

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : réseau électrique.

Thème

*Dimensionnement du système de
compensation d'énergie réactive et de ses
éléments de protection d'une installation
industrielle*

Réalisé par :

✚ M^r ALKAMA Ghilas

✚ M^r AMIAR Rabah

Promoteur :

✚ M^r A. ZIANE KHODJA

✚ M^r M. ADLI

Année Universitaire : 2012/2013

JE DÉDIE CE TRAVAIL À TOUS CEUX QUI ONT VÉCUS AVEC MOI LES PIRES ET LES

HEUREUX MOMENTS DE MA VIE.

GHILAS

Avec ma profonde gratitude et grand amour, Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents

A mes très chers frères

A mes très chères sœurs

A toute ma famille

A mes très chers amis sans exceptions (es)

RABAH

Remerciements

Nous remercions dieu, le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études.

Nos vifs remerciements s'adressent à nos promoteurs Mr ZIANE KHODJA ABDELKADER, Mr ADLI MOULOUD pour nous avoir orientés, conseillés et dirigés durant toute la durée de notre travail.

Nous tenons à remercier les membres de jury d'avoir bien voulu accepter d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous remercions aussi toute l'équipe de la direction d'IFRI (Mr RABHI.DJ, M RABHI.L, I.FARID...etc.) pour leurs collaborations.

Des remerciements vont également à tous nos enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Nous tenons à remercier tous les membres de nos familles pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Nous remercions nos proches et nos amis et tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I

BILAN DES PUISSANCES

I.1. Introduction	3
I.2. Puissance installée.....	3
I.3. Puissance utilisée.....	4
I.3.1. Facteur d'utilisation (Ku).....	4
I.3.2. Facteur de simultanéité (Ks).....	4
I.4. Recueil des données.....	5
I.4.1. Caractéristiques techniques de la ligne de production CSD.....	5
I.4.2. Schéma unifilaire	5
I.4.3. Tableau de recueil des données	6
I.5. Méthodes des calculs des charges électriques :	9
I.5.1. La puissance totale sans pertes dans le transformateur.....	11
I.5.2. Estimation des pertes de puissance dans le transformateur	11
I.5.3. La charge totale (avec pertes dans le transformateur).....	11
I.5.4. Puissance totale de la ligne de production avec extension.....	12
I.6. Conclusion.....	12

Chapitre II

COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE

II.1. Introduction	14
II.2. La compensation d'énergie réactive.....	14
II.2.1. Nature des énergies active et réactive.....	14
II.2.2. Composantes active et réactive du courant	15
II.2.3. Composantes active et réactive de la puissance.....	16
II.3. Facteur de puissance et $\cos \phi$ en présence d'harmonique.....	17
II.4. Circulation de l'énergie réactive	18
II.5. Energie réactive et éléments du réseau.....	19
II.5.1. Les machines synchrones.....	19
II.5.2. Les machines asynchrones	20
II.5.3. Les lignes et les câbles.....	20
II.5.4. Les transformateurs	20
II.5.5. Les inductances.....	21

II.5.6. Les condensateurs	21
II.6. Relation entre la puissance des condensateurs et l'amélioration du facteur de puissance :	21
II.7. Les modes de compensations d'énergie réactive.....	22
II.7.1. Compensation globale.....	23
II.7.2. Compensation locale ou par secteurs.....	24
II.7.3. Compensation individuelle.....	24
II.7.4. Compensation combinée.....	25
II.7.5. Recherche de la compensation optimale.....	26
II.8. Choix de la localisation.....	26
II.8.1. Calcul et choix de la section de câble alimentant le compresseur	26
II.8.2. Etape de calcul	28
II.8.3. Vérification de la chute de tension.....	29
II.8.4. Etape de calcul	29
II.8.5. Calcul de la perte de puissance	30
II.9. Calcul de la puissance des condensateurs de compensation.....	30
II.9.1. Pour le premier secteur (compris le compresseur).....	31
II.9.2. Pour le deuxième secteur (compris le reste des récepteurs).....	32
II.10. Calcul de la chute de tension après compensation.....	32
II.10.1. Calcul de la perte de puissance après compensation	32
II.11. Choix du type de compensation :	33
II.11.1. Compensation fixe :	33
II.11.2. Compensation automatique ou en "gradins" :	33
II.11.3. Principe et intérêt de la compensation automatique.....	33
II.11.4. Inconvénients d'une compensation en gradins dans un réseau d'usine.....	34
II.11.5. Étapes de calcul.....	34
II.11.6. Schéma de localisation.....	35
II.12. Détermination du type de batterie.....	35
II.12.1. Choix de type de batterie (premier secteur).....	36
II.12.2. Choix de type de batterie (deuxième secteur).....	36
II.12.3. Schéma unifilaire des deux batteries de compensation.....	37
II.13. Intérêts de la compensation d'énergie réactive :	38
II.14. Conclusion.....	39

Chapitre III

LES DIFFERENTS TYPES DE PERTURBATIONS ET LEURS DEGRES DE NUISANCES

III.1. Introduction.....	40
III.2. Origines des harmoniques et inter harmoniques	40

III.3. Caractérisations des harmoniques :	40
III.3.1. Le facteur de distorsion harmonique $T H D$	41
III.3.2. Le facteur de distorsion.....	41
III.4. Phénomènes transitoires et perturbations	42
III.4.1. Régime transitoire d'enclenchement	42
III.4.2. Régime transitoire de déclenchement.....	51
III.4.3. Les inductances de choc	59
III.5. Effets de résonance	60
III.6. Surcharge harmonique	62
III.7. Déséquilibre	62
III.8. Fluctuations de tension	63
III.9. Perturbation électromagnétique.....	63

Chapitre IV

CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DES MOYENS DE PROTECTION

IV.1. Introduction.....	65
IV.2. Choix des appareils de protection	65
IV.3. Les différents types de protection	65
IV.4. Problème de la protection	65
IV.4.1. Protection par disjoncteurs	67
IV.4.2. Protection par fusible	68
IV.4.3. Association-fusible disjoncteurs.....	69
IV.5. Détermination des courants de court-circuit 3ϕ	70
IV.5.1. Les différentes méthodes de calcul des courants de court-circuit $I_{cc3\phi}$	70
IV.5.2. Méthode générale de calcul des $I_{cc} 3\phi$	70
IV.5.3. Calcul de courants de court-circuit du premier secteur	73
IV.6. Sélectivité	73
IV.6.1. Introduction.....	73
IV.6.2. Définition de la sélectivité.....	73
IV.6.3. Choix de la sélectivité.....	75
IV.7. Dimensionnement des appareils de protection	76
IV.7.1. Calibrages de disjoncteurs	76
IV.7.2. Vérification de la sélectivité entre le disjoncteur principal (Q_p) et le disjoncteur de récepteur (Q_r).....	77
IV.7.3. Application numérique	77
CONCLUSION GENERALE.....	79

Liste des figures

Figure I-1: Schéma unifilaire	6
Figure II-1: Composition vectorielle des courants actif, réactif et apparent.....	15
Figure II-2: Composition vectorielle des puissances active, réactive et apparente.....	16
Figure II-3: Influence du $\cos \varphi$ sur la valeur de la puissance apparente.....	18
Figure II-4: Influence du $\cos \varphi$ sur la valeur du courant apparent.....	19
Figure II-5: Variation de φ en fonction de la puissance réactive des condensateurs QC	22
Figure II-6: Les quatre types de compensation à basse tension.....	23
Figure II-7: Principe de la compensation automatique d'une installation	34
Figure II-8: Schéma de localisation des gradins	35
Figure II-9: Schéma unifilaire des gradins (premier secteur)	37
Figure II-10: Schéma unifilaire des gradins (deuxième secteur).....	38
Figure III-1: Tension aux bornes de la source.....	42
Figure III-2: Tension mesuré en aval du disjoncteur principal.....	43
Figure III-3: Tension aux bornes de la charge.....	43
Figure III-4: Courant à la charge à l'enclenchement	44
Figure III-5: Tension en aval du disjoncteur principal	44
Figure III-6: Tension à la charge	45
Figure III-7: Tension aux bornes des condensateurs.....	45
Figure III-8: Courant du premier condensateur à l'enclenchement.....	46
Figure III-9: Courant du deuxième condensateur à l'enclenchement	46
Figure III-10: Courant du troisième condensateur à l'enclenchement.....	46
Figure III-11: Courant du quatrième condensateur à l'enclenchement.....	47
Figure III-12: Courant total des quatre condensateurs à l'enclenchement.....	47
Figure III-13: Courant à la charge à l'enclenchement	48
Figure III-14: Tension en aval du disjoncteur principal.....	48
Figure III-15: Tension à la charge.....	49
Figure III-16: Courant du premier condensateur à l'enclenchement.....	49
Figure III-17: Courant du deuxième condensateur à l'enclenchement	50
Figure III-18: Courant totale injecté par les condensateurs à l'enclenchement.....	50
Figure III-19: Courant à la charge à l'enclenchement	51
Figure III-20: Tension à la source.....	52
Figure III-21: Tension à l'aval du disjoncteur principal lors d'un déclenchement.....	52
Figure III-22: Tension aux bornes de la charge lors de déclenchement	53
Figure III-23: Tension aux bornes de condensateur.....	53

Figure III-24: Tension aux bornes du condensateur avant le déclenchement	54
Figure III-25: Courant dans un condensateur lors de déclenchement.....	54
Figure III-26: Courant dans un condensateur avant le déclenchement.....	55
Figure III-27: Le Courant total des quatre condensateurs au déclenchement	55
Figure III-28: Le Courant total des quatre condensateurs avant le déclenchement	56
Figure III-29: Courant à la charge au déclenchement.....	56
Figure III-30: Tension à l'aval du disjoncteur principal au déclenchement	57
Figure III-31: Tension aux bornes de la charge au déclenchement	57
Figure III-32: Tension aux bornes du condensateur au déclenchement	58
Figure III-33: Courant dans un condensateur au déclenchement.....	58
Figure III-34: Courant total des condensateurs au déclenchement.....	59
Figure III-35: Le courant à la charge au déclenchement.....	59
Figure III-36: Schéma simplifié d'une installation	60
Figure III-37: Schéma équivalent pour analyse harmonique	60
Figure III-38: Module de l'impédance Z en fonction de la fréquence.....	61
Figure III-39: Circulation des courants harmoniques.....	61
Figure IV-1: Déclencheur magnétothermique et électronique.....	68
Figure IV-2: Fusible en amont d'un gradin.....	69
Figure IV-3: Principe de la sélectivité.....	74
Figure IV-4: Courbe de sélectivité totale ou partielle avec déclencheurs magnétothermiques.....	75

Liste des tableaux

Tableau I-1: Facteur de simultanéité selon le nombre de circuits.....	4
Tableau I-2: Facteurs de simultanéité pour les différents types de récepteurs selon l'utilisation.....	5
Tableau I-3: Les données recueillies	7
Tableau I-4: Estimation des coefficients d'utilisation.....	8
Tableau I-5: Bilan des puissances	11
Tableau II-1: Valeurs du facteur de correction K1 [9]	27
Tableau II-2: Valeurs du facteur de correction K2 [9]	28
Tableau II-3: Choix de section en fonction de l'échauffement	29
Tableau II-4: Les résultats du deuxième secteur.....	32
Tableau II-5: Résultats obtenus après compensation.....	32
Tableau II-6: Section en fonction de l'échauffement.....	32
Tableau II-7: Puissances des récepteurs produisant les harmoniques.....	36
Tableau IV-1: Les contraintes et solutions de la protection	66
Tableau IV-2: Les calibres des fusibles pour batterie de condensateurs sous tension	69
Tableau IV-3: Résultats de calcul des courants de court-circuit.....	73
Tableau IV-4: Différentes techniques d'obtention de la meilleure disponibilité d'énergie	75
Tableau IV-5: Condition de réglage des déclencheurs magnétiques et thermique pour l'obtention d'une meilleure sélectivité [24].....	76
Tableau IV-6: Etude comparative.....	78

Préambule

L'origine de cette société remonte à l'année 1986. Cette dernière a été créée par Monsieur Ibrahim Laid, sous la dénomination « limonadière Ibrahim ». Ce n'est que dix ans plus tard, en 1996, que l'entreprise hérite du statut juridique d'une SNC « Société en Non Collectif » puis du statut de SARL « Société A Responsable Limitée », Composée de plusieurs associés.

La « **SARL Ibrahim & FILS** » est une société industrielle alimentaire spécialisée dans le domaine des boissons diverses. Elle est située à Ighzer Amokrane, dans la commune d'IFRI Ouzellaguen.

La SARL a produit cinq millions de bouteilles en 1996, la production atteignait le chiffre de cinquante-six millions de bouteilles vendues en 1999, son capital s'élève à 1.293.000.000.00 DA. Son numéro de registre de commerce est 98B01856 DU 18/02/98.

L'évolution rapide du chiffre d'affaires de l'entreprise, de ces dernières années, est due à l'expansion de cette dernière et à l'acquisition de nouveaux marchés. Ayant couvert une partie de la demande du marché national, l'entreprise s'est élancée dans l'exportation de ses produits vers l'étranger. Cependant, l'entreprise ne cesse d'influencer ses investissements afin d'étendre son réseau vers d'autres pays.

Aujourd'hui « **IFRI** » est réputée pour ses produits, en particulier, les eaux minérales, les boissons gazeuses avec des arômes différents (fraise, pomme verte, orange, citron, noir, bitter, light, eau gazéifiée...) et les jus (orange, cocktail de fruits, rouge au lait, raisin mure et carottes).

2-Présentation de la structure de la Sarl :

La structure organisationnelle des différentes sections et fonctions de l'entreprise ainsi que leurs missions peut être présentée comme suit :

- La direction
- Secrétariat
- Service commerciale
- Service d'approvisionnement
- Service informatique
- Service personnel
- Service technique
- Service production

- Service qualité
- Service comptabilité et finances
- Service gestion des stocks

Service technique

Ce service s'occupe de toute les taches techniques concernant la production, à cet effet il :

- Elabore les rapports techniques ;
- Etablit des programmes de production ;
- Contrôle la qualité des produits.

INTRODUCTION GENERALE

Les batteries de condensateurs sont actuellement le moyen le plus économique et le plus simple de production d'énergie réactive dans les installations industrielles.

Elles présentent les avantages de tous les équipements statiques :

- l'absence d'usure mécanique et un entretien réduit ;
- de faibles pertes ;
- un faible volume et une installation facile.

Mais malheureusement elles comportent aussi certaines limitations:

- la puissance réactive fournie n'est pas réglable simplement ;
- la puissance réactive fournie varie avec la tension d'alimentation;
- la mise sous tension provoque un violent appel de courant ;
- si la fréquence de résonance avec l'inductance de la source est proche de celle d'un harmonique existant, cet harmonique est amplifié et peut devenir gênant ou dangereux.

[5]

Dans le but de prévoir une technique d'approche pour améliorer ces limites, il est nécessaire de dimensionner ces batteries, prenant compte de tout ce qui peut provoquer des perturbations.

Afin de bien mener notre dimensionnement, nous avons structuré notre travail en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous avons entamé une étude expérimentale, nous permettant de déterminer :

- la puissance totale de la ligne de production à partir des caractéristiques électriques des récepteurs.
- le facteur de puissance global de la ligne.

Les résultats obtenus nous ont permis d'améliorer le facteur de puissance par, un dimensionnement d'un système de compensation d'énergie réactive.

Le deuxième chapitre est consacré au dimensionnement des batteries de compensation.

Le troisième chapitre définira les différents types de perturbations et leurs degrés de nuisance, essentiellement basé sur les surtensions et les surintensités transitoires d'enclenchement et de déclenchement.

Pour prédire ou interpréter les deux phénomènes transitoires qui accompagnent les batteries de compensation lors d'enclenchement ou déclenchement, nous choisirons le SIMULINK MATLAB, essentiellement pour mettre en évidence les contraintes susceptibles d'accompagner les ouvertures et fermetures de circuits capacitifs de compensation d'énergie réactive.

Finalement, la protection est dimensionnée dans le quatrième chapitre pour assurer la fiabilité de fonctionnement des gradins.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale résumant les principaux résultats Obtenus.

Chapitre I

BILAN DES PUISSANCES

I.1. Introduction

Le bilan des puissances est la première étape d'une étude d'une installation électrique industrielle. Elle consiste à évaluer et localiser géographiquement les valeurs des puissances actives et réactives des différents ou groupes de récepteurs.

Vu l'étendue du site, les valeurs des puissances installées et leurs répartitions, l'installation sera subdivisée en plusieurs zones géographiques.

Le bilan des puissances actives et réactives sera alors établi pour chaque zone en affectant aux différents récepteurs des facteurs d'utilisation caractérisant leurs modes de fonctionnement et des facteurs de simultanéité caractérisant la marche simultanée ou non simultanée de groupes de récepteurs regroupés dans des circuits communs. [1]

Des informations concernant la structure tarifaire sont aussi nécessaires pour faire le meilleur choix du raccordement de l'installation au réseau au niveau de la moyenne tension ou de la basse tension.

L'objet de ce chapitre consiste à établir une méthodologie d'estimation de la puissance d'utilisation.

Les valeurs données sont basées sur l'expérience et sur des enregistrements réalisés sur des installations existantes. En plus de fournir une base de données pour le calcul de l'installation de chaque circuit, la méthodologie proposée permet, à partir de ces calculs de base, de fournir une valeur globale pour la puissance d'utilisation de l'installation.

I.2. Puissance installée

C'est la somme des puissances de tous les récepteurs, c'est-à-dire la puissance nominale indiquée sur la plaque signalétique, plus l'éclairage. Elle est beaucoup plus élevée que celle réellement consommée car on suppose que tous les récepteurs fonctionnent simultanément et à leur puissance nominale. [3]

$$P_{a b s} = P_{r \acute{e} c e p t} / \eta \quad (I.1)$$

$$Q_{a b s} = P_{a b s} * \tan \varphi \quad (I.2)$$

η : Le rendement.

I.3. Puissance utilisée

C'est la puissance réellement utilisée par les récepteurs. Elle est tributaire de deux facteurs :

I.3.1. Facteur d'utilisation (K_u)

La puissance utilisée est inférieure à la puissance nominale installée (plaque signalétique) d'où la notion du facteur d'utilisation affectée à chaque récepteur.

Ceci est vrai lorsque les récepteurs à moteurs sont susceptibles de fonctionner en dessous de leur charge nominale.

Dans une installation industrielle, ce facteur peut-être estimé en moyenne à 0.75 pour les moteurs, par contre pour l'éclairage et le chauffage, il sera toujours égale à 1.

I.3.2. Facteur de simultanéité (K_s)

Dans l'ensemble électrique, les récepteurs d'un même circuit ne fonctionnent pas tous simultanément, par conséquent on affecte aux différents ensemble de récepteurs des facteurs de simultanéité.

La nature des récepteurs et les conditions d'exploitation sont essentielles pour déterminer ce facteur, on peut ne pas donner de valeurs précises applicables à tous les cas.

Les normes NFC14-100, UTE63-410 et 15-100 donnent quelques précisions sur ce facteur.

Tableau I-1: Facteur de simultanéité selon le nombre de circuits

Nombre de circuits	Facteur K_s
1 à 3	0.9
4 à 5	0.8
5 à 9	0.7
10 et plus	0.6

Tableau I-2: Facteurs de simultanéité pour les différents types de récepteurs selon l'utilisation

Utilisation	Facteur de simultanéité
Eclairage, conditionnement d'air.	1
Chauffage électrique, chauffe-eau.	1
Prise de courant (n : nombre de prise de courant alimenté par le même circuit)	0.1+ (0.9/n)si n<6 0.6si n>6
Appareil de cuisson	0.7
Ascenseurs et monte charge :	
• Pour les moteurs plus puissants	1
• Pour les suivants (moyens puissants)	0.75
• pour les autres	0.6

Lorsque les circuits d'alimentation de chauffage et de chauffe-eau ne peuvent être mis sous-tension que pendant certaines heures, il est possible de ne pas tenir compte simultanément de leur puissance.

Le courant à prendre en considération est égale au courant nominal du moteur, majoré du tiers du son courant de démarrage. [2], [3], [4]

I.4. Recueil des données

Notre travail repose à faire recueillir les données d'une ligne de production qui se nomme (CSD).

I.4.1. Caractéristiques techniques de la ligne de production CSD

- tension nominale : 400V.
- tension de service : 3*380/220V, 50Hz. 60Hz.

I.4.2. Schéma unifilaire

Le schéma électrique unifilaire est l'expression graphique de représentation des éléments de la structure du réseau.

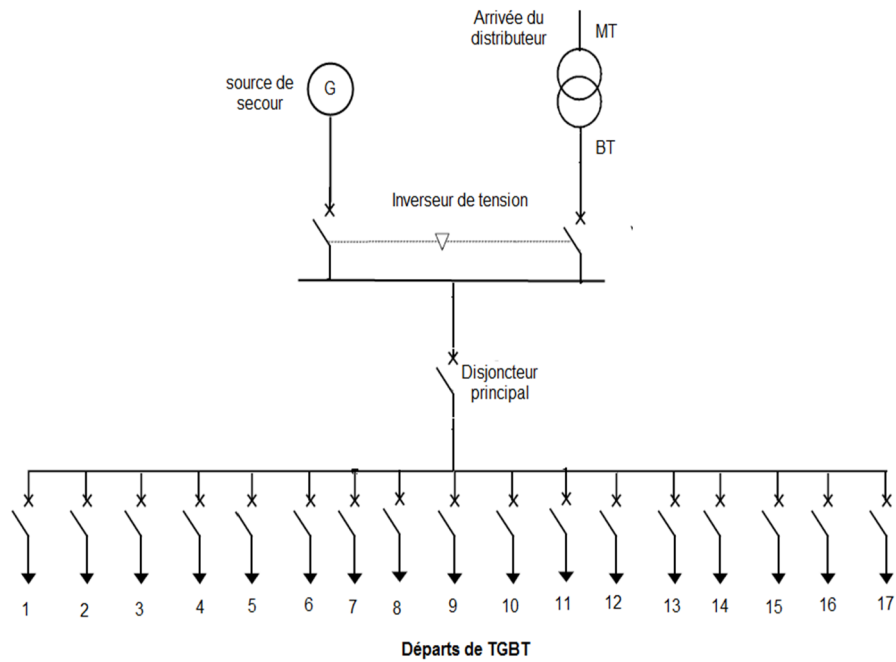


Figure I-1: Schéma unifilaire

I.4.3. Tableau de recueil des données

Les données récoltées pour faire un bilan des puissances sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau I-3: Les données recueillies

N° de la machine	Désignation		Pins (kW)	Cosφ	In (A)	η (%)
01	Palettiseur		38.8	0.80	70	85
02	Housseuse		38.5	0.87	64	85
03	Pilot convoyeur		45	0.64	100	85
04	Prémix		73	0.77	136.6	85
05	Fardeuse		154	0.94	238	85
06	Combi select	Souffleuse	546	0.99	791	85
		Remplisseuse	28	0.80	50	85
07	CTRL bout (avec une tension de 230V)		1.6	1	4	85
08	CIP (NEP) nettoyage en place		12	0.78	22	85
09	Pose poignets		4	0.89	6.49	85
10	Etiqueteuse		30	0.98	44	85
11	Sécheur		3	0.90	4.8	85
12	compresseur (40 bar)	compr ZD (33 bar)	220	0.71	446	85
		comprZR(7bar)	347	0.64	785	85
13	Sécheur		9	0.87	14.9	85
14	Réfrigérant		101.7	0.73	200	85
15	refroidisseur		19.5	0.80	35.2	85
16	Extracteur		7.8	0.86	13	85
17	Eclairage (intérieur et extérieur)		6.16	/	28	/

Après avoir relevé les courants nominaux à partir des plaques signalétiques les mesures ont été faites pour tous les récepteurs (fonctionnement en plein charge) à l'aide d'une pince ampermétrique.

Le facteur d'utilisation est déduit en effectuant le rapport suivant :

$$\frac{I_u}{I_n} \quad (I.3)$$

Le facteur de simultanéité a été estimé par rapport au nombre de circuits et le type de récepteurs. Les coefficients sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau I-4: Estimation des coefficients d'utilisation

N°	In (A)	Iu (A)	Ku	Ks	Calibre disj (A)
01	70	20	0.28	0.6	100
02	64	30	0.46	0.6	100
03	100	25	0.25	0.6	100
04	136.6	65	0.47	0.6	160
05	238	192	0.80	0.6	250
06	841	282	0.33	0.6	630
07	4	1.2	0.30	0.6	10
08	22	17	0.77	0.6	40
09	6.49	2.5	0.38	0.6	25
10	44	18	0.40	0.6	40
11	4.8	2	0.41	0.6	10
12	1231	1112	0.90	0.6	1600
13	14.9	4.5	0.30	0.6	40
14	200	164	0.82	0.6	250
15	35.2	26,4	0.75	0.6	/
16	/	13	1	0.6	30
17	/	28	1	1	2*16

Estimation de la charge totale :

Pour la détermination de la charge totale, on tient compte :

- De la puissance installée dans chaque récepteur;
- De la charge électrique d'éclairage intérieur et extérieur;
- Des pertes de puissance dans les transformateurs qui sont calculées préalablement.

