



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGÉNIERIE - ANNABA

Département d'Électronique, d'Électrotechnique et Automatique

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

Spécialité : Production Electrique et Energies Renouvelables

Présenté par

BADJI Sabra
ZEMOULI Nour El Houda

Diagnostic et amélioration des plans de protection électrique MT/HT

Encadré par

MCA. CHIHEB Sofiane
ENSTI Annaba

Membres du jury :

Pr. DOGHMANE Nouredine	Président	ENSTI -Annaba
Dr. SMILI Karima	Examineur	ENSTI-Annaba
Mr. AHMED MALEK Amor	Examineur	SPE Koudiet Eddraouech
Mr. GHERBI Mesbah	Examineur	Banque
Mr. CHABBI Abdallah	Invité	SPE Koudiet Eddraouech

ملخص

تدرس هذه الأطروحة التنسيق بين أنظمة الحماية الكهربائية داخل محطة توليد الطاقة الكهربائي ذات الدورة المركبة في SPE كودية الدراوش . في أعقاب الحوادث الحرجة التي تسببت في توقف إنتاج وحدة بقدرة 400 ميغاواط ، أُجري تحليل مفصل لخطة الحماية . تتضمن الدراسة نمذجة الأعطال الكهربائية المرصودة في بيئة ETAP ، والتحقق من صحة تسلسل الأعطال، واقتراح حلول لتحسين انتقائية وتنسيق أجهزة الحماية. كما يتناول العمل أعطال أنظمة النقل عالية السرعة (HSTS). يهدف هذا العمل ، من خلال تحسين الإعدادات وخطة حماية جديدة ، إلى تعزيز موثوقية واستمرارية خدمة المحطة بأفضل الحلول الممكنة.

كلمات مفتاحية : أنظمة الحماية الكهربائية ، التنسيق بين الحماية ، الأعطال الكهربائية، محطة الدورة المركبة ، انتقائية الحماية ، موثوقية الشبكة ، خطة الحماية .

Abstract

This dissertation studies the coordination between electrical protections within the SPE Kou-diet Eddraouch combined cycle thermal power plant. Following critical incidents that caused the production shutdown of a 400 MW unit , a detailed analysis of the protection plan was carried out . The study includes modeling under the ETAP environment of the observed electrical faults, validation of the tripping sequences and the proposal of solutions to improve the selectivity and coordination of the protection devices. The work also addresses the malfunctions of the High Speed Transfer Systems (HSTS). Through improved settings and a new protection plan, this work aims to strengthen the reliability and continuity of service of the plant with the best possible solutions .

Keywords :Electrical protection, protection coordination , electrical faults , combined cycle power plant , ETAP , selectivity , reliability , protection plan .

Résumé

Ce mémoire étudie la coordination entre les protections électriques au sein de la centrale thermique à cycle combiné de SPE Koudiet Eddraouch . Suite à des incidents critiques qui ont provoqué l'arrêt de production d'une tranche de 400 MW , une analyse détaillée du plan de protection a été réalisée . L'étude inclut la modélisation sous l' environnement ETAP des défauts électriques observés , la validation des séquences de déclenchement et la proposition des solutions pour améliorer la sélectivité et la coordination des dispositifs de protection . Le travail aborde également les dysfonctionnements des Systèmes de Transfert Haute Vitesse (HSTS). À travers des réglages améliorés et un nouveau plan de protection, ce travail vise à renforcer la fiabilité et la continuité de service de la centrale avec les meilleures solutions possibles .

Mots clés : Protection électrique, coordination des protections, défauts électriques , centrale à cycle combiné , sélectivité , fiabilité , plan de protection.

Dédicace

À la mémoire de mon père , Badji Yassine ,

Tu restes à jamais dans mon cœur.

Ce travail est dédié à toi , en hommage à tout ce que tu as été pour moi.

À nous-mêmes ,

Pour notre courage, nos efforts et notre persévérance tout au long de ce parcours.

