



AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DE L'ÉLECTRICITÉ DE LA MINE HOUNDE GOLD OPERATION PAR L'UTILISATION D'UN STATCOM

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 24 Janvier 2023 par

Razanwendé Nataniel NIKIEMA (20190128)

**Encadrant 2iE : Dr Y. Moussa SORO, Maître de Conférences (CAMES) Génie Électrique
et Énergétique, Institut 2iE**

**Maître de stage : M. Ackim LUNGU, Coordonnateur électrique du site de Houndé Gold
Operation SA**

Structure d'accueil du stage : Houndé Gold Operation SA, Filiale de Endeavour Mining

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Ing. Sayon SIDIBE

Membres et correcteurs : Ing. Justin BASSOLE

Dr. Moussa KADRI

Promotion [2021/2022]

DÉDICACES

Je dédie ce mémoire à :

- ✓ Mon père NIKIEMA Sibiri Marcel et à ma mère PACMOGDA Pingdwindé ;
- ✓ Celle qui m'a conseillé de faire cette formation, DAHANY Myriam ;
- ✓ Tous ceux de près ou de loin qui ont contribué à la réussite de ma formation.

REMERCIEMENTS

Je rends grâce à Dieu pour Sa fidélité qui ne m'a jamais fait défaut durant toute ma formation.

Mes remerciements également à/au :

- Corps enseignant et administratif de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) pour le savoir-faire, le savoir et le savoir-être dont j'ai bénéficié auprès d'eux ;
- Dr Y. Moussa SORO, enseignant-chercheur en Génie Électrique et Énergétique à l'institut 2iE pour son encadrement tout au long de mon stage ;
- Houndé Gold Opération SA pour m'avoir accueilli dans leur société dans le cadre de mon stage de fin d'études et qui a mis à ma disposition toutes les ressources nécessaires pour la réalisation de ce stage ;
- Mon maître de stage M. Ackim LUNGU, Coordonnateur Électrique du site pour ses conseils et son encadrement ayant mis à ma disposition les ressources nécessaires à la réalisation du présent travail ;
- Toute l'équipe du département maintenance électricité pour l'accompagnement, les conseils et les soutiens multiformes dont j'ai bénéficié tout au long de mon stage ;
- A la Fondation ENDEAVOUR pour la bourse d'étude qui m'a permis de faire ce parcours ;
- Mes amis pour tout le soutien.

RÉSUMÉ

Le STATCOM est un compensateur de la famille des systèmes de Transport Flexible à Courant Alternatif (FACT) utilisé pour l'amélioration de la qualité de l'électricité. Il est sollicité à la mine pour résoudre le problème d'instabilité de la tension qui cause de nombreux dommages sur plusieurs domaines. En effet, le problème de l'instabilité de la tension est la cause d'au moins dix-huit ruptures de l'alimentation électrique fournie par la SONABEL occasionnant une perte annuelle estimée à plus de 21 millions \$ USD. De ce fait, après avoir conclu sur le bien-fondé du recours de cette technologie pour solutionner le problème évoqué, nous avons sur la base de l'étude des configurations et composants du STATCOM, proposé une unité adaptée à l'entreprise minière. Nous avons par la suite réalisé une simulation du fonctionnement du compensateur sur le logiciel Matlab/Simulink afin d'éclairer sur le fonctionnement du compensateur. Nos résultats ont permis de montrer sa capacité à résoudre les problèmes de stabilité du réseau électrique rencontrés à la mine. Les résultats montrent que l'installation du STATCOM permet d'atténuer considérablement la baisse ou l'élévation de la tension lors d'une perturbation pour la maintenir dans une marge acceptable ($\pm 0,02$ pu de la tension de référence). Après l'étude des différentes configurations du STATCOM, l'unité retenue est le SILCOVAR-H fabriqué par la société NIDEC car elle répond aux caractéristiques du module adapté à notre application. Enfin, une étude économique et environnementale a été réalisée pour montrer la pertinence du projet. Il ressort que pour un investissement de 2 808 750 \$USD, le projet permettra d'engranger un bénéfice annuel de 21 060 148 \$USD et évitera une émission d'environ 521 tCO_{2e} par an.

Mots clés :

- 1- Stabilité réseau électrique
- 2- Compensateur statique
- 3- FACT
- 4- STATCOM

ABSTRACT

STATCOM is a compensator of the Flexible Alternating Current Transmission (FACT) family of systems used for power quality improvement. It is used at the mine to solve the problem of voltage instability which causes a lot of damage in several areas. Indeed, the problem of voltage instability is the cause of at least eighteen interruptions in the power supply provided by SONABEL, resulting in an estimated annual loss of more than US\$21 million. Therefore, after concluding on the appropriateness of using this technology to solve the problem mentioned, we proposed a unit adapted to the mining company, based on the study of STATCOM configurations and components. We then carried out a simulation of the operation of the compensator on the Matlab/Simulink software in order to shed light on the operation of the compensator. Our results showed its ability to solve the power system stability problems encountered at the mine. The results show that the installation of the STATCOM allows to considerably attenuate the voltage drop or rise during a disturbance to maintain it within an acceptable margin (± 0.02 pu of the reference voltage). After studying the various STATCOM configurations, the SILCOVAR-H manufactured by NIDEC was selected as it meets the characteristics of the module adapted to our application. Finally, an economic and environmental study was carried out to show the relevance of the project. It was found that for an investment of USD 2,808,750, the project would generate an annual profit of USD 21,060,148 and avoid emissions of around 521 tCO₂e per year.

Key words:

1. Power grid stability
2. Static compensator
3. FACT
4. STATCOM

LISTE DES ABRÉVIATIONS

2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AC	Courant alternatif
CC	Courant Continu
CO ₂	Dioxyde de carbone
FACTS	Flexible alternating current transmission system
GTO	Gate Turn-off thyristor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
PWM	Pulse Width Modulation
pu	Per Unit
SONABEL	Société Nationale Burkinabè d'Électricité
STATCOM	Static Synchronous Compensator
VSC	Voltage Source Converter

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	ii
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	3
LISTES DES FIGURES	4
INTRODUCTION GÉNÉRALE	5
CHAPITRE I : PRÉSENTATION DE HOUNDE GOLD OPÉRATION SA ET DU PROJET ...	6
INTRODUCTION	6
I. PRÉSENTATION DE HOUNDE GOLD OPÉRATION SA	6
I.1. Historique	6
I.2. Organisation de Houndé Gold Operation	6
I.3. Alimentation électrique du site	7
II. PRÉSENTATION DU PROJET D'INSTALLATION DU STATCOM.....	9
II.1. Contexte	9
II.2. Données de base	10
III. MÉTHODOLOGIE DE LA CONCEPTION DU PROJET.....	12
III.1. Matériels	12
III.2. Méthodologie de travail	12
CONCLUSION.....	13
CHAPITRE II : STATCOM, UNE SOLUTION POUR L'INSTABILITÉ DES RÉSEAUX	14
INTRODUCTION	14
I. PROBLÈMES RENCONTRÉS SUR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES	14
I.1. Mauvaise qualité de la tension.....	14
I.2. Harmoniques.....	18
I.3. Puissance réactive.....	18
I.4. Justification du projet	20
II. GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES FACTS	21
II.1. Les systèmes de compensation série	21
II.2. Compensation parallèle (shunt).....	22
II.3. Compensation hybride.....	22
III. COMPOSANTS DU STATCOM.....	23
III.1. Transformateur de couplage.....	24
III.2. Convertisseur de source de tension VSC (Voltage Source Converter).....	24
III.3. Condensateur à courant continu	30

III.4. Filtres	30
III.5. Système de commande et de communication	31
IV. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU STATCOM.....	31
CONCLUSION.....	34
CHAPITRE III : MODÉLISATION ET COMMANDE DU STATCOM.....	35
INTRODUCTION	35
I. MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DU STATCOM	35
II. COMMANDE DU STATCOM.....	37
II.1. Commande du contrôleur classique proportionnel intégral PI.....	37
II.2. Commande du régulateur IP sans zéro	39
III. SIMULATION DU FONCTIONNEMENT DU STATCOM	42
III.1. Paramètre de simulation.....	42
III.2. Simulation et résultats.....	44
IV. CHOIX DU STATCOM POUR L'APPLICATION À HGO	48
CONCLUSION.....	49
CHAPITRE IV : ÉTUDE DE L'IMPACT ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL DU PROJET.....	50
INTRODUCTION	50
I. IMPACT ÉCONOMIQUE DE L'INSTALLATION DU STATCOM.....	50
I.1. Méthodes de calculs.....	50
I.2. Résultats des calculs	51
II. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU PROJET.....	51
II.1. Émissions de dioxyde de carbone (CO ₂) à HGO.....	52
II.2. Impact du STATCOM sur les émissions de CO ₂	53
CONCLUSION.....	54
CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATION	55
BIBLIOGRAPHIE.....	56
ANNEXES.....	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Application de quelques des FACTS	23
Tableau 2 : Données pour la simulation.....	42
Tableau 3 : Paramètres de choix d'une unité de STATCOM	48
Tableau 4 : Calculs de l'analyse économique	50
Tableau 5 : Émissions de dioxyde de carbone par HGO en 2021	52
Tableau 6 : Calculs des émissions dues au fonctionnement des générateurs.....	53

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Salle de cellules à centrale électrique	8
Figure 2 : Salle des générateurs à la centrale électrique	8
Figure 3 : Profil de consommation électrique de la mine	10
Figure 4 : Profil des tensions entre phases	11
Figure 5 : Profil des fréquences	11
Figure 6 : Intensité des courants	12
Figure 7 : Creux de tension	15
Figure 8 : Fluctuations de tension	15
Figure 9 : Exemple de déséquilibre de tension triphasée	16
Figure 10 : Variation des fréquences	17
Figure 11 : Distorsion causée par un seul harmonique	18
Figure 12 : Puissance réactive	19
Figure 13 : VSC six impulsions à deux niveaux	25
Figure 14 : VSC douze impulsions à trois niveaux	25
Figure 15 : Convertisseur à vingt-quatre impulsions	26
Figure 16 : Convertisseur à quarante-huit impulsions	27
Figure 17 : Convertisseur multiniveau à diodes	28
Figure 18 : Convertisseur à condensateurs volants à cinq niveaux	29
Figure 19 : Convertisseur en pont H cascade	30
Figure 20 : Structure d'un STATCOM couplé au réseau	31
Figure 22 : Structure basique du STATCOM	32
Figure 23 : Comportement inductif	33
Figure 24 : Comportement capacitif	33
Figure 25 : Caractéristique V-I du STATCOM	34
Figure 26 : Dispositif de STATCOM connecté au réseau	36
Figure 27 : Schéma bloc d'une commande PI du STATCOM	38
Figure 28 : Schéma de régulateur de l'onduleur	40
Figure 29 : Modulation delta	41
Figure 30 : Régulation avec correcteur IP	42
Figure 31 : Tension et courant de la ligne contrôlée	42
Figure 32 : Simulation du STATCOM sur Matlab/Simulink	44
Figure 33 : Échange de l'énergie réactive entre le STATCOM et le réseau	45
Figure 34 : Tension du STATCOM	45
Figure 35 : Courant réactif échangé entre le STATCOM et le réseau	46
Figure 36 : Tension de la source continue du VSC	46
Figure 37 : Tension du réseau	47
Figure 38 : Tension de référence et tension mesurée du réseau	47
Figure 39 : Fiche technique de SILCOVAR-H Air Cooled STATCOM	49
Figure 40 : Représentation des émissions de HGO en 2021	53

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La bonne qualité d'une alimentation électrique exempte de coupures brèves et de variations incontrôlées de l'amplitude de la tension et du courant est le souhait de tout gestionnaire de réseau. Cela permet d'éviter un effondrement du réseau électrique qui a sans doute de graves conséquences pour les consommateurs.

Le développement de l'électronique de puissance a ouvert la porte à l'invention de nouvelles technologies de compensateurs capables de solutionner les problèmes récents et dommageables du réseau électrique. Parmi ces solutions figurent les FACTS qui ont fait leurs preuves dans l'amélioration de la qualité de l'énergie et dans l'optimisation du transit de la puissance active sur les lignes électriques à de grandes distances. En effet, il n'est plus à démontrer que l'électricité est plus que nécessaire pour le développement industriel surtout dans les pays en voie de développement comme le Burkina Faso. Elle sera totalement bénéfique pour le consommateur que si elle est fiable et de bonne qualité. La mine de Houndé est à la recherche de cette qualité et entend utiliser les moyens disponibles pour résoudre le problème majeur qu'elle rencontre, à savoir l'instabilité de la tension. Ce problème engendre des pertes financières importantes dues aux ruptures de l'alimentation. Houndé Gold Operation (HGO) a donc décidé d'avoir recours au STATCOM, un compensateur de dernière génération qui est l'un des meilleurs de la famille FACTS. L'étude de la mise en œuvre du projet est l'objet de notre travail et est subdivisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente la mine de Houndé et le projet d'installation du STATCOM. Nous y montrons un aperçu du fonctionnement de la mine et présentons les difficultés rencontrées au niveau de l'alimentation électrique. Le second chapitre est consacré à la présentation du STATCOM où nous évoquons le fonctionnement et les composantes du STATCOM. Une modélisation mathématique et la commande du STATCOM sont abordées au troisième chapitre où nous ferons également une simulation du fonctionnement du STATCOM et un choix d'une unité de STATCOM adapté à notre utilisation. Le dernier chapitre traite de l'impact économique et environnemental du projet d'installation du STATCOM à la mine de Houndé. Nous terminons par une conclusion et des recommandations pour la prochaine étape du projet.

CHAPITRE I : PRÉSENTATION DE HOUNDE GOLD OPÉRATION SA ET DU PROJET

INTRODUCTION

L'industrie minière est en pleine expansion au Burkina Faso ces dernières années. Ce développement occasionne plusieurs défis pour une alimentation électrique fiable et stable. C'est pour cette raison que les industriels envisagent de plus en plus des mécanismes pour la résolution de plusieurs problèmes au niveau local.

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'entreprise qui nous a accueillis pour le présent stage. Nous présentons le contexte du projet et la méthodologie suivie pour le travail.

I. PRÉSENTATION DE HOUNDE GOLD OPÉRATION SA

I.1. Historique

En 1939 débuta l'exploration de la mine de Houndé qui s'est poursuivie jusqu'en 2012 avec des interruptions plus ou moins longues. Le site est situé à Houndé et s'étend sur une superficie de 23,19 km² avec des réserves estimées à plus de 10 millions d'onces d'or pour une durée de vie d'au moins 10 ans. La construction de la mine a commencé en Avril 2016 et la production en décembre 2017. Il s'agit d'une exploitation à ciel ouvert utilisant la technologie Charbon In Leach pour le traitement de l'or. La mine est détenue à 90 % par Endeavour Mining et 10 % par l'État burkinabé et compte à nos jours environ 1909 employés, dont 1720 hommes et 189 femmes.

I.2. Organisation de Houndé Gold Operation

Sous le leadership d'un directeur général, la mine de Houndé est subdivisée en dix départements, tous dirigés par des directeurs. Les départements sont les suivants :

- Le département de santé-sécurité au travail HSE ;
- Le département usine ;
- Le département des ressources humaines ;
- Le département de la logistique ;
- Le département de la mine ;
- Le département de sécurité ;
- Le département des équipements lourds mobiles HME ;

- Le département des finances ;
- Le département des infrastructures ;
- Le département des affaires sociales.

Le sous-département qui nous a reçu dans le cadre du stage est la maintenance-usine plus précisément la section électricité et instrumentation. La section électricité et instrumentation est responsable de l'installation et de l'entretien des appareils et équipements électriques (moteurs, système d'éclairage) et des instruments à l'intérieur de l'usine et à l'extérieur. Une présentation du site est montrée en Annexe 1.

I.3. Alimentation électrique du site

Centrale électrique

HGO est entièrement alimentée par le réseau électrique national à travers la SONABEL. La puissance souscrite est de 15 MW et une tension de 11 kV équivalent à la tension du plus gros moteur du site. Deux transformateurs (un en fonctionnement et l'autre en réserve) de 90 kV/11 kV permettent de desservir le site. La consommation moyenne par jour du site est estimée à environ 558 MWh.

Outre l'alimentation de la SONABEL, Houndé Gold Operation dispose d'une centrale thermique comme source de secours constituée de 16 Générateurs du type CATERPILAR 11 kV. Chaque générateur a une puissance active de 1,6 MW soit une puissance totale installée de 25,6 MW. La Figure 1 et la Figure 2 présentent respectivement les cellules de la centrale et les générateurs utilisés à la centrale thermique.



Figure 1 : Salle de cellules à centrale électrique



Figure 2 : Salle des générateurs à la centrale électrique

L'administration

Le départ de l'administration alimente les serveurs informatiques de la section informatique, les appareils et équipements administratifs. La clinique du site est également alimentée par ce même départ. Ce sont des charges sensibles dont il est important d'assurer une bonne alimentation électrique. Outre ces charges, le départ alimente le camp d'habitation équipé de climatiseurs, de chauffe-eau électrique, d'appareils électroménagers pour le restaurant et la buanderie ainsi que la salle de gym.

Garage

La section comprend le garage des gros engins et le garage des véhicules légers. Les postes de soudures, les compresseurs d'air, les plaques de soudure et les pompes hydrauliques sont les gros consommateurs d'électricité dans cette section pour ne citer que ceux-ci. La station d'essence et la section Hygiène et Sécurité Environnementale HSE y tirent également leur source d'énergie.

Usine

L'Annexe 2 présente une image de l'usine. Le départ de l'usine est le plus important puisqu'il alimente les grosses charges du site. L'usine doit fonctionner de façon continue pour assurer le traitement du minerai. Un schéma du traitement du minerai est donné en Annexe 3. La cellule d'arrivée de l'usine alimente les sous-sections du nom de Motor Center Control (MCC) suivants :

- Le MCC Crusher : Ce MCC regroupe les moteurs du concasseur et des premiers convoyeurs de minerais ;
- Le MCC Grinding et Charbon In Leach : c'est la section de broyage du minerai. Deux moteurs de 6 MW/11 kV chacun, entraînent les deux broyeurs SAG Mill et BALL Mill. Quatre moteurs (deux en marche et deux autres en repos) permettent le transfert de la boue aux différents tanks de traitement de l'or. Les compresseurs d'air sont continuellement en marche pour empêcher la solidification de la solution dans les tanks de récupération de l'or. Outre ces charges, un départ long d'environ 4 km alimente une pompe installée au barrage.
- MCC Water Service et Elution : Les pompes hydrauliques permanemment en marches permettent de ravitailler le process en eau, indispensable pour le traitement de l'or. L'Elution regroupe les chaudières et les bruleurs utilisés pour la séparation de la solution riche en or du charbon de récupération. Les bruleurs sont essentiellement utilisés pour la régénération du charbon. Le Gold Room (maison de l'or) comporte des électrolyseurs, des fours de moulage de l'or et un important système d'aération (charge sensible).

Les ateliers de mécanique et d'électricité, le laboratoire et les bureaux constituent également des charges de consommation électrique non négligeables. La consommation journalière de l'usine est estimée à 312 MWh. L'usine dispose également de batteries de condensation pour relever le facteur de puissance. L'installation est d'une capacité de 12 Mvar et permet d'avoir un facteur de puissance égal à 0,96. Le schéma unifilaire de l'installation électrique est présenté en Annexe 4.