Alors établit un calcul préalable pour la charge totale.

I.5. Méthodes des calculs des charges électriques :

Puissance de force utilisée :

$$P_u = P_{inst} * K_u \quad (I.4)$$

Avec :

P_u : puissance active de force de récepteur i

P_{inst} : puissance installée du récepteur i

K_u : coefficient d'utilisation du récepteur i

$$Q_u = P_{inst} * \tan \varphi_i * K_u \quad (I.5)$$

Q_u : puissance réactive de force du récepteur i

Puissance de force consommée:

$$P_{cons} = P_u * K_s \quad (I.6)$$

$$Q_{cons} = Q_u * K_s \quad (I.7)$$

Avec :

K_s coefficient de simultanéité du récepteur i

Charge totale d'un récepteur :

- puissance active totale :

$$P_i = P_{cons} \quad (\text{I.8})$$

- puissance réactive totale :

$$Q_i = Q_{cons} \quad (\text{I.9})$$

- puissance apparente totale :

$$S_i = \sqrt{P_{cons}^2 + Q_{cons}^2} \quad (\text{I.10})$$

S_i : puissance apparente totale d'un récepteur

Estimation des pertes de puissance dans les transformateurs :

$$\Delta P_{tr} = 0.02 S_{tot} \quad (\text{I.11})$$

$$\Delta Q_{tr} = 0,1 S_{tot} \quad (\text{I.12})$$

ΔP_{tr} pertes de puissance actives estimées dans le transformateur

ΔQ_{tr} pertes de puissance réactives estimées dans le transformateur

La charge totale et le facteur de puissance :

$$S_t = \sqrt{(P_t)^2 + (Q_t)^2} \quad (\text{I.13})$$

$$P_t = \sum P_i + \Delta P_{tr} \quad (\text{I.14})$$

$$Q_t = \sum Q_i + \Delta Q_{tr} \quad (\text{I.15})$$

$$\cos \varphi = \frac{P_t}{S_t} \quad [3] \quad (\text{I.16})$$

Les résultats sont représentés dans le tableau ci-après :

Tableau I-5: Bilan des puissances

Charge totale									
N° de bloc	Pinst (KW)	Ku	Tgφ	Pu (Kw)	Qu (kvar)	Ks	Pi (Kw)	Qi (Kvar)	
1	38,8	0,28	0,75	10,864	8,148	0,6	6,5184	4,8888	
2	38,5	0,46	0,56	17,71	9,9176	0,6	10,626	5,95056	
3	45	0,25	1,2	11,25	13,5	0,6	6,75	8,1	
4	73	0,47	0,82	34,31	28,1342	0,6	20,586	16,88052	
5	154	0,8	0,36	123,2	44,352	0,6	73,92	26,6112	
6	574	0,33	0,48	189,42	90,9216	0,6	113,652	54,55296	
7	1,6	0,3	0	0,48	0	0,6	0,288	0	
8	12	0,77	0,8	9,24	7,392	0,6	5,544	4,4352	
9	4	0,38	0,51	1,52	0,7752	0,6	0,912	0,46512	
10	30	0,4	0,2	12	2,4	0,6	7,2	1,44	
11	3	0,41	0,48	1,23	0,5904	0,6	0,738	0,35424	
12	567	0,9	1,12	510,3	571,536	0,6	306,18	342,9216	
13	9	0,3	0,56	2,7	1,512	0,6	1,62	0,9072	
14	101,7	0,82	0,93	83,394	77,55642	0,6	50,0364	46,533852	
15	19,5	0,75	0,75	14,625	10,96875	0,6	8,775	6,58125	
16	7,84	1	0,56	7,84	4,39	0,6	7,84	4,39	
17	6,16	1	/	6,16	0	1	6,16	0	
Total							627,3458	525,012502	

I.5.1. La puissance totale sans pertes dans le transformateur

$$S t = \sqrt{(P t^2) + (Q t^2)} \Rightarrow S t o t = 818,0469 \text{ kVA}$$

I.5.2. Estimation des pertes de puissance dans le transformateur

$$\Delta P t = 16,3609 \text{ kW}$$

$$\Delta Q t = 81,80469 \text{ kVAr}$$

I.5.3. La charge totale (avec pertes dans le transformateur)

$$P t = 643.7067 \text{ kW}$$

$$Q t = 606,8171 \text{ kVAr}$$

D'ou :

$$S e n t = 884,6385 \text{ kVA}$$

le facteur de puissance :

$$\cos\varphi = \frac{P_{e n t}}{S_{e n t}} 0,72$$

I.5.4. Puissance totale de la ligne de production avec extension

$$S_{e x t} = 0.2 * S_{e n t}$$

$$S_{e x t} = 176,9277 \text{ k V A}$$

$$S_{t} = S_{e n t} + S_{e x t}$$

$$S_{t} = 1061,5662 \text{ k V A}$$

I.6. Conclusion

L'élaboration de bilan de puissance nous a permis de vérifier le niveau de consommation en énergie électrique et de voir la disponibilité de l'énergie au sein de la ligne de production CSD. Pour cela on a opté pour la méthode de coefficient d'utilisation qui ne nécessite pas une bonne connaissance des caractéristiques des récepteurs, ce qui nous a permis de déterminer les puissances utiles des différents récepteurs et la puissance globale nécessaire au transformateur.

D'après les résultats obtenus dans ce chapitre, nous constatons que l'installation électrique de la ligne de production CSD présente un facteur de puissance faible de $\cos\varphi = 0.72$ entraînant des pertes importantes.

Les puissances des différentes machines, ainsi déterminées, nous serviront au dimensionnement, d'un système de compensation d'énergie réactive, qui nous permet l'amélioration de facteur de puissance, une réduction de la chute de tension et une augmentation de la puissance active disponible au transformateur.

Chapitre II

COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE

II.1. Introduction

Les problèmes liés à la circulation d'énergie réactive, en particulier dans les réseaux d'usines, conduisent à envisager, dès le départ, la solution définitive qui serait capable de résoudre, par nature, tous ces problèmes.

Il y a lieu de signaler que tous les types de compensateurs statiques ne présentent pas les mêmes possibilités. De plus, l'investissement est relativement lourd (il équivaut à une fraction notable de la puissance des convertisseurs de production) et cette dépense doit être justifiée par une nécessité reconnue.

C'est pourquoi, il a paru utile, plutôt que de décrire en détail une technologie qui est tout à fait classique, de réserver une place importante à l'analyse des divers aspects possibles du problème général de compensation, tel qu'il peut se poser au concepteur d'une installation industrielle. [5]

II.2. La compensation d'énergie réactive

La compensation de l'énergie réactive est un élément important pour réduire la facture d'énergie et améliorer la qualité du réseau électrique.

II.2.1. Nature des énergies active et réactive

Tout système électrique (câble, ligne, transformateur, moteur, éclairage, ...) utilisant le courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie :

L'énergie active et l'énergie réactive.

➤ **l'énergie active consommée (kWh)**

Elle résulte de l'utilisation de puissance active P (kW) essentiellement par les récepteurs.

Elle se transforme intégralement en énergie mécanique, thermique ou lumineuse.

➤ **l'énergie réactive consommée ($kVAh$)**

Elle sert à la magnétisation des circuits magnétiques des machines (transformateurs et moteurs). De plus, les lignes et les câbles consomment ou produisent de la puissance réactive suivant leurs niveaux de charges. Elle correspond à la puissance réactive Q (kVA) des récepteurs.

II.2.2. Composantes active et réactive du courant

A chacune de ces énergies active et réactive correspond un courant.

- **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 apparent** (I_t) (total) est le courant résultant qui parcourt le câble électrique depuis la source jusqu'au récepteur. Ce courant est déphasé d'un angle φ par rapport au courant actif (ou par rapport à la tension).

Pour un courant ne comportant pas de composantes harmoniques, ces courants se composent vectoriellement en valeurs efficaces comme indiqué sur la figure II-1.

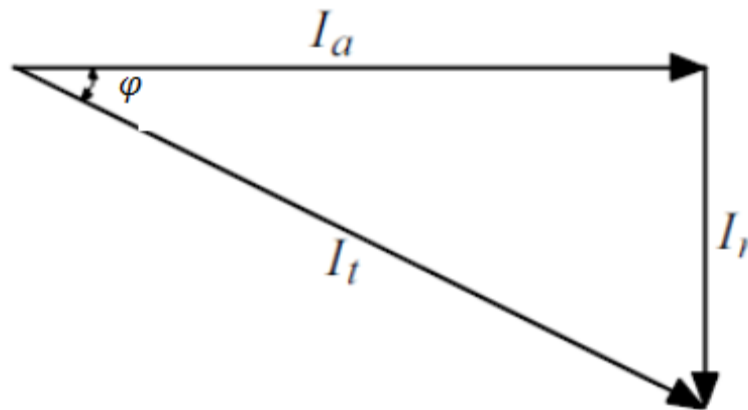


Figure II-1: composition vectorielle des courants actif, réactif et apparent

I_t : courant apparent

I_a : courant actif

I_r : courant réactif

φ : Déphasage entre le courant total et le courant actif

Les courants actifs, réactif, apparent et le déphasage sont liés par les relations suivantes :

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \quad (\text{II. 1})$$

$$I_a = I_t \cos \varphi \quad (\text{II. 2})$$

$$I_r = I_t \sin \varphi \quad (\text{II. 3})$$

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

II.2.3. Composantes active et réactive de la puissance

Pour des courants et des tensions ne comportant pas de composantes harmoniques, le diagramme précédent établi 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 :

➤ **La puissance active**

$$P = V I \cos(\varphi) \quad (\text{II. 4})$$

➤ **La puissance réactive**

$$Q = V I \sin(\varphi) \quad (\text{II. 5})$$

➤ **La puissance apparente**

$$S = V I \quad (\text{II. 6})$$

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

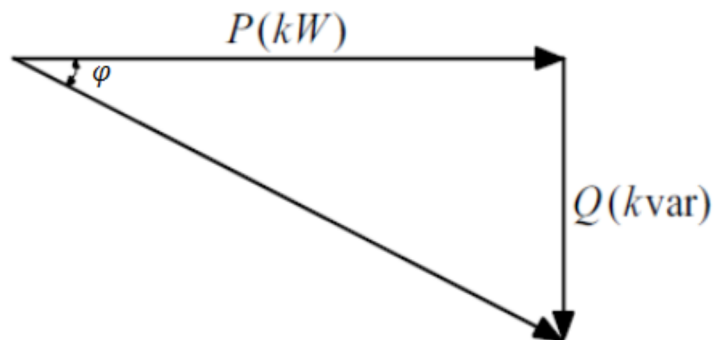


Figure II-2: composition vectorielle des puissances active, réactive et apparente

S : puissance apparente

P : puissance active

Q : puissance réactive

φ : Déphasage entre la puissance apparente et la puissance active (égal au déphasage entre le courant et la tension)

D'où
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{II. 7})$$

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

➤ **Facteur de puissance**

Le facteur de puissance est défini par le rapport suivant :

$$F = \frac{P}{S} \quad (\text{II. 8})$$

En l'absence d'harmoniques, le facteur de puissance est égal à $\cos \varphi$

Par contre, en présence d'harmoniques ces deux valeurs peuvent être très différentes :

$$F = F_d * \cos \varphi \quad (\text{II. 9})$$

F_d : Facteur de déformation

➤ **La valeur $\tan \varphi$**

On utilise souvent $\tan \varphi$ au lieu de $\cos \varphi$

En l'absence d'harmoniques, l'expression de $\tan \varphi$ est la suivante :

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad (\text{II. 10})$$

II.3. Facteur de puissance et $\cos \varphi$ en présence d'harmonique

En présence d'harmoniques, les définitions sont les suivantes :

$$F = \frac{P}{S} \quad (\text{II. 11})$$

P : puissance active totale (y compris les harmoniques)

S : puissance apparente totale (y compris les harmoniques)

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} \quad (\text{II.12})$$

P_1 : puissance active de la composante fondamentale

S_1 : puissance apparente de la composante fondamentale

φ : Déphasage entre les composantes fondamentales de courant et de tension

On écrit souvent $\cos \varphi$ afin de préciser que le déphasage ne s'applique qu'aux composantes fondamentales.

L'installation de condensateurs permet de compenser l'énergie réactive de la composante fondamentale et d'obtenir un $\cos \varphi$ voisinant 1.

Par contre, il n'est pas possible de compenser par des condensateurs l'énergie réactive due aux harmoniques. Il en résulte qu'en présence d'harmoniques, il est impossible d'obtenir un facteur de puissance égal à 1 en installant des condensateurs. Pour obtenir un facteur de Puissance égal à 1, il faut éliminer les courants harmoniques par un filtre actif.

Cependant, il faut noter que le distributeur d'énergie ne fait payer au client que l'énergie due à la composante fondamentale. Il faudra donc calculer $\cos\varphi_1$ (et non F) pour déterminer la puissance réactive des condensateurs qu'il faut installer pour réduire ou supprimer de la facture le montant de l'énergie réactive.

II.4. Circulation de l'énergie réactive

La circulation de l'énergie réactive a des influences importantes sur le choix des matériels et le fonctionnement des réseaux. Elle a par conséquent, des incidences économiques.

En effet, pour une même puissance active P utilisée, la figure II-3 montre qu'il faut fournir d'autant plus de puissance apparente ($S_2 > S_1$) que le $\cos\varphi$ est faible, c'est-à-dire que l'angle φ est élevé.

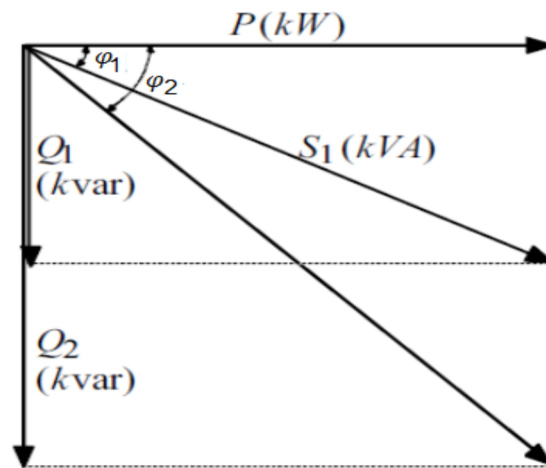


Figure II-3: Influence du $\cos\varphi$ sur la valeur de la puissance apparente

De façon identique (voir fig. II-4), pour un même courant actif utilisé I_a (pour une tension constante U du réseau), il faut fournir d'autant plus de courant apparent ($I_2 > I_1$) c'est-à-dire que le $\cos\varphi$ est faible (l'angle φ élevé).

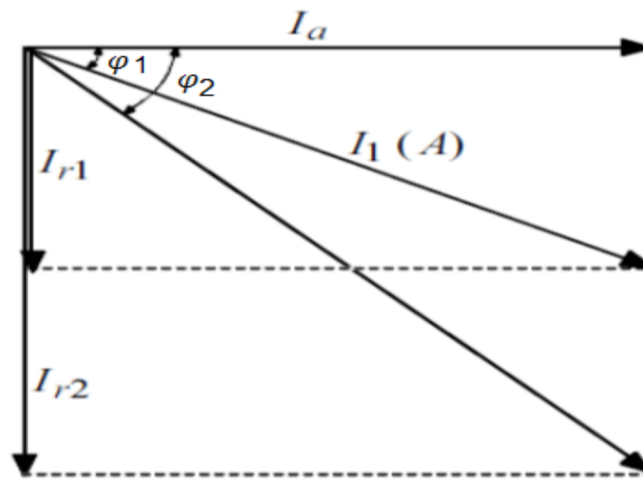


Figure II-4: Influence du $\cos \varphi$ sur la valeur du courant apparent

Ainsi, en raison de l'augmentation du courant apparent, 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 élevées ;
- des chutes de tension élevées.

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

Pour éviter la circulation de cette énergie réactive dans le réseau, il faut la produire au plus près des consommateurs et très souvent les batteries de condensateurs sont préférées aux autres moyens.

Ainsi, cette énergie réactive ne circule qu'entre les condensateurs et les consommateurs d'énergie réactive. Il est alors évident que plus les condensateurs seront proches des consommateurs, moins les conséquences de la circulation d'énergie réactives seront importantes.

Pour éviter les conséquences d'une circulation d'énergie importante sur leur réseau, les distributeurs facturent généralement l'énergie réactive au-delà d'un certain seuil ; cela incite les utilisateurs à compenser l'énergie réactive qu'ils consomment.

II.5. Énergie réactive et éléments du réseau

II.5.1. Les machines synchrones

Ce sont les alternateurs et les moteurs synchrones. En agissant sur le courant d'excitation, on fait varier la puissance réactive de la machine. Pour un fort courant d'excitation, la

machine fournie de la puissance réactive ($Q < 0$) et pour un faible courant d'excitation, elle absorbe de la puissance réactive ($Q > 0$).

Les machines synchrones peuvent donc fournir une partie de la puissance réactive demandée.

II.5.2. Les machines asynchrones

Ce sont les moteurs et les génératrices asynchrones.

Elles absorbent de l'énergie réactive, avec un $\cos \phi$ d'autant plus bas que la charge est faible

II.5.3. Les lignes et les câbles

Les caractéristiques L et C des lignes et des câbles sont telles que ces éléments sont consommateurs ou producteurs d'énergie réactive selon leur charge.

Pour une liaison triphasée :

$$Q = 3(C \omega V^2 - L \omega I^2) \quad (\text{II. 13})$$

C : capacité de la liaison

L : inductance de la liaison

V : tension simple

I : courant véhiculé par la liaison

De façon pratique :

- les lignes consomment de la puissance réactive
- les câbles MT produisent de la puissance réactive à faible charge et en consomment à forte charge.

Les câbles BT consomment de la puissance réactive.

II.5.4. Les transformateurs

Un transformateur consomme une puissance réactive qui peut être déterminée approximativement en ajoutant :

- une partie fixe qui dépend du courant magnétisant à vide I_0 :

$$Q_0 = \sqrt{3} U_n I_0 \quad (\text{II. 14})$$

- une partie approximativement proportionnelle au carré de la puissance apparente qu'il transit:

$$Q_c = U_c^2 \frac{S^2}{S_n^2} \quad (\text{II. 15})$$

U_c : Tension de court-circuit du transformateur en pu.

S : puissance apparente transitée par le transformateur

S_n : puissance apparente nominale du transformateur

U_n : tension composée nominale

La puissance réactive totale consommée par le transformateur est :

$$Q_t = Q_o + Q_c \quad (\text{II. 16})$$

II.5.5. Les inductances

Elles consomment de la puissance réactive ; elles sont utilisées par exemple pour stabiliser l'arc des lampes fluorescentes ou des fours.

II.5.6. Les condensateurs

Ils fournissent de la puissance réactive avec un très bon rendement, c'est pourquoi ils sont utilisés pour cette application. [6]

II.6. Relation entre la puissance des condensateurs et l'amélioration du facteur de puissance :

Il s'agit de déterminer la puissance réactive à installer pour obtenir le $\cos \phi$ désiré. Supposons qu'en un point du réseau de puissance active P et réactive Q , on désire améliorer $\cos \phi$ pour obtenir $\cos \phi'$ ou passer de $\tan \phi$ à $\tan \phi'$

On installe des condensateurs de puissance réactive Q_C , on a alors :

$$\tan \phi = \frac{Q}{P} \quad (\text{II. 17})$$

$$\tan \phi' = \frac{Q'}{P} \quad (\text{II. 18})$$

$$Q_c = Q - Q' \quad (\text{II. 19})$$

On en déduit :
$$Q_c = P(tg\varphi - tg\varphi') \quad (\text{II. 20})$$

La figure 2-5 illustre graphiquement la variation de φ en fonction de Q_c . [7]

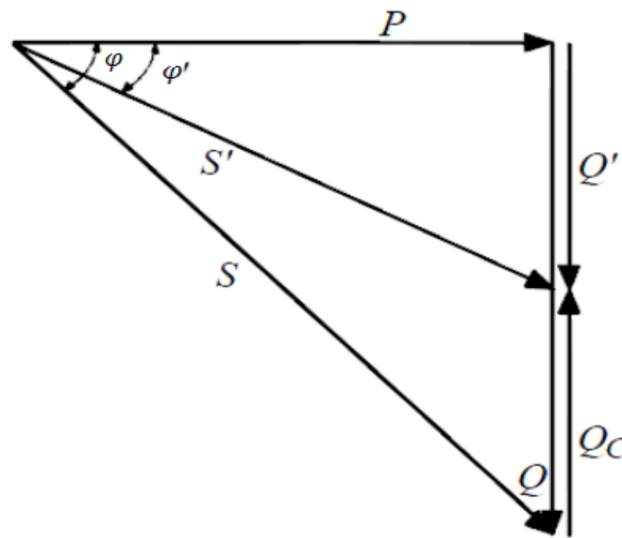


Figure II-5: Variation de φ en fonction de la puissance réactive des condensateurs Q_c

II.7. Les modes de compensations d'énergie réactive

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.

Ces modes de compensation sont très coûteux, on cherchera donc, dans la pratique, un optimum technico-économique.

Les batteries de condensateurs en basse tension sont installées chez le client (en général, les consommateurs industriels) en aval du poste de comptage. Le client industriel peut utiliser au mieux son contrat d'abonnement en l'énergie, en améliorant le facteur de puissance de son installation.

Les modules de compensation d'énergie réactive ont une tension assignée qui dépasse rarement 1 000 V, ils sont généralement triphasés et couplés en triangle [8].

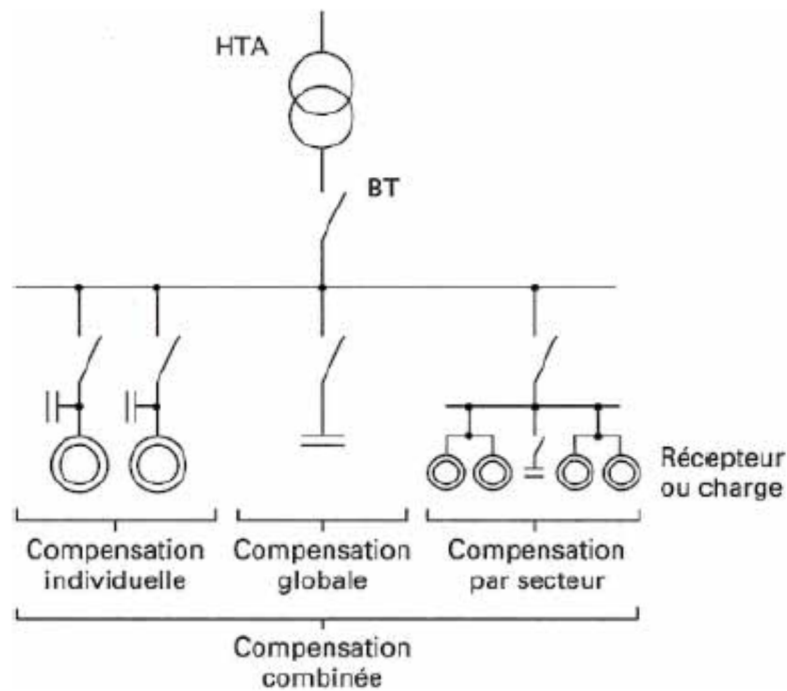


Figure II-6: Les quatre types de compensation à basse tension

II.7.1. Compensation globale

➤ Principe

La batterie est raccordée en tête d'installation 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 du site.

➤ intérêts

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. [6]

➤ Inconvénients

- les câbles d'alimentation de l'installation en aval de la batterie doivent être prévus pour faire transiter toute la puissance apparente ;

- un entretien périodique doit être effectué.

➤ **Utilisation**

Lorsque la charge est régulière, une compensation globale convient.

II.7.2. Compensation locale ou par secteurs

➤ **Principe**

La batterie est raccordée au tableau de distribution et fournit l'énergie réactive demandée par un secteur de l'installation.

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

➤ **intérêts**

Ce type de compensation :

- supprime les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive.
- optimise une partie du réseau, le courant réactif n'étant pas véhiculé entre le niveau qui est en aval vers le secteur compensé.
- augmente la puissance active disponible du transformateur et la puissance active qui peut être véhiculée dans les canalisations situées en amont du secteur compensé. [6]

➤ **Inconvénients**

- Les câbles, en aval de la batterie, alimentant les appareils de l'atelier doivent être dimensionnés pour prendre en considération toute la puissance apparente demandée ;
- Une protection des condensateurs de la batterie (fusibles, disjoncteur, etc....) doit être prévue pour question de sécurité, ce qui augmente le coût de la batterie ;
- Nécessite une maintenance périodique de la batterie. [8]

➤ **utilisation**

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

II.7.3. Compensation individuelle

➤ **principe**

La batterie est raccordée directement aux bornes du récepteur.

La compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance du récepteur est importante par rapport à la puissance du transformateur.

Lorsqu'elle est possible, cette compensation produit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée aux besoins.