À nos chers parents,

Merci pour votre amour, votre soutien et vos sacrifices. Sans vous, rien n'aurait été possible.

À nos amis,

Merci pour votre présence, votre aide et vos encouragements dans les moments difficiles
comme dans les moments de joie.

Sabra & Nour Elhouda

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de fin d'études .

Avant tout , nos remerciements les plus sincères vont à nos parents pour leur amour inconditionnel , leurs sacrifices et leur soutien moral et matériel tout au long de notre parcours. Leur présence constante et leurs encouragements ont été une source inestimable de force et de motivation.

Nous adressons également notre reconnaissance à Monsieur Chiheb Sofiane , notre encadrant , pour son accompagnement attentif , ses conseils avisés et son exigence qui ont grandement enrichi ce travail .

Nos remerciements vont aussi à Monsieur Messaoud Djeghaba , professeur à l'ENSTI, pour son encadrement pédagogique et son appui précieux durant tout le projet.

Nous remercions chaleureusement l'ensemble de nos enseignants de l'ENSTI d'Annaba pour la qualité de leur enseignement et leur engagement à nous transmettre un savoir solide, qui a constitué les fondations de notre formation.

Nos sincères remerciements s'adressent aussi aux ingénieurs de la centrale SPE Koudiet Ed Draouech :

Monsieur Cheloufi Nabil,

Monsieur Amor Ahmed Malek,

Monsieur Menacer Abderezek,

pour leur accueil , leur accompagnement technique et leur disponibilité durant notre stage ainsi que pour les connaissances pratiques qu'ils nous ont généreusement transmises.

À toutes et à tous, merci du fond du cœur.

Table des matières

Résumé	I
Table des matières	VI
Table des figures	VII
Table des tableaux	VIII
Liste des abréviations	IX
Introduction générale	1
I Présentation du lieu de stage	3
I.1 Introduction	3
I.2 Présentation de la centrale de Koudiet Eddraouch	3
I.2.1 Fiche technique de la centrale	3
I.2.2 Composants et fonctionnement de la centrale Koudiet Eddraouch	3
I.3 Les niveaux de tension de la centrale	4
I.3.1 Niveau basse tension 400 V	5
I.3.2 Niveau moyenne tension 6,6 kV	5
I.3.3 Niveau moyenne tension 18,5 kV	5
I.3.4 Niveau Très haute tension 400 kV	6
I.4 Problématique et objectifs	6
I.5 Conclusion	6
II Les systèmes de protection entre la fiabilité et la sélectivité	7
II.1 Introduction	7
II.2 La protection des systèmes électriques	7
II.2.1 Les réducteurs de mesure	7
II.2.2 Les systèmes de traitement d'information : Le relais de protection	8
II.2.3 Le système de coupure (disjoncteur)	8
II.3 Coordination des protections	8
II.4 Sélectivité des protections	9
II.4.1 Sélectivité ampèremétrique	9
II.4.2 Sélectivité chronométrique	9
II.4.3 Sélectivité logique	9
II.4.4 Sélectivité directionnelle	10
II.4.5 Les conséquences de l'absence de sélectivité	10

II.5 Conclusion	10
III Simulation et validation des scénarios des défauts	11
III.1 Introduction	11
III.2 Présentation de l'environnement de simulation ETAP	11
III.3 Etude de cas de protection de pompe d'eau de mer	11
III.3.1 Conséquences du défaut	12
III.3.2 Simulation du défaut et réglages	13
III.4 Etude de cas de HSTS	15
III.4.1 Scenarios de fonctionnement du HSTS	16
III.4.2 Diagnostic du dysfonctionnement du HSTS 1	18
III.4.3 Diagnostic du dysfonctionnement du HSTS 2	20
III.5 Conclusion	20
IV Solutions techniques proposées pour l'amélioration du système de protection	21
IV.1 Introduction	21
IV.2 Solutions pour le problème de protection de pompe d'eau de mer	21
IV.2.1 Amélioration des réglages de protection et coordination	21
IV.2.2 Résultats de simulation après amélioration	23
IV.2.3 Proposition d'un nouveau plan de protection pour la tranche défectueuse	23
IV.3 Solutions pour le problème de HSTS	25
IV.3.1 Solution technique pour le système HSTS 1	25
IV.3.2 Solution technique pour le système HSTS 2	26
IV.4 Conclusion	26
Conclusion générale	27
Bibliographie	28

