-metz.fr
7. Aunilec. (s.d.). Compensation d'énergie réactive et onduleurs. Disponible sur : www.aunilec.fr
8. Schneider Electric Belgique. (s.d.). Solutions énergétiques et compensation. Disponible sur : www.schneider-electric.be
9. TotalEnergies. (s.d.). Parlons énergie. Disponible sur : www.totalenergies.fr/particulier/parlons-energie
10. Power Calculation. (s.d.). Comment déterminer le niveau optimal de compensation ? – Guide de l'installation électrique. Disponible sur : www.power-calculation.com