➤ **intérêts**

- supprime les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive.
- réduit les pertes par effet Joule (KWh) et les chutes de tension.
- Économie de dispositifs pour la connexion et la déconnexion des condensateurs.
- Diminution du courant circulant dans les lignes permettant une réduction des dimensions des lignes et des appareils et une augmentation de la puissance active disponible au transformateur.

➤ **Inconvénients**

C'est le type de compensation qui offre le plus d'avantages mais qui est le plus coûteux. Si les charges ne fonctionnent pas en permanence, certains condensateurs restent inactifs.

➤ **utilisation**

Une compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance de certains récepteurs est importante par rapport à la puissance du transformateur. [6]

II.7.4. Compensation combinée

Elle est utilisée dans le cas où l'installation comporte de petits et de gros appareils électriques. Une compensation individuelle est réalisée pour les appareils fonctionnant pendant de longues durées et une compensation par secteur ou globale pour les autres récepteurs.

L'avantage de ce type de compensation est que chaque ensemble d'appareils électriques est compensé de la manière la plus adaptée. [8]

II.7.5. Recherche de la compensation optimale

Après avoir effectué le calcul de la puissance réactive globale à compenser, il faut déterminer les emplacements optimaux des condensateurs et le type de batterie (fixe ou automatique) afin d'obtenir un retour d'investissement des délais les plus courts possibles. [6]

II.8. Choix de la localisation

$$Q_t = 606,8171 \text{ kVAr}$$

$$Q_{\text{compresseur}} = 342,9216 \text{ kVAr}$$

La puissance réactive consommée par le compresseur dépasse la moitié de la puissance totale, notre choix se porte, ainsi, sur la compensation individuelle de ce secteur :

- emplacement de compresseur (dépasse les 110 m à partir du tableau de distribution). Ainsi, nous effectuerons le dimensionnement de la section du câble l'alimentant afin de vérifier la chute de tension et les pertes de puissance dans cette ligne.
- la quantité d'énergie demandée par le compresseur est plus élevée par rapport à celle des autres récepteurs.
- le coût d'investissement des câbles est lourd par rapport au coût de l'installation des batteries.

II.8.1. Calcul et choix de la section de câble alimentant le compresseur

Le calcul de la section d'un conducteur d'une ligne électrique est en fonction des différents paramètres de l'installation :

- Le mode de pose;
- Le type de câble à installer;
- La température ambiante;
- La nature de l'isolant;
- L'intensité nominale du courant d'emploi I_e ;
- La nature du sol (pour le câble enterré);

$$I_f = \frac{I_e}{K_1 * K_2} = \frac{I_e}{K} \quad (\text{II.21})$$

$$K = K_1 * K_2 \quad (\text{II.22})$$

K1 : coefficient d'influence de température d'emploi et type d'isolation du conducteur, il est donné dans le tableau II-1 :

Tableau II-1: Valeurs du facteur de correction K1 [9]

Températures Ambiantes T (C°)	Isolation		
	Caoutchouc	PRC	PVC
10	1.29	1.17	1.22
15	1.22	1.13	1.17
20	1.15	1.09	1.12
25	1.07	1.04	1.07
30	1	1	1
35	0.93	0.95	0.93
40	0.82	0.9	0.87
45	0.71	0.87	0.79
50	0.58	0.82	0.71
55	-	0.76	0.61
60	-	0.71	0.5

K2 : facteur de correction dans le cas où plusieurs câbles sont posés sur chemins de câbles jointivement en nappe horizontale ou verticale. Lorsque l'on a plusieurs couches on prend

comme facteur le produit des facteurs de disposition horizontale et verticale (influence de mode de pose), ce facteur est donné dans le tableau (II-2) :

Tableau II-2: Valeurs du facteur de correction K2 [9]

Disposition des câbles	Nombre de câbles				
	2	3	4 ou 5	6 ou 8	9 et plus
Plan horizontal	0.85	0.78	0.75	0.72	0.7
Plan vertical	0.80	0.73	0.7	0.68	0.66

II.8.2. Etape de calcul

Compresseur 40 bar

- Le mode de pose des câbles est le plan horizontal (4 câble) $K2 = 0.75$
- La température de milieu est de 40 °C $K1 = 0.9$
- Nature de câble Ames en cuivre.
- Nature de l'isolant en PRC
- Intensité de courant d'emploi :

$$I_e = I_n * K_u \quad (\text{II. 23})$$

$$I_e = 1231 * 0,9 = 1107.9 \text{ A}$$

$$K = 0.9 * 0.75 \Rightarrow K = 0.675$$

$$I_f = \frac{I_e}{K} \Rightarrow I_f = 1641,333 \text{ A}$$

Le choix du câble est obtenu d'après le mode de pose, la nature de l'isolation et le nombre d'âmes conductrices du circuit. le courant admissible correspond au courant fictif et le numéro de la colonne, après on déduit la section à partir de tableau des courants admissibles des sections des câbles utilisés (voir l'annexe Tableau. [1], [2]).

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (II-3) :

Tableau II-3: Choix de section en fonction de l'échauffement

N°	I (A)	K	I (A)	I a (A)	S (mm ²)
1	1107,9	0.675	1641.333	4*444	4*185

II.8.3. Vérification de la chute de tension

La chute de tension sur une canalisation est calculée par la formule suivante :

$$\Delta U = \sqrt{3} I_B \left(\frac{\rho l}{S} \cos \varphi + \lambda l \sin \varphi \right) \quad (\text{II. 24})$$

ΔU : chute de tension, en volt

ρ : Résistivité du conducteur en service normal, soit 1,25 fois celle à 20 C°

$$\rho = 0,0225 \Omega \text{ mm}^2/\text{m} \text{ Pour le cuivre ; } \rho = 0,036 \Omega \text{ mm}^2/\text{m} \text{ pour l'aluminium}$$

l : longueur de la canalisation, en mètre

S : section des conducteurs, en mm²

I_B : Courant maximal d'emploi, en ampère

λ : réactance linéique des conducteurs, valeur moyenne égale à 0.08 Ω/Km . [4]

Connaissant le courant I_e , le facteur de puissance ($\cos \varphi$) la chute de tension admissible dans le compresseur à étudier et sa longueur, on détermine la section du conducteur appropriée (S_j), sachant que la chute de tension admissible dans notre cas est estimée à 8% c'est à-dire que :

$$\Delta U = 32V$$

II.8.4. Etape de calcul

$$I_e = 1107,9 \text{ A} , U = 400 \text{ V} , l = 110 \text{ m} , \cos \varphi = 0.67$$

$$\rho = 0,0225 \Omega \text{ mm}^2/\text{m} , S_j = 4 * 185 \text{ mm}^2$$

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{2 * 0,0225 * 110}{4 * 185} = 0.003344 \Omega$$

$$\Delta U = \sqrt{3} * 1107,9 * (0.003344 * 0.67 + 0.0088 * 0.74) = 16.79547 \text{ V}$$

$$\frac{\Delta U}{U} * 100 = 4.19 \% < 8 \%$$

II.8.5. Calcul de la perte de puissance

La perte de puissance dans une canalisation est calculée par la formule :

$$\Delta P = \frac{3 \rho l}{s} * I^2 = 3R * I^2 \quad (\text{II. 25})$$

$$\Delta P = 12,3137 \text{ k W}$$

II.9. Calcul de la puissance des condensateurs de compensation

✓ En monophasé

La valeur de la capacité se calcul a l'aide de la relation suivante :

$$Q_c = -C \omega * V^2 \quad (\text{II. 26})$$

✓ En triphasé

Dans ce cas il existe deux façons pour monter les condensateurs:

- **Montage triangle**

La puissance réactive fournie par l'ensemble des condensateurs est donnée par l'expression suivante :

$$Q_c = -3C \omega * U^2 \quad (\text{II. 27})$$

$$C_{eq} = \frac{m}{n} * C \quad (\text{II. 28})$$

Avec :

U : tension composée (V)

ω : pulsation des tensions du réseau (rd/s)

C : capacité du condensateur (F)

m : nombre de branche connectés en parallèle

n : nombre d'unité de condensateur dans une branche

- **Montage étoile**

La puissance réactive fournie par l'ensemble des condensateurs est donnée par la l'expression suivante : [2]

$$Q_c = -3C \omega * V^2 \quad (\text{II. 29})$$

Et $Q_{c_Δ} = -3C \omega * U^2 \quad (\text{II. 30})$

$$Q_{c_λ} = -3C \omega * V^2 \quad (\text{II. 31})$$

$$Q_{c_λ} = -3C \omega \left(\frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 \quad (\text{II. 32})$$

$$Q_{c_λ} = -C \omega^2 * U \quad (\text{II. 33})$$

D'où $C_{eq_λ} = 3 * C_{eq_Δ} \quad (\text{II. 34})$

II.9.1. Pour le premier secteur (compris le compresseur)

$$Q_c = P (t g \varphi - 1) g \varphi \quad (\text{II. 35})$$

$$t g \varphi \frac{Q_{comp}}{P_{comp}} \frac{342,9216}{306,18} \Rightarrow t g \varphi = 1,12$$

$$Q_c = 306,18(1,12 - 0,4) \Rightarrow Q_c = 220,4496 \text{ k V A r}$$

$$C = \frac{Q_c}{(3 U^2 * \omega)} = \frac{220,4496}{3 * 314 * 400^2} \Rightarrow C = 1,461 \text{ m F}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$t g \varphi$ avant compensation

$t g \varphi$ après compensation

Q_c : puissance réactive fournie par les batteries

U : la tension aux bornes la batterie

C : capacité de la batterie

II.9.2. Pour le deuxième secteur (compris le reste des récepteurs)

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau II-4: Les résultats du deuxième secteur

P (kW)	Q (kVA)	$\cos \varphi$	Q_c (kVA)	C (mF)
337.5267	263.8955	0.78	128.2601	0.8505

II.10. Calcul de la chute de tension après compensation**Tableau II-5:** Résultats obtenus après compensation

P (kW)	Q (kVA)	Q_c (kVA)	Q' (kVA)	$\cos \varphi'$
306.18	342.9216	220.4496	122.472	0.4

$I_e = 480,23$ A , $U = 400$ V , $l = 110$ m , $\cos \varphi = 0,928$

Tableau II-6: Section en fonction de l'échauffement

N°	I_e (A)	K	I_j (A)	I_a (A)	S (mm ²)
1	480,23	0,675	711,4518	2*390	2*150

$\rho = 0,0225$ Ω mm²/m , $S_j = 2 * 150$ mm²

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,0225 \cdot 110}{2 \cdot 150} = 0,00825 \Omega$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot 480,23 \cdot (0,00825 \cdot 0,928 + 0,0088 \cdot 0,37) = 9,076$$

$$\frac{\Delta U}{U} * 100 = 2,26 \% < 8 \%$$

II.10.1. Calcul de la perte de puissance après compensation

La perte de puissance dans une canalisation est calculée par la formule :

$$\Delta P = \frac{3 \rho l}{S} * I^2 = 3R * I^2 \Rightarrow \Delta P = 5,707k W$$

Après avoir vérifié la chute de tension et les pertes de puissance dans la ligne de compresseur, nous constatons que la compensation par secteur est favorable pour une bonne tenue de tension et une réduction primordiale des pertes dans cette ligne.

II.11. Choix du type de compensation :

II.11.1. Compensation fixe :

On met en service l'ensemble de la batterie dans un fonctionnement "tout ou rien".

La mise en service peut être manuelle (par disjoncteur ou interrupteur), semi-automatique (par contacteur), asservie aux bornes des moteurs.

Ce type de compensation est utilisé lorsque la puissance réactive est faible (< 15 % de la puissance du transformateur) et la charge relativement stable [10]

Elles sont utilisées de préférence :

- aux bornes des récepteurs
- Sur les jeux de barres dont la fluctuation de charge est faible [6]

II.11.2. Compensation automatique ou en "gradins" :

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

La batterie de condensateurs est fractionnée en gradins, avec possibilité de mettre en service un plus ou moins grand nombre de gradins, en général de façon automatique.

Ce type de batterie est installé en tête de la distribution BT ou sur les départs de puissance importante.

Cela permet une régulation pas à pas de l'énergie réactive fournie aux variations de consommation, et ainsi de maintenir le *cos φ* à la valeur désirée.

L'enclenchement et le déclenchement des gradins sont pilotés par un relais varométrique [10]

II.11.3. Principe et intérêt de la compensation automatique

Les batteries de condensateurs sont divisées en gradins (voir figure. II-7). La valeur du *cos φ* est détectée par un relais varométrique qui commande automatiquement l'enclenchement et le déclenchement des gradins en fonction de la charge et du *cos φ* désiré.

Le transformateur de courant doit être placé en amont des récepteurs et des batteries de

condensateurs.

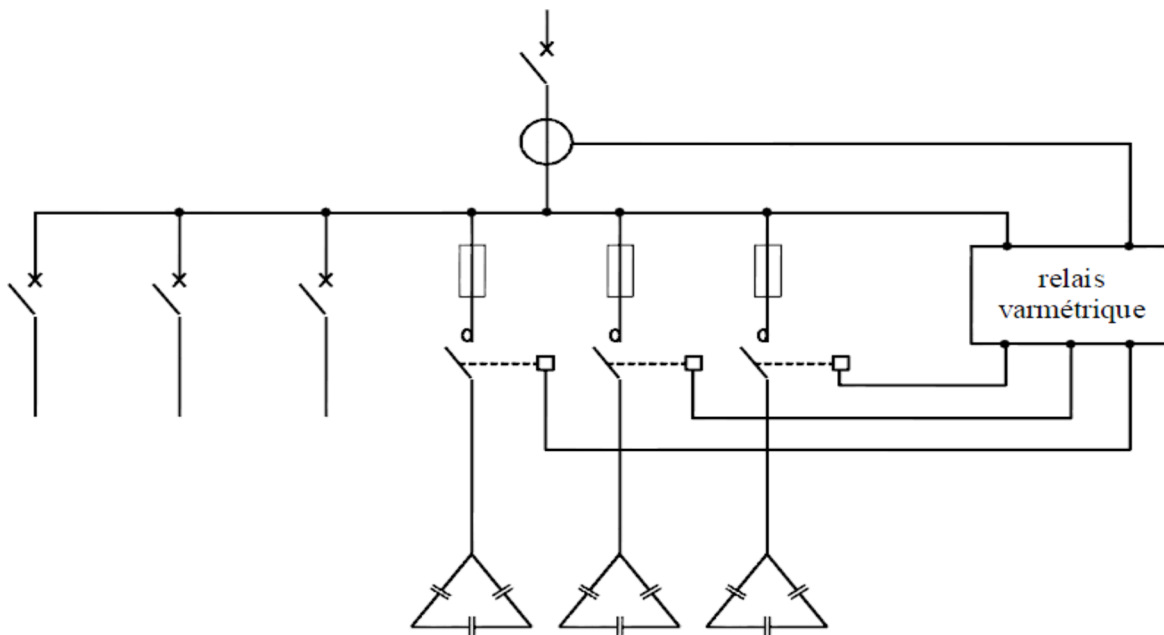


Figure II-7: Principe de la compensation automatique d'une installation

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.

On maintient ainsi une tension de service régulière tout en évitant de payer de l'énergie réactive au distributeur en période de forte consommation. [6]

II.11.4. Inconvénients d'une compensation en gradins dans un réseau d'usine

- Surcharge des gradins ;
- Dérive de la fréquence de résonance ;
- Régimes transitoires. [10]

II.11.5. Étapes de calcul

- **Pour le premier secteur :**

$$\frac{Q_c}{S_n} = \frac{224496}{1250} = 17,63 \% > 15\% \text{ dans ce cas la compensation automatique est}$$

adéquate, quatre gradins de 50 kVAr donneront la quantité suffisante.

- **Pour le deuxième secteur :**

$$\frac{Q_c}{S_n} = \frac{122601}{1250} = 10,26 \% < 15\%$$

Une compensation automatique convient car le rapport est proche de 15 %, du même pour éviter le transit d'énergie réactive pendant la variation de la consommation ; deux gradins de 50 kVAr.

II.11.6. Schéma de localisation

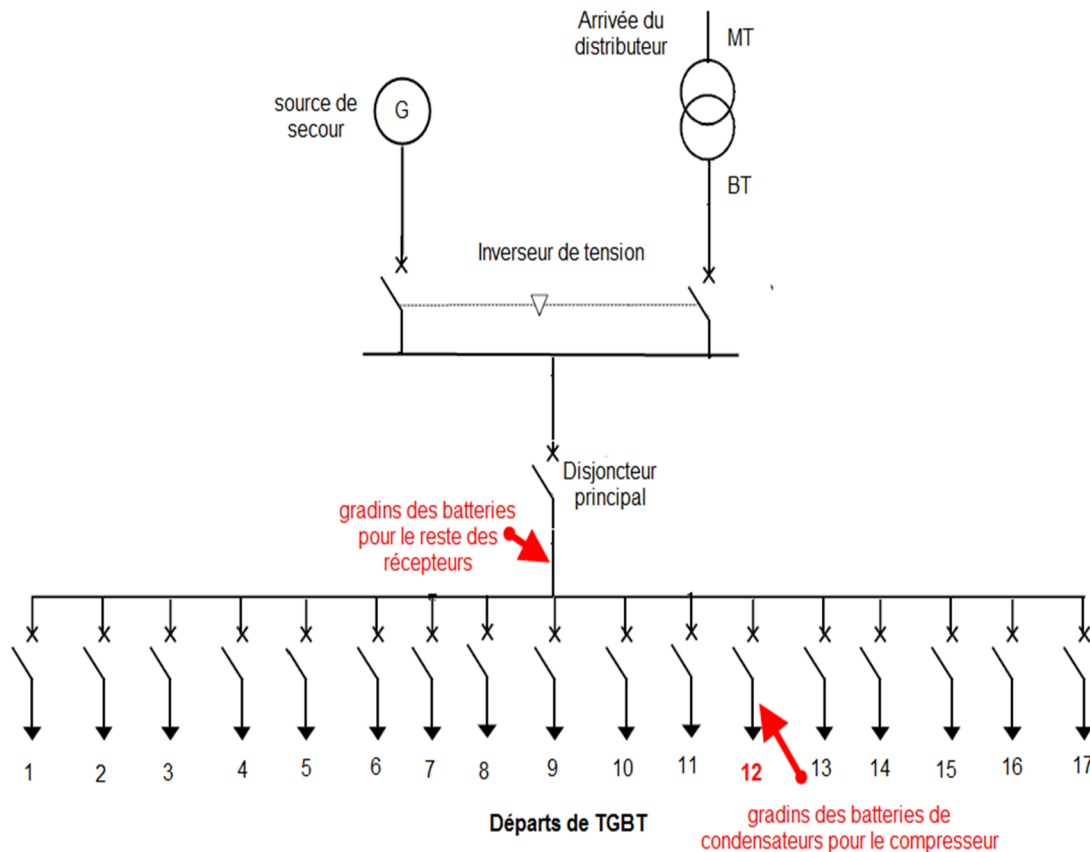


Figure II-8: Schéma de localisation des gradins

II.12. Détermination du type de batterie

Les équipements de compensation peuvent être de trois types, adaptés au niveau de pollution harmonique du réseau.

Type standard, type H ou type SAH

Le choix peut se faire :

- ❖ soit à partir du rapport $G/H/S_n$

Le rapport $G/H/S_n$ permet de déterminer le type d'équipement approprié.

- Standard \Rightarrow si puissance des générateurs d'harmoniques inférieure à 15% de la puissance du transformateur
- Type H (isolation renforcée à 470 V) \Rightarrow si puissance des générateurs d'harmoniques est comprise entre 15% et 25% de la puissance du transformateur
- Type SAH (avec selfs anti harmoniques) \Rightarrow si puissance des générateurs d'harmoniques est comprise entre 25% et 50% de la puissance du transformateur

Remarque : au-delà de 50% de générateurs d'harmoniques, l'installation de filtres est recommandée.

II.12.1. Choix de type de batterie (premier secteur)

$$G H / S n \frac{459,7188}{1250} = 36,77\%$$

D'après le rapport on fait le choix sur le type SAH

II.12.2. Choix de type de batterie (deuxième secteur)

Les puissances des récepteurs produisant les harmoniques sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau II-7: Puissances des récepteurs produisant les harmoniques

Récepteur	<i>P c o n</i> (k W)	<i>Q c o n</i> (k V A)	<i>S c o n</i> (k V)
Palettiseur	6,5184	4,8888	8,1475
Housseuse	10,626	5,95056	12,17871
Pilot convoyeur	6,75	8,1	12,51938
Prémix	20,586	16,88052	26,62208
Fardeleuse	73,92	26,6112	78,56412
Combi select	113,652	54,55296	126,06665
Réfrigérant	50,0364	46,533852	68,33035
			332,42887

$$G H / S n \frac{332,42887}{1250} = 26,59\% \Rightarrow \text{Type SAH}$$

- ❖ Soit à partir du taux de distorsion en courant harmonique THD mesuré :

$THD \frac{S}{S_n} < 5\% \Rightarrow$ Équipement standard

$5\% < THD \frac{S}{S_n} < 10\% \Rightarrow$ Équipement type H

$10\% < THD \frac{S}{S_n} < 20\% \Rightarrow$ Équipement type SAH

S_n : puissance apparente du transformateur.

S : la Charge en kV Au secondaire du transformateur au moment de la mesure.

THD : "Total Harmonic Distorsion" ou taux global de distorsion harmonique [11]

L'équipement de compensation choisi, dans notre cas, englobe aussi l'atténuation des harmoniques, car plus d'un tiers des récepteurs produisent les harmoniques (moteurs à vitesse variable, convertisseurs statiques ...etc.).

Une batterie de type SAH (avec self anti-harmonique) représentera une solution pour ces dernières.

II.12.3. Schéma unifilaire des deux batteries de compensation

Finalement nous finirons cette compensation par les schémas unifilaire des deux secteurs:

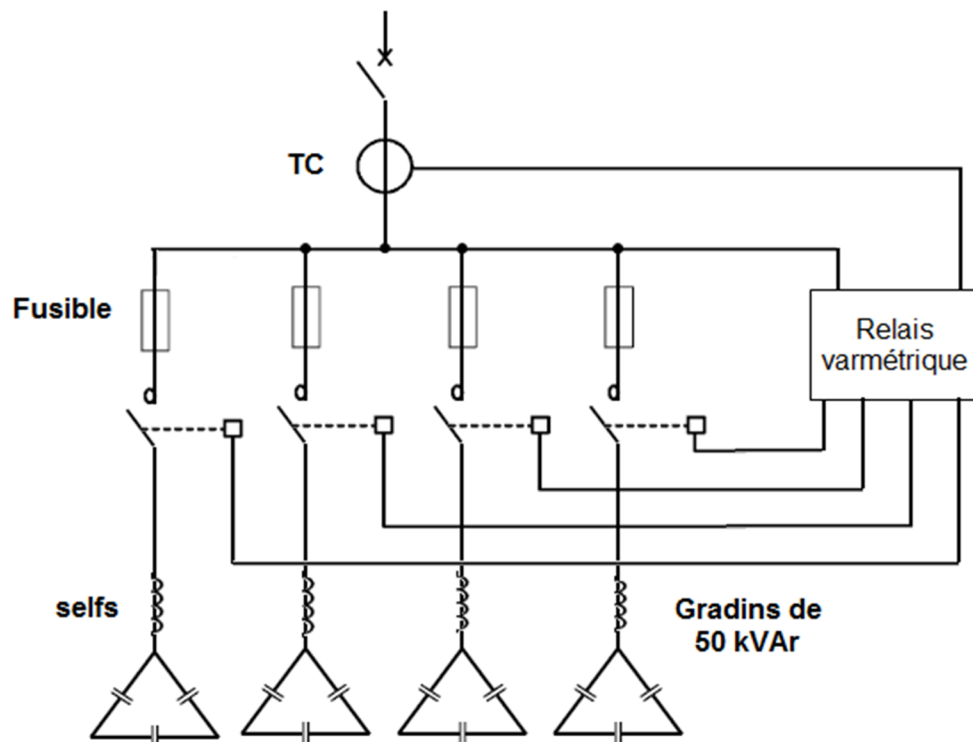


Figure II-9: Schéma unifilaire des gradins (premier secteur)

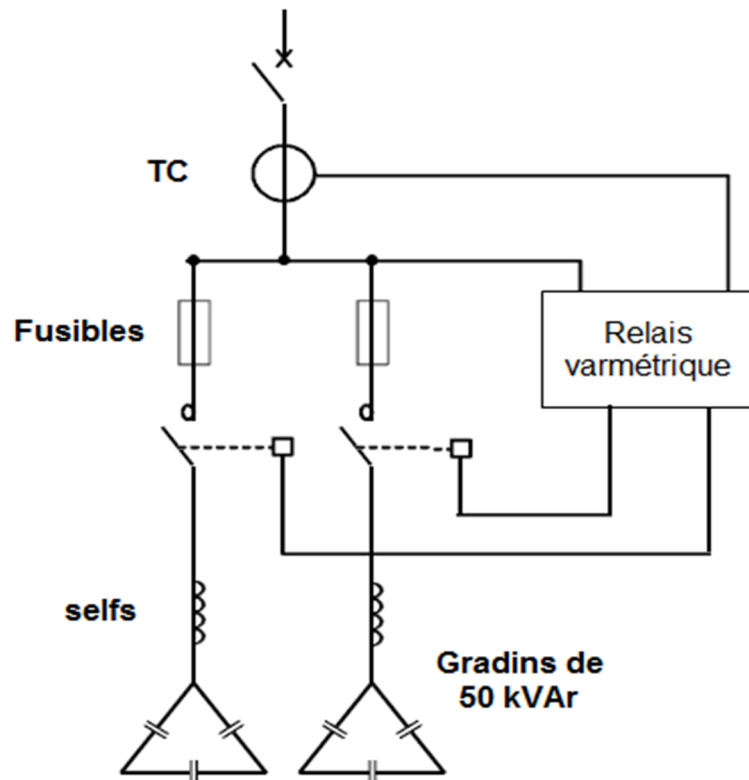


Figure II-10: Schéma unifilaire des gradins (deuxième secteur)

II.13. Intérêts de la compensation d'énergie réactive :

L'intérêt technique de la compensation d'énergie réactive :

- Suppression de la facturation des consommations excessives d'énergie réactive ;
- Réduction de la puissance souscrite en kVA
- Diminution des pertes dans les conducteurs à puissance active constante ;
- Augmentation de la puissance active transportée à courant apparent constant
diminution de la chute de tension [7]

L'intérêt économique de la compensation est mesuré en comparant le coût d'installation des batteries de condensateurs aux économies qu'elle procure.