Table des figures

Figure I.1	Schéma simplifié du cycle combiné de la centrale	4
Figure I.2	Schéma unifilaire de SPE KOUDIET EDDRAOUCH	5
Figure II.1	Composants d'un système de protection [3]	7
Figure II.2	Courbes de déclenchement avec sélectivité ampèremétrique [7]	9
Figure II.3	Courbes de déclenchement avec sélectivité chronométrique [7]	9
Figure III.1	Interface principale du logiciel ETAP	12
Figure III.2	Schéma unifilaire simulé avec défaut sur le départ eau de circulation .	12
Figure III.3	Simulation du défaut sous environnement ETAP	14
Figure III.4	Simulation du défaut sous environnement ETAP	15
Figure III.5	Schéma synoptique HSTS	16
Figure III.6	Simulation du fonctionnement normal du HSTS par logiciel ETAP . . .	16
Figure III.7	Simulation ETAP du scénario de transfert d'alimentation par SUE-3000 (1) (défaut sur tranche 2 et alimentation par tranche 1)	17
Figure III.8	Simulation ETAP du scénario de transfert d'alimentation par SUE-3000 (2) (défaut sur tranche 2 et alimentation par tranche 1)	17
Figure III.9	Simulation ETAP du démarrage automatique du groupe Black Start . . .	18
Figure III.10	Chronologie des actions de protection du scénario de Black Out.	18
Figure III.11	Détection de défaillance du disjoncteur CB1 (CB Fail Logic)	19
Figure III.12	Détails de surveillance du disjoncteur CB1 (CB1 Failure Supervision Logic)	19
Figure III.13	Message d'erreur de communication affiché sur l'interface RHMI du système HSTS2 (ABB SUE 3000)	20
Figure IV.1	Mise à jour du réglage des relais de protection : (a) Courbe Definite Time du Relais 1 ,(b) Courbe EIT du Relais 1	22
Figure IV.2	Simulation ETAP du défaut corrigé avec nouveaux réglages des relais	23
Figure IV.3	Séquence d'opération des protections après les réglages effectués . . .	23
Figure IV.4	Simulation ETAP du défaut corrigé avec des nouveaux relais de protection	25

Liste des tableaux

Tableau III.1	Réglages des relais de protection	13
Tableau IV.1	Mise à jour du réglage des relais de protection	22
Tableau IV.2	Réglage des nouveaux relais de protection	24

Liste des abréviations

ATS *Automatic Transfer Switch*

BT *Basse Tension*

CB *Circuit Breaker (disjoncteur)*

CPU *Central Processing Unit*

ETAP *Electrical Transient Analyzer Program*

GIS *Gas Insulated Substation*

HRSG *Heat Recovery Steam Generator*

HSTS *High Speed Transfer System*

IHM *Interface Homme-Machine*

LCI *Load Commutated Inverter*

RHMI *Remote Human Machine Interface*

SCADA *Supervisory Control and Data Acquisition*

SPE *Société de Production d'Électricité*

TP *Transformateur Principal*

TS *Transformateur de Soutirage*

THT *Très Haute Tension*

TT/TC *Transformateur de Tension / Transformateur de Courant*

UPS *Uninterruptible Power Supply*

Introduction Générale

Dans notre vie actuelle où l'énergie électrique représente un élément indispensable dans tous les secteurs, la satisfaction des demandeurs de cette énergie est indispensable. Les centrales électriques sont censées fonctionner sans interruption afin de satisfaire la demande énergétique. Pour cela, les différentes parties de cette centrale doivent fonctionner convenablement, et aucune interruption n'est tolérable car elle peut perturber la totalité de système.