II. PRÉSENTATION DU PROJET D'INSTALLATION DU STATCOM

II.1. Contexte

La qualité de l'énergie est d'une importance capitale pour le bon fonctionnement des équipements et des appareils électriques. Pour le cas particulier de la mine, la mauvaise qualité de l'électricité engendre un déclenchement régulier des équipements de protections et même la perte de l'alimentation de façon répétitive. Ces perturbations de l'alimentation engendrent des pertes financières importantes pour la mine.

La stabilité de la tension électrique a longtemps été au centre des préoccupations des distributeurs d'électricité pour assurer une bonne qualité de l'électricité aux consommateurs. Mais bien que des efforts sont faits pour résoudre ce problème de façon collective, les clients

continuent de subir les insuffisances de ces solutions collectives et sont obligés de trouver des solutions locales à leurs problèmes. Ainsi, un diagnostic préalable sur la qualité électrique sur le site de HGO a conclu sur une recommandation du STATCOM afin d'améliorer principalement la stabilité de la tension électrique. Le présent projet de stage vise à étudier l'impact du STATCOM dans l'amélioration de la qualité de l'électricité à la mine et statuer sur la pertinence de son installation sur le plan financier et environnemental.

II.2. Données de base

Nous avons bénéficié des données sur la consommation électrique, des valeurs de tension entre phases et les valeurs de la fréquence d'une semaine (du 26 Mai 2022 au 02 Juin 2022). Pour des raisons indépendantes de notre volonté, nous n'avons pas obtenu les données sur les caractéristiques de réseau qui est géré par la SONABEL. Néanmoins, les données obtenues nous ont permis de générer le profil de la consommation électrique (Figure 3), le profil de la tension entre phases (Figure 4), le profil des fréquences (Figure 5) et le profil des courants (Figure 6). L'ensemble de ces données a été collecté sur une semaine.

✚ Consommation électrique d'une semaine

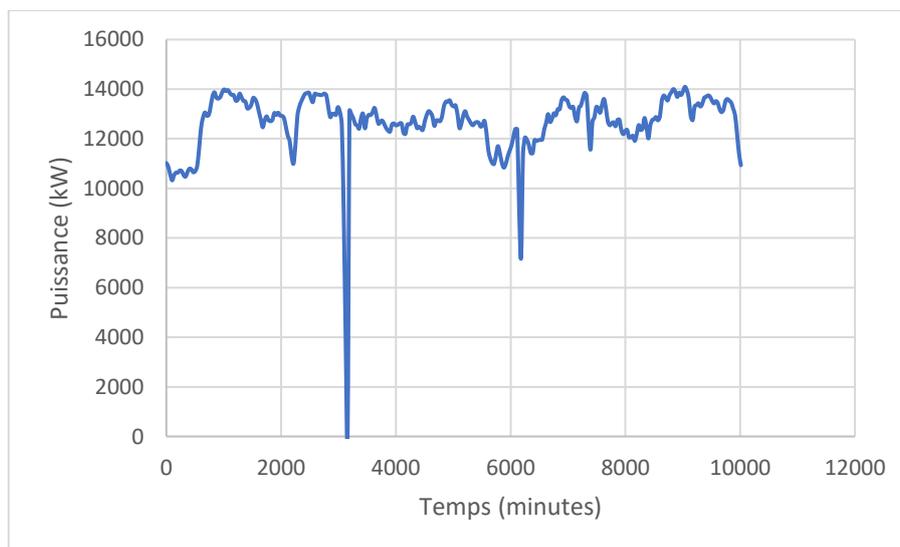


Figure 3 : Profil de consommation électrique de la mine

Les données sur la consommation électrique ont permis d'évaluer à 558 MWh la consommation journalière de la mine.

✚ Le profil des tensions entre phases

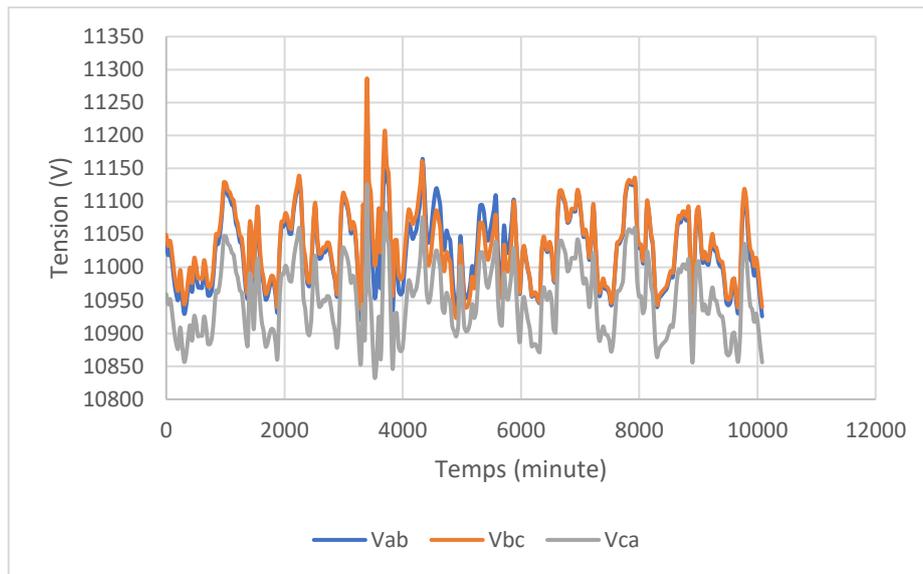


Figure 4 : Profil des tensions entre phases

Les tensions mesurées dans cette semaine sont comprises entre 10832V et 11287V. il n'y a pas eu de problème d'alimentation dû à la tension cette semaine.

✚ Profil des fréquences

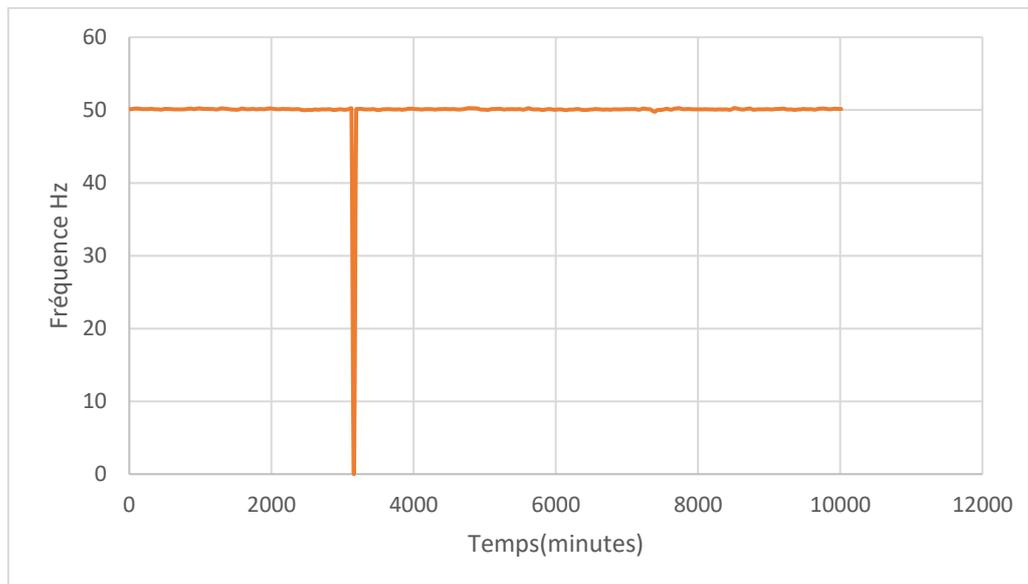


Figure 5 : Profil des fréquences

La fréquence minimale mesurée dans cette semaine était de 49,77 Hz. Le maximum quant à elle s'établissait à 50,26 Hz. Il s'agissait d'une semaine idéale côté fréquence du réseau.

✚ Profil des courants

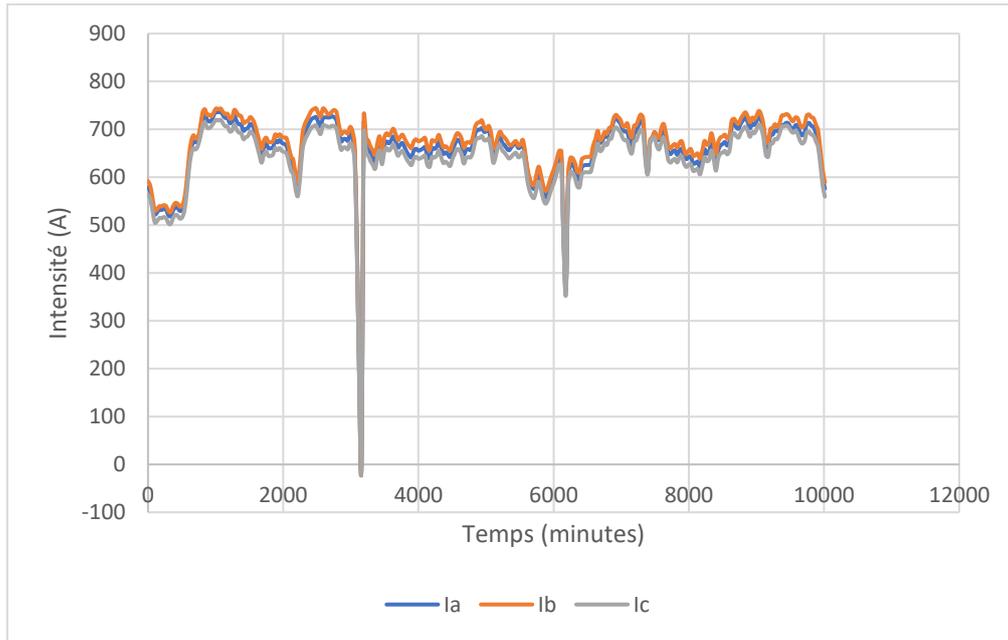


Figure 6 : Intensité des courants

Les intensités des courants varient entre 178 A et 744 A. Nous constatons que l'équilibrage des charges est acceptable.

III. MÉTHODOLOGIE DE LA CONCEPTION DU PROJET

III.1. Matériels

Plusieurs outils et moyens matériels nous ont servi à bien mener notre étude.

- **L'ensemble des données et documents mis à disposition** : il s'agit entre autres des schémas électriques, le schéma de traitement de l'or, un fichier contenant les mesures des tensions, de la puissance consommée, des intensités et des fréquences d'une semaine de fonctionnement. Le fichier a servi à la génération des profils représentés ci-dessus (figures 4 à 6) ;
- **Matlab/Simulink** : ce logiciel a été utilisé pour la simulation du fonctionnement du STATCOM pour la régulation de la tension ;
- **Microsoft Office Excel** : tous les calculs et certains graphes ont été effectués avec ce logiciel.

III.2. Méthodologie de travail

Notre travail pour trouver une solution à l'instabilité de la tension d'alimentation de la mine par l'installation d'une unité du STATCOM se subdivise en quatre points :

- Premièrement, nous avons fait une collecte de données sur l'alimentation électrique du site. Il était important de comprendre les problèmes rencontrés et les solutions déjà appliquées ou envisagées pour chaque cas ;
- Deuxièmement, une revue bibliographique a été faite pour comprendre les composants, le fonctionnement et l'utilisation du STATCOM ;
- Troisièmement, nous avons fait une simulation du STATCOM afin de conclure sur la capacité de ce dernier à solutionner le problème majeur rencontré sur le réseau électrique de la mine à savoir l'instabilité de la tension du réseau de la SONABEL. Nous avons également fait des propositions pour un bon choix de l'unité ;
- Finalement, nous avons abordé l'étude économique et l'impact environnemental du projet afin de faire ressortir sa pertinence.

CONCLUSION

Le projet de l'installation du STATCOM répond à un besoin d'amélioration de la qualité de l'électricité au niveau local de la mine. Après ce chapitre, nous allons montrer le rôle du STATCOM dans la résolution du principal problème rencontré à Houndé Gold Operation.

CHAPITRE II : STATCOM, UNE SOLUTION POUR L'INSTABILITÉ DES RÉSEAUX ELECTRIQUES

INTRODUCTION

Ce chapitre présente et définit le STATCOM et ses avantages. Nous allons montrer les composantes essentielles à l'installation du STATCOM et des détails aidant au choix de l'unité. À la fin de ce chapitre, nous donnerons des recommandations sur le choix de la principale composante qu'est le convertisseur de source de tension.

I. PROBLÈMES RENCONTRÉS SUR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

I.1. Mauvaise qualité de la tension

Instabilité de la tension

La stabilité de la tension peut être définie comme étant la capacité de maintenir une tension de barre constamment acceptable à chaque nœud du réseau, dans les conditions normales de fonctionnement. On parle d'instabilité du réseau en tension lorsqu'une perturbation, une modification de la charge entraîne une chute de tension progressive et incontrôlable pouvant occasionner un effondrement généralisé de la tension.

Les causes probables de l'instabilité de la tension sont entre autres :

- Le mauvais réglage de la tension ;
- La non-maîtrise des caractéristiques de la charge ;
- L'inefficacité ou les mauvais réglages des dispositifs de compensation de la puissance réactive.

Creux de tensions et coupures brèves

Les creux de tension comme représentés sur la Figure 7 : Creux de tension[2] sont dus à des défauts sur le réseau de transport entraînés par des phénomènes aléatoires ou sur l'installation elle-même. Ces phénomènes conduisent très souvent à des courants élevés qui provoquent à travers les impédances des éléments du réseau une chute de tension qui varie entre 10 % et 90 % de la valeur nominale pendant une durée d'au moins 10 ms. L'amplitude de cette chute est plus faible lorsque le point d'observation est électriquement éloigné de la source de

perturbation. La durée de ces creux peut aller de 10 ms à plusieurs secondes. Les défauts sont plus souvent éliminés en moins de 0,2 s[1] lorsque le réseau est stable.

Une coupure brève est une perte complète de la tension d'alimentation d'une durée de trois secondes à moins d'une minute. Elles ont lieu le plus souvent lorsque la tension d'alimentation baisse de plus de 0,1 pu. La qualité de la tension est déterminée par l'amplitude qui doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$. En dehors de cette plage, des dysfonctionnements peuvent être causés par les creux de tension et les coupures brèves.

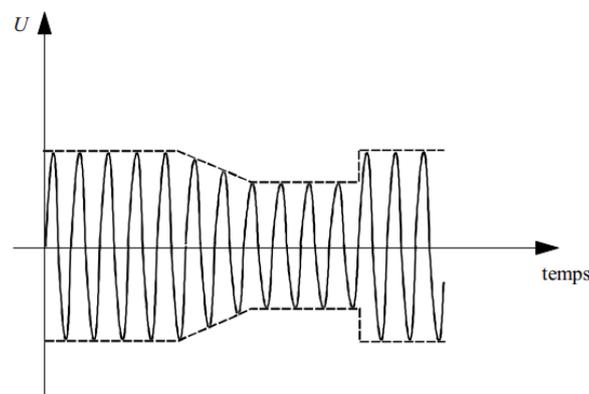


Figure 7 : Creux de tension[2]

✚ Fluctuations de tension (flicker)

D'une amplitude généralement inférieure à plus ou moins 10 % de la tension nominale, les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou aléatoires de l'enveloppe de la tension. Le nom « flicker » provient de son effet de papillotement sur l'éclairage qui advient lorsque la marge de tolérance est dépassée. La Figure 8 montre ces fluctuations.

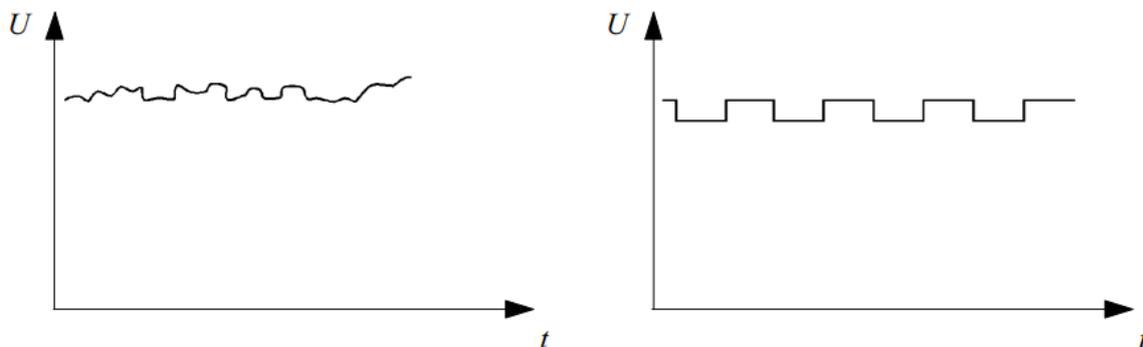


Figure 8 : Fluctuations de tension[2]

✚ Chute de tension

La circulation du courant dans un câble électrique entraîne une chute de tension dans celui-ci. Elle est liée à l'impédance ou à la résistance du flux de courant dans les différents éléments du circuit électrique. L'amplitude de la chute est alors plus élevée lorsque le courant appelé est considérable. De plus, lorsque des récepteurs à très grand courant de démarrage démarrent, des perturbations se produisent pouvant même causer un arrêt des générateurs ou un déclenchement des équipements de protections. Ces phénomènes lorsqu'ils sont récurrents causent d'énormes pertes économiques aux consommateurs.

✚ Déséquilibre de tension

On parle de déséquilibre de tension triphasée lorsque les trois tensions ne sont pas en déphasage les uns des autres de 120° et ne sont pas égales en amplitude. Il est le plus souvent dû à l'alimentation d'une charge non équilibrée.

Le déséquilibre de tension trop important (supérieur à 2 % en considérant la valeur moyenne) cause une surchauffe des câbles électriques et donc un surdimensionnement de ceux-ci pour remédier à ce problème qui peut dégrader prématurément les charges triphasées [3]. La Figure 9 illustre un exemple de déséquilibre de tension.