Le coût des batteries de condensateurs dépend de plusieurs paramètres dont :

- la puissance installée,
- le niveau de tension,
- le fractionnement en gradins,
- le mode de commande,

Le niveau de qualité de la protection. [12]

II.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons définie la nature des énergies active et réactive avec leurs composantes de courant, ainsi que nous avons décrit l'influence de la circulation d'énergie réactive dans le réseau.

Une définition des éléments de réseau nous suffit de déduire les éléments absorbeurs et fournisseurs d'énergie réactive (machine synchrone, asynchrone...etc.)

Nous avons cité les différentes méthodes de compensation (compensation individuelle, compensation globale et locale) ainsi que leurs avantages et inconvénients.

D'après les résultats obtenus dans le chapitre précédent, la puissance réactive consommée par le compresseur dépasse la moitié de la puissance totale.

Nous avons vérifié que la chute de tension et les pertes de puissance dans la ligne alimentant le compresseur sont importantes, puis nous avons proposé une compensation en deux secteurs, afin d'améliorer le facteur de puissance $\cos \varphi = 0.93$, avec un redimensionnement des sections des câbles en fonction de l'échauffement, évitant la circulation de courant réactif dans les lignes; diminution des pertes de puissance et de la chute de tension.

Enfin on a clôturé ce chapitre par les types de compensations existantes (fixes et automatiques), ajoutons à cela un dimensionnement en quatre gradins.

Chapitre III

LES DIFFERENTS TYPES DE PERTURBATIONS ET LEURS DEGRES DE NUISANCES

III.1. Introduction

Les réseaux électriques industriels modernes doivent faire face à de nouveaux défis et de nouvelles opportunités d'un système électrique en pleine évolution technologique, du point de vue technique notamment ceux liés à l'alimentation des charges non linéaires.

L'accompagnement des systèmes de compensation aux réseaux électriques a une problématique importante due aux phénomènes d'enclenchement et de déclenchement des batteries de condensateurs.

Plusieurs types de ces nouvelles charges engendrent des perturbations importantes sur les batteries de condensateurs, ces perturbations peuvent être classées en deux catégories, qui sont:

- Les distorsions causées par les courants perturbateurs, tels que les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et les courants réactifs ;
- Celles engendrées par les tensions perturbatrices, telles que les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrées. [13]

III.2. Origines des harmoniques et inter harmoniques

Les harmoniques sont des ondes à fréquences multiples de la fréquence du réseau qui se superposent à l'onde fondamentale de fréquence 50 Hz.

La principale source des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements à base de l'électronique de puissance dits « semi-conducteur ».

Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter harmoniques est due aux fonctionnements de convertisseurs de fréquence, de variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle - commande.

Les harmoniques sont générées par des charges non linéaires absorbant un courant non sinusoïdal. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à de générateurs de courants harmoniques : appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc.

III.3. Caractérisations des harmoniques :

Les harmoniques dans le réseau électrique peuvent être caractérisées par différentes

grandeurs, parmi lesquelles on peut citer, ci-après, les plus importantes et les plus utilisées :

III.3.1. Le facteur de distorsion harmonique $T H D$

Le facteur de distorsion harmonique noté $T H D$ est déterminé pour donner une idée sur l'amplitude de la perturbation harmonique ; il est exprimé par l'expression suivante :

$$T H D = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left[\frac{V_h}{V_1} \right]^2} \quad (\text{III. 1})$$

V_1 : Valeur efficace de la tension fondamentale.

V_h : Valeur efficace de la tension harmonique du rang h

Ou encore par :

$$T H D (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (\text{III. 2})$$

I_1 : Valeur efficace du courant fondamental.

I_h : Valeur efficace du courant harmonique de rang h

III.3.2. Le facteur de distorsion

Le facteur de distorsion noté $F d i s t$ est donné par l'équation suivante :

$$F d i s t = \frac{I_{c1}}{I_c} \quad (\text{III. 3})$$

I_{c1} : La valeur efficace du courant fondamental de charge.

I_c : La valeur efficace du courant de charge.

Ce facteur nous renseigne sur la puissance déformante engendrée par les harmoniques.

$$D = S * [1 - (F d i s t)^2] \quad (\text{III. 4})$$

D : Puissance déformante.

S : Puissance apparente.

Le facteur de distorsion $F d i s t$ vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît. [14]

III.4. Phénomènes transitoires et perturbations

III.4.1. Régime transitoire d'enclenchement

L'enclenchement d'une batterie de condensateurs est accompagné d'un régime transitoire en courant et en tension, Une surintensité et une surtension apparaissent.

Nous mettrons en évidence ces deux phénomènes par plusieurs simulations à l'aide de logiciel MATLAB, ajoutant à cela un moyen pour atténuer ces deux phénomènes.

On fait une étude sur un réseau par un circuit électrique réaliser dans le MATLAB SIMULINK, composé de :

-Une source de tension simple 220 V

-un disjoncteur principal

-une ligne de résistance $0,00334\Omega$, réactance de $0,0088 \Omega$

-une charge variable de puissance active $P = 102,06 k W$ et de puissance réactive $Q = 114,3 k V$ subdivisé en quatre parties.

Finalisons cette simulation par des visualisations par scope, qui sont présentés dans les figures suivantes :

➤ **Etude d'un réseau sans compensation avec une charge variable :**

On fait varier la charge par un retard d'enclenchement de 0.1s entre chaque charge.

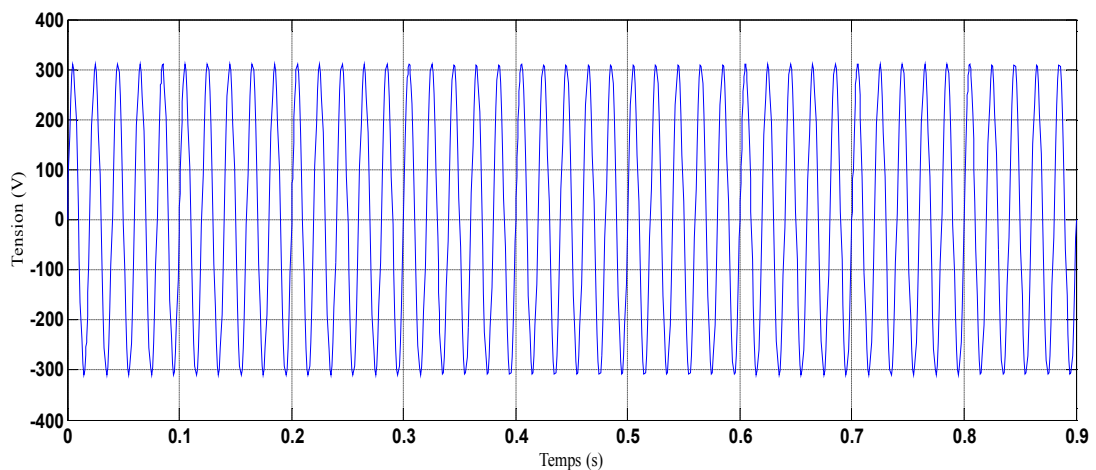


Figure III-1: Tension aux bornes de la source

La tension simple de la source est fixée à la valeur 220 V

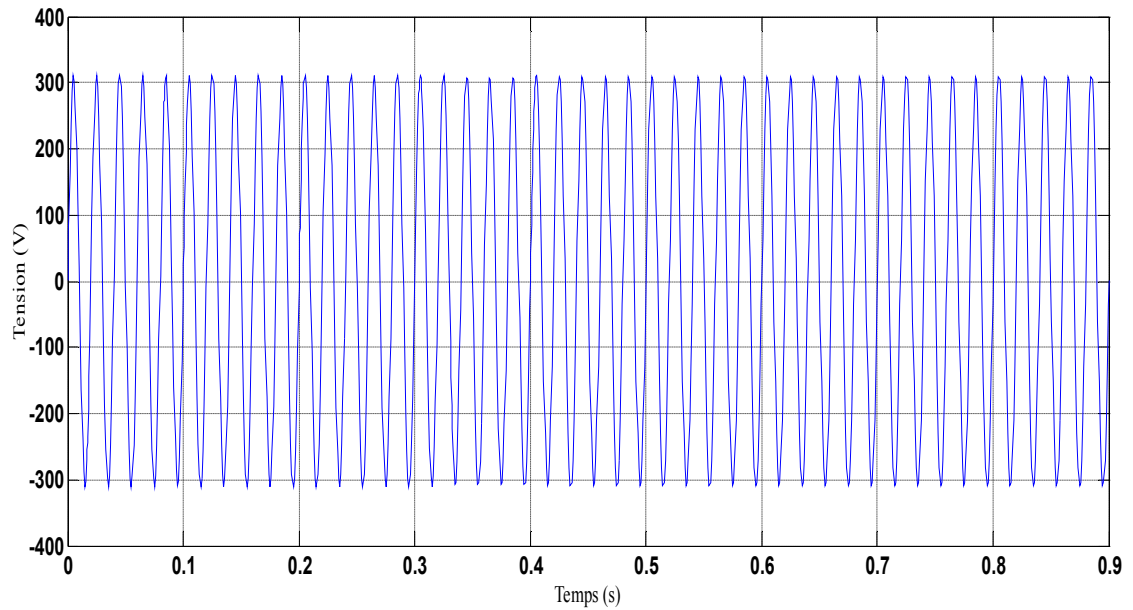


Figure III-2: Tension mesuré en aval du disjoncteur principal

Nous observons que la tension est diminuée légèrement par la variation de la charge à partir du premier enclenchement de la charge $t = 0.1s$.

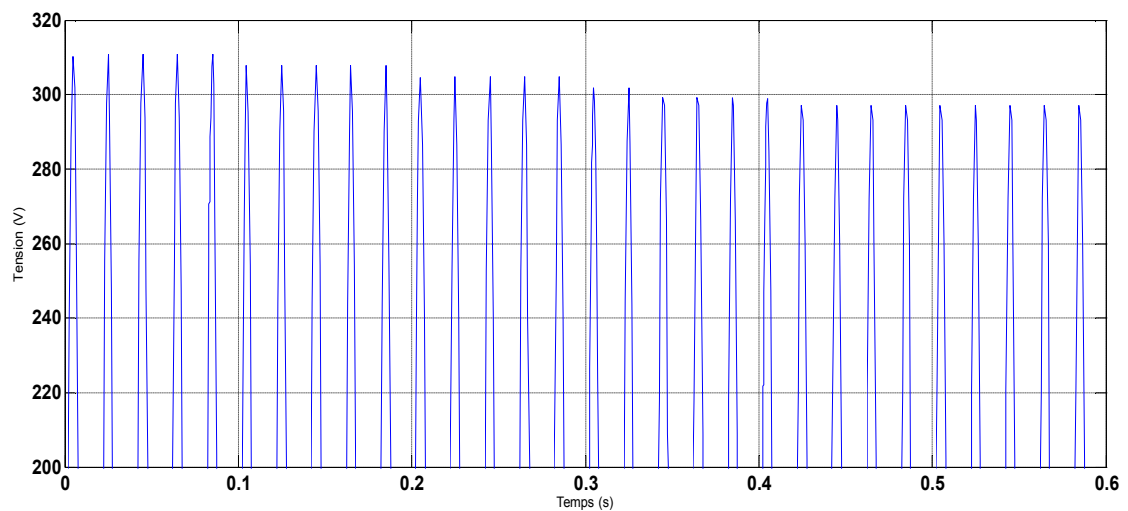


Figure III-3: Tension aux bornes de la charge

À l'enclenchement de la premier charge à l'instant $t = 0.1 s$, la tension baisse légèrement, à $t = 0.2s$ jusqu'à $t = 0.4s$ les trois autres charges se mettent en fonctionnement simultanément, provoquant une diminution de tension (chute de tension dans la ligne), baisse jusqu'à 295 V.

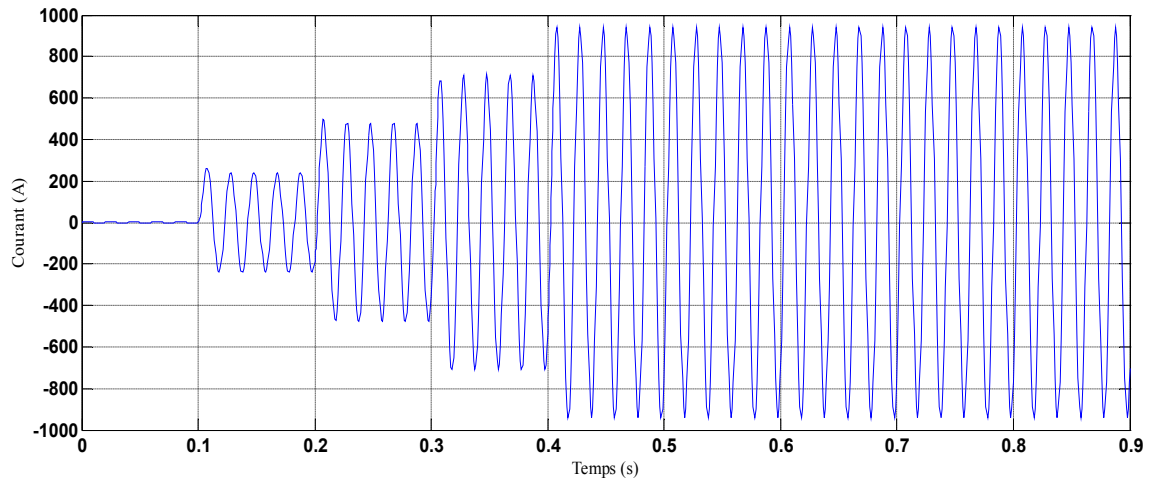


Figure III-4: Courant à la charge à l'enclenchement

La fig. (III-4) nous montre la variation de courant à la charge (consommation variable) après la fermeture des quatre disjoncteurs simultanément à $t=0.1s$ jusqu'à $t=0.4s$, retard de $0.1s$ à la fermeture pour chaque charge.

➤ **Etude d'un réseau compensé à l'enclenchement des batteries avec une charge variable**

Après avoir varié la charge, nous avons observé l'existence d'une chute de tension. On insère, en dérivation, quatre batteries de compensation de puissance $50 kVA$ pour chaque gradin, $16.66kVA$ par branche, Commandée par relais var métrique.

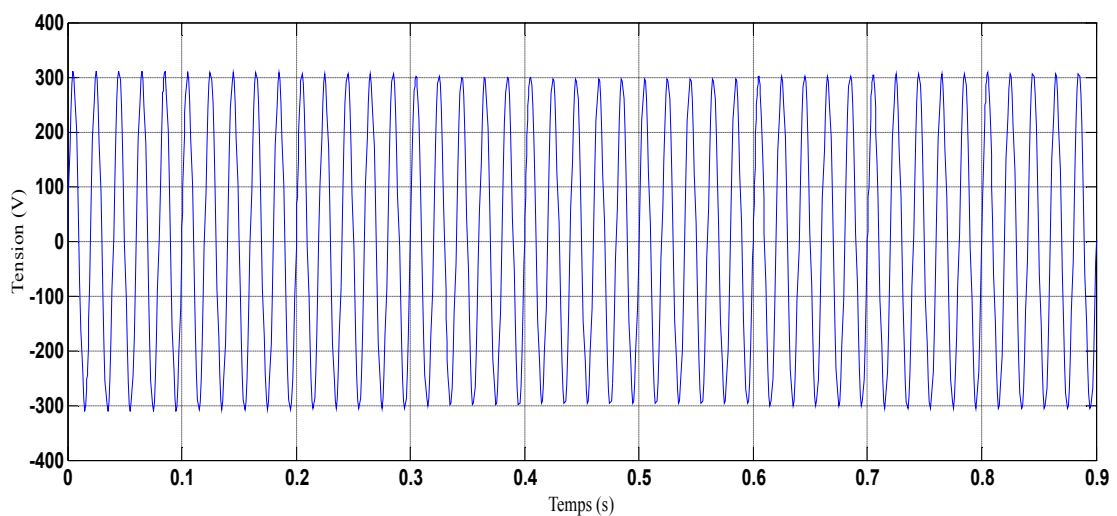


Figure III-5: Tension en aval du disjoncteur principal

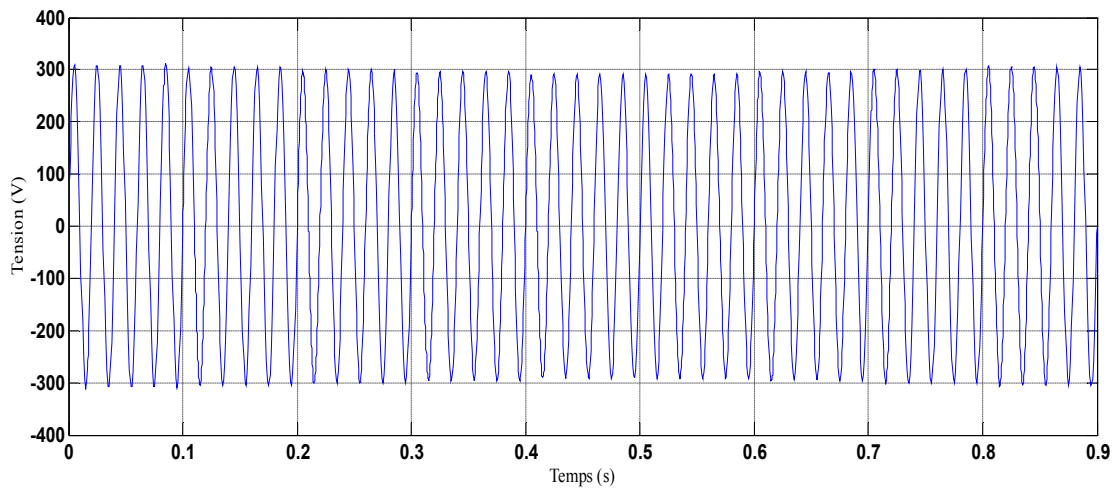


Figure III-6: Tension à la charge

On constate que la chute de tension dans la ligne augmente à chaque enclenchement des charges, de l'instant 0.1s jusqu'à $t = 0.6s$ les charges s'enclenchent simultanément, puis à partir de $t = 0.6s$ jusqu'à $t = 0.9s$ les charges se déconnectent simultanément, la chute de tension s'attéue.

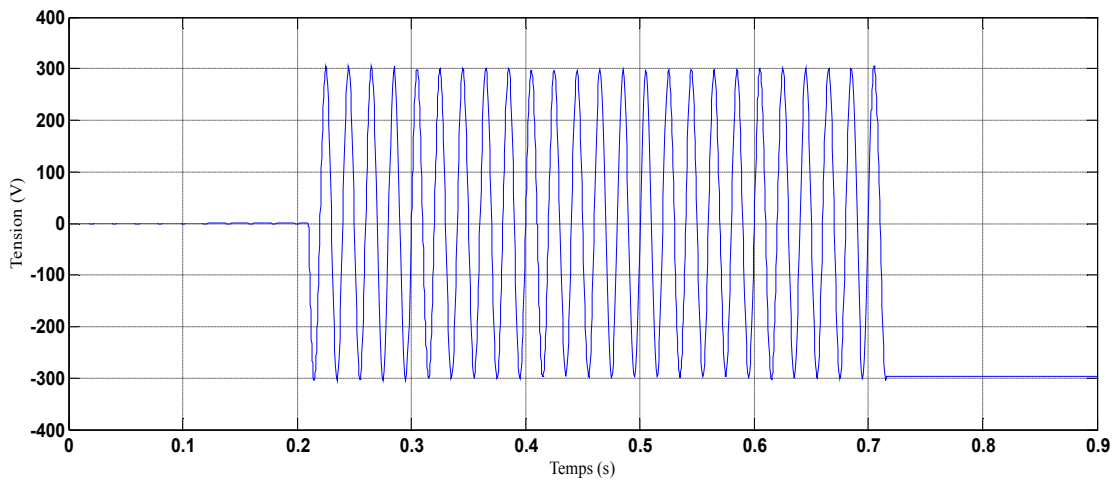


Figure III-7: Tension aux bornes des condensateurs

On voit que après l'ouverture du relais, le condensateur reste chargé à la tension crête du réseau (311V).

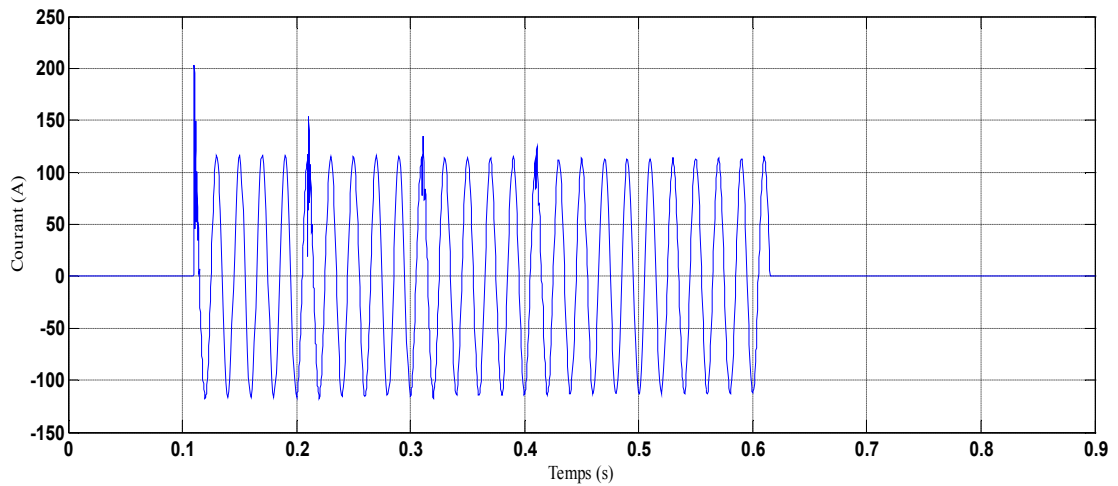


Figure III-8: Courant du premier condensateur à l'enclenchement

On remarque l'apparitions d'une forte surintensité lors de l'enclenchement, atteignant presque le double de sa valeur avant l'enclenchement.