La centrale de Koudiet Eddraouch, située dans la région d'El Tarf qui est de puissance de pointe 1200 MW, constitue l'une des plus importantes installations de production électrique du pays. Cette centrale à cycle combiné représente un système qui doit fonctionner d'une manière cohérente. Les systèmes sont alimentés avec l'énergie électrique, et comme la centrale est de surface importante, cela exige que l'acheminement d'énergie vers les accessoires de la centrale passe à travers différents niveaux de tension (18 kV, 6.6 kV et 400 V). Il est alors impératif d'équiper chaque niveau de tension par une protection adéquate. Récemment, certains problèmes ont été constatés dans des protections des alimentations d'accessoires de la centrale, et qui ont provoqué la mise hors service d'une tranche de la centrale (de puissance 400 MW). Initialement, nous avons pensé que le problème était un problème de coordination entre les protections. Mais les visites sur site durant le stage ont ouvert d'autres portes illustrant un besoin d'intervention d'un spécialiste, et pourquoi pas une micro-entreprise spécialisée.

Ce mémoire vise à étudier en profondeur les mécanismes de coordination entre les protections dans la centrale de Koudiet Eddraouch. À travers l'analyse des situations réelles des systèmes de protection, des rapports de diagnostic de déclenchement, nous cherchons simuler le fonctionnement actuel des protections, à identifier les points à améliorer, et de proposer des plans de protection adaptées et de proposer une opération de maintenance des systèmes de protection dans la centrale de Koudiet Eddraouch.

Le présent projet de fin d'étude est structuré comme suit :

Le premier chapitre vise à présenter l'établissement de stage, l'unité qui nous a reçus et nous a accompagnés, ainsi que l'explication de situation de problème.

Dans le deuxième chapitre nous présentons une revue de la littérature sur les protections des installations électriques et nous rappelons les points à respecter dans le réglage des protections.

Une simulation du cas actuel de défaut est effectuée dans le troisième chapitre. Sous l'environnement ETAP nous allons simuler l'alimentation qui possède un défaut et nous allons essayer d'identifier les problèmes dans le système de protection et nous allons refaire la simulation en corrigeant le système de protection. A la fin de chapitre, nous allons simuler un deuxième système qui a connu des défaillances au niveau de la centrale et nous essayons de donner un diagnostic pour le système étudié.

Le dernier chapitre illustre les solutions techniques proposées sous forme de nouveaux plans de protection.

A la fin , une conclusion englobe les résultats obtenus lors de notre étude ainsi que quelques perspectives .

Chapitre I

Présentation du lieu de stage

I.1 Introduction

Les centrales électriques sont considérées comme les points les plus importants dans les réseaux électriques, car sans ces centrales, le réseau électrique devient une structure mécanique fabriquée d'isolants et des métaux sans esprit. Le présent chapitre vise à présenter la centrale de Koudiet Eddraouch et à présenter la problématique à étudier dans notre mémoire.

I.2 Présentation de la centrale de Koudiet Eddraouch

Construite par GE et mise en service fin Février 2012, cette centrale a été installée afin de répondre à la demande croissante en énergie électrique en Algérie [1, 2].

I.2.1 Fiche technique de la centrale

- Type de centrale : Thermique à cycle combiné
- Puissance installée : 1200 MW (3 tranches de 400 MW)
- Source d'énergie primaire : Gaz naturel
- Source d'énergie secondaire : Gasoil
- Délai de la réalisation : 48,5 mois
- Coût d'investissement : 35 Milliards de DA

I.2.2 Composants et fonctionnement de la centrale Koudiet Eddraouch

Les parties initialement distinctes au niveau de la centrale sont comme suit :

- L'alternateur.