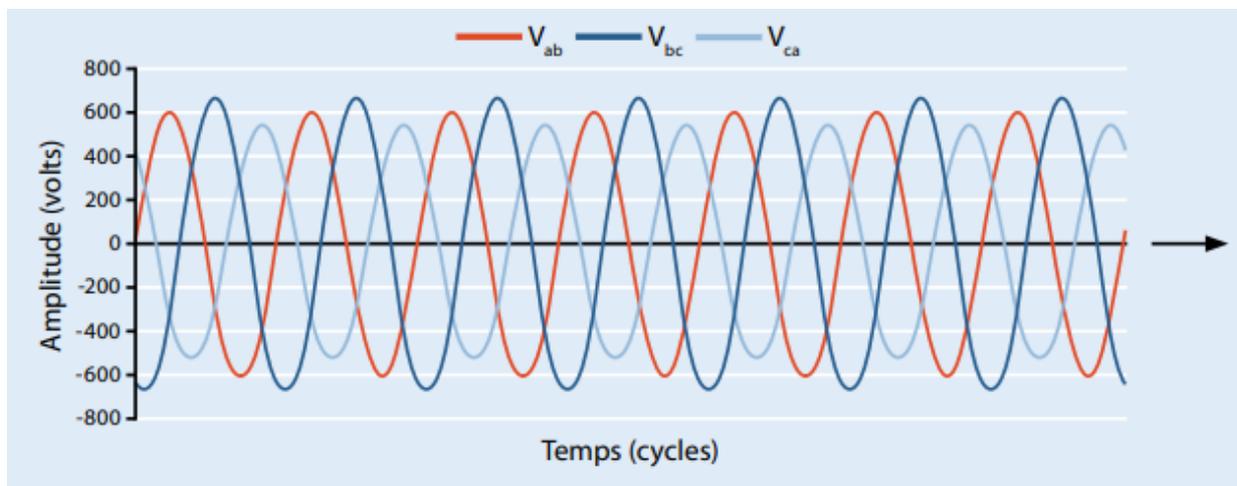


Figure 9 : Exemple de déséquilibre de tension triphasée[3]

✚ Surtensions

Il y'a surtension lorsque la tension apportée est supérieure à la tension maximale prévue. C'est une augmentation de l'amplitude de la tension de 1,1 pu à 1,8 pu. Elle est l'une des causes principales d'importants dommages sur les appareils et installations électriques. Les

surtensions peuvent être de type différentiel c'est-à-dire entre deux conducteurs actifs dans lequel cas la valeur de l'amplitude peut atteindre 1,73 pu. Le second cas est de type commun c'est-à-dire entre un conducteur actif et une masse[4] qui peut conduire à une valeur de 1,5 pu sur la phase. Les principales causes des surtensions sont :

- Le déclenchement de charges importantes ;
- Une défaillance des régulateurs de tension ;
- Des phénomènes naturels comme la foudre et la tempête ;
- Des manœuvres sur la ligne ;
- Des courts-circuits.

Variations de fréquence

Bien que ces défauts soient rares dans des réseaux synchrones, les variations de fréquence perturbent l'alimentation électrique lorsqu'elles dépassent 1 Hz. Leurs causes vont de l'évolution continue de la consommation aux incidents de type court-circuit en passant par les variations brutales de la production électrique. La norme 1000-2-4, paragraphe 4-4 sur le niveau de compatibilité dans les installations industrielles, énonce que les variations de fréquence peuvent aller jusqu'à plus ou moins 4 %. Un système de délestage permet de maintenir la fréquence en cas de surcharge[2]. La Figure 10 ci-dessous illustre les variations de fréquences à la mine pendant une semaine.

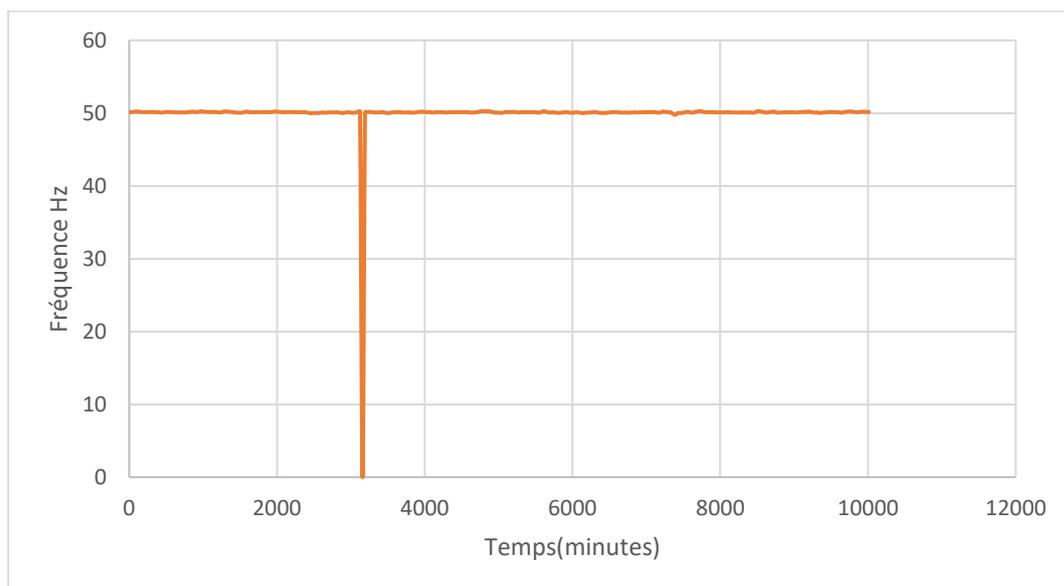


Figure 10 : Variation des fréquences

I.2. Harmoniques

Les harmoniques sont considérés comme des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau. Les perturbations des harmoniques engendrent des signaux déformés et non parfaitement sinusoïdaux sur le réseau comme illustrés sur la Figure 11.

Les courants harmoniques proviennent très souvent des charges non linéaires. La proportion de ces amplitudes dépend de la charge. Plus la charge est importante, plus les amplitudes sont élevées et peuvent causer des échauffements de certains équipements comme les condensateurs et provoquer le dysfonctionnement des systèmes électroniques.

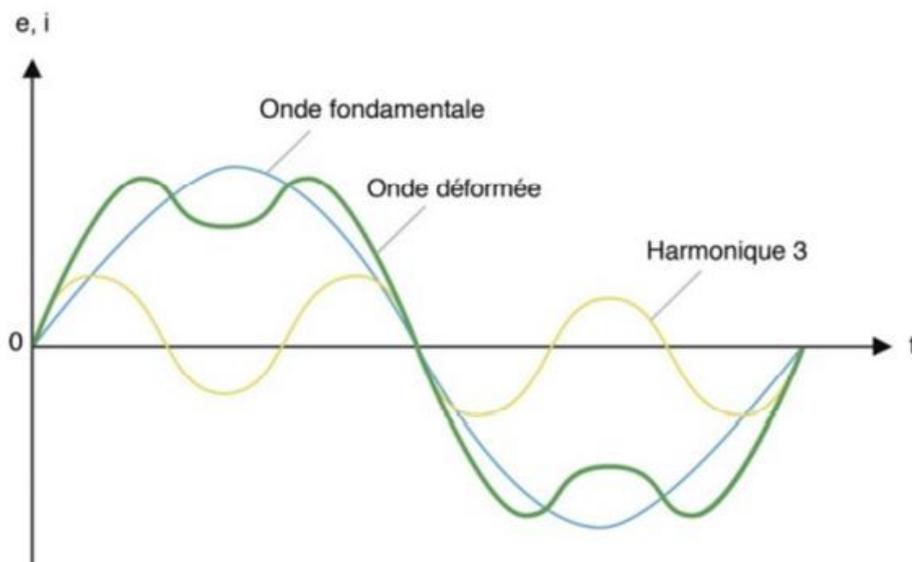


Figure 11 : Distorsion causée par un seul harmonique[5]

I.3. Puissance réactive

La puissance réactive sert à l'aimantation des circuits magnétiques des machines électriques (transformateurs, moteurs) et le fonctionnement de certains appareils tels que les lampes fluorescentes. Son expression est obtenue par la relation présentée dans la Figure 12.

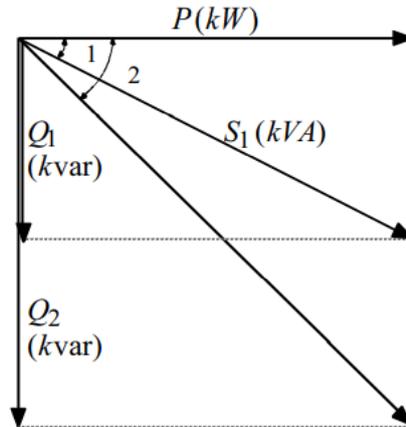


Figure 12 : Puissance réactive

Elle présente plusieurs problèmes d'ordre technique et économique lorsqu'elle est acheminée par les lignes électriques de transport à cause du courant appelé très élevé qui en découle. La Figure 12 nous montre que pour une même puissance active, la puissance apparente demandée est plus grande lorsque la puissance réactive est transportée par la ligne électrique. Cette situation oblige les industriels à produire la puissance réactive près de leurs installations pour éviter d'être pénalisés par les sociétés de distribution d'électricité.

Relation entre la stabilité et la compensation d'énergie réactive :

La puissance dans un réseau à courant alternatif comporte deux composantes : la puissance active P et la puissance réactive Q . La puissance active est transformée par les moteurs en énergie mécanique, thermique ou électrique selon le besoin. La puissance réactive sert à l'aimantation des circuits magnétiques des machines électriques (moteurs, transformateurs), ainsi qu'au fonctionnement de certains appareils comme les lampes fluorescentes.

L'alimentation d'une charge $P + jQ$ peut être représentée par la figure ci-dessus. Pour une charge inductive, la tension aux bornes de la charge est en avance sur le courant qui la traverse d'un angle φ . La composante active du courant I_a est en phase avec la tension V_r pendant que la composante réactive I_r est en quadrature avec cette même tension. Le courant I_a est porteur de la puissance active tandis que le courant I_r est responsable de la puissance réactive en cas de besoin.

L'équation du courant injecté par la source est la suivante :

$$\bar{I} = \frac{(V_s < \theta_s) - (V_r < \theta_r)}{(Z < \gamma)} \quad (\text{II-1})$$

Où V_s et V_r sont les tensions de la ligne, θ_s et θ_r sont des angles de phase de ces tensions et $Z < \gamma$ est l'impédance de ligne.

La puissance fournie par le jeu de barre source est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{S}_s = \bar{V}_s * \bar{I}_s = (V_s < \theta_s) * \left(\frac{(V_s < \theta_s) - (V_r < \theta_r)}{(Z < \gamma)} \right) \quad (\text{II-2})$$

$$\bar{S}_s = \left(\frac{V_s^2}{Z} \right) < (\gamma) - \left(\frac{V_s \cdot V_r}{Z} \right) < (\gamma + \theta_s - \theta_r) \quad (\text{II-3})$$

En supposant $R \ll X$ on a : $Z = jX$ et $\gamma = \frac{\pi}{2}$.

À partir de l'équation (II-3), on calcule les puissances actives et réactives transitant sur une ligne comme suit :

$$P_s = \frac{V_s \cdot V_r}{X} \sin \delta \quad (\text{II-4})$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{Z} - \frac{V_s \cdot V_r}{X} \cos \delta \quad (\text{II-5})$$

Avec $\delta = \theta_s - \theta_r$, $Z = X$ et $\gamma = \frac{\pi}{2}$.

Ces dernières expressions montrent qu'il est important de produire l'énergie réactive près des charges pour éviter qu'elle soit transportée par la ligne. Cette technique est connue sous le principe de compensation d'énergie réactive et favorise une bonne qualité du réseau électrique.

Le STATCOM est généralement utilisé pour la compensation de l'énergie réactive et donc pour la régulation de la tension. Il génère une tension alternative en phase avec le réseau électrique à partir d'une source continue. Cela permet une amélioration du facteur de puissance et de compenser les chutes et les surtensions pour garantir une meilleure qualité de l'alimentation.

I.4. Justification du projet

Une étude préliminaire a permis de recenser les problèmes cités plus haut sur le réseau électrique de la mine. De tous ces problèmes, la dégradation de la qualité de la tension est celui qui cause le plus de dommages, car cela occasionne des ruptures de l'alimentation électrique de façon répétée. À l'issue de cette étude, une recommandation du STATCOM a été formulée

pour solutionner ce problème. Ce présent travail vise à montrer le bien-fondé de cette solution et sa faisabilité.

II. GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES FACTS

L'institut IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineering) définit les FACTS (Flexible AC Transmission System) comme des systèmes basés sur l'électronique de puissance et d'autres équipements statiques qui permettent de contrôler un ou plusieurs paramètres du système de transmission à courant alternatif afin d'améliorer la contrôlabilité et d'augmenter la capacité de transfert de puissance. Ils sont principalement composés d'éléments passifs comme les capacités et les inductances, de transformateurs, des composants de puissances (diodes, thyristors, transistors) et des éléments de contrôle spécifique à leur application. Les FACTS fonctionnent sur le principe de compensation parallèle, série ou hybride pour répondre aux fonctions qui sont les suivantes :

- ✓ Contrôle dynamique de la tension du réseau pour la réduction des perturbations ;
- ✓ Amortissement des oscillations entre les sources de tensions et les résonnances qui apparaissent entre la turbine et la génératrice électrique ;
- ✓ Amélioration de la stabilité du réseau pendant les phases transitoires ou en cas de défaut.

Les systèmes de compensation FACTS sont répartis en trois grands groupes selon leurs modes de connexion sur le réseau évoqués ci-après.

II.1. Les systèmes de compensation série

Ce sont des dispositifs connectés en série avec le réseau électrique. Ils peuvent être utilisés comme des impédances variables (capacitive ou inductive) ou une source de tension variable. Les compensateurs série modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci. Ce sont entre autres :

- Les Compensateurs série contrôlés par Thyristors, en anglais Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) ;
- Thyristor Controlled Series Reactor (TCSR);
- Thyristor Switched Serie Capacitor (TSSC);
- Compensateur Synchrone Statique Série, en anglais Static Synchronous Series Compensator (SSSC).

II.2. Compensation parallèle (shunt)

Ces compensateurs fonctionnent comme des impédances variables connectées en parallèle sur un réseau. Ils absorbent ou injectent un courant variable sur le réseau afin de modifier les puissances réactives et actives qui transitent dans cette ligne. Les différents types sont :

- Les Réactances commandées par Thyristors (RCT), en anglais TCR (Thyristor Controlled Reactor) ;
- Les Condensateurs Commandés par Thyristor (CCT), en anglais Thyristor Switched Capacitor (TSC) ;
- Le Compensateur Statique de Puissance Réactive (CSPR), en anglais Static Var Compensator (SVC) ;
- Les Thyristor Control Breaking Resistor (TCBR);
- Les Compensateurs statiques synchrones en anglais STATCOM ;
- Le Restaurateur Dynamique de Tension en anglais Dynamic Voltage Restorer (DVR).

II.3. Compensation hybride

Les compensateurs hybrides sont une combinaison des dispositifs série et parallèle commandés d'une manière coordonnée pour accomplir des rôles spécifiques. Par leurs configurations particulières, ils permettent un contrôle efficace de la tension, du facteur de puissance et le flux de la puissance active et réactive leur confèrent un rôle multivariable. De ce nombre on retrouve :

- Les compensateurs commandés par thyristors comme le transformateur déphaseur à thyristor ;
- Les compensateurs hybrides à base de GTO thyristors : Contrôleur de Transit de Puissance unifié (Unified Power Flow Controller UPFC) et le Contrôleur de Transit de puissance entre les lignes (Interline Power Flow Controller IPFC).

Le Tableau 1 : Application de quelques des FACTS est un récapitulatif de quelques domaines d'applications des FACTS et leurs applications privilégiées pour une bonne efficacité [6].

Tableau 1 : Application de quelques des FACTS

	Contrôle du transit de la puissance	Contrôle de la tension	Stabilité transitoire
SSSC	**	*	***
UPFC	***	***	***
SVC	*	**	*
STATCOM	*	***	**

Le tableau ci-dessus montre que le contrôleur de transit de puissance unifié UPFC présente plusieurs points positifs que le STATCOM. Cependant ce dernier est plus adapté à une application dans une industrie minière et sera donc retenu pour résoudre le problème rencontré à la mine.

III. COMPOSANTS DU STATCOM

Le STATCOM (STATic synchrone COMPensator) ou compensateur synchrone statique est un dispositif de compensation de la puissance réactive connecté en parallèle à un réseau alternatif. Il est basé sur un convertisseur électronique de tension VSC et incluant des commutations de ligne interrupteurs tels que les thyristors. Le STATCOM a pour rôle d'absorber ou de fournir la puissance réactive afin de réguler la tension du réseau indépendamment de celle-ci.

De son ancien nom STATCON (Statique synchrone Condenser), le STATCOM fait partie de la famille des FACTS et se différencie des autres compensateurs par les caractéristiques suivantes :

- Un temps de réponse très faible (moins de 1 ms) ;
- Une grande capacité à maintenir la tension du réseau à plus ou moins 5 % de la consigne, une stabilisation dynamique de la tension ;
- Une réduction des pertes actives sur les lignes ;
- Un équilibrage dynamique de la charge ;
- Un coût de maintenance très faible ;
- Une amélioration du facteur de puissance ;

- Régulation rapide de la puissance réactive
- Sortie de courant réactif complet même lorsque la tension du système est faible.
- Fonctions intégrées avancées à haute performance
- Algorithme de contrôle robuste pour la tension et le support réactif
- Conception de sous-modules redondants pour une fiabilité élevée.

Sans que cela soit exhaustif, les principaux composants du STATCOM sont les suivants :

III.1. Transformateur de couplage

L'onduleur du STATCOM est connecté à la ligne d'alimentation de la charge par un transformateur de couplage. Celui-ci fournit une réactance inductive à la ligne. Les pertes du transformateur doivent être mesurées à la puissance maximale et à la fréquence de l'alimentation pour respecter les exigences de la norme CEI/IS dans les conditions suivantes [7] :

- Perte à vide (perte fer) à la tension nominale et à la fréquence fondamentale ;
- Perte de charge (perte cuivre) à la valeur nominale correspondant au courant continu maximum et à 75 °C ;
- Perte de l'équipement de refroidissement du transformateur représentant les pertes auxiliaires à la tension nominale et à la fréquence fondamentale.

III.2. Convertisseur de source de tension VSC (Voltage Source Converter)

La source de tension convertit la tension continue (celle des batteries de condensateurs) en tension alternative triphasée pour le système d'alimentation. L'onduleur de tension fournit une tension qui est toujours en quadrature en arrière ou en avance par rapport au courant suivant que le STATCOM injecte ou reçoit du réactif. On distingue plusieurs types de convertisseurs répartis en deux grands groupes :

Les convertisseurs multi-impulsions

- **Convertisseur à six impulsions** : C'est le VSC de base du STATCOM. Les autres topologies sont composées de plusieurs convertisseurs à six impulsions. La Figure 13 montre une configuration d'un VSC à six impulsions à deux niveaux. Il est composé de six GTO et de diodes antiparallèles. Les GTO sont des dispositifs de commutation de système où le convertisseur génère des tensions de sortie alternative à partir d'une

source continue. On y retrouve également des VSC à six impulsions avec d'autres dispositifs auto commutés tels que les IGBT et les MCT ou IGCT.

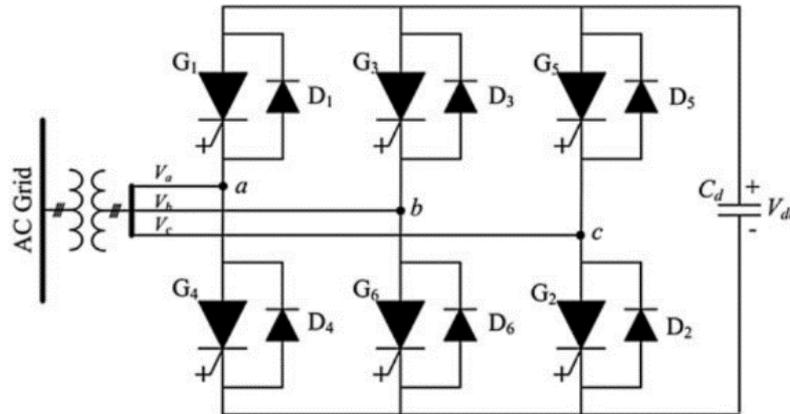


Figure 13 : VSC six impulsions à deux niveaux[8]

- **Convertisseur à douze impulsions :** Ce convertisseur est composé soit de convertisseurs à six impulsions à deux niveaux ou soit de convertisseurs à six impulsions à trois niveaux comme illustrés dans la Figure 14. Ces convertisseurs six impulsions sont mis en parallèle sur une ligne CC puis connectés en série avec un transformateur à la sortie. Le transformateur du VSC à deux niveaux est connecté au réseau alternatif en triangle-étoile tandis que celui du VSC à trois niveaux est connecté en étoile-étoile. Ces connexions permettent facilement l'élimination des harmoniques d'ordre inférieur.