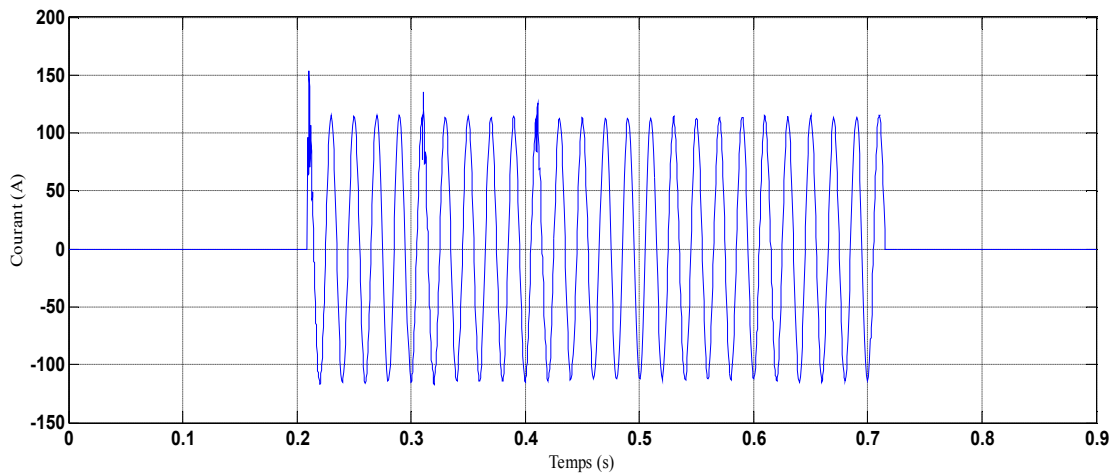


Figure III-9: Courant du deuxième condensateur à l'enclenchement

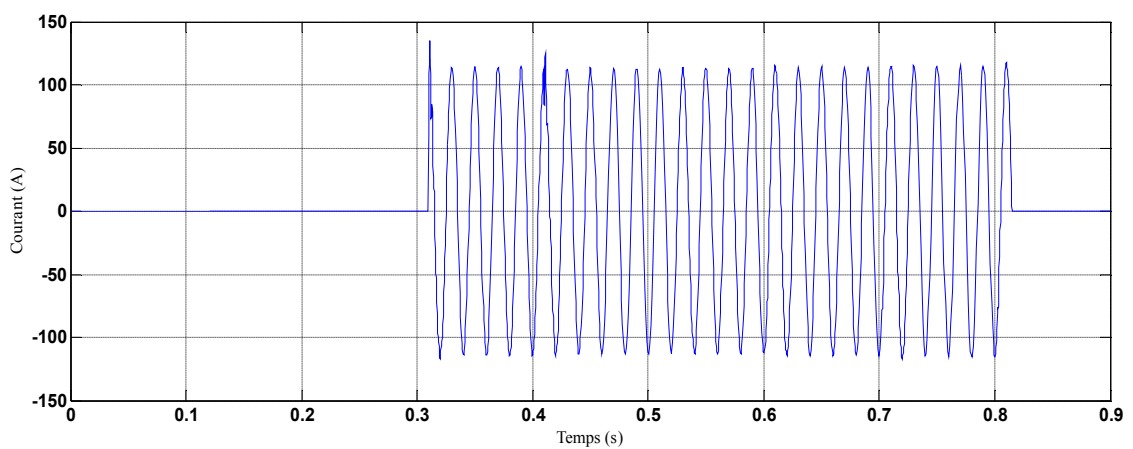


Figure III-10: Courant du troisième condensateur à l'enclenchement

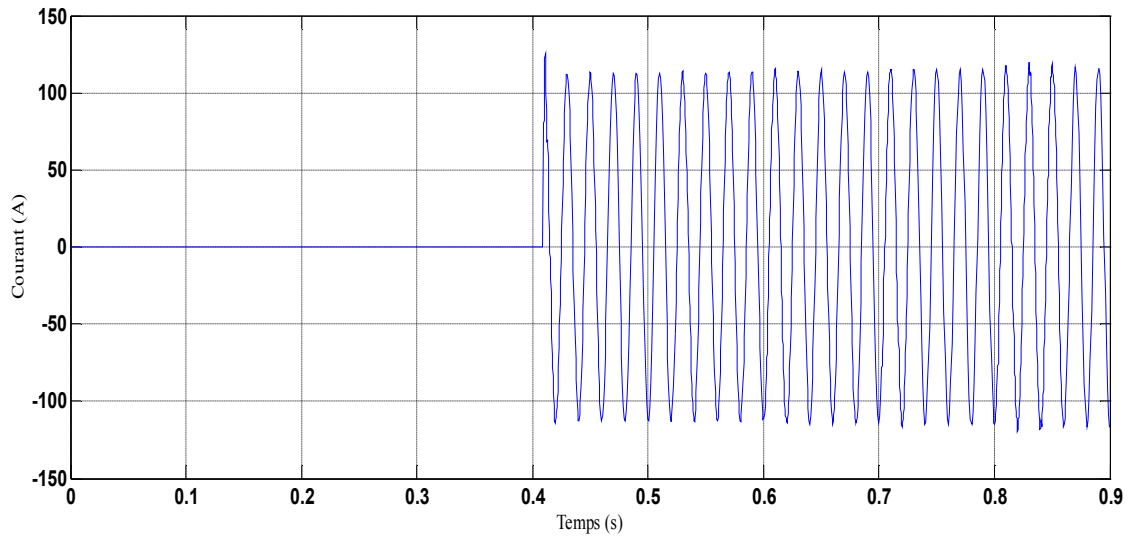


Figure III-11: Courant du quatrième condensateur à l'enclenchement

Nous constatons dans ces trois dernières, les pics de courant (la surintensité) ont diminué, comparés à celui de la figure III. 7 (enclenchement du premier condensateur).

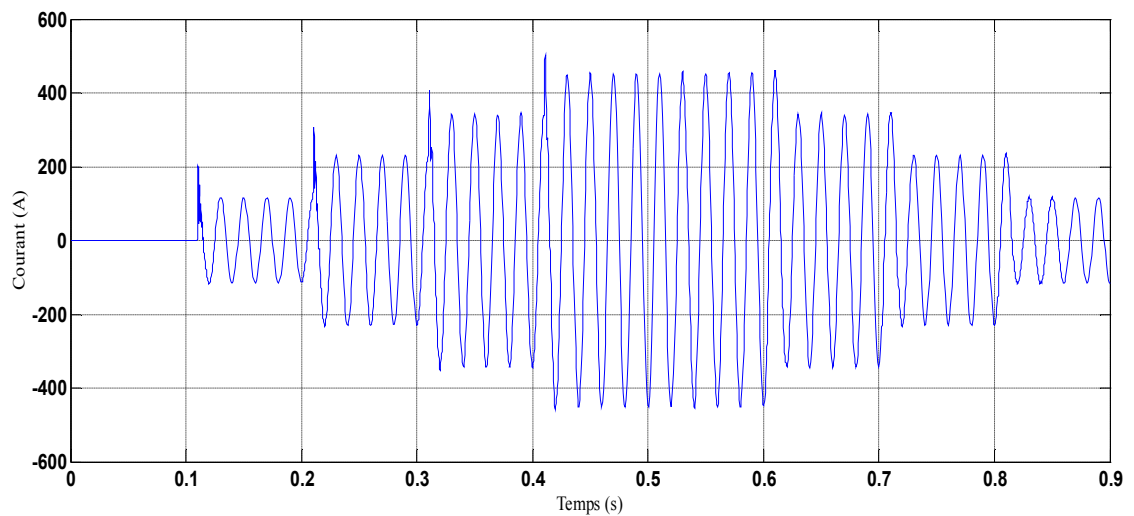


Figure III-12: Courant total des quatre condensateurs à l'enclenchement

Cette figure nous montre la surintensité qui apparaît à chaque enclenchement.

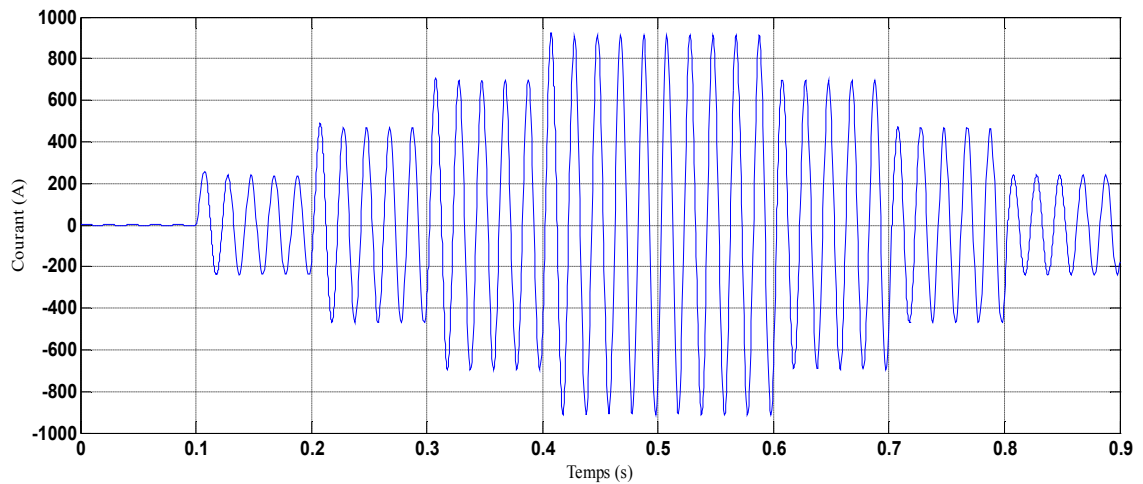


Figure III-13: Courant à la charge à l'enclenchement

Nous constatons que le courant à la charge est perturbé, à l'instant d'enclenchement le courant augmente puis se stabilise.

➤ **Etude d'un réseau compensé à l'enclenchement des condensateurs avec une charge variable (batterie de compensation en série avec une bobine de choc)**

On ajoute au circuit étudié précédemment une bobine dite de choc en série avec le condensateur pour chaque branche, pour atténuer les surintensités lors de l'enclenchement des condensateurs.

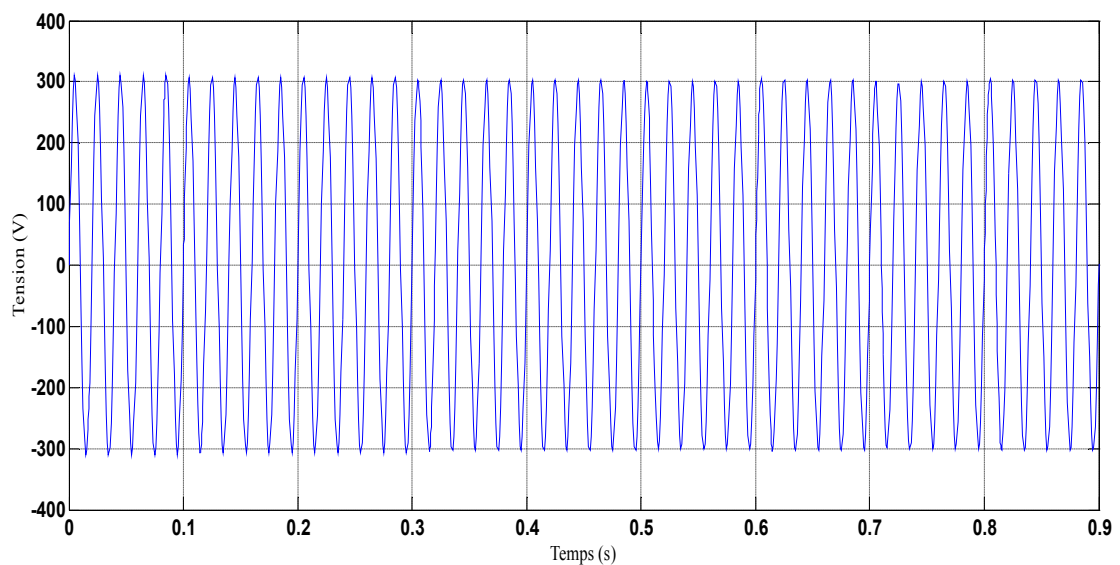


Figure III-14: Tension en aval du disjoncteur principal

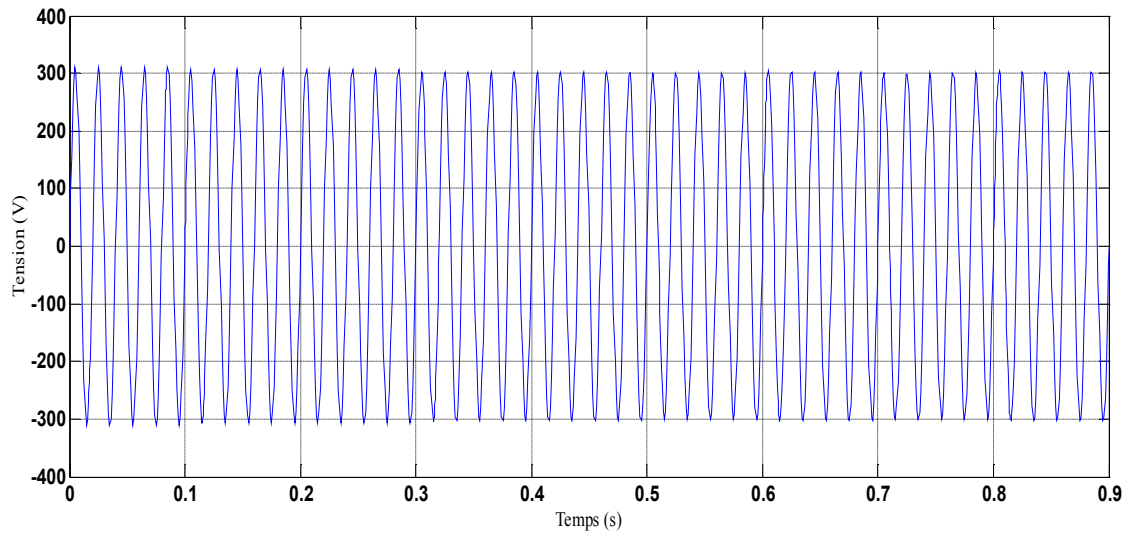


Figure III-15: Tension à la charge

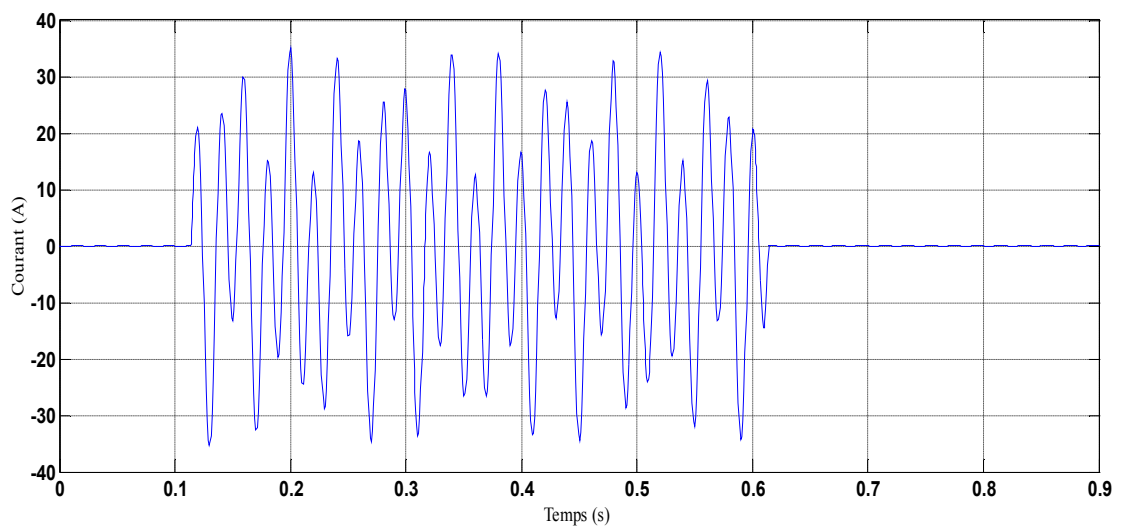


Figure III-16: Courant du premier condensateur à l'enclenchement

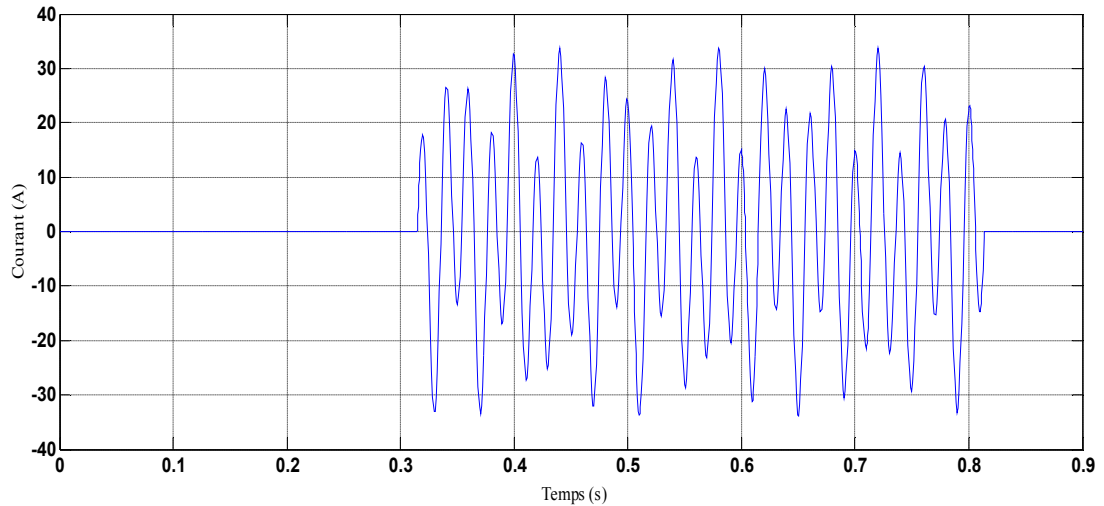


Figure III-17: Courant du deuxième condensateur à l'enclenchement

Nous constatons une diminution des pics de courants avec l'insertion des bobines de choc, comparés aux courants d'enclenchements précédents (comme le montrent les figures III.8- III.9- III.10 et III.11)

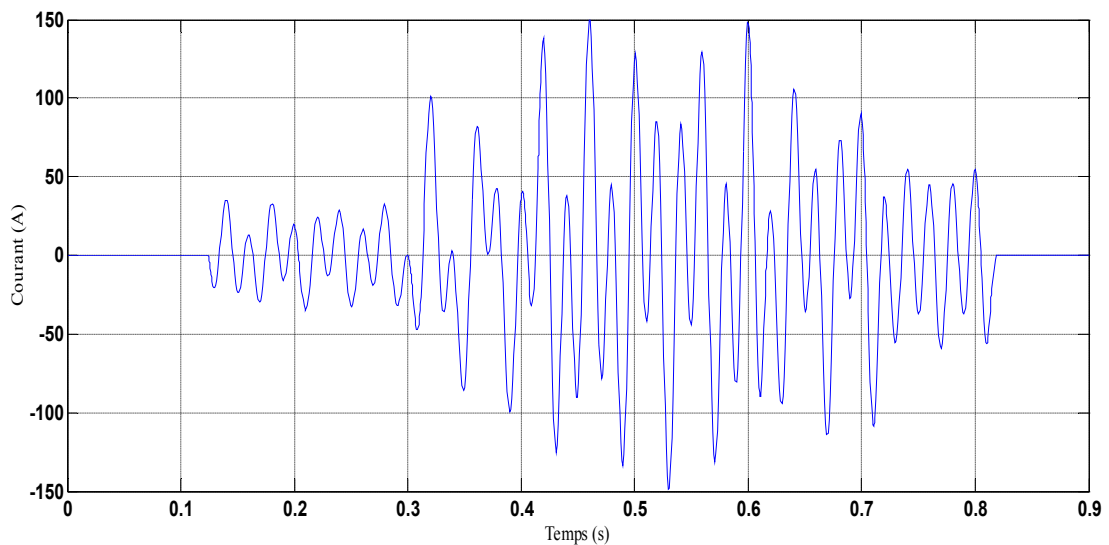


Figure III-18: Courant totale injecté par les condensateurs à l'enclenchement

Nous remarquons aussi l'absence des pics du courant à l'enclenchement, en présence des bobines, comme il est illustré dans cette figure.

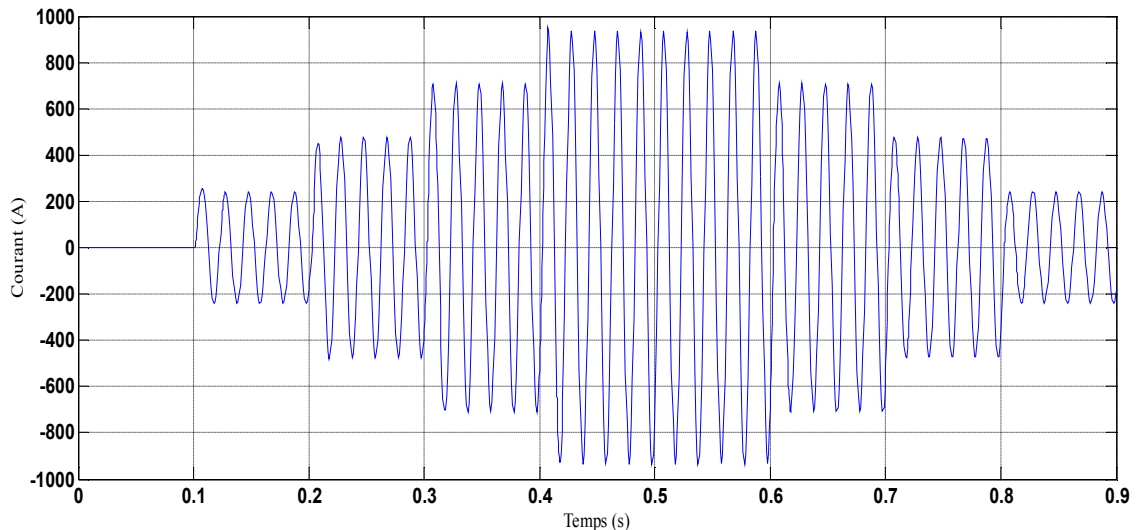


Figure III-19: Courant à la charge à l'enclenchement

Avec la variation de la charge et l'enclenchement des condensateurs, les pics du courant à l'enclenchement de chaque condensateur sont atténués par la présence des bobines.

III.4.2. Régime transitoire de déclenchement

En pratique, les tensions n'augmentent pas aussi rapidement ni d'une façon aussi régulière à chaque réamorçage du fait qu'il n'apparaît pas toujours lorsque la différence de tension est maximale et que l'amortissement joue dans une certaine mesure.

Néanmoins, les réamorçages successifs à la coupure d'une batterie peuvent conduire à des surtensions élevées, dangereuses pour le réseau et les condensateurs.

Par ailleurs, les surintensités entraînées sont proportionnelles à la différence de tension existant avant l'amorçage entre le réseau et la batterie. En conséquence, ces surintensités ont des amplitudes toujours supérieures à celles rencontrées à l'enclenchement et sont donc plus dangereuses pour l'ensemble des matériels.

Il est donc primordial d'utiliser un appareillage de manœuvre dont la rapide régénération diélectrique évite tout réamorçage.

Nous réalisons la même étude que celle de l'enclenchement, pour le régime transitoire de déclenchement, avec des visualisations représentées dans les figures suivantes.

➤ **Etude d'un réseau au déclenchement des condensateurs avec une charge variable**

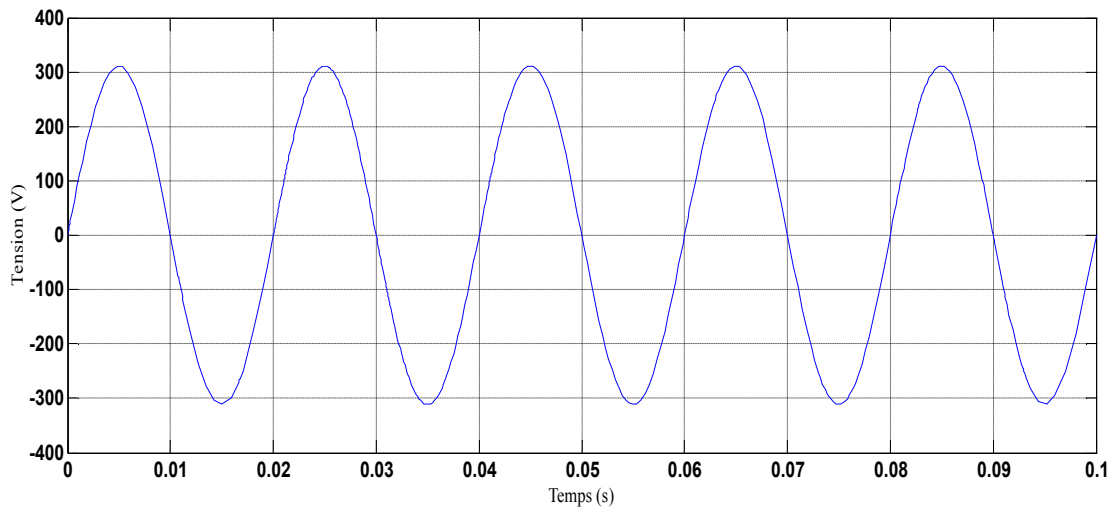


Figure III-20: Tension à la source

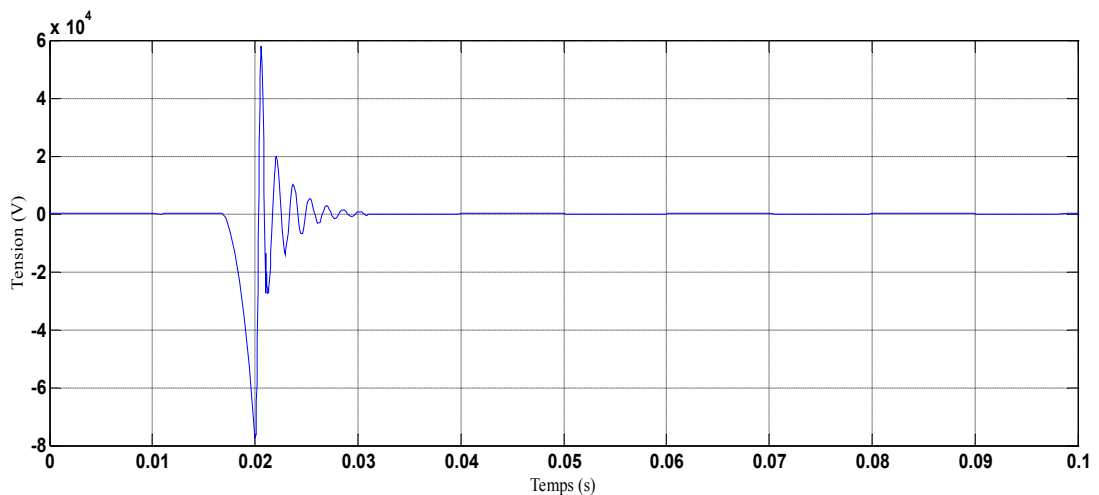


Figure III-21: Tension à l'aval du disjoncteur principal lors d'un déclenchement

Après le premier déclenchement des condensateurs $t = 0.011s$, la surtension baisse brièvement dans une durée très courte, entre 0.011s jusqu'à 0.03s, elle atteint 60 000V puis elle se stabilise et elle garde la tension du réseau jusqu'au déclenchement des autres condensateurs, puis elle s'annule.