- Transformateur principal (400 /18,5) kV,490 MVA, 50 Hz.
- Transformateur de soutirage 36 MVA, (18,5 /6.9) kV, 50 Hz.
- La turbine à gaz.
- La chaudière de récupération des gaz d'échappement (HRSG).
- La turbine à vapeur.
- Condenseur.

Ces différents composants sont englobés sur la figure suivante.

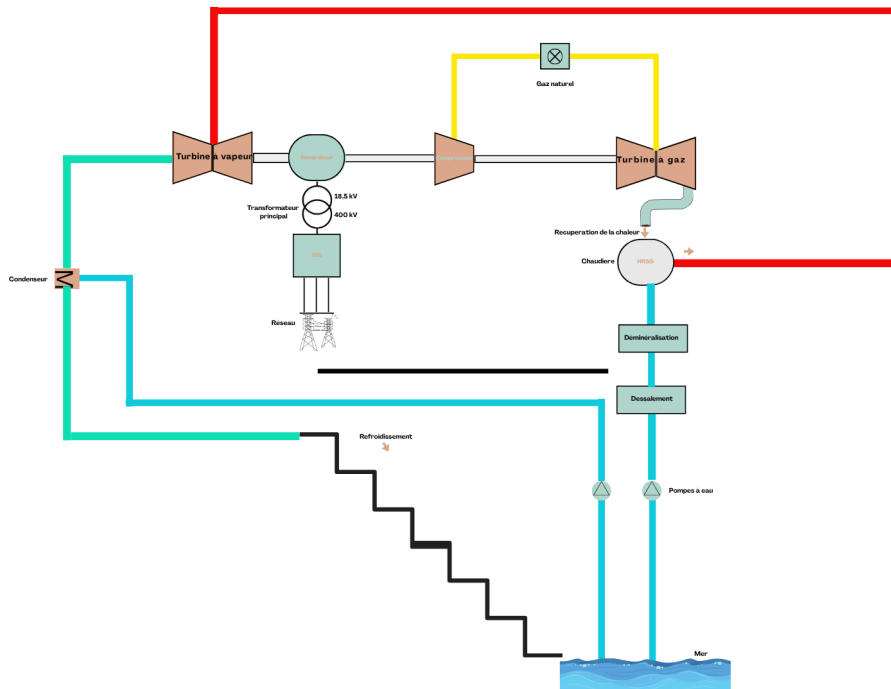


Fig. I.1 : Schéma simplifié du cycle combiné de la centrale

Le fonctionnement de cette centrale repose sur le principe du cycle combiné : une turbine à gaz fonctionnant en brûlant le gaz dans une chambre de combustion pour tourner la turbine à gaz qui entraîne l'alternateur . Ensuite , les gaz évacués par cette combustion sont récupérés pour produire de la vapeur d'eau tournant une turbine à vapeur qui est couplée avec le même alternateur .

I.3 Les niveaux de tension de la centrale

Nous présentons dans ce qui suit une explication des différents niveaux de tensions existants au niveau de la centrale accompagnée d'un schéma unifilaire comme illustré sur la figure I.2 .