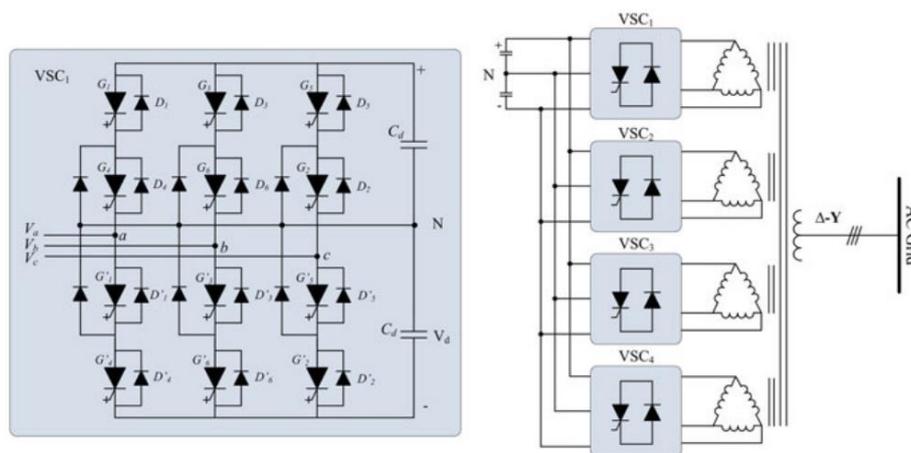


Figure 14 : VSC douze impulsions à trois niveaux[8]

- **Convertisseur à vingt-quatre impulsions** : Ce modèle, constitué de quatre convertisseurs six impulsions, est aussi connu sous le nom de convertisseur vingt-quatre impulsions quasi illustré par la Figure 15. Ce convertisseur permet l'élimination des 23^e, 25^e, 47^e et 49^e harmoniques dans la forme d'onde de la sortie alternative.

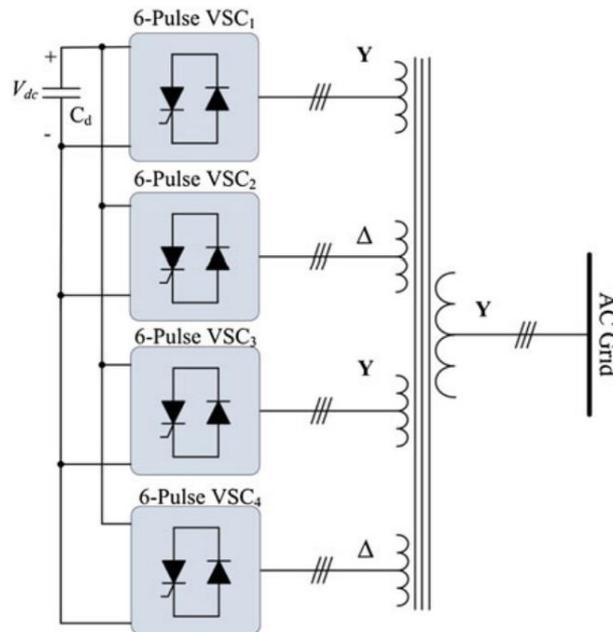


Figure 15 : Convertisseur à vingt-quatre impulsions[8]

- **Convertisseur à quarante-huit impulsions** : C'est le plus important de ce groupe de convertisseurs qui permettent de réduire considérablement les harmoniques. Ce convertisseur est constitué de huit convertisseurs à six impulsions et est capable d'éliminer les 47^e, 49^e, 95^e et 97^e harmoniques. Le transformateur à la sortie du convertisseur est connecté en zigzag côté primaire et en étoile-triangle côté secondaire. Son utilisation même en grande puissance (centaines de MVA) ne nécessite pas de filtres AC. Les connexions de ce convertisseur sont similaires à celles de la Figure 16.

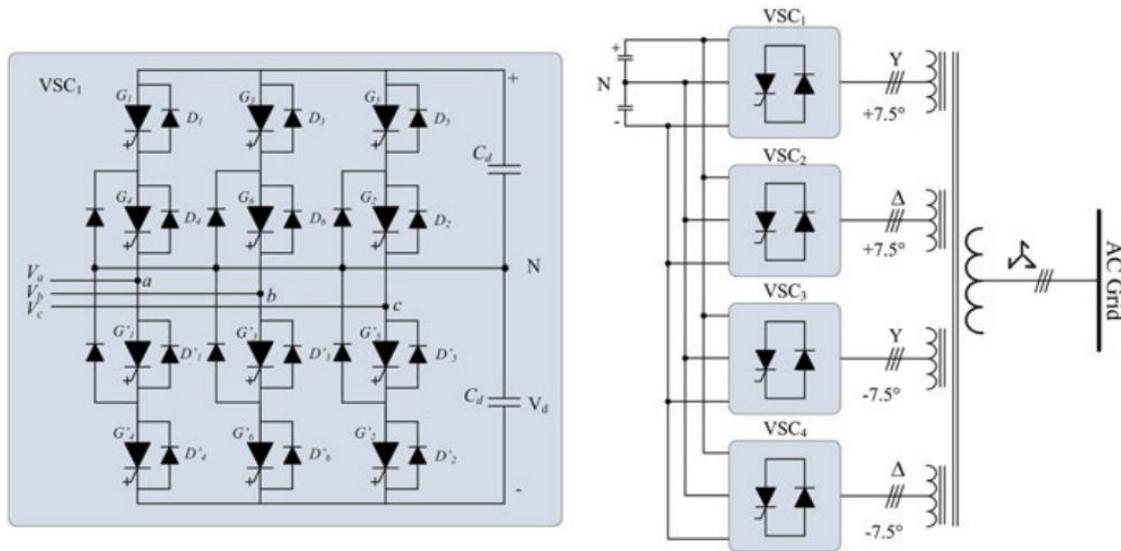


Figure 16 : Convertisseur à quarante-huit impulsions[8]

⚡ Convertisseurs multiniveaux

Les convertisseurs multiniveaux présentent plusieurs avantages que les convertisseurs multi-impulsions. Ils ont une contrainte de tension plus faible sur les dispositifs de commutation, une sortie de puissance plus élevée, une diminution des interférences électromagnétiques et des tensions en escaliers en fonction de la génération multi-niveaux[9]. Ils sont capables de contrôler des puissances allant de quelques kvar à plusieurs Mvar.

- **Convertisseur à diodes** : Ces convertisseurs sont généralement utilisés pour la compensation statique de l'énergie réactive, le contrôle de la variation de vitesse des moteurs et le contrôle des réseaux d'interconnexions. La tension de sortie est contrôlée par le sous-contrôleur du point neutre et le sous-contrôleur de la tension aux bornes. Les algorithmes de modulation de largeur d'impulsion à vecteur spatial et la modulation à base de vecteur virtuel permettent d'équilibrer la tension du condensateur de liaison CC. Ce type de convertisseur est principalement utilisé dans des applications d'énergie solaire et éolienne. La Figure 17 représente la typologie de ce convertisseur. Il est basé sur le partage d'un bus CC commun sur quatre condensateurs.

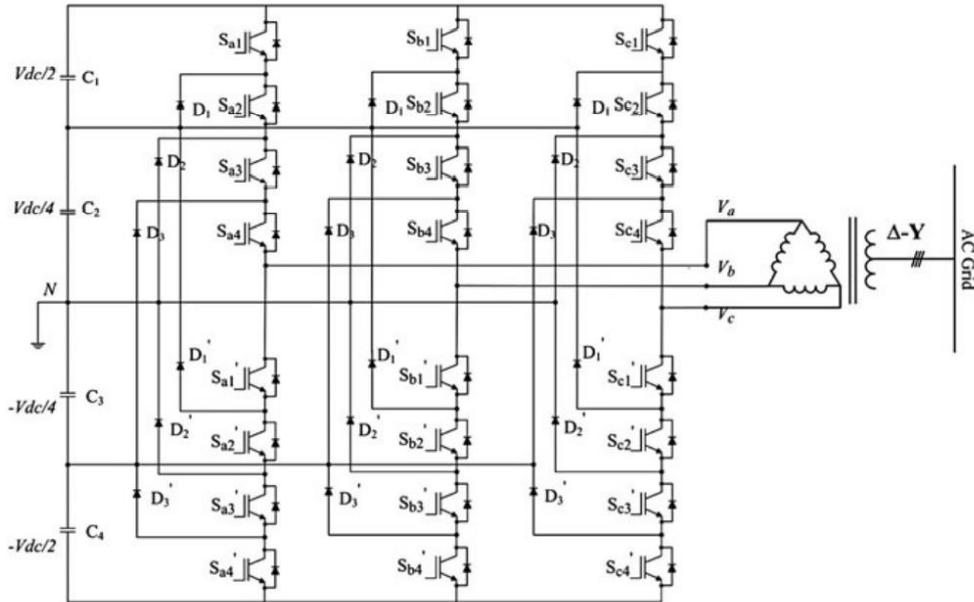


Figure 17 : Convertisseur multiniveau à diodes[8]

- **Convertisseur multi-niveau à condensateurs volants** : Ce convertisseur a été créé pour permettre une utilisation sur la conversion de puissance de haute tension en remplacement au convertisseur à diodes. Chaque cellule est constituée de deux dispositifs de commutation et d'un condensateur. Comme avantages, ce convertisseur fournit des capacités supplémentaires en cas de coupure de courant du fait du grand nombre de condensateurs et les combinaisons de commutation redondantes offrent une flexibilité dans le contrôle et l'équilibrage des différents niveaux de tension. Les inconvénients sont entre autres le coût élevé pour ces configurations de condensateurs et la complexité de son assemblage. De plus, le contrôle et l'équilibrage de la tension du condensateur deviennent plus compliqués avec un nombre excessif de cellules[10]. La Figure 18 montre un convertisseur à condensateurs volants à cinq niveaux.

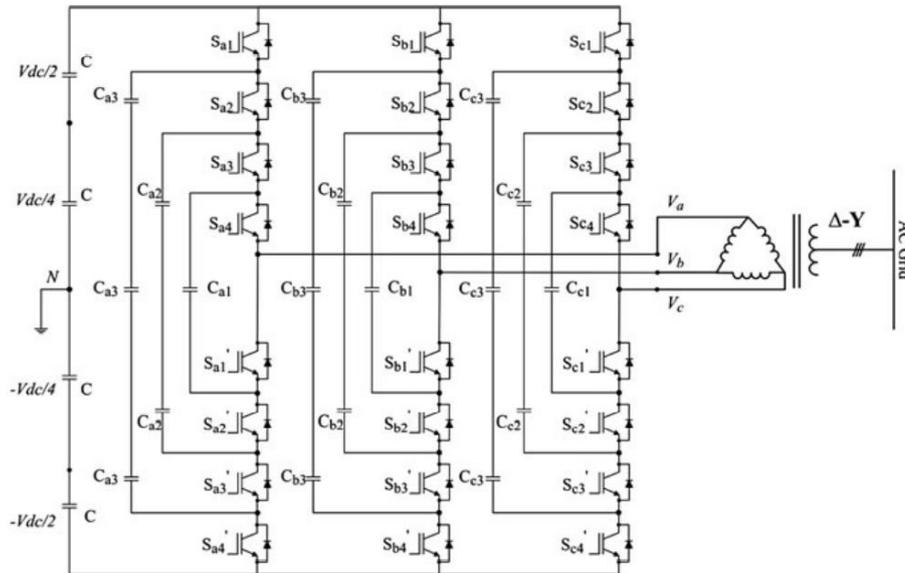


Figure 18 : Convertisseur à condensateurs volants à cinq niveaux[8]

- **Les convertisseurs multiniveaux de pont en H cascade** : Ce sont les meilleurs et les plus répandus dans les utilisations de STATCOM pour la compensation de l'énergie réactive. Cette topologie est préférée aux autres topologies parce qu'elle se compose de plusieurs modules de pont en H connectés en série pour générer une tension de sortie à plusieurs niveaux. La grande fréquence de commutation et le taux de puissance accru par l'ensemble de l'appareil et partagé de manière égale entre chaque module sont ses caractéristiques les plus importantes. De plus, ce convertisseur est capable d'éliminer les harmoniques d'ordre supérieur par rapport aux autres topologies. Ce convertisseur permet également de se passer des condensateurs grâce à sa source de tension CC isolée. La Figure 19 illustre un convertisseur de pont en H à cinq niveaux.

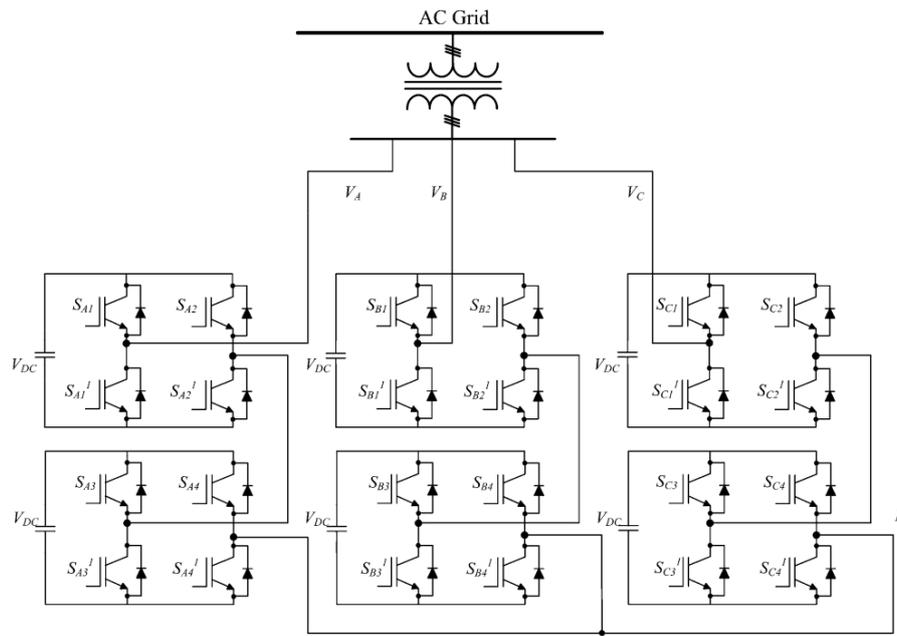


Figure 19 : Convertisseur en pont H cascade[8]

III.3. Condensateur à courant continu

Il s'agit d'un composant de stockage d'énergie servant d'entrée pour le VSC. Les unités de STATCOM en sont dotées pour permettre leurs fonctionnements en cas de perte de l'alimentation principale pendant un bref moment. Toutefois, pour un grand besoin d'une puissance active, des unités extérieures de condensateurs CC peuvent être couplées au STATCOM selon la capacité désirée.

III.4. Filtres

Les topologies STATCOM basées sur des convertisseurs multi-niveaux coûtent moins cher, ont des structures de dispositifs moins volumineuses, des pertes de puissance actives moins élevées que les topologies STATCOM multi-impulsions. Cependant, la structure VSC inclut des harmoniques d'ordre supérieur à la sortie. Cela est dû au fait que les commutateurs de puissance utilisés fonctionnent à des fréquences de commutation inférieures pour réduire les pertes de commutation, chose qui provoque des harmoniques de courant de lignes à des fréquences plus basses. Pour cela, l'utilisation d'un filtre à la sortie du STATCOM est indispensable pour éliminer les harmoniques d'ordre haut et bas. Les méthodes de filtrage les plus couramment utilisées sont les filtres passifs qui comprennent principalement les filtres L, les filtres LC, les filtres LCL et les filtres actifs appelés filtres de puissance actifs. Cependant,

les fabricants de STATCOM se passent de l'utilisation de filtres pour la plupart des technologies basées sur des VSC multi-niveaux en raison de leur capacité à réduire les harmoniques d'ordres inférieurs contrairement aux SVC classiques ou à trois niveaux[11].

III.5. Système de commande et de communication

La Figure 20 ci-dessous représente la structure d'un couplage du STATCOM au réseau.

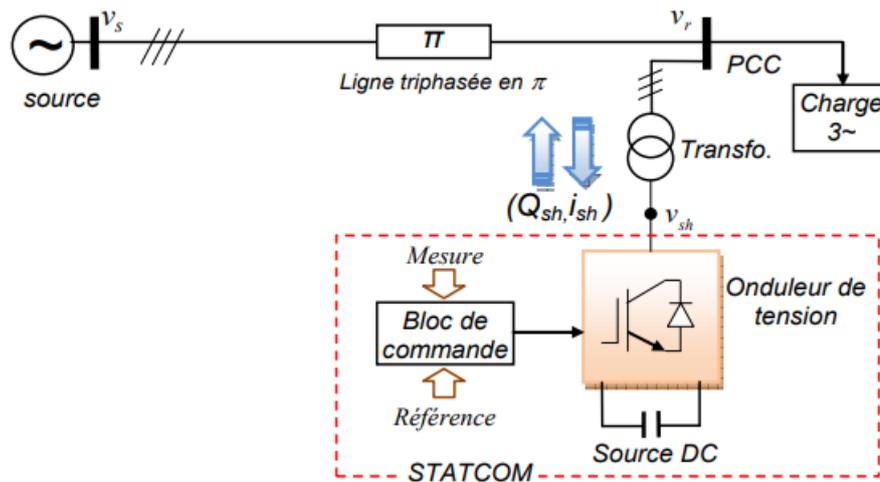


Figure 20 : Structure d'un STATCOM couplé au réseau[5]

Les capteurs et les contrôleurs ont pour rôles de mesurer et de maintenir les tensions de références de l'onduleur en agissant sur les impulsions d'ouverture et de fermeture des interrupteurs électroniques comme les IGBTs ou les thyristors à GTO.

La fonction principale est de réguler l'amplitude de la tension au point de connexion PCC avec la ligne. Un échange de puissance réactive entre le STATCOM et le système au point d'interface est produit à travers la différence de tension alternative de la réactance de fuite du transformateur. Ce transformateur de couplage utilise une tension secondaire en phase avec la tension du réseau. Le système de communication entre le STATCOM et le réseau électrique est fourni par le fabricant de l'unité. Il s'agit d'un logiciel intégré dans un ordinateur pour gérer ou contrôler le fonctionnement du STATCOM.

IV. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU STATCOM

Le STATCOM est un compensateur installé en parallèle comme illustré par la Figure 21. Son principe de fonctionnement est similaire à celui du compensateur synchrone c'est-à-dire que les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'un champ tournant. Ce principe est rendu possible grâce à l'évolution des composantes de l'électronique de puissance telle que

les GTO de forte puissance et la création des cellules de commutations bidirectionnelles formées de GTO et de diodes en antiparallèle.