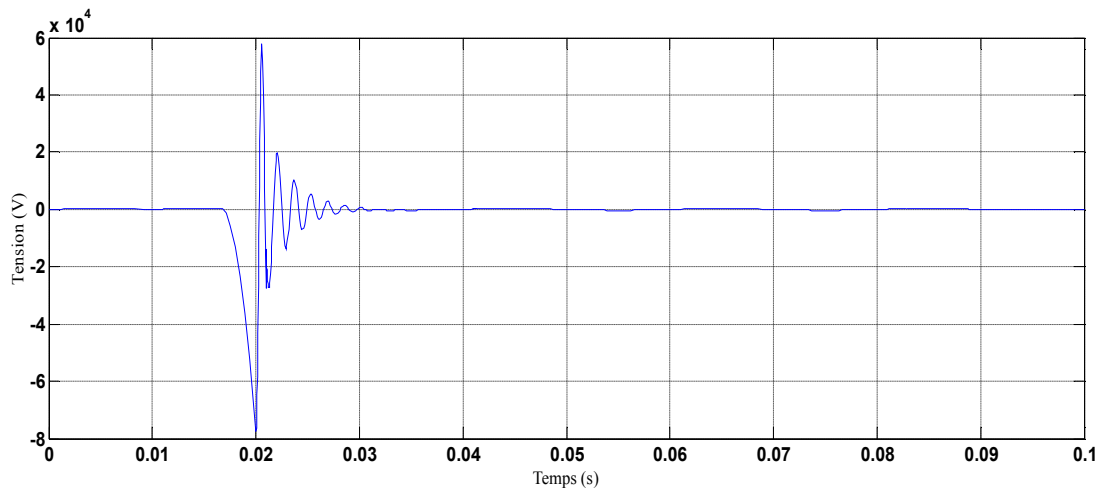


Figure III-22: Tension aux bornes de la charge lors de déclenchement

Cette figure présente le phénomène de déclenchement à la charge, lors de l'ouverture des disjoncteurs de charge, l'arc apparaît à $t = 0,011$ s la tension de condensateur se décharge rapidement sur la charge, ce qui provoque une brève surtension élevée. Puis elle se stabilise et garde la tension du réseau jusqu'à ce que les autres condensateurs soient déclenchés, puis elle s'annule.

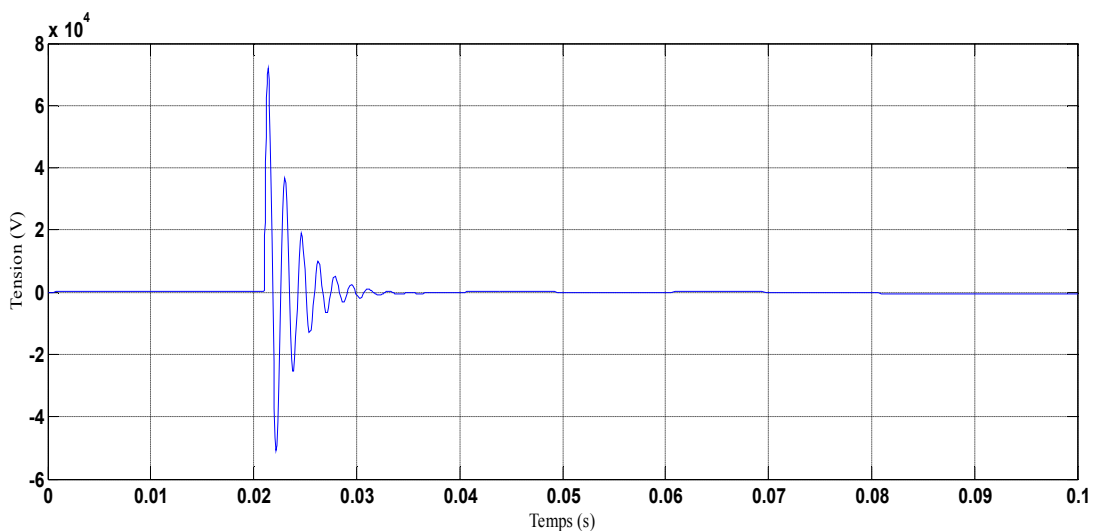


Figure III-23: Tension aux bornes de condensateur

On remarque que le condensateur est initialement chargé à la tension crête du réseau 311 V, lors de l'ouverture de l'appareil de manœuvre, la tension crête se décharge brusquement accompagnée d'une oscillation de tension qui atteint 70 000 V.

Après oscillation, la tension se stabilise et reste chargée à la tension crête du réseau.

Nous avons relevé une découpe dans la figure précédente pour voir la forme du courant avant le déclenchement entre $t = 0s$ et $t = 0.02s$, illustré dans la figure suivante :

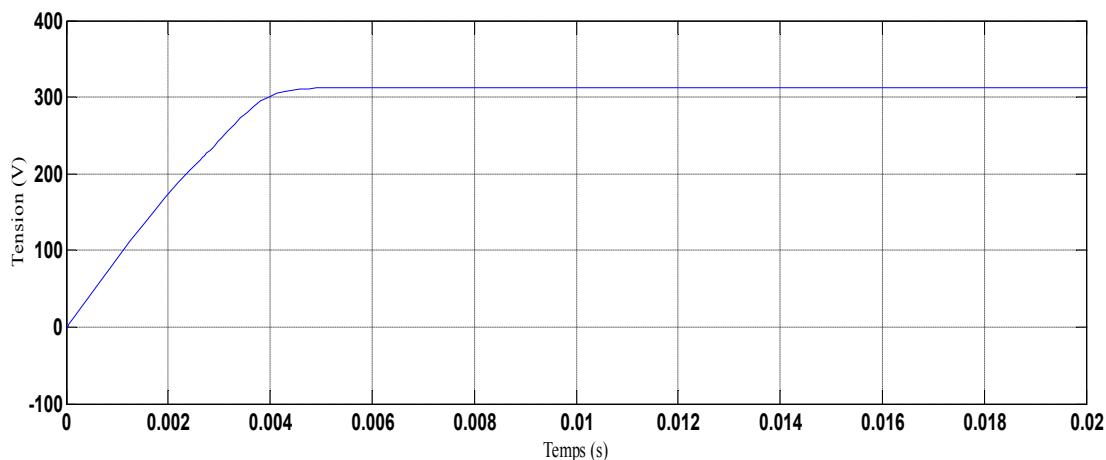


Figure III-24: Tension aux bornes du condensateur avant le déclenchement

À $t = 0s$ jusqu'au déclenchement de condensateur $t = 0.02s$ le condensateur est initialement chargé à la tension du réseau 311 V.

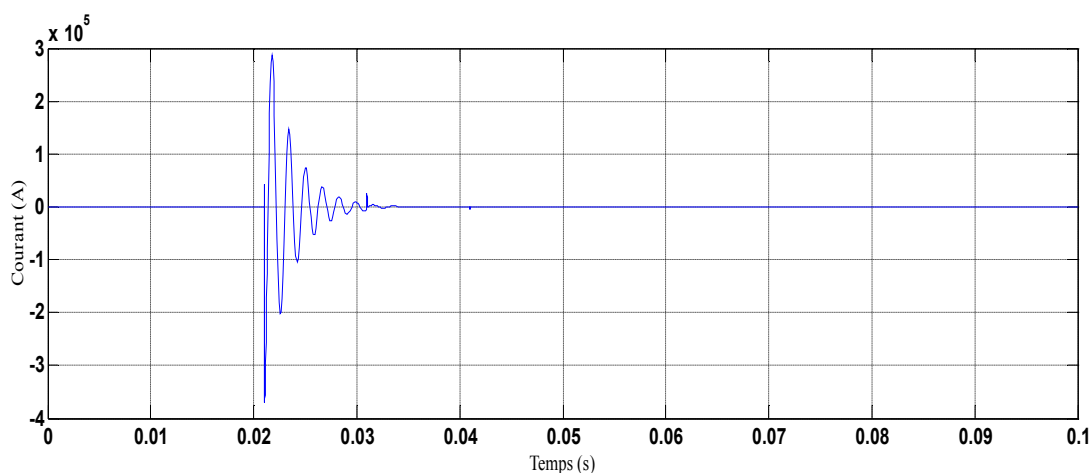


Figure III-25: Courant dans un condensateur lors de déclenchement

Cette figure illustre la surintensité engendrée dans le condensateur lors de l'ouverture de relais, elle est proportionnelle à la différence de tension existant avant l'ouverture entre le réseau et la batterie. En conséquence, cette surintensité a une amplitude supérieure à celle rencontrée à l'enclenchement. Comme le montre la figure.

Nous avons enregistré une découpe dans la figure précédente pour observer la forme du courant avant le déclenchement entre $t = 0s$ et $t = 0.005s$, illustré dans la figure suivante :

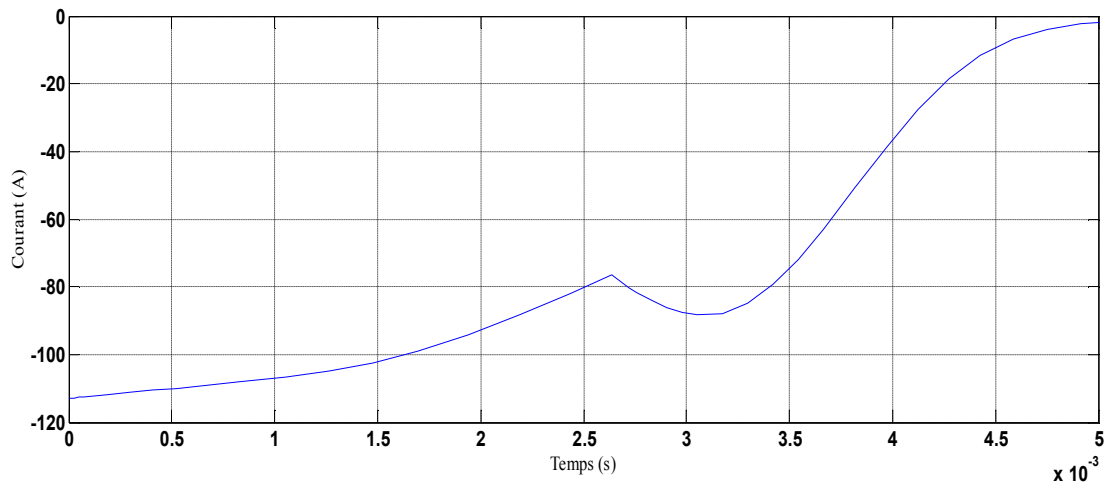


Figure III-26: Courant dans un condensateur avant le déclenchement

À $t = 0$ s jusqu'à $t = 0.011$ s le courant est négatif égale à (-118 A), lors de déclenchement, un arc électrique peut prendre naissance vue la brusque surintensité jusqu'à es son annulation après une courte durée.

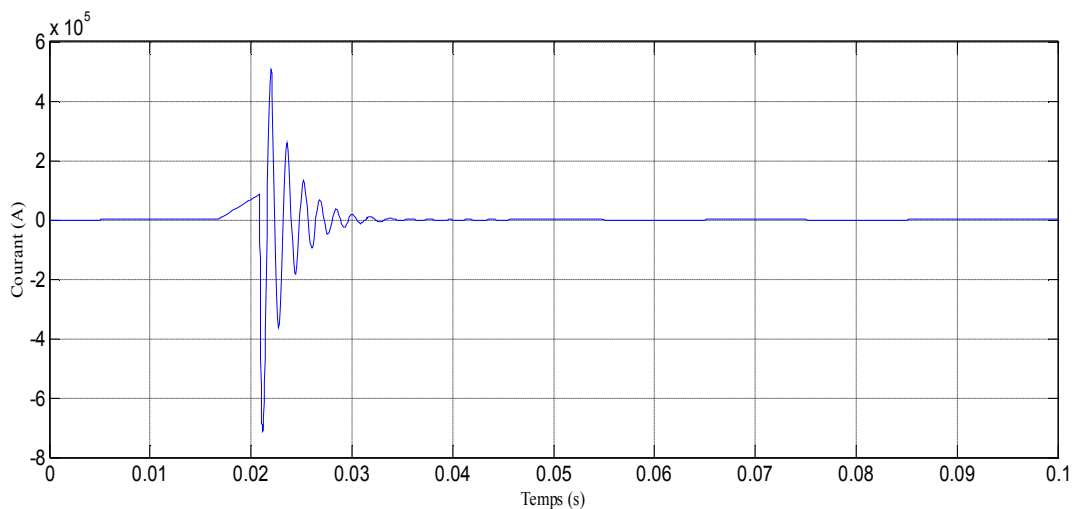


Figure III-27: Le Courant total des quatre condensateurs au déclenchement

On remarque que Lors de déclenchement de premier condensateur à $t = 0.011$ s phénomène d'arc crée, provoque une surintensité dangereuse.

La figure suivante présentant une découpe de la précédente dans l'intervalle du temps $[0s - 0.005s]$, illustre la forme de courant avant le déclenchement.

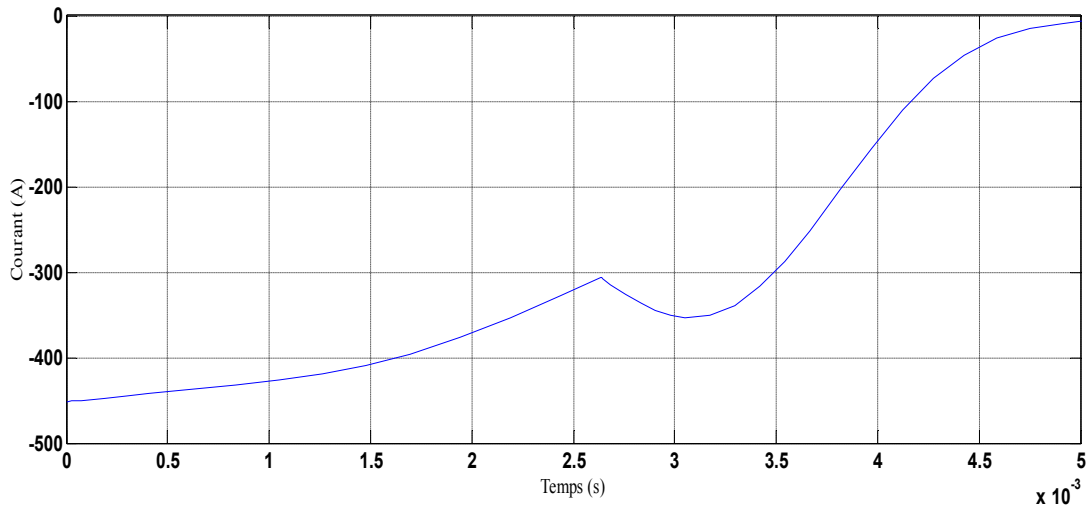


Figure III-28: Le Courant total des quatre condensateurs avant le déclenchement

On remarque qu'à $t = 0$ s le courant n'est pas nul, il est égale à la somme des quatre courantes injectés par les condensateurs (-460 A) comme elle le montre la figure (III. 28).

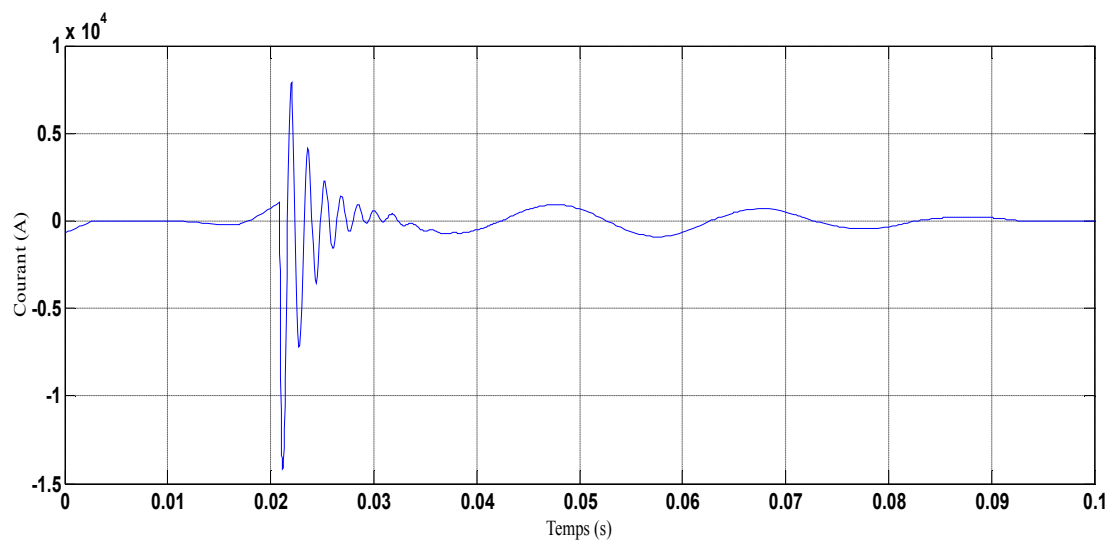


Figure III-29: Courant à la charge au déclenchement

On constat que l'arc apparait au premier déclenchement à $t = 0.011$ s, accompagner d'une oscillation intensive, qui dure tout le long des déclenchements.

- **Etude d'un réseau compensé au déclenchement des gradins avec une charge variable (batterie de compensation en série avec une bobine de choc)**

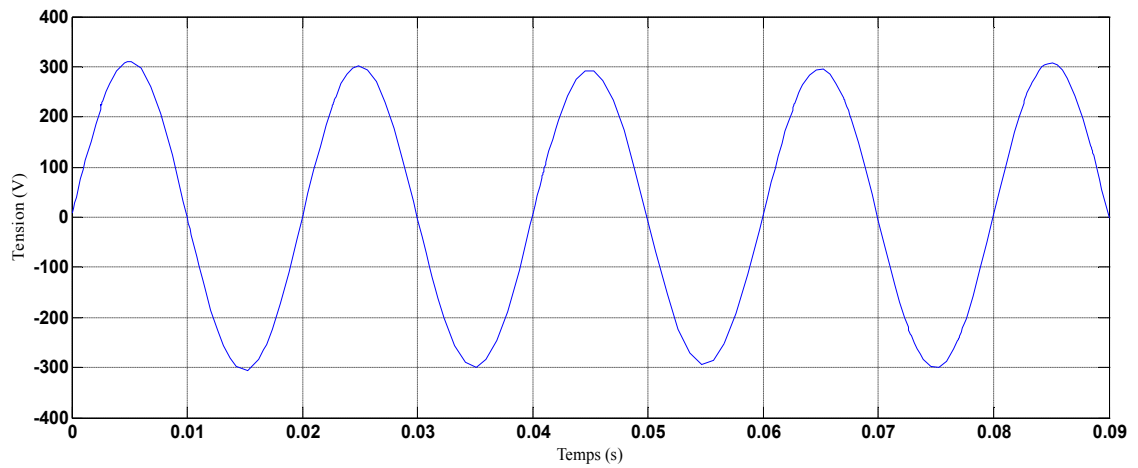


Figure III-30: Tension à l'aval du disjoncteur principal au déclenchement

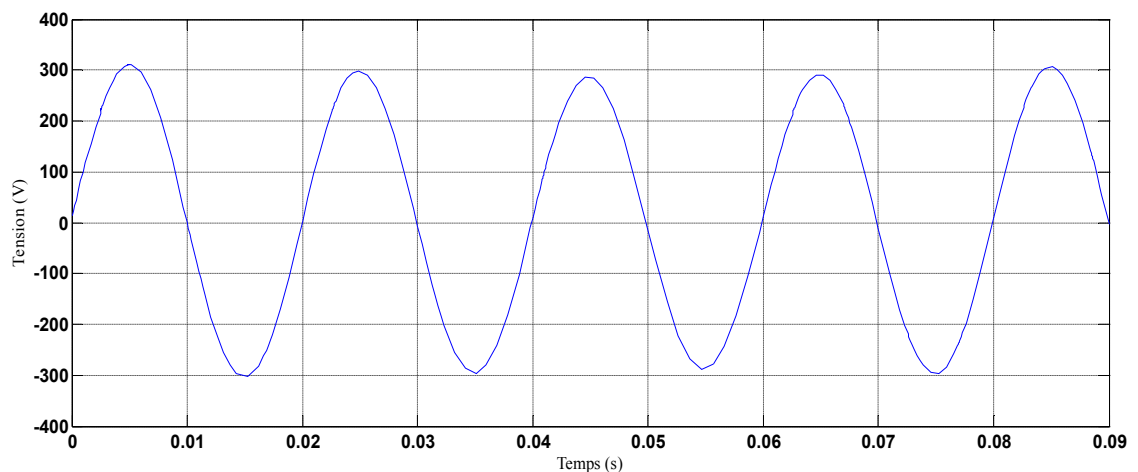


Figure III-31: Tension aux bornes de la charge au déclenchement

On constate dans ces deux dernières une atténuation des surtensions causé par le déclenchement des condensateurs.

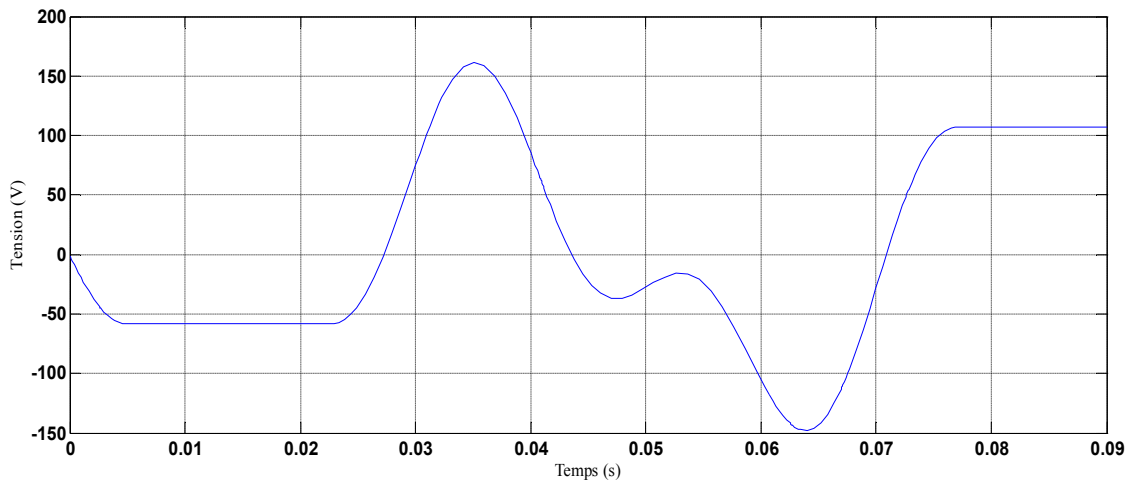


Figure III-32: Tension aux bornes du condensateur au déclenchement

On constate que la présence de la bobine a un effet très important, sur les surtensions de déclenchement, ces dernières sont réduites jusqu'à 160 V aux bornes du condensateur.

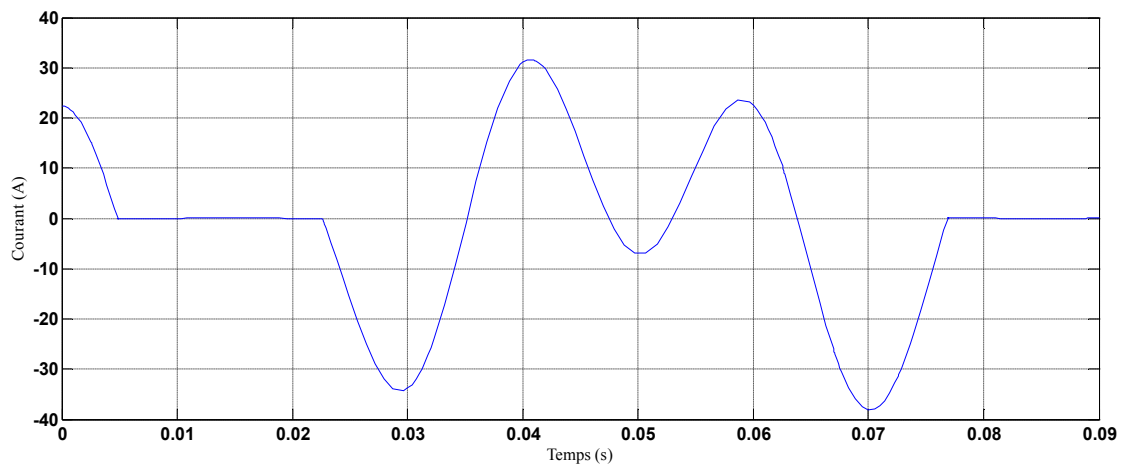


Figure III-33: Courant dans un condensateur au déclenchement

Cette figure illustre la diminution de l'arc, jusqu'à 32 A à l'ouverture du relais de condensateur en présence de la bobine.