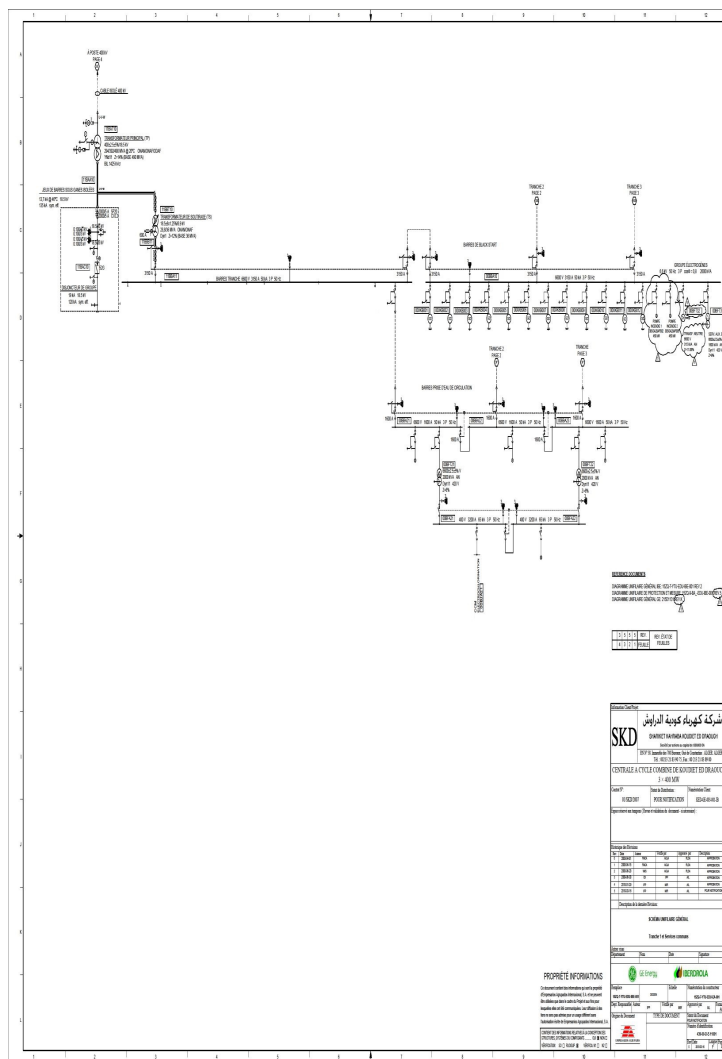


Fig. I.2 : Schéma unifilaire de SPE KOUDIET EDDRAOUCH

I.3.1 Niveau basse tension 400 V

Cette tension est utilisée pour l'alimentation des jeux de barres BT pour les auxiliaires (via ATS), et aussi une liaison avec les groupes électrogènes en cas de perte de tension (systèmes UPS).

I.3.2 Niveau moyenne tension 6,6 kV

Cette tension est fournie par le transformateur de soutirage (18,5/6,6 kV, 36 MVA). Elle est utilisée pour alimenter les services auxiliaires de la centrale et aussi pour alimenter le système LCI.

I.3.3 Niveau moyenne tension 18,5 kV

Cette tension est générée par l'alternateur principal (460 MVA), elle est considérée comme un niveau intermédiaire pour l'élévation de tension vers 400 kV pour le transport, l'alimentation des auxiliaires via transformateur de soutirage, et l'excitation et le démarrage de l'alternateur.

I.3.4 Niveau Très haute tension 400 kV

Ce niveau de tension est utilisé pour la liaison de la centrale avec le réseau, obtenue grâce au transformateur principal (18,5/400 kV, 490 MVA) et transmise via le poste GIS.

I.4 Problématique et objectifs

Pour assurer une fiabilité de la centrale, il faut que ses accessoires fonctionnent d'une manière fiable donc il faut les alimenter en toute sécurité. Le fonctionnement en cycle combiné de configuration single shaft demande que les deux cycles fonctionnent simultanément. Pour le cycle Brayton (Turbine à gaz) uniquement le fonctionnement des torches doit être assuré, et quand l'alternateur continue à tourner à une vitesse de 4 tours / minue pour ne pas avoir un arrêt brutal de la machine, il entraîne le compresseur donc l'air comprimé est généré. Mais pour le deuxième cycle (de turbine à vapeur) il faut assurer la présence de source de chaleur ainsi que la source de froid et cela pour la génération de vapeur et pour sa condensation.

La centrale de Koudiet Eddraouch utilise l'eau de mer comme une source froide : il existe six pompes qui servent à pomper l'eau de mer vers le condenseur d'une manière continue, car en cas d'interruption la température et la pression au niveau des canalisations devient instable, et le système se pose en grand risque de se mettre à l'arrêt, et ce qui demande un protocole spéciale (maintenir l'alternateur en train de se tourner, réduire la température du système doucement...).