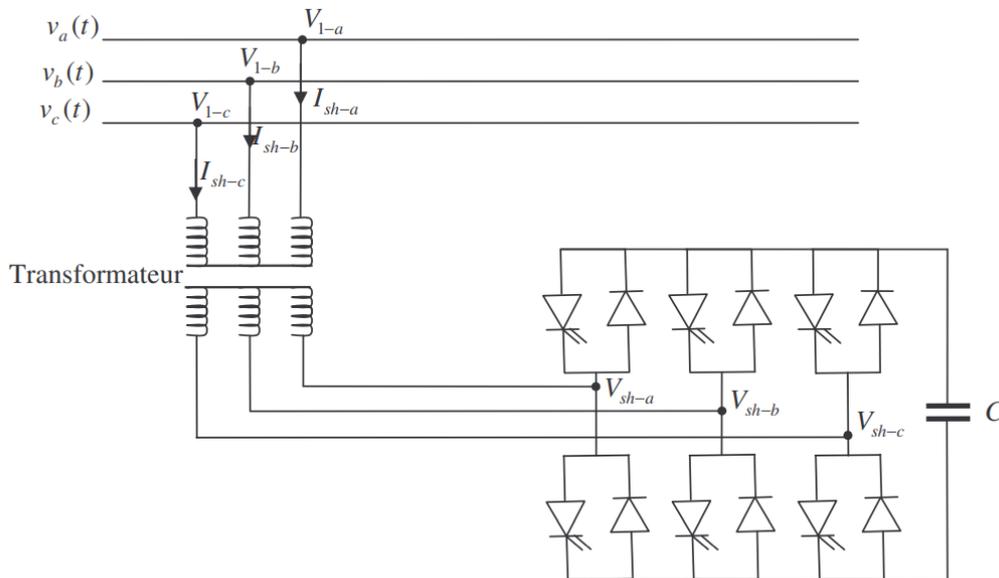


Figure 21 : Structure basique du STATCOM [6]

Le STATCOM échange l'énergie réactive avec le réseau. Ce mécanisme s'effectue par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur, laquelle est en phase avec la tension du réseau. Pour l'analyse du fonctionnement du STATCOM, nous négligerons les échanges d'énergie active entre la source et le STATCOM. Seul l'échange entre le VSC du STATCOM et la source de tension sera considéré. L'écoulement de la puissance active et la puissance réactive entre ces deux sources de tension sont exprimés par ces formules ci-dessous [12] :

$$P = \frac{V_1 \cdot V_{sh}}{X_{sh}} \cdot \sin \delta \tag{II-6}$$

$$Q = \frac{V_1}{X_{sh}} [V_1 - V_{sh} \cdot \cos \delta] \tag{II-7}$$

δ : angle de phase entre la tension du réseau V_1 et la tension de l'onduleur V_{sh} .

X_{sh} : Réactance de fuite d'une phase du transformateur de couplage shunt.

Le STATCOM est configuré de sorte que l'angle de phase contrôle le flux actif entre la source CA et le convertisseur de la source de tension (VSC). Le débit de la puissance réactive est déterminé par l'amplitude de la source de tension V_1 et la tension fondamentale de la sortie du

VSC V_{sh} . Si la tension du VSC est inférieure à la tension du réseau, le courant circulant à travers la réactance est inductif c'est-à-dire déphasée de $-\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension du réseau comme représenté sur la Figure 22. Le STATCOM fonctionne alors en mode inductif. Si par contre la tension du VSC est supérieure à la tension du réseau, le courant circulant à travers la réactance est capacitif soit déphasé de $+\frac{\pi}{2}$. Le STATCOM fonctionne alors en mode capacitif comme présenté sur la Figure 23. Si la tension du VSC est égale à la tension du réseau, il n'y a pas d'échange d'énergie et le courant qui circule dans l'inductance est nul. Il faut noter qu'en fonctionnement normal, une petite quantité d'énergie active circule dans le VSC dans le but de compenser les pertes de puissance à l'intérieur du VSC.

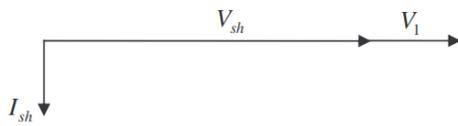


Figure 22 : Comportement inductif

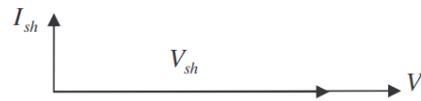


Figure 23 : Comportement capacitif

L'amplitude du courant réactif échangée entre le STATCOM et le réseau est donnée par l'équation suivante[13] :

$$I = \frac{V_1 - V_{sh}}{X_{sh}} \quad (\text{II-8})$$

En effet, la sortie du courant réactif est liée à l'angle d'amorçage du thyristor qui est donné par le déphasage entre les tensions du STATCOM V_{sh} et du bus V_1 . Cet angle permet de modifier l'état de charge du condensateur et l'amplitude de la tension E du STATCOM. La différence d'amplitude de la tension du STATCOM et la tension du réseau ainsi que la réactance de fuite du transformateur X_{sh} détermine l'amplitude du courant réactif injecté sur le réseau. De la même manière, la variation de l'amplitude de la tension permet de réguler l'échange de l'énergie réactive entre l'onduleur du STATCOM et le réseau.

La caractéristique tension-courant du STATCOM est représentée par la Figure 24. Elle est similaire à d'autres compensateurs, à la différence que le STATCOM peut continuer à fournir un courant maximal même lorsque la tension du réseau est faible. Cela permet une meilleure régulation de la tension du réseau.

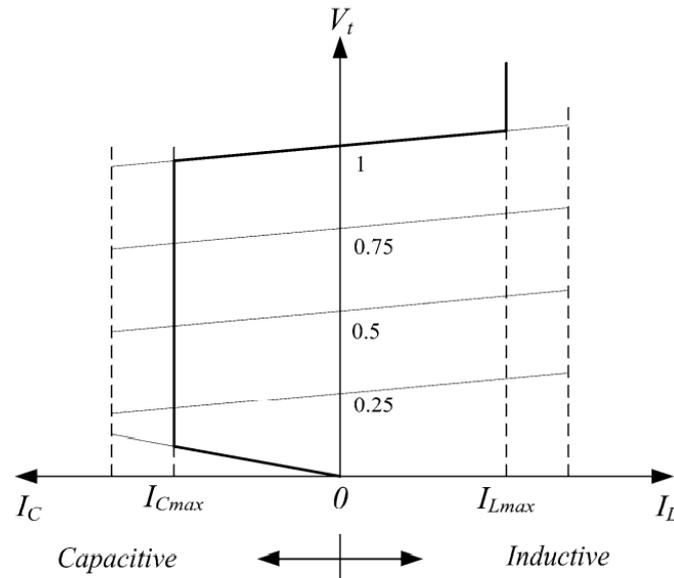


Figure 24 : Caractéristique V-I du STATCOM [7]

CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre le principal problème qui a conduit au projet d'installation du STATCOM. Nous avons également abordé la famille des FACTS utilisés pour l'amélioration de la qualité de l'énergie plus particulièrement le STATCOM et son principe de fonctionnement. Le STATCOM est l'un des meilleurs systèmes utilisés pour la compensation de l'énergie réactive et la régulation de la tension. Après un aperçu sur quelques topologies de convertisseurs VSC, nous concluons que la topologie multiniveau à pont H en cascades présente plus d'avantages que les autres. Elle sera préférée pour une application à la mine de Houndé.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation du STATCOM et le choix d'un module adapté à notre application.

CHAPITRE III : MODÉLISATION ET COMMANDE DU STATCOM

INTRODUCTION

Le STATCOM est un compensateur capable de fournir ou d'absorber de l'énergie réactive de la ligne sur laquelle il est connecté et par la même occasion influencer sur l'amplitude de la tension. Nous expliquons dans ce chapitre le fonctionnement du STATCOM pour la régulation de la tension. Dans la première partie, un modèle mathématique du STATCOM permettant une compréhension du système de commande du compensateur est développé. La deuxième partie est réservée à la commande où nous allons, après une étude de deux types de commandes, proposer une pour une application à la mine. Dans la troisième partie, nous allons expliquer davantage le rôle et le fonctionnement du STATCOM par une simulation d'un modèle proposé par *Giroux et al.* [14]. La simulation sera faite sur l'environnement Matlab Simulink du logiciel Matlab R2022b.

À la fin du chapitre, nous présenterons les résultats obtenus des simulations et nous proposerons une unité de STATCOM.

I. MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DU STATCOM

Le STATCOM comme tout système électrique peut être représenté par des équations mathématiques qui déterminent son fonctionnement. La modélisation consiste à mettre ces équations mathématiques en relation en vue d'extraire des lois de commandes reliant les grandeurs de sorties aux grandeurs d'entrée.

La Figure 25 présente un circuit basique d'un dispositif de STATCOM connecté au réseau.

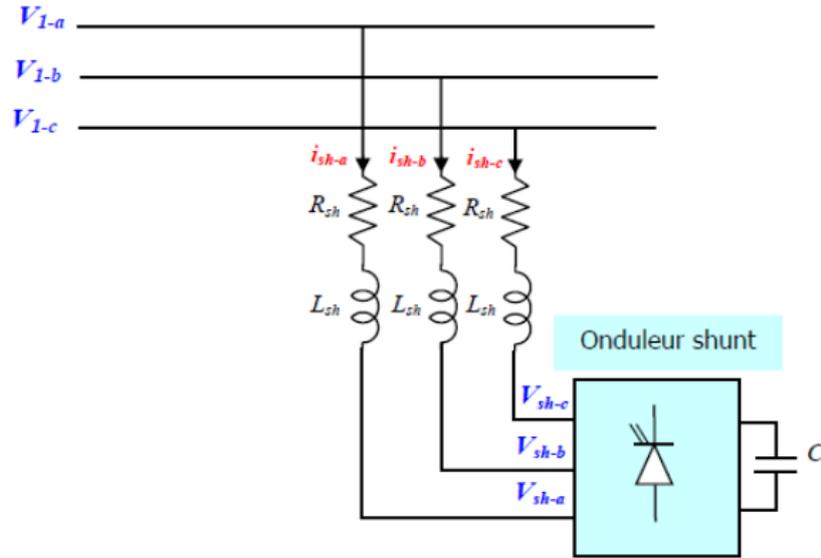


Figure 25 : Dispositif de STATCOM connecté au réseau [15]

Les équations obtenues à partir de ce schéma par application des lois Kirchhoff [5] sont entre autres :

$$\begin{cases} V_{sh-a} - V_{1-a} = R_{sh}i_{sh-a} + L_{sh} \frac{di_{sh-a}}{dt} \\ V_{sh-b} - V_{1-b} = R_{sh}i_{sh-b} + L_{sh} \frac{di_{sh-b}}{dt} \\ V_{sh-c} - V_{1-c} = R_{sh}i_{sh-c} + L_{sh} \frac{di_{sh-c}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

$(V_{sh-a}, V_{sh-b}, V_{sh-c})$: Tensions triphasées à la sortie du STATCOM ;

$(V_{1-a}, V_{1-b}, V_{1-c})$: Tensions triphasées au point de couplage ;

$(i_{sh-a}, i_{sh-b}, i_{sh-c})$: Courants triphasés shunt injectés ou absorbés par le STATCOM

L'équation de la composante de la tension à la sortie du STATCOM est la suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{sh-a} \\ V_{sh-b} \\ V_{sh-c} \end{bmatrix} = m V_{dc} \begin{bmatrix} \sin(\omega_t + \alpha) \\ \sin(\omega_t - \frac{2\pi}{3} + \alpha) \\ \sin(\omega_t + \frac{2\pi}{3} + \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{III-2})$$

m : Taux de modulation ;

α : Angle de phase de l'onde de modulation ;

ω : La fréquence du système.

Le courant au côté continu de l'onduleur est exprimé en appliquant les lois de Kirchhoff comme suit :

$$i_{dc} = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{III-3})$$

$$i_{dc} = \frac{1}{V_{dc}} (V_{sh-a} i_{sh-a} + V_{sh-b} i_{sh-b} + V_{sh-c} i_{sh-c}) \quad (\text{III-4})$$

En remplaçant les composantes de la tension V_{sh-a} , V_{sh-b} et V_{sh-c} de (III-2) dans (III-4) nous obtenons l'équation :

$$i_{dc} = m(i_{sh-a} \sin(\omega_t + \alpha) + i_{sh-b} \sin(\omega_t - \frac{2\pi}{3} + \alpha) + i_{sh-c} \sin(\omega_t + \frac{2\pi}{3} + \alpha)) \quad (\text{III-5})$$

En passant par la transformation de Park qui permet le passage d'un système triphasé équilibré (a, b, c) à un système d'axes en rotation avec deux axes orthogonaux (d, q) [5], nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{sh-d} - V_{1-d} = R_{sh} i_{sh-d} + L_{sh} \frac{di_{sh-d}}{dt} - \omega L_{sh} i_{sh-d} \\ V_{sh-q} - V_{1-q} = R_{sh} i_{sh-q} + L_{sh} \frac{di_{sh-q}}{dt} - \omega L_{sh} i_{sh-q} \end{cases} \quad (\text{III-6})$$

Et,

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3m}{2C} (i_{sh-d} \cos \alpha + i_{sh-q} \sin \alpha) \quad (\text{III-7})$$

Les deux dernières équations du modèle (d, q) du STATCOM sont utilisées pour la conception des contrôleurs côtés AC et DC.

II. COMMANDE DU STATCOM

Plusieurs modèles existent pour la modélisation de la commande du STATCOM en fonction des rôles souhaités, les applications et les tailles des réseaux à contrôler. Dans notre travail, nous étudierons deux régulateurs : le régulateur PI et le régulateur IP sans zéro.

II.1. Commande du contrôleur classique proportionnel intégral PI

Le contrôleur est très utilisé dans la conception de STATCOM, car il permet un bon suivi de la consigne. Au total trois niveaux de contrôle sont observés au niveau du STATCOM : le contrôle de tension DC, le contrôle de courant côté AC et le contrôle de la tension au point de couplage (PCC). La Figure 26 : Schéma bloc d'une commande PI du STATCOM [5] présente le schéma bloc complet de la commande du contrôleur classique PI.

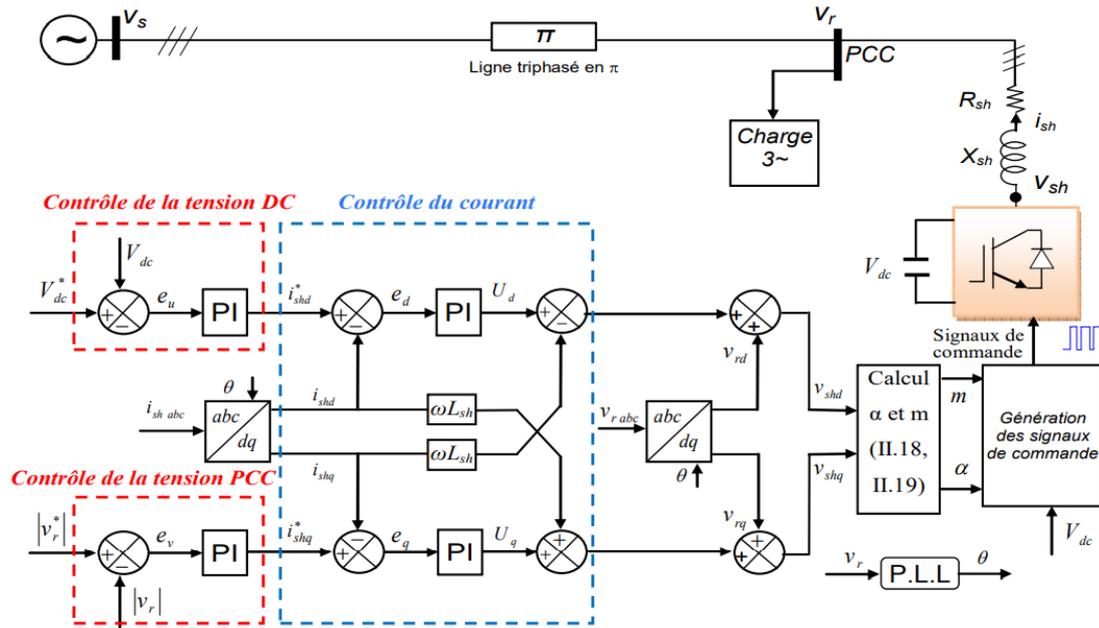


Figure 26 : Schéma bloc d'une commande PI du STATCOM [5]

⚡ Contrôle du courant côté AC

Le contrôle des puissances active et réactive échangées entre le STATCOM et le réseau est rendu possible par la régulation des composantes directe et quadratique du courant i_{sh-d} et i_{sh-q} . Les composantes V_{sh-d} et V_{sh-q} sont des variables de commande au niveau des deux boucles de réglage tandis que V_{1-d} et V_{1-q} sont des variables de perturbation[5]. Le système d'équations obtenu à partir des nouvelles variables de commande U_d et U_q liées respectivement aux axes d et q est le suivant :

$$\begin{cases} U_d = V_{sh-d} - V_{1-d} + \omega L_{sh} i_{sh-d} \\ U_q = V_{sh-q} - V_{1-q} - \omega L_{sh} i_{sh-q} \end{cases} \quad (III-8)$$

$$\begin{cases} \frac{di_{sh-d}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} i_{sh-d} + U_d \\ \frac{di_{sh-q}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} i_{sh-q} + U_q \end{cases} \quad (III-9)$$

Les gains du contrôleur PI sont :

$$k_{pi} = 3 \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \quad (III-10)$$

$$k_{ii} = k_{pi} \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \quad (III-11)$$

Où k_{pi} et k_{ii} désignent respectivement les gains proportionnel et intégral.

✚ Contrôle de tension DC

Le régulateur de type PI est généralement utilisé pour le contrôle de la tension DC. Ce contrôleur a pour rôle de réguler la tension du bus continu à une tension proche de la consigne. Il contrôle donc le transit de puissance active entre le PCC et le bus continu. Le régulateur a pour entrées une tension de référence V_{dc}^* et la tension mesurée V_{dc} et comme sortie la composante du courant de référence i_{sh-d}^* . Des calculs à partir de l'équilibre des puissances entre la partie DC et AC du STATCOM et les composantes du régulateur permettent de déterminer les gains du contrôleur PI comme suit [5] :

$$K_{pu} = \frac{3}{|G_u(s)|} \quad \text{(III-12)}$$

$$K_{iu} = K_{pi} \frac{3}{|G_u(s)|} \quad \text{(III-13)}$$

Où :

$$G_u(s) = \frac{3 V_{1-d}}{s C V_{dc}^*} \text{ Obtenu dans le domaine fréquentiel par l'équation } V_{dc}^2(s) = \frac{3 V_{1-d}}{s C} i_{sh-d} ;$$

La constante de temps en boucle ouverte est obtenue à partir de l'équation $\frac{1}{\tau_{BOu}} = \frac{K_{iu}}{K_{pu}} = K_{pi}$.

✚ Contrôle de tension au point de couplage

Le dimensionnement du régulateur PI à ce niveau suit les mêmes étapes que celui du bus DC ci-dessus en remplaçant V_{dc} par V_1 . En effet, le contrôleur PI génère un signal de référence pour la composante du courant réactif i_{sh-q} du STATCOM comme représenté sur la Figure 26 qui rassemble tous les contrôleurs cités plus haut.

II.2. Commande du régulateur IP sans zéro

Ce régulateur est développé dans [16] par *Flitti et al.* Il s'est révélé être le meilleur dans la catégorie compensation de l'énergie réactive et le contrôle de la tension suite à des simulations qui ont consisté principalement à réaliser la fonction intégrale avant la fonction proportionnelle. La modélisation de la commande du régulateur est représentée par la Figure 27.