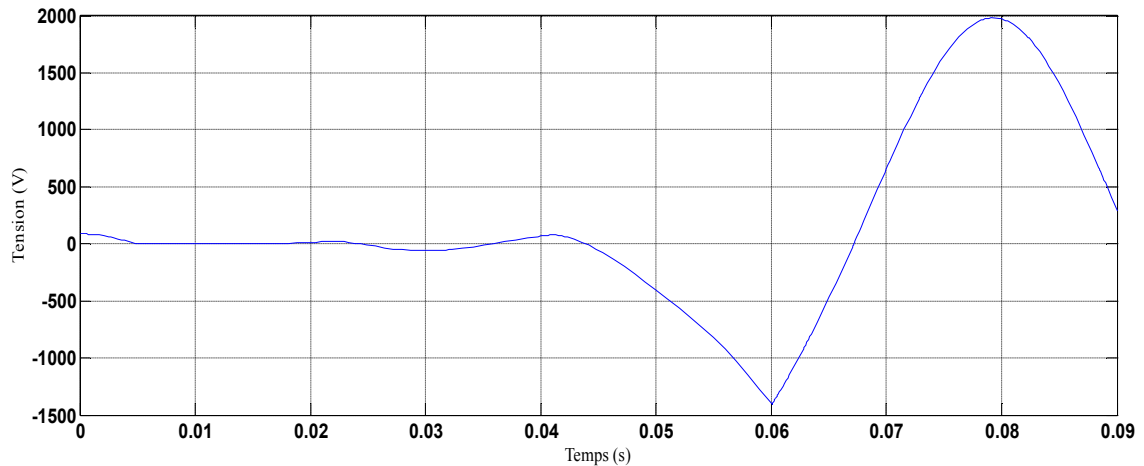


Figure III-34: Courant total des condensateurs au déclenchement

On constate que l'arc s'atténue à 2000 A au total des courants injectés par les condensateurs.

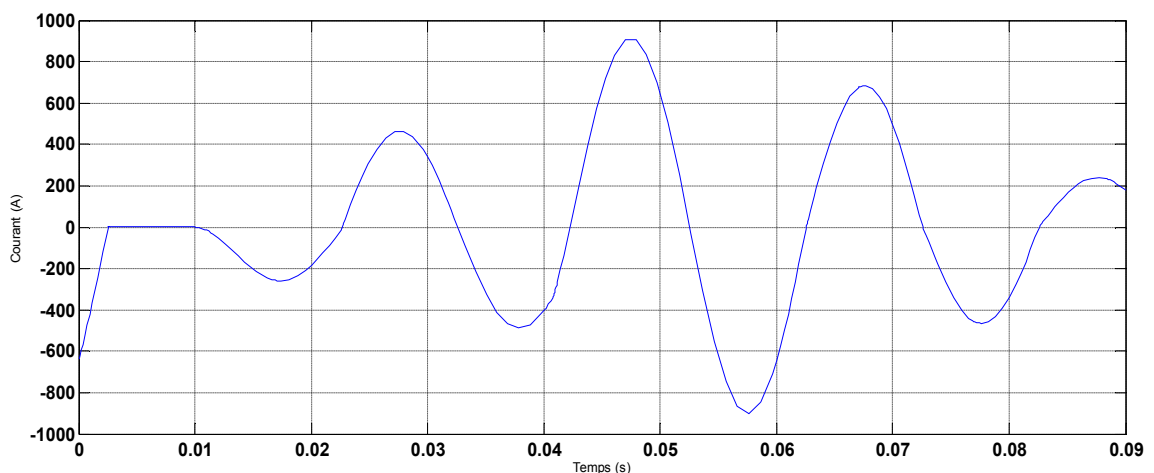


Figure III-35: Le courant à la charge au déclenchement

On constate que le pic de l'arc s'est atténué à 900 A, en présence de la bobine.

III.4.3. Les inductances de choc

Les inductances devront être adaptées en fonction des possibilités des fabricants et des considérations économiques.

Installation : intérieur - extérieur.

Courant permanent nominal : 1,3 à 1,5 In.

Tenue thermique aux surintensités momentanées : 30 à 50 In.

Tenue électrodynamique : I_c crête au point de raccordement.

Il s'agit d'inductance dans l'air sans noyau magnétique.

Les valeurs les plus utilisées sont des inductances de 50, 100 ou 150m H

III.5. Effets de résonance

Le phénomène de résonance est à l'origine des plus importantes distorsions harmoniques dans les réseaux de distribution et la cause majeure de surcharges des condensateurs de compensation.

Les phénomènes décrits ci-dessous sont du type "résonance parallèle".

Considérons le schéma simplifié suivant, représentant une installation comprenant :

- un transformateur d'alimentation,
- des charges linéaires,
- des charges non linéaires génératrices de courants harmoniques,
- des condensateurs de compensation.

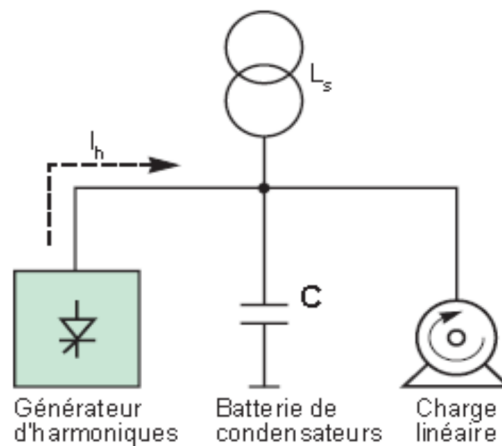


Figure III-36: Schéma simplifié d'une installation

Pour une analyse harmonique, le schéma équivalent est le suivant :

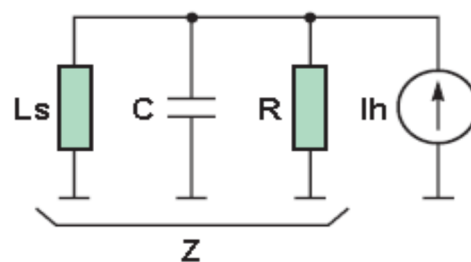


Figure III-37: Schéma équivalent pour analyse harmonique

L : Inductance de l'alimentation (réseau + transfo + ligne),

C : capacité de compensation,

R : résistance des charges linéaires,

I_h : Générateurs d'harmoniques.

Le module de l'impédance vue par les courants harmoniques est représenté sur la figure ci-dessous :

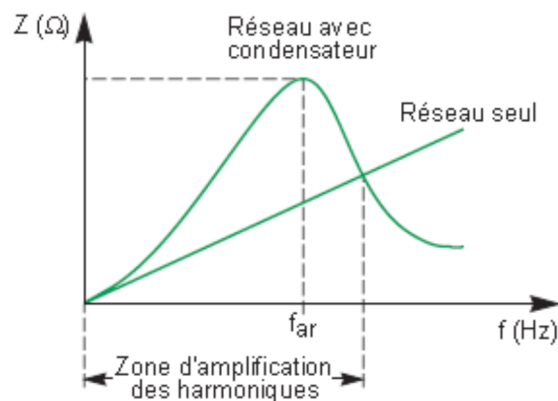


Figure III-38: Module de l'impédance Z en fonction de la fréquence

Interprétation physique :

- la fréquence f_{ar} est la fréquence d'accord du circuit (L et C),
- à la fréquence f_{ar} le module de l'impédance du réseau vu par les harmoniques est maximal. Il y a donc apparition de tensions harmoniques importantes, et donc une forte distorsion de tension, dans la zone d'amplification des harmoniques il y a dans le circuit (L et C) circulation de courants harmoniques supérieurs aux courants harmoniques injectés.

Le schéma suivant montre les éléments du circuit affectés par les courants harmoniques :

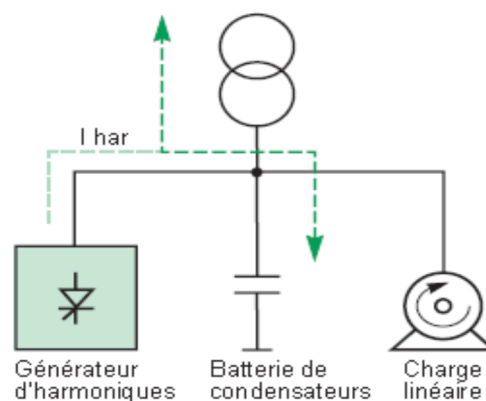


Figure III-39: Circulation des courants harmoniques

Le réseau d'alimentation ainsi que les condensateurs de compensation sont soumis à des courants harmoniques importants et donc à des risques de surcharge.

III.6. Surcharge harmonique

Les tensions harmoniques appliquées aux condensateurs provoquent la circulation de courants proportionnels à la fréquence des harmoniques. Ces courants sont responsables de pertes supplémentaires. Les tensions harmoniques augmentent aussi la valeur crête de la tension, ce qui entraîne un vieillissement accéléré des condensateurs.

Il en résulte donc une surcharge de près de 20 % par rapport à un fonctionnement sous tension parfaitement sinusoïdale.

Les condensateurs de type standard peuvent supporter une surcharge en courant de 30 % (pour supporter l'effet cumulé des harmoniques et des fluctuations de tension).

En cas de forte distorsion harmonique, on doit utiliser des condensateurs de type H, pouvant supporter 1,43 In.

La surcharge est due à une surintensité temporaire ou à une surintensité permanente :
Surintensité permanente liée à une élévation de la tension d'alimentation, la circulation d'un courant harmonique due à la présence de charges non linéaires telles que convertisseurs statiques (redresseurs, variateurs de vitesse), fours à arc ...,
Surintensité temporaire liée à une mise sous-tension de gradin d'une batterie. [16]

III.7. Déséquilibre

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes par rapport aux autres de 120°.

La tension inverse (ou homopolaire) est provoquée par les chutes de tension le long des impédances du réseau dues aux courants inverses (ou homopolaire) produits par les charges déséquilibrées qui conduisent à des courants non identiques sur les trois phases (charges BT connectées entre phase et neutre, charges monophasées ou biphasées MT telles que machines à souder et fours à induction).

Les défauts monophasés ou biphasés provoquent des déséquilibres jusqu'au fonctionnement des protections.

➤ Origines

Charges déséquilibrées (charges monophasées de forte puissance).

➤ **Effets**

Le principal effet est le sur échauffement des machines asynchrones triphasées.

En effet, la réactance inverse d'une machine asynchrone est équivalente à sa réactance pendant la phase de démarrage. Les courants de phase peuvent alors différer considérablement.

Ce qui accroît l'échauffement de la ou des phases parcourues par le courant le plus élevé et réduit la durée de vie de la machine.

En pratique, un taux de déséquilibre de tension de 1 % pendant une longue période et 1,5 % de moins de quelques minutes est acceptable.

➤ **Solutions envisagées**

Les solutions consistent à :

- Equilibrer les charges monophasées sur les trois phases ;
- Diminuer l'impédance du réseau en amont des générateurs de déséquilibre en augmentant les puissances des transformateurs et la section des câbles ;
- Prévoir une protection adaptée des machines ;
- Utiliser des charges L, C judicieusement raccordées. [17]

III.8. Fluctuations de tension

La **présence d'une batterie** augmente l'impédance équivalente de la source (donc la chute de tension). En effet, l'admittance Y_C de la batterie est capacitive, alors que la partie imaginaire de l'admittance Y_S de la source est inductive, donc de signe opposé.

Il faut mentionner, également, que chaque enclenchement de gradin provoque un bref mais violent **appel de courant** qui réduit la durée de vie des contacts de disjoncteurs et celle des condensateurs. Cela peut être significatif si le nombre de manœuvres atteint quelques dizaines par jour. [7]

III.9. Perturbation électromagnétique

Phénomène électromagnétique susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système. Ces phénomènes sont les harmoniques, les fluctuations de tension, les creux de tension, les coupures brèves, les déséquilibres de tension, les variations de fréquence de l'alimentation, les composantes continues et la transmission des

signaux sur le réseau par courant porteur. [19]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de perturbations et leurs degrés de nuisance qui peuvent prendre naissance dans le système de compensation d'énergie réactive et leurs origines avec des solutions envisageables.

Après avoir fait une étude sur les deux phénomènes transitoires qui apparaissent lors de l'enclenchement et déclenchement des condensateurs par plusieurs simulations, on a montré l'augmentation des pics des courants et la surélévation de la tension lors de déclenchement. Pour cela, nous avons proposé une solution pour atténuer cette amplification, avec l'insertion d'une bobine de choc en série avec le condensateur.

On a aussi détaillé des solutions pour les problèmes liés aux condensateurs en présence d'harmoniques.

Cependant, les perturbations ne doivent pas être subies comme une fatalité car des solutions existent. Leur définition et leur mise en œuvre dans le respect des règles de l'art, ainsi que leur maintenance par des spécialistes permettent une qualité d'alimentation personnalisée adaptée aux besoins de l'utilisateur.

Connaitre les différents types de perturbations nous facilite une protection contre ces dernières.

Chapitre IV

CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DES MOYENS DE PROTECTION

IV.1. Introduction

Le plan de protection est un compromis entre les objectifs de sensibilité, de rapidité et de fiabilité. Outre un bon fonctionnement en régime normal, il doit permettre la sécurité des personnes et des biens, n'éliminer que la partie en défaut et assurer la continuité de service de la partie en amont du dispositif de protection.

Un système de protection peut être défini comme étant un ensemble de dispositifs plus ou moins complexes dont le rôle est l'élimination des éléments en défaut en laissant, dans la mesure du possible, les éléments sains en service et de limiter les dommages qui pourraient être causés à l'élément protégé.

Dans ce chapitre, nous allons dimensionner l'ensemble des appareils de protection pour un meilleur fonctionnement.

IV.2. Choix des appareils de protection

L'appareillage électrique constitue un ensemble de produits très variés, dont le rôle est d'assurer le service que l'on exige des installations électriques, de protéger celles-ci contre les défauts accidentels et de garantir un fonctionnement correct des charges utilisatrices.

Leur fonction de base est la connexion et la déconnexion des circuits, réalisée soit volontairement sur l'ordre d'un opérateur, soit automatiquement sur l'ordre d'un appareillage auxiliaire ou d'un déclencheur.

IV.3. Les différents types de protection

L'activité de l'appareil est basée sur la nature du dispositif de protection et cela dépend du type de protection visé :

- contre les surcharges ;
- contre les courts circuits. [20]

IV.4. Problème de la protection

Le problème de la protection des installations consiste à définir la nature du défaut contre lequel on doit protéger l'équipement électrique puis à choisir l'appareil capable de détecter les défauts et de procéder à leur suppression. Les principales perturbations sur un système de compensation se traduisent :

- Les surintensités dues aux surcharges ou court circuits
- Les surtensions ou les baisses de tension

Tableau IV-1: Les contraintes et solutions de la protection

Perturbations	Causes	Effets	Moyens de protection
Surcharges	-Lorsque les récepteurs demandent une puissance importante dans un circuit électrique	-Accroissement anormal de courant d'où échauffement lent mais pouvant entraîner la détérioration de l'installation	-disjoncteur -Un relais magnétique -Coupe-circuit à fusible
Courts circuits	-Elévation brutale d'un courant absorbé par le circuit due à un contact électrique entre deux conducteurs de polarités différentes	-Création d'un arc électrique -Echauffement très important	-disjoncteur avec relais magnétique -Temps de coupure inférieur à celui de l'échauffement
Surtensions	-Lors de l'extinction de l'arc, une apparition de surtension qui provoque un danger pour les batteries de compensation	-Une surtension peut provoquer une détérioration des appareils	-Séparation des circuits de tension -Insertion des bobines de chocs en série avec les condensateurs
Surintensités	-L'enclenchement d'une batterie est accompagné d'une surintensité, dont l'amplitude et la fréquence dépendent des caractéristiques du réseau amont et du nombre des batteries	-une grande surintensité entraîne des dégâts.	-Insertion des bobines de chocs en série avec les condensateurs
Basse de tension	-Lors de déséquilibre d'un réseau triphasé ou par suite de la coupure d'une phase ou de sa mise à la terre	-Mauvais fonctionnement des récepteurs	-Relais à basse tension souvent temporisé pour éviter les coupures

- **Protection contre les surcharges**

Pour réaliser une protection efficace contre les surcharges, on doit prévoir la coupure d'un circuit avant un échauffement anormal pouvant provoquer des dégâts

Selon la norme NFC 15 100, deux conditions sont à respecter :

$$I_e \leq I_n \leq I_z$$

$$I_2 \leq 1,45I_z$$

Avec :

I_e : Courant d'emploi

I_n : Courant nominal du dispositif de protection

I_z : Courant admissible dans la canalisation

I_2 : Courant de fonctionnement du dispositif de protection dans le temps conventionnel.

- **Protection contre les courts-circuits**

Le pouvoir de coupure de l'appareil de protection doit être au moins supérieur ou égale au plus fort courant de court-circuit.

$$I_{cc\ max} \leq P_{dc}$$

Avec :

I_{cc} : Intensité de court-circuit.

P_{dc} : Pouvoir de coupure de l'appareil de protection

IV.4.1. Protection par disjoncteurs

Un disjoncteur est un interrupteur à ouverture automatique assurant la protection d'une installation contre les surcharges, les courts-circuits, les défauts d'isolement, par ouverture rapide du circuit en défaut. Il remplit aussi la fonction de sectionnement (isolement d'un circuit) en défaut. Certains appareils permettent une télécommande à distance.

Les disjoncteurs sont essentiellement destinés à la protection des circuits, des transformateurs, des sources d'énergie, des couplages entre circuits différents, etc.

- **Courant de réglage**

C'est le courant maximal que peut supporter le disjoncteur, sans déclenchement. Il

peut être réglable de $0,7 I_n$ à $1 I_n$ pour déclencheurs thermiques de $0,4 I_n$ à $1 I_n$ pour les déclencheurs électriques.

- **Pouvoir de coupure**

C'est la plus grande intensité de courant de court-circuit (préssumé) qu'un disjoncteur peut interrompre sous une tension donnée en respectant la condition suivante :

$$P_{dc} \geq I_{cc}$$

- **Principes de déclenchement**

Le type de protection assuré par le disjoncteur dépend essentiellement de la nature de déclenchement, le déclencheur permet l'ouverture des pôles du disjoncteur lors d'un défaut (court-circuit, surcharge). Il est de nature magnétothermique ou électronique. Ce dernier cas permet une plus grande précision et un réglage plus souple. [21]

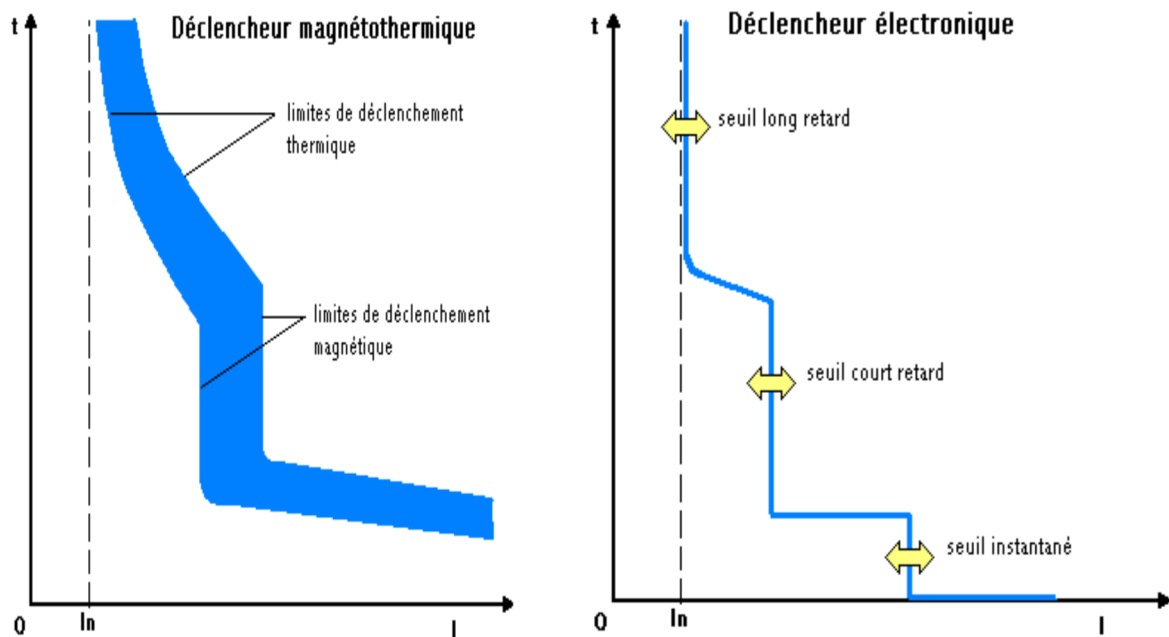


Figure IV-1: Déclencheur magnétothermique et électronique

IV.4.2. Protection par fusible

Ce sont des appareils de protection dans la fonction est d'ouvrir par fusion, d'un ou de plusieurs parties du circuit lorsque le courant dépasse une valeur donnée pendant un temps déterminée.

- **La tension nominale de fusible U_n**

C'est la tension à laquelle se rapporte le P_d , elle doit vérifiée par rapport a la tension de service

$$U \geq U_{service}$$

- **Pouvoir de coupure**

Les fusibles ont un excellent pouvoir de coupure appréciée dans le cas court-circuit important grâce à leur rapidité de fusion du fait que le courant de défaut est éliminé avant d’atteindre sa valeur maximale. C’est ce qu’on appelle la limitation qui à l’avantage de réduire les contraintes thermiques, provoquées par un court-circuit.

(Voir le tableau 3 de l’annexe) [21]

- **Choix de fusible**

Fusible amont d’une batterie de condensateurs :

Le calibre du fusible doit être supérieur ou égal à deux fois le courant nominal de la batterie de condensateurs (I_c).

$$I \geq 2 * I_c$$

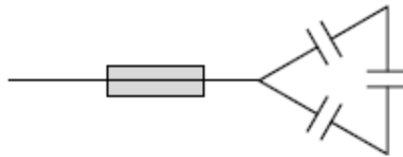


Figure IV-2: Fusible en amont d’un gradin

Tableau IV-2: Les calibres des fusibles pour batterie de condensateurs sous tension 400 V [25]

Capacité en (K V A)	5	10	20	30	40	50	60	75	100	125	150
Fusible g l (A)	20	32	63	80	125	160	200	200	250	400	400

Nous avons des gradins de 50 K V A $\Rightarrow I_f = 160 A$

IV.4.3. Association-fusible disjoncteurs

L’association fusibles amont disjoncteurs aval permet de réaliser économiquement la

protection des petits départs dans des installations susceptibles, lors d'un défaut, de développer des courants de court circuit élevés. Cette association impose de :

- Choisir le calibre des fusibles approprié au type du disjoncteur et à l'intensité de réglage des déclencheurs
- Placer les fusibles en amont du disjoncteur.
- Ne pas mettre de fusible sur le conducteur neutre. [21]

IV.5. Détermination des courants de court-circuit 3 φ

IV.5.1. Les différentes méthodes de calcul des courants de court-circuit I c c 3 φ

Il existe plusieurs méthodes de calcul des courants de court-circuit, parmi lesquelles on peut citer :

- La méthode des impédances,
- La méthode des composantes symétriques,

Puis que l'installation est alimentée à partir d'une source triphasée équilibrée et est très éloignée électriquement, on utilisera alors la méthode des impédances.

La somme des résistances situées en amont de ce point :

$$R_t = \sum_{i=1}^n R_i \quad (\text{IV. 1})$$

Et la somme des réactances situées en amont de ce point :

$$X_t = \sum_{i=1}^n X_i \quad (\text{IV. 2})$$

$$I_{cc \max} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_t^2 + X_t^2}} \quad (\text{IV. 3})$$

R_t Et X_t exprimées en $m\Omega$

U_n : tension nominale entre phases du transformateur (400 V)

IV.5.2. Méthode générale de calcul des I c c 3 φ

Pour ce calcul on adoptera la méthode des impédances et on calculera l'intensité du courant de court-circuit, qui provoque des arcs électriques les plus intenses et qui est le court-circuit triphasé.

La disposition d'un réseau de distribution de moyenne ou basse tension peut être

généralisée selon le schéma ci-après, dans lequel on retrouve toujours les éléments suivants :

- Le réseau amont ;
- Le ou les transformateurs ;
- Un ou des disjoncteurs ;
- Des câbles, des jeux de barres, des canalisations préfabriquées ;

La méthode consiste à décomposer le réseau en tronçons et à calculer, pour chacun des tronçons, R et X, puis les additionner arithmétiquement.

- **Réseau amont**

La puissance de court-circuit du réseau HT (S_{cc} = puissance de court-circuit) est donnée par le distributeur d'énergie, l'impédance du réseau amont ramené au secondaire du transformateur est donnée par la relation :

$$Z_a = \frac{U_o^2}{S_{cc}} \quad (\text{IV. 4})$$

U_o : Tension entre phase a vide du secondaire du transformateur, elle est égale à 400V

La résistance R_a peut être considérée comme négligeable devant la réactance X_a qui peut être confondue avec Z_a

Si un calcul précis est nécessaire, on peut prendre :

$$\frac{R_a}{X_a} = 0,15 \quad (\text{IV. 5})$$

- **Transformateur**

L'impédance Z_{tr} d'un transformateur vue du secondaire est donnée par la relation

$$Z_{tr} = \frac{U_o^2}{S_n} * U_{cc}(\%) \quad (\text{IV. 6})$$

U : Tension entre phases au secondaire à vide,

S_n : Puissance nominale du transformateur,

U_{cc} : Tension de court circuit en %,

Avec:

$$S = 1250 \text{ MVA}, \text{ donc } U_{cc} = 8\% .$$

La résistance se calcule a partir des pertes cuivre (P_{cu}) dans le transformateurs (essaye en

court-circuit).

$$P_{cu} = 3R_{tr} * I_n^2 \quad (\text{IV. 7})$$

D'où :

$$R_{tr} = \frac{P_{cu}}{3 I_n^2} \quad (\text{IV. 8})$$

Avec :

$$P_{cu} = 15 \text{ KW}$$

$$I_n = 1760 \text{ A}$$

La réactance se déduit de la relation :

$$X_{tr} = \sqrt{Z_{tr}^2 - R_{tr}^2} \quad (\text{IV. 9})$$

X_{tr} : Réactance du transformateur,

R_{tr} : Résistance du transformateur,

Z_{tr} : Impédance ramenée au secondaire du transformateur.

- **Disjoncteur**

La résistance est négligeable, la réactance est prise égale à 0,15 mΩ .

- **Câbles**

La résistance se calcule à l'aide de la formule :

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (\text{IV. 10})$$

$$l = 110\text{m}$$

$$S = 300\text{mm}^2$$

l : Longueur de la canalisation, en mètre

S : Section des conducteurs, en mm²

La résistivité des conducteurs est prise à température normale de fonctionnement. [23]

IV.5.3. Calcul de courants de court-circuit du premier secteur

Les résultats des courants de court-circuit dans les deux disjoncteurs sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau IV-3: Résultats de calcul des courants de court-circuit

Partie de L'installation		Caractéristiques	R(m Ω)	X(m Ω)	R (m Ω)	X (m Ω)	I c (k A)
Réseau Amont		S c = 3 0 0 M	0,047	0,316	0,047	0,316	
Transfo		1 2 5 0 k 30 / 0,4 k V U c = 8%	0,286	1,907	0,333	2,223	
Disjoncteur Principal		Disjoncteur principal(Q p)	0	0,15	0,333	2,373	96,375
Liaison Transfo-disjoncteur		l = 1 1 0 S = 3 0 0 m²	8,25	8,8	8,583	11,173	
Disjoncteur De récepteur		Disjoncteur De récepteur (Q r)	0	0,15	8,583	12,673	15,088
Départs		$\sum R = R \text{ r} + R \text{ t} + R \text{ l} + R \text{ c} = R \text{ r}$ $\sum X = X \text{ r} + X \text{ t} + X \text{ l} + X \text{ c} = X \text{ r}$					

IV.6. Sélectivité

IV.6.1. Introduction

La sélectivité des protections est une caractéristique essentielle qui doit être prise en compte dès la conception d'une installation basse tension, afin de garantir aux utilisateurs la meilleure disponibilité de l'énergie.

IV.6.2. Définition de la sélectivité

C'est la coordination des dispositifs de coupure automatique de telle sorte qu'un

défaut, survenant en un point quelconque du réseau, soit éliminé par le disjoncteur placé immédiatement en amont du défaut, et par lui seul.

IV.6.2.1. La sélectivité totale

La distribution est dite totalement sélective si, et seulement si, quelle que soit la valeur du courant de défaut, seul le dispositif de protection situé le plus en aval, parmi ceux sollicités par le défaut, s'ouvre et reste ouvert.

IV.6.2.2. La sélectivité partielle

La sélectivité est partielle si le dispositif aval fonctionne seul jusqu'à une valeur de court-circuit inférieure à I_{cc} présumé. Au delà amont et aval fonctionnent

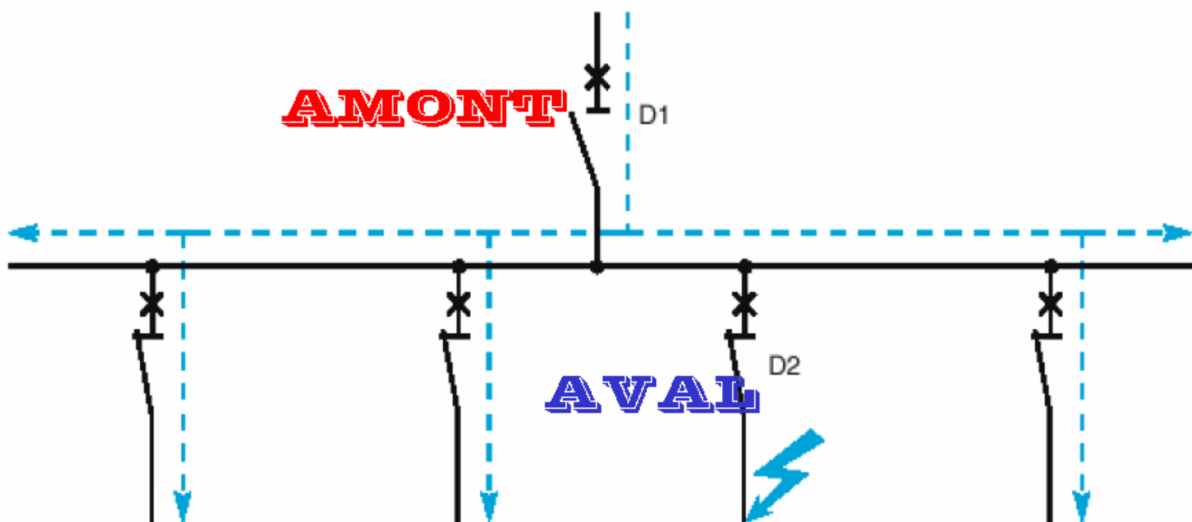


Figure IV-3: Principe de la sélectivité

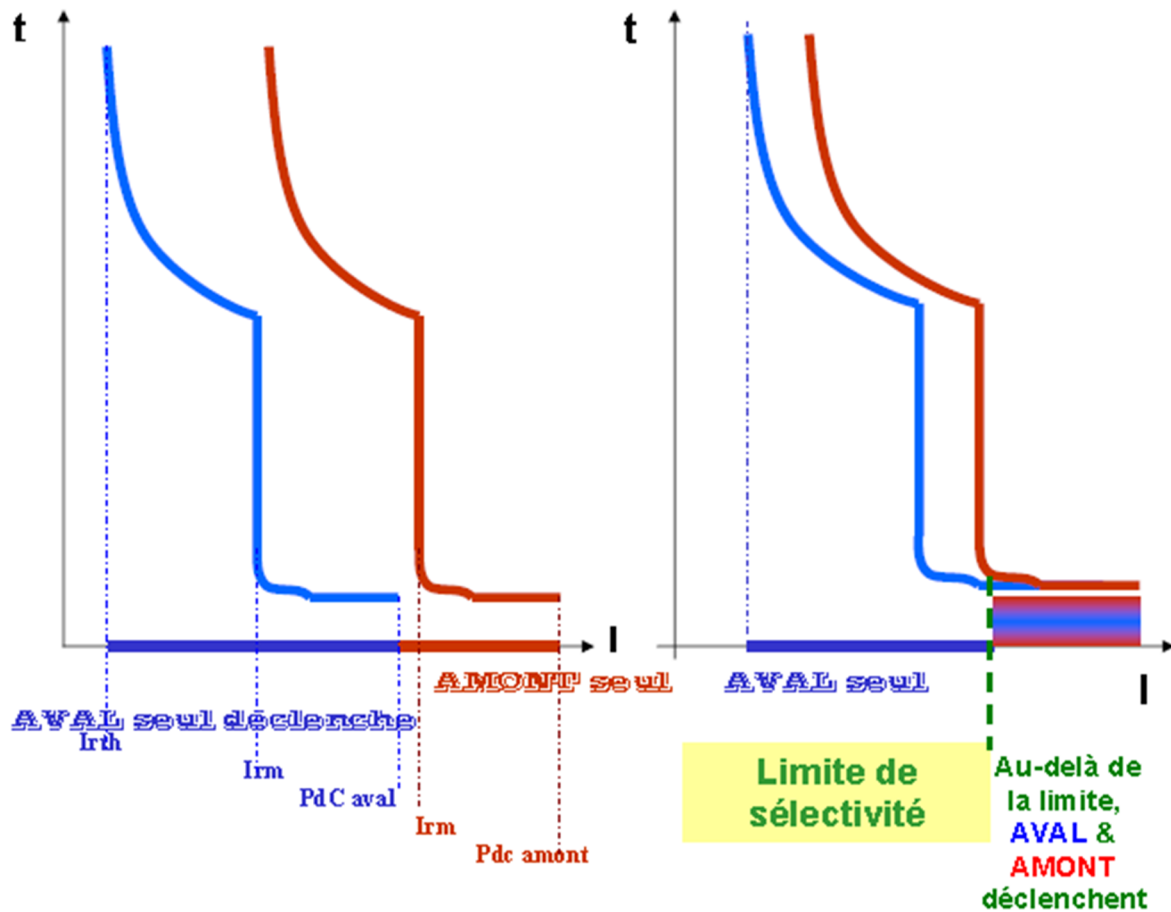


Figure IV-4: Courbe de sélectivité totale ou partielle avec déclencheurs magnétothermiques

IV.6.3. Choix de la sélectivité

Le choix d’un type de sélectivité dans une distribution électrique se fait en fonction du type d’appareil et de leur situation dans l’installation. Différentes techniques peuvent être combinées entre deux appareils pour obtenir la meilleure disponibilité de l’énergie électrique.

Tableau IV-4: Différentes techniques d’obtention de la meilleure disponibilité d’énergie

Circuit concerne	Type de sélectivité		Type de disjoncteur
	Ampérométrique	Chronométrique	
Origine de l’installation	Oui	Oui	Sélectif
Distribution de puissance	Oui	Oui	Limiteur
Distribution terminal	Oui	Oui	Limiteur

Le tableau suivant résume les conditions de réglage des déclencheurs magnétiques et thermique à remplir pour obtenir une meilleure sélectivité :

Tableau IV-5: Condition de réglage des déclencheurs magnétiques et thermique pour l'obtention d'une meilleure sélectivité [24]

Application	Protection thermique $I_{1\text{amont}} / I_{1\text{aval}} \geq$	Protection magnétique $I_{1\text{amont}} / I_{1\text{aval}} \geq$
Distribution	1,6	2
	1,6	1,5
Moteur	3	2
	3	1,5

IV.7. Dimensionnement des appareils de protection

IV.7.1. Calibrages de disjoncteurs

Le choix de calibre de disjoncteurs s'effectue à partir de la condition suivante :

$$I_n \geq I_e$$

Avec :

I_n : Courant nominal de disjoncteur

I_e : Courant d'emploi

- **Calibrages de disjoncteur principal(Q_p)**

$$I_e = 1760 \text{ A} \quad \Rightarrow \quad I_n = 2000 \text{ A}$$

Le pouvoir de coupure est déterminé en fonction du courant de court-circuit établi tel que :

$$I_{cc} = 96,375 \text{ kA}$$

Donc :

$$P_{dc} \geq 1,45 * 96,375 \text{ kA} \Rightarrow P_{dc} \geq 140 \text{ kA}$$

- **Calibrage de disjoncteur de récepteur(Q_r)**

Le choix de calibre disjoncteur de récepteur est la somme des courants d'emploi de compresseur est celui des condensateurs.

$$I_e \text{ compresseur} = 480,23 \text{ A} \quad I_e \text{ condensateur} = 550,74 \text{ A}$$

$$I_e \text{ totale} = \sum I = 1030,97 \text{ A} \Rightarrow I_n = 1200 \text{ A}$$

Le pouvoir de coupure est déterminé en fonction du courant de court-circuit établi tel que :

$$I_{cc} = 15,088 \text{ kA}$$

Donc :

$$P_{dc} \geq 1,45 * 15,088 \text{ kA} \Rightarrow P_{dc} \geq 22 \text{ kA}$$

IV.7.2. Vérification de la sélectivité entre le disjoncteur principal (Q_p) et le disjoncteur de récepteur (Q_r)

D'après le tableau qui donne les conditions qu'il faut remplir afin d'assurer une sélectivité entre deux appareils de protection

- Protection thermique : $I_{r \text{ amont}} / I_{r \text{ aval}} \geq 1,6$
- Protection magnétique: $I_{r \text{ amont}} / I_{r \text{ aval}} \geq 2$ [21]

IV.7.3. Application numérique

- Le courant nominal de $Q_p = 2000 \text{ A}$
- Le courant nominal de $Q_r = 1200 \text{ A}$

1) Vérification de la protection thermique

- $I_{t \text{ hamont } Q_p} = 0,95 * 2000 = 1900 \text{ A}$
- $I_{t \text{ havall } Q_r} = 0,95 * 1200 = 1140 \text{ A}$

D'où $I_{r \text{ amont } Q_p} / I_{r \text{ aval } Q_r} = 1,7 > 1,6 \Rightarrow$ La sélectivité est assurée

2) Vérification de la protection magnétique

- $I_{m \text{ amont } Q_p} = 5 * 2000 = 10000 \text{ A}$
- $I_{m \text{ aval } Q_r} = 1,5 * 1200 = 1800 \text{ A}$

D'où $I_{r \text{ amont } Q_p} / I_{r \text{ aval } Q_r} = 5,55 \Rightarrow$ La sélectivité est assurée

D'après les résultats la sélectivité (thermique, magnétique) est assurée entre les disjoncteurs.

Tableau IV-6: Etude comparative

	<i>Installation existante</i>	<i>Installation proposée</i>
<i>Mode de compensation</i>	Globale	En deux secteurs
<i>Facteur de puissance</i>	0,72	0,93
<i>Chute de tension (V)</i>	16,8	9,07
<i>Pertes de puissances (kW)</i>	12,32	5,7
<i>Section des câbles (mm²)</i>	4*185	2*150
<i>Types de compensations</i>	Automatique	Automatique
<i>Types de batteries</i>	SAH	SAH

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité le choix des appareils de protection pour éviter les divers dégâts, ainsi, les différents types de protection.

Nous avons calculé les différents courants de court-circuit, pouvoir de coupure qui nous permettent de faire le choix et le dimensionnement des disjoncteurs.

Ajoutant à cela une protection par fusible pour éviter les contraintes thermiques provoqué par le court-circuit.

Finalement nous avons clôturé notre travail par la vérification de la sélectivité entre le disjoncteur principal et le disjoncteur protégeant le récepteur, qui se fait en comparant les caractéristiques de chaque disjoncteur avec celles de la protection située immédiatement en amont.

Conclusion générale

Dans le présent travail, nous avons réalisé le dimensionnement du système de compensation d'énergie réactive de l'entreprise IFRI qui nous a permis de découvrir l'environnement industriel, de combler nos insuffisances et d'approfondir nos connaissances dans le domaine des installations électriques industrielles.

Elle nous a aussi permis de toucher à la pratique, de maîtriser la méthodologie du calcul de bilan de puissance; la technique de compensation d'énergie, ainsi d'acquérir des connaissances dans les techniques de dimensionnement des protections, et la maîtrise d'une bonne exploitation électrique.

Avant d'entamer le dimensionnement, nous avons recueilli les données de l'installation, élaboré le bilan de puissances qui nous a permis de déterminer la puissance totale et le facteur de puissance de la ligne de production.

Ensuite on a vérifié que la chute de tension et les pertes de puissance dans la ligne alimentant le compresseur sont importantes, puis nous avons proposé une compensation en deux secteurs, avec un redimensionnement des sections des câbles en fonction de l'échauffement, évitant la circulation de courant réactif dans les lignes; diminution des pertes de puissance et de la chute de tension.

Pour une bonne sûreté de fonctionnement du système, nous avons lancé une étude similaire à celle du réseau industriel, afin de visualiser les deux phénomènes transitoires qui accompagnent les batteries de compensation lors d'enclenchement ou déclenchement, causées par le pilotage des gradins (ouverture et fermeture du relais), ralenti par une solution adéquate (self anti-harmonique), ajoutant à cela la reconnaissance des perturbations qui engendrent à des fragilisations des équipements de manœuvre, car l'industrie impose une continuité de service avec une disponibilité d'alimentation.

Finalement, nous avons dimensionné une protection par disjoncteur contre les courts-circuits et les surcharges, ainsi une protection par fusible pour les gradins, ajoutant à cela une vérification de la sélectivité des disjoncteurs.

Annexe

Tableau 1 : Repaire des colonnes pour le choix de section

Modes de pose	Isolation	Caoutchouc Polychlorure De vinyle		Butyle PRC Ethylène- propylène	
		N° d'âmes Du circuit	3 Ames	2 Ames	3 âmes
Conduits apparents		2	3	4	5
Conduits encastrés		2	3	4	5
Moulures, plinthes		2	3	4	5
Fixation aux parois	{ (1) (2)	4	5	6	7
		3	4	5	6
Fixation aux plafonds	{ (1) (2)	4	5	6	7
		3	4	5	6
Chemins de câbles, tablettes	{ (1) (2)	4	5	6	7
		3	4	5	6
Corbeaux		3	4	5	6
Goulottes		2	3	4	5
Gouttières		3	4	5	6
Gaines		2	3	4	5
Conduits dans caniveaux ouverts		1(a)	2(a)	3(a)	4(a)
Conduits dans caniveau fermé		1	2	3	4
Caniveaux ouverts		2(a)	3(a)	4(a)	5(a)
Caniveaux fermés		2	3	4	5
Caniveaux remplis de sable		*	*	*	*
Vides de construction		2	3	4	5
Alvéoles		2	3	4	5
Blocs alvéoles		2	3	4	5
Huisseries	{ (1) (2)	3	4	5	6
		2	3	4	5
Encastrement direct		-	-	-	-
Enterré directement		*	*	*	*
Enterré avec protection		*	*	*	*
Enterré dans fourreau		*	*	*	*
Canalisations préfabriquées		-	-	-	-
Sur isolateurs	{ (1) (2)	5	6	7	8
		4	5	6	7
Lignes aériennes		5	6	7	8
Immergé		*	*	*	*

(1) Câbles unipolaires
(2) Câbles multipolaires
(a) Les valeurs peuvent être majorées de 5 %
(b) à l'étude
- Conditions particulières

Tableau 2 : Courants admissibles des sections des câbles

Nature du câble	Section minimale des âmes (mm ²)	Repères de colonnes							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Ames en cuivre	1.5	14	15.5	17.5	19.5	22	24	27	29
	2.5	19	21	24	26	30	33	37	40
	4	25	28	32	35	40	45	50	55
	6	32	36	44	46	52	58	64	70
	10	44	50	57	63	71	80	88	97
	16	59	68	76	85	96	107	119	130
	25	75	89	101	112	127	142	157	172
	35	97	114	125	138	157	175	194	213
	50		134	151	168	190	212	235	257
	70		171	192	213	242	270	299	327
	95		207	232	258	293	327	362	396
	120		239	269	299	339	379	449	458
	150		275	309	344	390	435	481	527
185		314	353	392	444	496	549	602	
240		369	415	464	522	584	645	707	
Câbles unipolaires seulement	300		420	472	525	595	665	735	805
	400		490	552	613	695	779	859	940
	500		550	618	687	780	870	960	1050
	630		635	705	782	885	995	1095	1200
	800		700	790	875	990	1115	1235	1350
	1000		790	890	990	1120	1250	1380	1510
Ames en aluminium	16	34	39	44	49	55	62	69	76
	25	46	53	59	66	75	83	93	101
	35	58	69	79	87	99	114	122	134
	50	76	86	97	108	125	138	154	166
	70		105	118	131	154	168	183	200
	95		133	150	166	192	213	234	256
	120		161	161	200	232	258	282	309
	150		186	240	236	269	299	327	357
	185			240	268	309	344	375	411
	240			275	305	353	292	428	469
			325	360	115	461	503	551	
Câbles unipolaires seulement	300			370	410	472	525	575	628
	400			432	479	552	613	670	732
	500			485	537	618	687	750	822
	630			550	540	705	782	855	935
	800			620	685	790	875	955	1050
	1000			709	772	890	990	1075	1180

Tableau 3 : Pouvoirs de coupure des différents types de fusible

Type de fusible	Calibre (A)	Taille	Tension (V)	Pdc (A)
Cartouches Cylindriques domestique gf	2 à 10	8.5 x 23 v	250	4000
	4 à 16	10.5 x 28.5 v	250	4000
	1 à 20	8.5 x 31.5 v	380	20000
	16 à 25	10.3 x 31.5 v	380	20000
	25 à 32	10.3 x 38 v	380	20000
Cartouches cylindriques domestique gf, Am	1 à 20	10.3 x 38 v	400 ou 500	100000
	4 à 50	14 x 51 v	400 ou 500	100000
	10 à 125	22 x 58 v	400 ou 500	100000
Cartouches couteaux Domestique gf, aM	Jusqu'à 1200	1, 2, 3, 4	400 ou 500	100000

Références Bibliographiques

- [1] Guide technique schneider Electric « Guide de l'installation Electrique »
« Normes internationales CEI et nationales françaises NF » 2010
- [2] Jean Reperant « réseaux électrique industriels » Cahier technique de l'ingénieur N° D 5022
- [3] Guide technique schneider Electric « catalogue distribution électrique » 2002
- [4] Guide technique schneider Electric « puissance d'une installation »
- [5] Gilbert DROUIN « Compensateurs statiques de puissance réactive »
Cahiers techniques de l'Ingénieur. N° D4315
- [6] C. PRÉVÉ R. JEANNOT « Guide de conception des réseaux électriques industriels »
1997
- [7] Catalogue Merlin Gerin « La compensation de l'énergie réactive »
Cahiers technique de l'ingénierie 1988
- [8] CHARLES HANTOUCHE « Condensateurs de puissance » Cahier technique Doc. D
4 710
- [9] Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique « étude et dimensionnement d'un tableau
général basse tension » à l'université abderrahmane mira-bejaia promotion 2009
- [10] GERARD GAY guide technique Schneider Electric « La Compensation de l'énergie
réactive » 2006
- [11] Guide technique schneider Electric « guide de distribution électrique » 2002
- [12] guide technique schneider Electric « La compensation de l'énergie réactive »
Intersections-N° 16 200
- [13] ION ETXEBERRIA-OTADUI « Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à
la distribution électrique-application à la qualité de l'énergie » ; Thèse de doctorat de l'institut
national polytechnique de Grenoble 2003
-

[14] mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique « modélisation et commande d'un UPFC utilise en filtrage des courants harmoniques d'un réseau électrique » à l'école nationale polytechnique juin 2007

[15] DENIS KOCH « guide technique schneider Electric N° 189 »
« Manœuvre et protection des batteries de condensateurs MT » 1997

[16] guide technique schneider Electric « Guides experts basse tension N°6 »
« Guide de la compensation d'énergie réactive et du filtrage des harmoniques »

[17] PHILIPPE FERRACCI « *La qualité de l'énergie électrique* » ; Schneider Electric 2001

[18] JACQUES du PARC « Correction de la puissance réactive et des harmoniques »
Cahier technique Doc. D 3 215

[19] guide technique schneider Electric « Les perturbations électromagnétiques basses et haute fréquence » juin 2000

[20] LOUIS FECHANT « Apparaillage électrique à basse tension »
Cahier technique de l'ingénieur N° D4860

[21] HENRI NEY « 3 installations électriques »

[22] Guide technique schneider Electric « catalogue distribution électrique » BT 98

[23] HENRI NEY « 4 équipements de puissances »

[24] MARC SERPINET, ROBERT MOREL « la sélectivité énergétique en BT »
Cahier technique Merlin Gerin N° 167 édition juin 1993

[25] cahier technique « catalogue général SOCOMEC »

Résumé

Dans les réseaux électriques internes industriels, la puissance réactive est fournie par le propriétaire, avec l'installation des systèmes de compensation d'énergie.

Cette énergie n'est pas simplement réglable car elle dépend avec la variation de la charge, l'enclenchement et le déclenchement des batteries de condensateur provoque des perturbations (surintensité et surtension).

Dans cette thèse nous avons met en évidence ces perturbations par plusieurs simulation sur logiciel MATLAB, nous avons aussi envisagé une solution adéquate (self-anti harmonique) pour atténué ces perturbations.