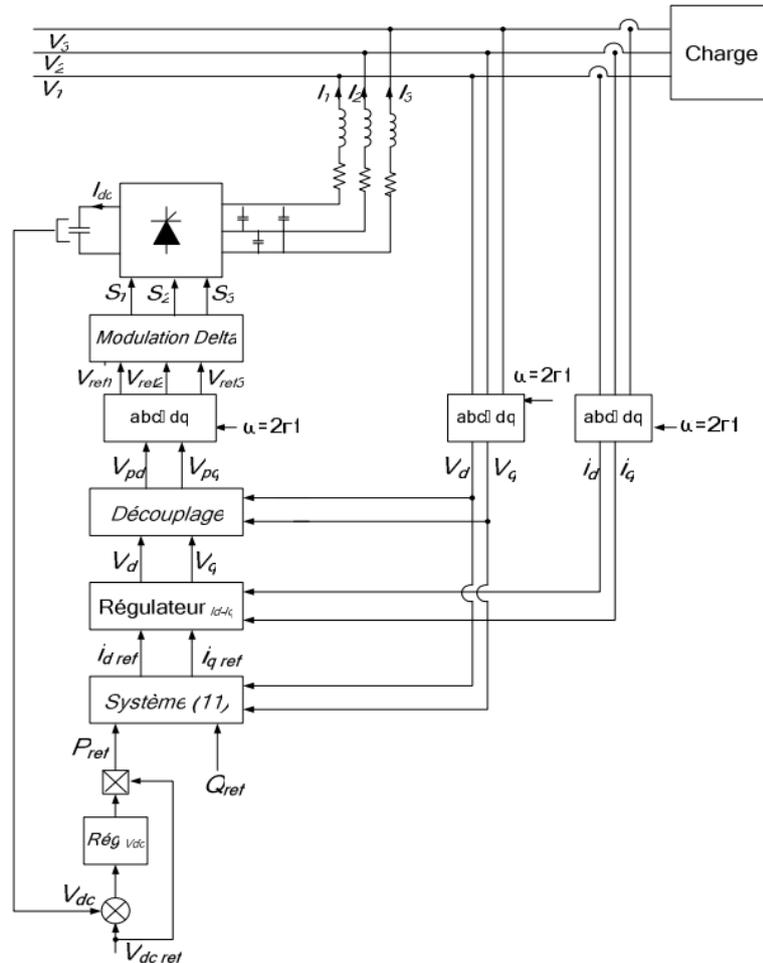


Figure 27 : Schéma de régulateur de l'onduleur[16]

Deux boucles internes et une boucle externe sont nécessaires pour assurer la commande du compensateur. Les boucles internes permettent de minimiser les harmoniques des courants du réseau ainsi que la facilitation de l'échange de la puissance réactive. La boucle externe assure la régulation de la tension du condensateur pour la maintenir à valeur de référence. La modélisation de chaque partie de la commande est expliquée ci-après [16] :

Concernant le compensateur, une fonction logique de connexion est utilisée en remplacement aux deux interrupteurs bidirectionnels de chaque bras d'onduleur. Cette fonction décrit l'état de chaque interrupteur par « 1 » lorsque l'interrupteur est fermé et par « 0 » lorsqu'il est ouvert.

Considérons la fonction de connexion $F_{is}(i \in \{1, 2, 3\} \text{ et } s \in \{1, 2, 3\})$ d'un interrupteur K_{is} associé au bras de l'onduleur. La relation entre « i » et « s » est donnée par le système d'équations :

$$\begin{cases} S_1 = 1 - F_{10} \\ S_2 = 1 - F_{20} \\ S_3 = 1 - F_{30} \end{cases} \quad (\text{III-14})$$

La forme générale de l'onduleur sous la forme matricielle obtenue après calcul est la suivante :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III-15})$$

Les signaux de commande S_1 , S_2 et S_3 sont obtenus à partir de la modulation delta. Cette technique consiste à générer les trois signaux de sortie par comparaison d'un signal sinusoïdal de référence V_{ref} à un signal triangulaire V_p oscillant dans la bande de largeur ΔV comme présenté sur la Figure 28.

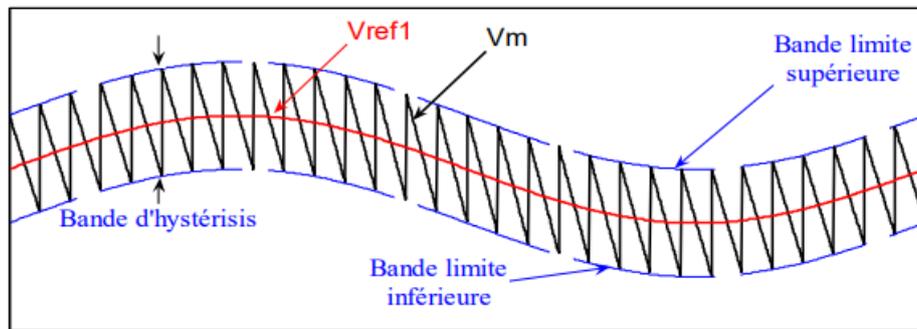


Figure 28 : Modulation delta [16]

Les boucles interne et externe de la commande sont exprimées comme suit :

$$FTBO_{in}(p) = \frac{1}{R_s(1+\tau p)} \text{ avec } \tau = \frac{L_s}{R_s} \quad (\text{III-16})$$

$$FTBO_{ext}(p) = \frac{1}{c p} \quad (\text{III-17})$$

En utilisant la transformation de Park, on obtient les composantes de la tension et du courant de référence dans le repère d-q ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} * \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III-18})$$

$$\begin{cases} i_{d \text{ ref}} = \frac{2}{3} * \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} * (P V_d + Q V_q) \\ i_{q \text{ ref}} = \frac{2}{3} * \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} * (P V_d - Q V_q) \end{cases} \quad (\text{III-19})$$

Où la puissance active $P = \frac{3}{2}(V_d i_d + V_q i_q)$ et la puissance réactive $Q = \frac{3}{2}(V_d i_d - V_q i_q)$. Le schéma bloc du régulateur IP sans zéro est illustré dans la Figure 29.

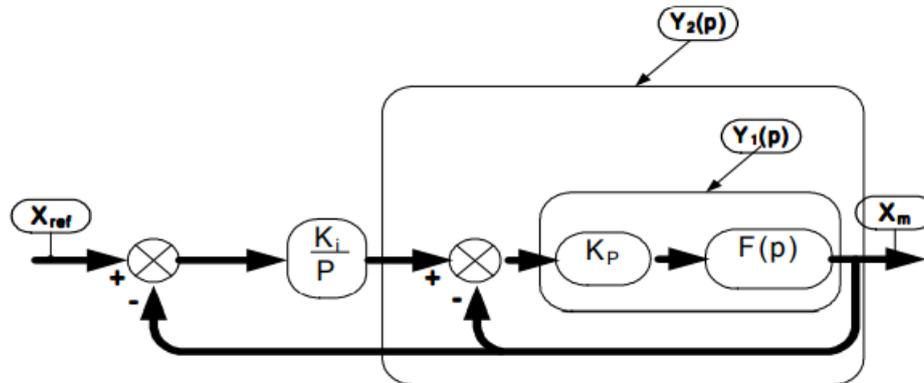


Figure 29 : Régulation avec correcteur IP [16]

Cette commande permet d'obtenir le profil de tension et courant représenté dans la Figure 30. On constate que la tension (V_1) de la ligne contrôlée est maintenue constante malgré des perturbations introduites pour la simulation d'une durée de 0,4s.

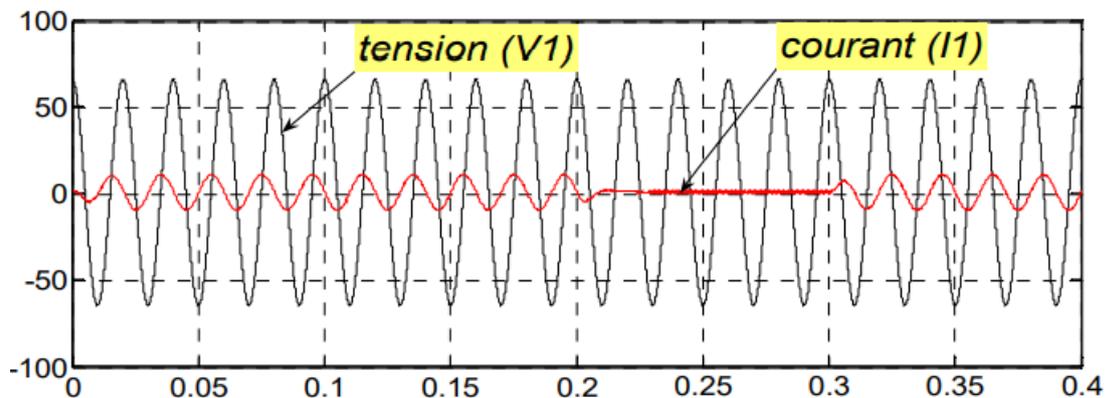


Figure 30 : Tension et courant de la ligne contrôlée

III. SIMULATION DU FONCTIONNEMENT DU STATCOM

III.1. Paramètre de simulation

Tableau 2 évoque les valeurs utilisées pour la simulation sur Matlab/Simulink.

Tableau 2 : Données pour la simulation

Le réseau		Ligne 1	
Tension nominale U_b	500 kV	Longueur	200 km
Fréquence f	60 Hz	Résistance par longueur	0,02546 Ohms/km
Source triphasée N° 1		Inductance par longueur	0,933 7 e-3 H/km
Puissance S_1	8500 MVA	Capacité par longueur	12,74 e-9
Résistance R (Ohms)	2,9412	Ligne 2	
$R = \frac{U_b^2}{S_1 \cdot 10}$			
Inductance L (H), $L = \frac{U_b^2}{2\pi \cdot f \cdot S_2}$	0,078017	Longueur	75 km
Puissance de la charge 1	300 MW	Résistance par longueur	0,02546 Ohms/km
Source triphasée N° 2		Inductance par longueur	0,933 7 e-3 H/km
Puissance S_2	6500 MVA	Capacité par longueur	12,74 e-9
Angle de phase (degré)	9,2-20	Ligne 3	
Ratio X/R	8		
Puissance de la charge 2	200 MVA	Résistance par longueur	0,02546 Ohms/km
Source triphasée N° 3		Inductance par longueur	0,933 7 e-3 H/km
Puissance S_3	9000 MVA	Capacité par longueur	12,74 e-9
Angle de phase (degré)	9,2-40	STATCOM 48-impulsion GTO	
Ratio X/R	10		
Transformateur du VSC		Type convertisseur	Quatre branches de trois niveaux chacun
Puissance transformateur i, Pi	100 e6/4	Dispositif électronique de puissance	GTO/ Diodes
Tension entre phases du primaire	500 e3/4	Résistance de l'amortisseur	1 e5 Ohms
Tension secondaire entre phases	15 kV	Résistance interne	1 e-4 Ohms
Angle entre phases	±7,5	Condensateur	
Control du STATCOM		Puissance du condensateur Qc	100Mvar
Mode	Régulation de la tension	Capacité	0,003 F
Chute de tension	0,03 pu/100 MVA	Gains du régulateur du courant réactif	Kp=5
Gains du régulateur de tension	Kp=12		Ki=40
	Ki=3000	Temps de simulation	0,4 s

III.2. Simulation et résultats

La Figure 31 présente le fonctionnement du STATCOM en mode contrôle de la tension et la tension de référence est de 1,0 pu.

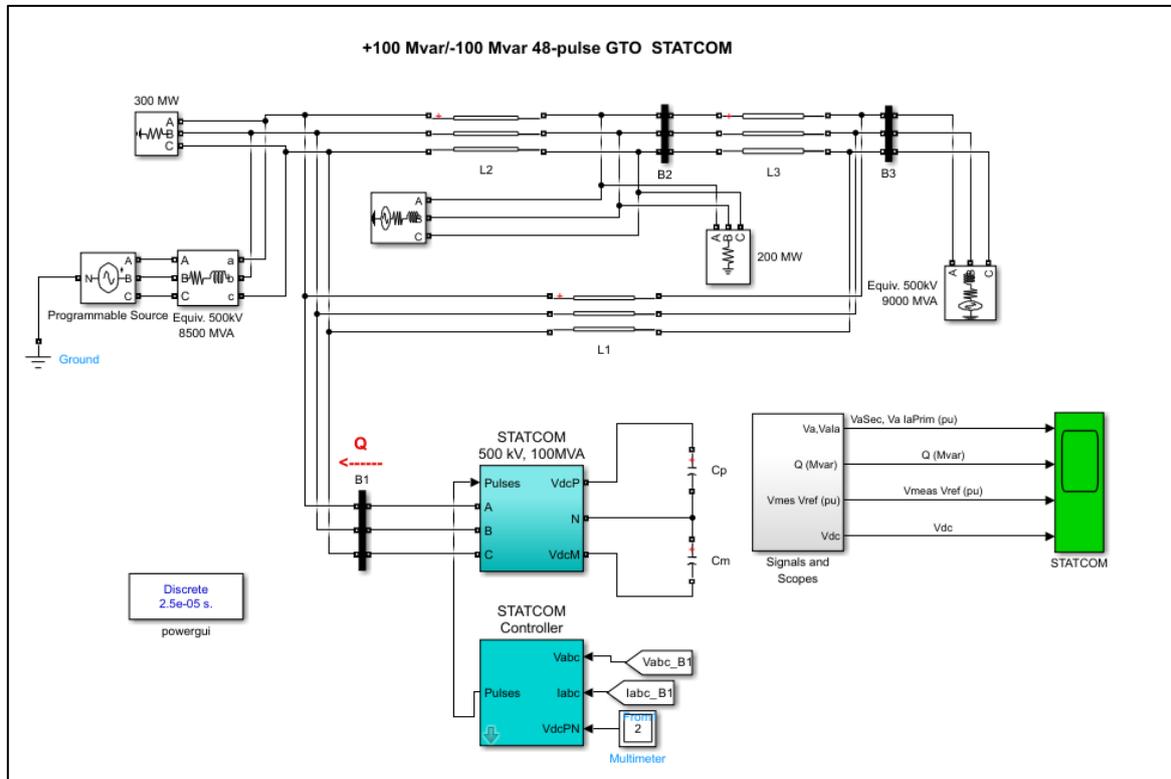


Figure 31 : Simulation du STATCOM sur Matlab/Simulink

La simulation s'est effectuée en trois temps. Au début, nous avons un fonctionnement normal du réseau et la tension de sortie du STATCOM est en phase avec celle du réseau. Initialement, la source de tension programmable est réglée à 1,049 pu afin d'obtenir une tension de référence $V_{ref} = 1,0$ pu. Ensuite, la source crée une perturbation qui fait chuter brusquement la tension à 0,955 pu (4,5 % de la tension nominale) à l'instant $t = 0,1$ s. À l'instant $t = 0,2$ s, la source fait

varier la tension 1,045 pu de la tension nominale. Enfin à $t=0,3$ s, la tension de la source revient à la normale. La Figure 32 présente l'énergie réactive mise en jeu lors de la simulation.

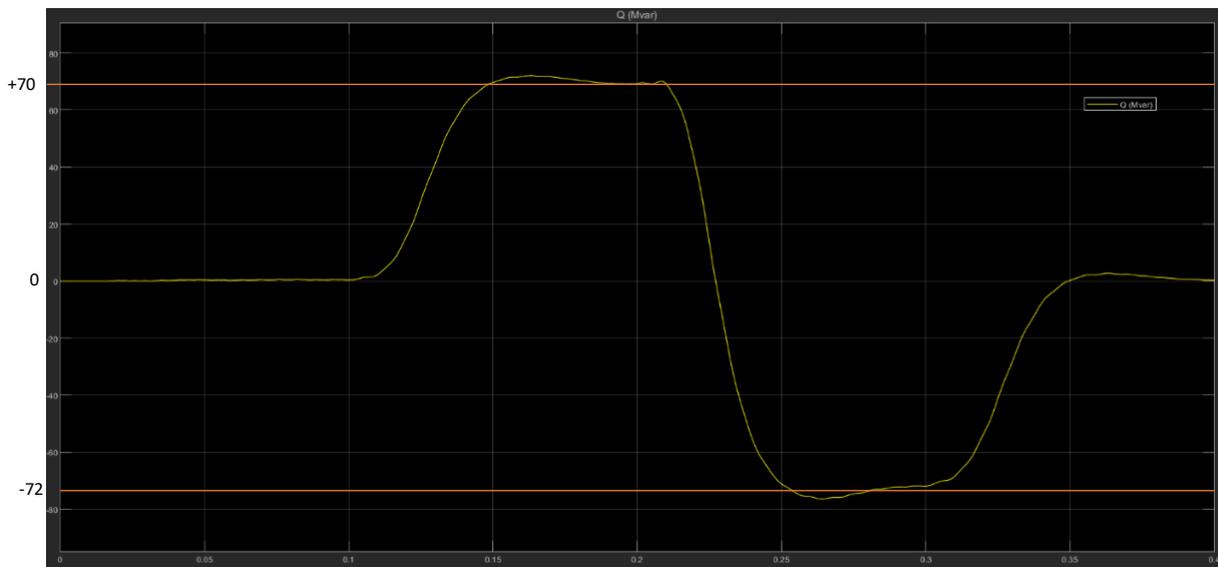


Figure 32 : Échange de l'énergie réactive entre le STATCOM et le réseau

Lorsque la tension de la source chute de 4,5 % à l'instant $t=0,1$ s, le STATCOM réagit en générant une puissance réactive $Q=+70$ Mvar. C'est le fonctionnement capacitif du STATCOM. Lorsque la tension passe à 1,045 pu, nous constatons que la puissance réactive se stabilise autour de $Q=-72$ Mvar. Le STATCOM alors en mode inductif absorbe de l'énergie réactive du réseau. Lorsque les perturbations cessent, le point de fonctionnement du STATCOM revient à 0 Mvar. Ces échanges de puissance réactive impliquent une variation de l'amplitude de la tension du STATCOM présenté sur la Figure 33.

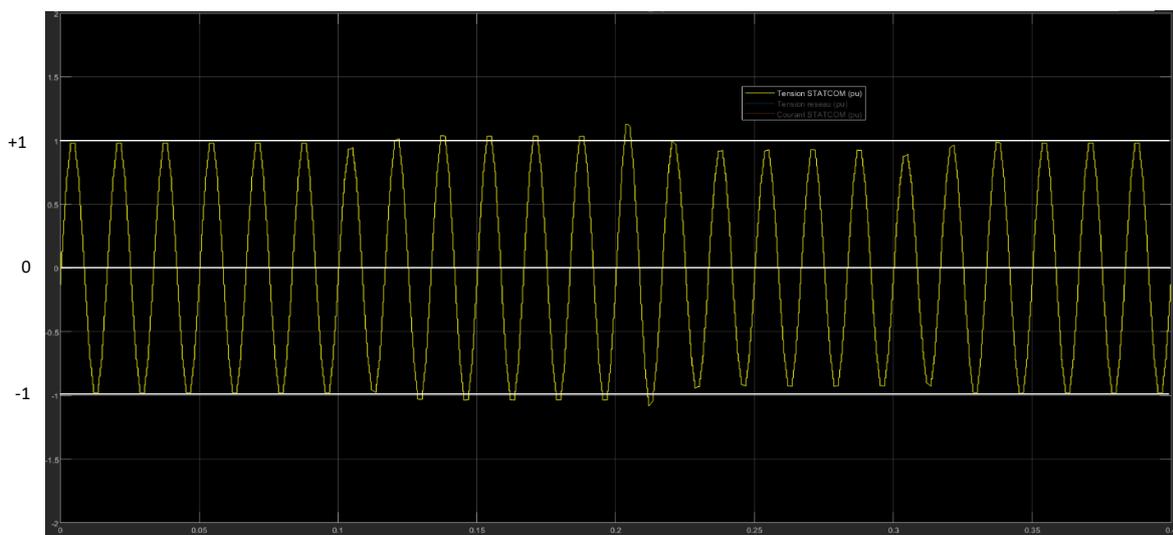


Figure 33 : Tension du STATCOM

Nous remarquons qu'à l'instant de la première perturbation à $t=0,1$ s, la tension passe légèrement la barre de 1 pu (autour de 1,04 pu). Lorsque la tension de la source augmente, nous constatons une diminution de l'amplitude de la tension du STATCOM qui s'établit autour de 0,96 pu. Elle revient à 1,0 pu à partir de $t=0,3$ s ; l'échange du courant réactif mis en œuvre est illustré dans la Figure 34.

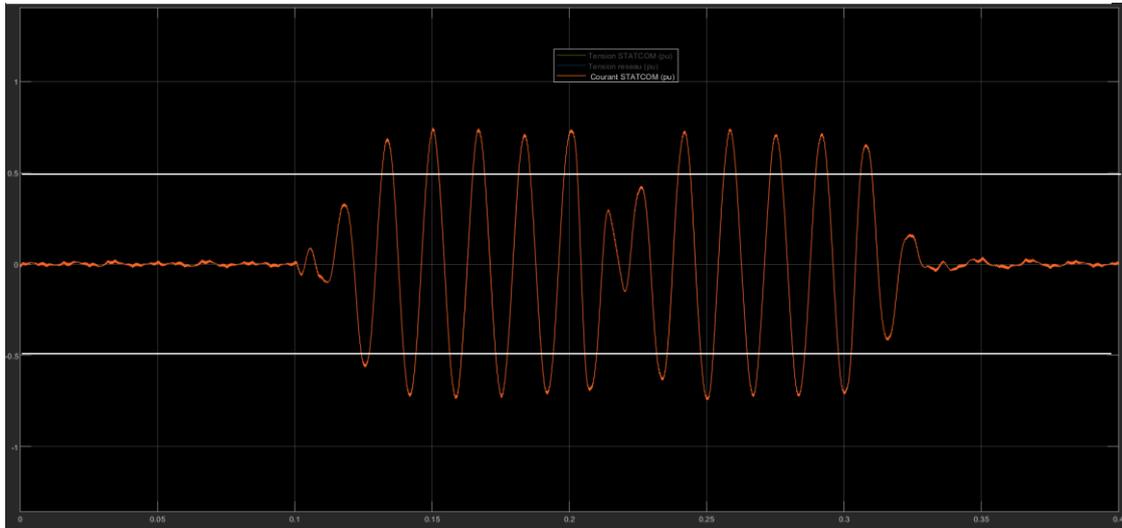


Figure 34 : Courant réactif échangé entre le STATCOM et le réseau

La figure ci-dessus montre que lorsque la tension de la source chute, le STATCOM injecte un courant capacitif d'amplitude 0,75 pu environ. Lorsque la tension de la source augmente, le STATCOM réagit par l'injection d'un courant inductif de même amplitude. L'injection de courant s'arrête à $t=0,3$ s. Le fonctionnement de la source continue est représenté dans la Figure 35.

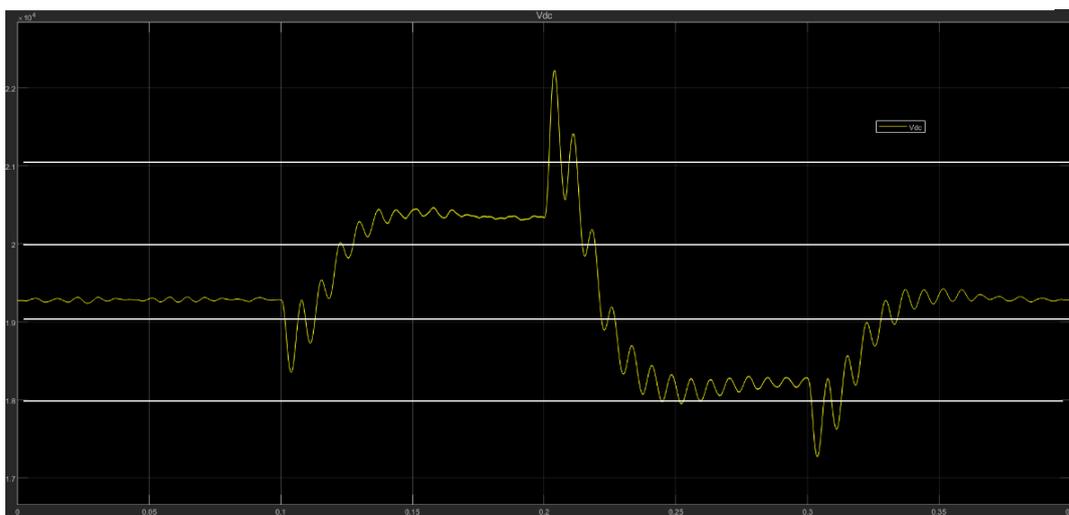


Figure 35 : Tension de la source continue du VSC

Toutes ces manœuvres du STATCOM permettent d'obtenir les résultats présentés dans les Figure 36 et Figure 37.

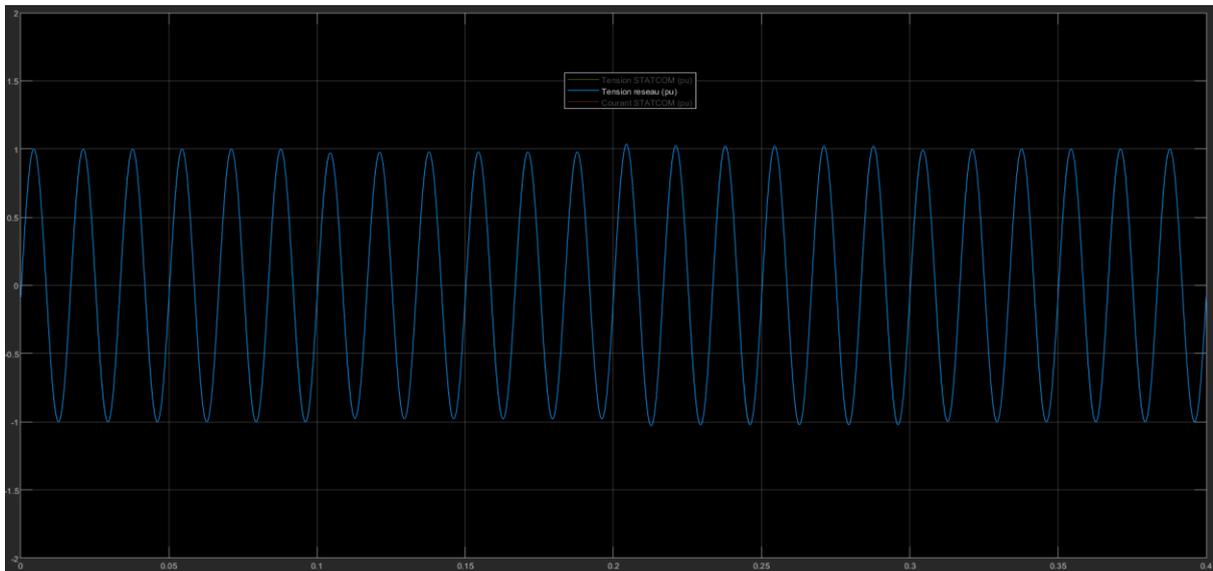


Figure 36 : Tension du réseau

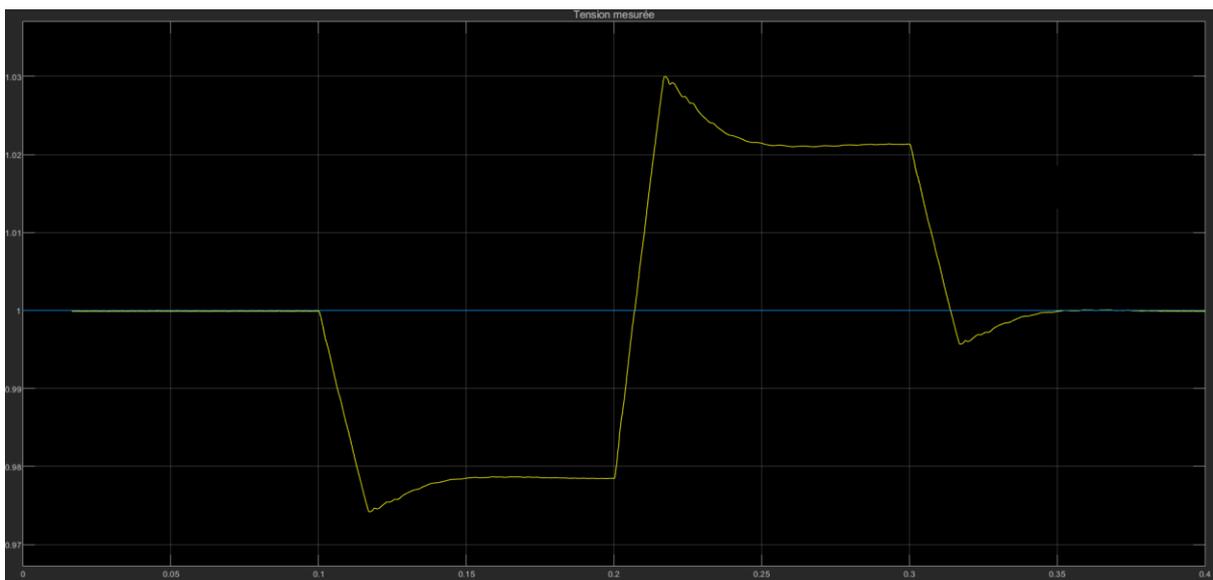


Figure 37 : Tension de référence et tension mesurée du réseau

Nous remarquons que lorsque la tension du réseau chute à 0,955 pu, le STATCOM permet de la ramener à 0,979 pu au bout d'environ 47 ms. Lorsque la tension du réseau passe à 1,045 pu, le STATCOM la stabilise autour de 1,021 pu. La Figure 37 présente la tension de référence du réseau en bleu et la tension du réseau mesurée en jaune au cours des différentes perturbations. Le STATCOM est donc un système efficace pour le contrôle et la régulation de la tension.

IV. CHOIX DU STATCOM POUR L'APPLICATION À HGO

Le choix d'une unité adaptée à HGO prend en compte plusieurs paramètres allant du type du réseau au convertisseur du STATCOM. Le Tableau 3 présente les critères et les choix que nous recommandons pour l'atteinte des objectifs de HGO.

Tableau 3 : Paramètres de choix d'une unité de STATCOM

Composante	Valeur/type	Commentaire
Tension nominale du réseau	11 kV	Il s'agit de la tension d'utilisation à HGO
Topologie du convertisseur VSC	Convertisseurs multi-niveaux de pont H cascade	Cette technologie présente des avantages comme : <ul style="list-style-type: none"> - Structure compacte ; - Maintenance aisée ; - Topologie multiniveau en chaîne ; - Sortie de tension sinusoïdale parfaite ; - Faible fréquence de commutation ; - Sous-modules redondants intégrés en série ; - Technologie de pointe en matière d'équilibrage de la tension continue ; - Carte de commande et de contrôle secondaire éprouvée.
Commande du convertisseur	Régulateur IP sans zéro	Comme étudié plus haut, ce régulateur offre plus d'avantages pour la compensation et la régulation de la tension.
Transformateur de couplage	Autotransformateur	Le STATCOM reçoit et fournit du courant. Le transformateur doit donc supporter ce flux. De façon générale, les fabricants de STATCOM recommandent des transformateurs compatibles à leurs unités.
Batterie de condensateur $Q_c = P(\tan \varphi - \tan \varphi')$ $Q_c = 15 \tan \cos^{-1} 0,8 - \tan \cos^{-1} 0,97)$	$Q_c = 7,49 \text{ Mvar}$	La compensation de l'énergie réactive servira à relever le facteur de puissance de 0,8 à 0,97. La compensation a les avantages suivants : <ul style="list-style-type: none"> - Une suppression de la facturation des consommations excessives de l'énergie réactive ; - Une réduction de la puissance souscrite en kVA ; - Une diminution des pertes dans les conducteurs à puissance active constante ; - Une augmentation de la puissance active transportée à courant apparent constant ; - Une diminution de la chute de tension.

La Figure 38 montre les caractéristiques d'une unité de STATCOM qui correspondent à nos attentes. Le choix s'est porté sur SILCOVER H Air Cooled STATCOM de la compagnie NIDEC [17].

Technical Data

	DESCRIPTION	UNIT	CHARACTERISTIC
ENVIRONMENTAL CONDITIONS	Installation		indoor
	Working temperature	°C	+ 5 +40 ⁽¹⁾
	Storage temperature	°C	-20 +70
	Relative humidity (max.)	%	< 95 non condensing
	Altitude (max.)	m ft	< 1000 a.s.l. ⁽²⁾ < 3300 a.s.l. ⁽²⁾
	Pollution degree		2 (Without conductive pollution in accordance with IEC 61800-5-1)
CONVERTER	Type		Medium Voltage Multi-level IGBT Inverter
	Rated output voltage	kV	6.6; 10; 11
	Output frequency	Hz	50 / 60
	Rated output current	A	See tables below
	Cooling type		AF – Forced air. WF – Deionized water in closed circuit with water /water heat exchanger or with outside water/air heat exchanger. Redundant pumps
CABINET ⁽³⁾	Protection degree / open door		IP 42 / IP20
	Paint color		RAL 7035 (Nidec ASI standard)
	Cable inlet / outlet		Bottom / bottom
	Noise level @ 1 m	dB(A)	Air cooling: ≤ 80 - Water cooling: ≤ 70
	Accessibility		Front

(1) For ambient temperature above 50°C, please contact the factory or the local representative - (2) For altitudes above 2000 m (6600 ft), please contact the factory or the local representative
(3) For information about container version (only water cooled), please contact the factory or the local representative

SILCOVAR-H – Air cooling – Star configuration

SIZE	RATED CURRENT [A]	RATED POWER [kVAR]	DIMENSIONS (cabinet)			
			Width [mm]	Depth [mm]	Height [mm]	
6000 V	SVRH 2K6 A60	250	2598	3800	1400	3200
	SVRH 3K3 A60	320	3325	4800	1400	3200
	SVRH 4K1 A60	400	4157	4800	1400	3200
6600 V	SVRH 2K9 A66	250	2858	3800	1400	3200
	SVRH 3K7 A66	320	3658	4800	1400	3200
	SVRH 4K6 A66	400	4573	4800	1400	3200
10000 V	SVRH 4K3 A10	250	4330	4200	1400	3000
	SVRH 5K5 A10	320	5543	5400	1400	3000
	SVRH 6K9 A10	400	6928	5400	1400	3000
11000 V	SVRH 4K8 A11	250	4763	4200	1400	3000
	SVRH 6K1 A11	320	6007	5400	1400	3000
	SVRH 7K6 A11	400	7621	5400	1400	3000

Figure 38 : Fiche technique de SILCOVAR-H Air Cooled STATCOM

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique du STATCOM. Ensuite, nous avons étudié deux types de régulateurs qui peuvent être utilisés pour la partie commande du STATCOM. Il ressort que la commande basée sur le régulateur IP sans zéro sera préférée au régulateur classique PI dans une application spécifique comme notre cas. Une simulation du fonctionnement nous permet de confirmer que le système de régulation de l'amplitude de la tension par le STATCOM via l'échange d'énergie réactive est capable d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique de la mine. Nous avons terminé en proposant une unité de STATCOM sur la base des caractéristiques du réseau et l'application voulue.

Dans le prochain chapitre, nous étudierons l'impact économique et environnemental du projet d'installation du STATCOM.

CHAPITRE IV : ÉTUDE ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL DU PROJET

INTRODUCTION

Dans le but d'aider à la prise de décision pour la réalisation du projet, une étude économique et environnementale est nécessaire. Nous considérons pour cela plusieurs paramètres qui conditionnent la pertinence du projet. Une conclusion sera faite à la fin du chapitre.

I. ETUDE ÉCONOMIQUE DE L'INSTALLATION DU STATCOM

I.1. Méthodes de calculs

L'analyse de la faisabilité économique se subdivise en trois points : les pertes financières liées à l'arrêt de la production de l'or dû à l'instabilité de la tension, les pertes engendrées par le recours à la centrale thermique du site dues à l'instabilité du réseau et les gains que pourra engendrer l'installation du STATCOM. Il faut noter que la centrale électrique dispose d'un système d'inversion de source efficace qui permet de rétablir l'alimentation électrique après la perte du réseau de la SONABEL à environ cinq minutes en général. Pour notre analyse, nous considérerons le cumul de ces brèves ruptures pendant une année (environ 18 ruptures). De plus, la durée de vie des équipements de protection (disjoncteurs par exemple) est réduite suite aux arrêts et rétablissements de l'alimentation causant également des pertes financières qui n'ont pas pu être chiffrées pour cette analyse. Les calculs effectués sont présentés dans le Tableau 4 : Calculs de l'analyse économique.

Tableau 4 : Calculs de l'analyse économique

	Formule	Valeur
Temps de rupture d'alimentation, T (heure)	-	1,5
Production (traitement du minerai) par heure, P (tonne)	-	280
Teneur en or t_0 (g/t)	-	2,31
Production d'or P_{o1} (g/h)	$P_{o1} = P \cdot t_0$	646,8
Production d'or P_{o2} (once/h)	$P_{o2} = P_{o1} * 31,104$ (Car 1 once= 31,104 g)	20 795
Perte de production dans l'année P_{o3} (once)	$P_{o3} = P_{o2} \cdot T$	31 192
Prix d'une once P_{r1} obtenu dans le rapport 2021 de Endeavour Mining (USD)	-	675
Perte financière engendrée P_{r2} (USD)	$P_{r2} = P_{r1} \cdot P_{o3}$	21 054 688

Coût d'installation du STATCOM C_{inst} (\$ USD/kvar)	Valeur moyenne obtenue suite à l'analyse de 25 projets [18]	150
Puissance réactive du STATCOM Q_c (kvar)	-	7 490
Investissement initial du STATCOM $I_{statcom}$ (\$ USD)	$I_{statcom} = C_{inst} \cdot Q_c$	1 123 500
Majoration pour tenir compte des frais de transport, de douane et de main d'œuvre en comparaison à d'autres projets réalisés à HGO $I_{statcom'}$ (\$ USD)	$I_{statcom'} = 2,5 * I_{statcom}$	2 808 750
Coût de maintenance annuel (\$ USD)	$C_{ma} = 2\% \cdot I_{statcom'}$	56175
Taux d'actualisation i	-	0,08
Durée de vie de l'unité n (années)	-	10
Coût de maintenance C_{m10} sur 10 ans	$C_{m10} = C_{ma} \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$, $n=9$	2 805 954
Consommation moyenne des générateurs $Cons_{moy}$ (l/h). (En fonctionnement normal, 13 générateurs sont nécessaires pour supporter la charge. Chaque générateur consomme 250 l/h)	-	3 250
Prix du carburant diesel P_{carb} (\$ USD)	-	1,12
Coût de fonctionnement des générateurs C_f (USD)	$C_f = P_{carb} \cdot Cons_{moy}$	5 460
Gain financier avec le STATCOM G_f (\$ USD/an). (Il s'agit du montant que le STATCOM permettra d'économiser)	$G_f = P_{r2} + C_f$	21 060 148
Temps de retour sur investissement TRI_1 (années)	$TRI_1 = \frac{I_{statcom'} + C_{m10}}{G_f}$	0,26660331
Temps de retour sur investissement TRI_2 (jours)	$TRI_2 = TRI_1 * 12 * 30$	96
Valeur actuelle nette du projet VAN	$VAN = -I_{statcom'} - C_{m10} + G_f \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$, $n=10$	1 046 344 796

I.2. Résultats des calculs

Les calculs montrent la faisabilité économique du projet. Pour un investissement estimé à 2,8 millions \$ USD, le temps de retour sur investissement est évalué à 96 jours et la VAN en 10 ans est évaluée à plus d'un milliard \$ USD. Le projet est donc largement bénéfique pour la mine de Houndé.

II. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU PROJET

Le changement climatique oblige une prise en compte de l'impact environnemental des projets d'investissements dans le but général de réduire le réchauffement de la planète. L'étude de l'impact environnemental est très importante pour tout projet d'investissement, surtout pour les grandes entreprises comme HGO, qui depuis deux ans s'est lancée dans une dynamique de réduction de l'impact carbone en son sein.

Dans notre travail, nous allons montrer comment l'installation du STATCOM 0 la mine peut contribuer à éviter des émissions de gaz à effet de serre (GES), plus précisément le dioxyde de carbone. Pour le cas de la mine, les émissions de dioxyde de carbone dues à l'installation du STATCOM se limitent au transport de l'unité de son lieu de fabrication jusqu'à HGO. Cette émission n'a pas pu être quantifiée donc ne sera pas abordée.

II.1. Émissions de dioxyde de carbone (CO₂) à HGO

Les émissions de gaz d'une entreprise peuvent être classées en trois catégories appelées scope qui sont les suivantes :

- **Scope 1** : elle quantifie les émissions directes de l'entreprise provenant d'une activité donnée en occurrence la combustion de combustible fossile. Dans notre étude, nous nous limiterons aux émissions de CO₂ pour la production électrique au niveau des générateurs diesel de la mine. Ce sont des émissions contrôlables par l'entreprise ;
- **Scope 2** : elle représente les émissions indirectes de l'entreprise correspondante à la consommation d'une énergie finale dont les GES ne sont pas émis sur le lieu de la consommation, mais de la production. Nous considérerons dans notre cas l'achat de l'électricité de la SONABEL ;
- **Scope 3** : cette catégorie regroupe les émissions provenant d'activités connexes de l'entreprise, mais nécessaires à son activité. Ce sont par exemple les déplacements des employés, le transport de carburant, etc.

Le Tableau 5 : Émissions de dioxyde de carbone par HGO en 2021 et la Figure 39 ci-dessous présentent les émissions de CO₂ par HGO en 2021 en considérant le facteur d'émission de chaque source d'énergie.

Tableau 5 : Émissions de dioxyde de carbone par HGO en 2021[19]

Catégorie	Émissions (tCO ₂ -e)	% émissions
Scope 1 (représentant 55,95 GWh produit)	108 033,9	56
Scope 2 (représentant 94,992 GWh payé)	54 732,88	29
Scope 3	28 905,09	15

Total	191 671,87	100
--------------	------------	-----

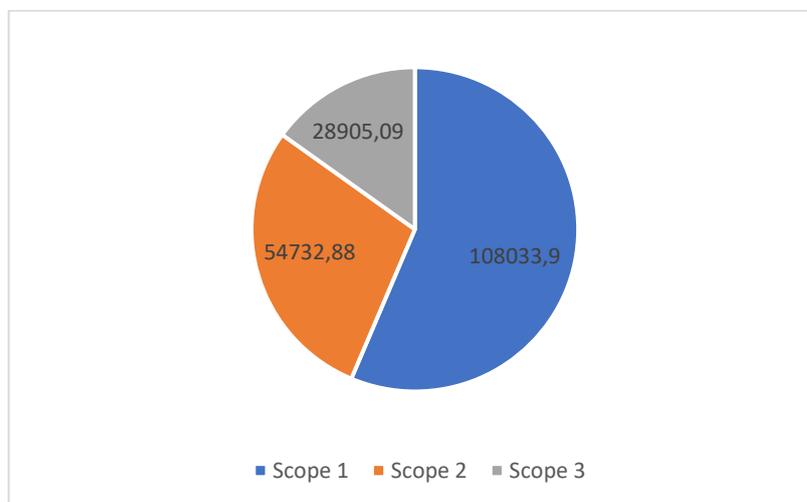


Figure 39 : Représentation des émissions de HGO en 2021

II.2. Impact du STATCOM sur les émissions de CO₂

Le Tableau 6 présente les calculs qui permettent de déterminer l'impact du STATCOM sur le plan environnemental. Nous avons considéré les émissions que le STATCOM permettra d'éviter.

Tableau 6 : Calculs des émissions dues au fonctionnement des générateurs

Nombre de ruptures d'alimentation	18
Temps de fonctionnement des générateurs T (heure). (Pour chaque démarrage des générateurs, le temps de fonctionnement minimum est d'une heure.)	18
Puissance moyenne consommée à HGO P_{moy} (GWh)	0,015
Énergie produite par les générateurs (GWh) $E_{ge} = P_{moy} \cdot T$	0,27
Quantité de CO₂ produite (tCO₂e/GWh) $q_{CO_2} = \frac{Scope1}{55,95}$	1 930,90
Quantité de CO₂ produite par les générateurs (tCO₂e) $Q_{CO_2} = q_{CO_2} \cdot E_{ge}$	521,34

D'après les calculs faits dans le tableau ci-dessus, l'installation du STATCOM permettra d'éviter une émission de $Q_{CO_2} = 521,34$ tCO₂e par an. Cette quantité est non négligeable dans une démarche de réduction de l'impact carbone de la mine.

CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à l'étude de l'impact économique et environnemental du projet d'installation du STATCOM à HGO. Sur ces deux domaines, les résultats des analyses montrent que le projet sera très bénéfique pour la mine. Le temps de retour sur investissement est estimé à 96 jours et le projet permettra d'éviter une émission d'environ 521,34 tCO₂e par an.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATION

La qualité de l'électricité est un sujet préoccupant pour les électriciens de HGO, dont l'usine doit fonctionner de façon continue (24 h/24). Vu les coupures récurrentes sur le réseau électrique de HGO dues à la l'instabilité de la tension du fournisseur, il a été demandé de faire une étude sur les pistes d'amélioration de la qualité de son électricité. Les premières investigations nous ont mené à proposer l'utilisation d'un STATCOM. L'étude menée qui est intitulée « amélioration de la qualité de l'électricité de la mine HGO par l'utilisation d'un STATCOM » peut être subdivisée en trois parties. Premièrement, il était question de statuer sur l'opportunité d'installer un STATCOM. Cela nous a conduit à faire un aperçu sur d'autres équipements utilisés pour améliorer la stabilité du réseau électrique et le STATCOM s'est révélé incontestable dans le domaine de la stabilisation de la tension. Une simulation de son fonctionnement sur le logiciel Matlab/Simulink a également confirmé ce pouvoir du compensateur. Deuxièmement, une étude sur les différentes composantes du module et de sa commande a abouti à une proposition d'une unité adaptée à notre utilisation à HGO. Le SILCOVAR-H, fabriqué par la société NIDEC a donc été choisi à cet effet. Troisièmement, nous avons étudié la pertinence du projet d'installation du STATCOM sur le plan économique et environnemental toujours dans le but d'aider à la décision des premiers responsables de l'entreprise.

À l'issue de cette étude, nous concluons que le STATCOM est capable de solutionner notre principal problème qu'est l'instabilité de la tension à HGO. Il empêchera au moins dix-huit ruptures de l'alimentation électrique dans l'année apportant un grand soulagement aux gestionnaires du réseau électrique. De plus, l'installation de l'unité apportera un bénéfice annuel de 21 millions de dollars USD pour un investissement de 2,8 millions de dollars USD et 521 tCO_{2e} en moins seront émis par an.

Nous recommandons aux responsables de HGO de prendre contact avec les fabricants des unités de STATCOM comme le groupe ABB, NIDEC, GE, Schneider, Merus Power ou SIEMENS pour l'installation proprement dite de l'unité. En plus de cela, une formation des techniciens de la centrale électrique sur l'utilisation et l'entretien du STATCOM sera d'une grande importance pour la réussite du projet.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. M. Benarous, P. B. Belmadani, M. A. Zegaoui, D. A. Smaili, et D. T. Allaoui, « Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC », p. 119.
- [2] « guide-de-conception-des-reseaux-electrique-industriels-by-genie-electromcanique-com.pdf ».1997. 930 p.
- [3] Bulletin sur la qualité de l'électricité, « Le déséquilibre de tension et de courant », p. 2.
- [4] SENNI Amina. Contrôle des tensions d'un Réseaux de Transport par les Dispositifs FACTS <<STATCOM>>. 2018, 70 p
- [5] Belila HASSEN. Amélioration des performances du réseau par l'utilisation d'un FACTS: applications aux sources photovoltaïques. 2021, 148 p.
- [6] Smail IMADOUCHENE et Nassim HOCINI, Base de fonctionnement des dispositifs FACTS - Application d'un STATCOM pour la régulation de la tension. 2010, 113 p.
- [7] « technical-specifications-statcom-bikaner-ss.pdf ».47 p.
- [8] F. Shahnia, S. Rajakaruna, et A. Ghosh, Éd., *Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems*. Singapore: Springer Singapore, 2015. doi: 10.1007/978-981-287-281-4.
- [9] G. S. Shehu, A. B. Kunya, I. H. Shanono, et T. Yalcinoz, « A Review of Multilevel Inverter Topology and Control Techniques », *J. Autom. Control Eng.*, p. 233-241, 2016, doi: 10.18178/joace.4.3.233-241.
- [10] D. S. Nikam et V. N. Kalkhambkar, « STATCOM and Multilevel VSC Topology: A Review », in *2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT)*, Coimbatore, mars 2018, p. 1-7. doi: 10.1109/ICCTCT.2018.8551170.
- [11] « A matter of FACTS - Deliver more high quality power ». <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1JNS018770&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (consulté le 6 décembre 2022).
- [12] M. Mezaache et K. Chikhi, « Etude de la Performance d'un Dispositif STATCOM Utilisée pour Compenser la Puissance Réactive au Point de Raccordement », p. 5, 2013.
- [13] B. U. Musa et M. Mustapha, « Modelling and Simulation of STATCOM for Reactive Power and Voltage Control. », vol. 2, n° 2, p. 5, 2015.
- [14] « STATCOM (Detailed Model) - MATLAB & Simulink - MathWorks France.html ».
- [15] M. Mezaache et K. Chikhi, « Etude de la Performance d'un Dispositif STATCOM Utilisée pour Compenser la Puissance Réactive au Point de Raccordement », p. 5, 2013.
- [16] Flitti et al. Technique de commande d'un convertisseur Multiniveaux Appliquée à la Compensation de l'énergie Réactive. 2008, 6 p.
- [17] « TDS2019.13.11.00EN_SILCOVAR-H_air-cooled.pdf ».

[18] « FACTS: costs of STATCOMs and SVCs? », *Thunder Said Energy*.
<https://thundersaidenergy.com/downloads/facts-costs-of-statcoms-and-svcs/> (consulté le 12 décembre 2022).

[19] SAWADOGO Zackaria, Elaboration d'une stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'amélioration de l'efficacité énergétique dans les mines du groupe Endeavour Mining. Génie Electrique et Energétique, Ouagadougou 2iE, 83p.

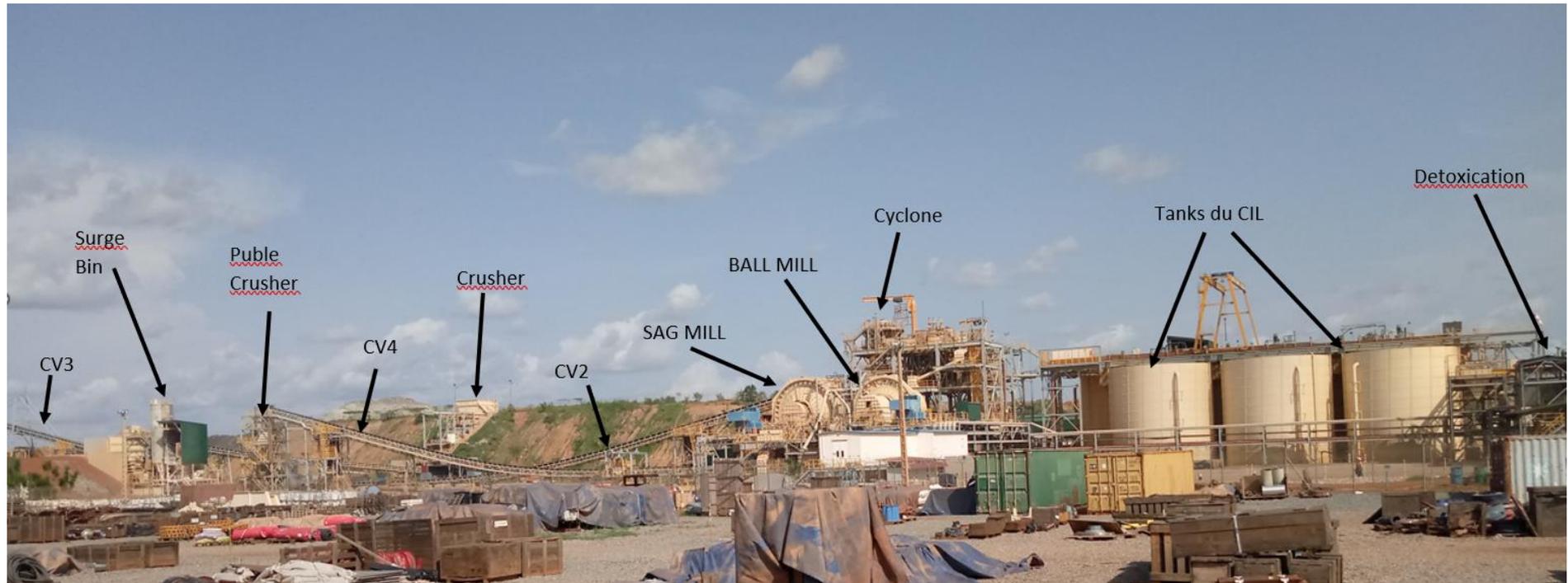
ANNEXES

Annexe 1 : Site de HGO	59
Annexe 2 : Image de l'usine	60
Annexe 3 : Schéma du traitement de minerais.....	61
Annexe 4 : Schéma unifilaire de l'installation électrique de la mine.....	62

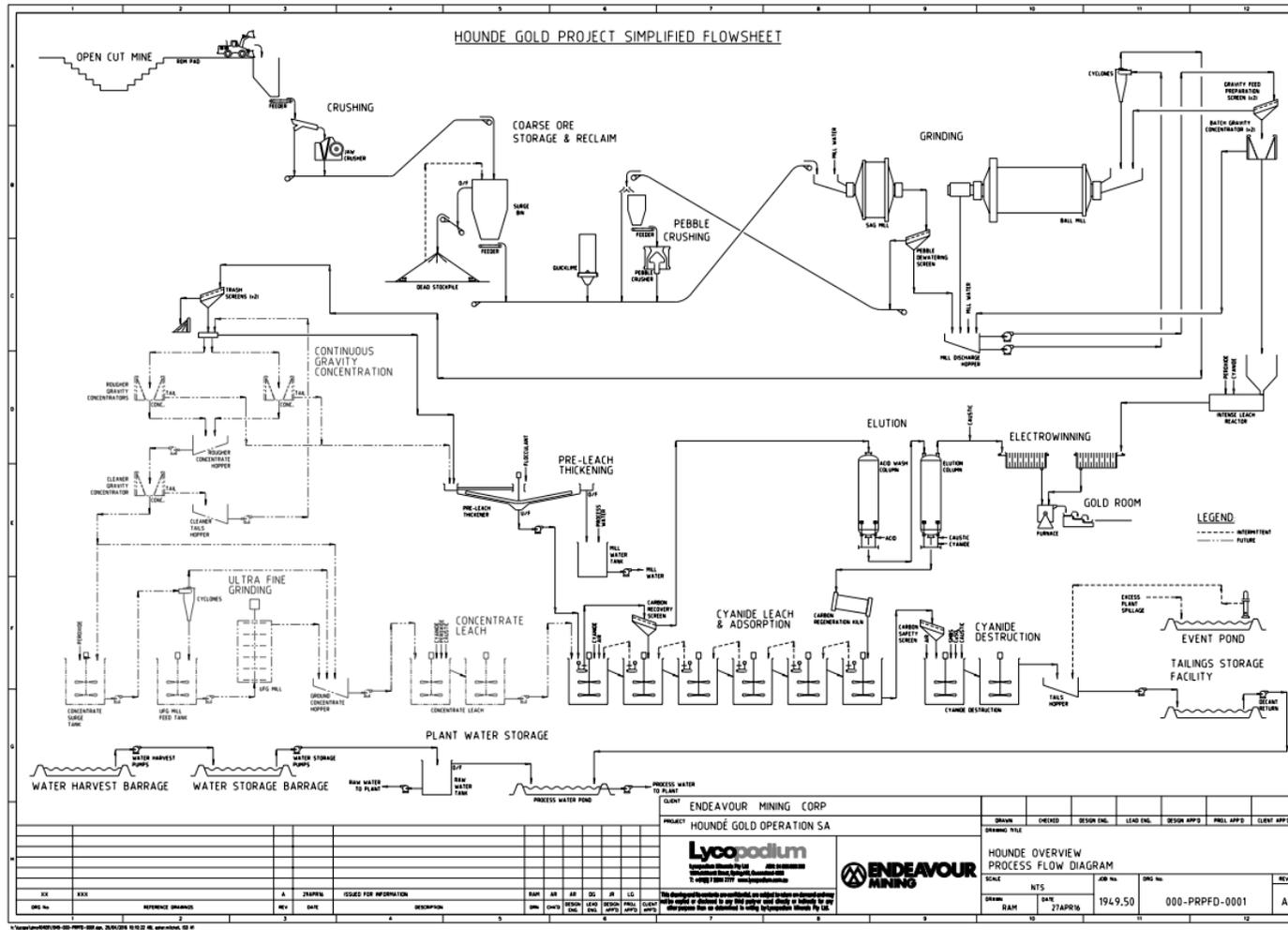
Annexe 1 : Site de HGO



Annexe 2 : Image de l'usine



Annexe 3 : Schéma du traitement de minerai



Annexe 4 : Schéma unifilaire de l'installation électrique de la mine