Un défaut électrique est survenu sur le câble d'alimentation des pompes à eau de mer à l'heure de pointe. Ce câble est raccordé au jeu de barres 6,6 kV, a présenté un court-circuit. La réaction prévue de système de protection était d'isoler le câble défectueux par le disjoncteur de départ en amont, afin de préserver la continuité de service de la tranche.

Cependant, la réaction réelle du système de protection a dévié de la séquence attendue : au lieu que le disjoncteur de niveau 6.6 kV s'ouvre, le disjoncteur de tension 400 kV (52L) est ouvert premièrement, suivi d'un disjoncteur intermédiaire 6,6 kV (52A), et enfin du disjoncteur situé en amont du câble défectueux. Cette réaction en cascade a conduit l'arrêt du système de refroidissement, et cela a perturbé la stabilité de la chaîne de production, et afin d'éviter toute autre complication, toute la tranche a été mise hors service.

Ce déclenchement non sélectif a provoqué une perte de production non justifiée durant l'heure de pointe juste à cause du comportement du système de protection. Afin de mieux comprendre le diagnostic du défaut, il faut analyser les séquences de fonctionnement de système de protection, et identifier pourquoi le niveau de tension 400 kV a été éliminé en premier lieu.

I.5 Conclusion

Le fonctionnement de centrale à cycle combiné est un peu exigeant, où la totalité des accessoires doivent fonctionner d'une manière satisfaisante. Le cas de défaut au niveau de centrale de Koudiet Eddraouch était une preuve claire de nécessité d'avoir une protection fiable. Le prochain chapitre présentera des généralités sur les systèmes de protection, leurs fonctionnements et caractéristiques.

Chapitre II

Les systèmes de protection entre la fiabilité et la sélectivité

II.1 Introduction

Les systèmes de protection dans la basse tension comprennent un petit équipement simple (disjoncteur, parafoudre,...). Mais pour le cas des protections en haute tension plusieurs systèmes interviennent pour donner l'image de grandeur, traiter l'information et isoler la partie défectueuse. Le présent chapitre résume le fonctionnement des systèmes de protection, leurs réglages ainsi que la notion de la sélectivité des protections.

II.2 La protection des systèmes électriques

Dans les installations électriques industrielles, où la tension est parfois supérieure à 400 V, et les courants sont très forts, et la protection de ces éléments est essentielle car ils représentent un investissement important. Pour assurer cette fonction, les systèmes de protection se composent de sous-systèmes où chacun complète l'autre.

Dans le cas général, la totalité de système peut se présenter comme illustré sur la figure suivante.

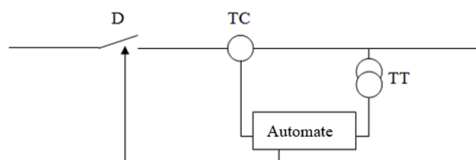


Fig. II.1 : Composants d'un système de protection [3]

II.2.1 Les réducteurs de mesure

Ces réducteurs se présentent principalement sous forme de transformateurs -le réseau électrique est de courant alternatif- soit de courant (TC) ou de tension (TT).

Avec ces réducteurs, nous obtenons des images de grandeurs électriques qui peuvent être lues avec les relais, où la tension est réduite à 100 V, et les courants sont réduits à 1 ou 5 A. La fiabilité de fonctionnement des réducteurs de mesure assure que les grandeurs mesurées sont correctes et que l'automate recevra une information de grandeur protégée sans perturbation [3].

II.2.2 Les systèmes de traitement d'information : Le relais de protection

Les systèmes de traitement d'information (relais de protection) sont des automates programmables fonctionnant comme relais de protection numérique- jouent un rôle central dans la protection des installations électriques. Ces automates sont conçus pour recevoir des signaux d'entrée, généralement issus de transformateurs de courant (TC) et de tension (TP) et d'autres signaux numériques. Ces automates analysent ces données en temps réel selon des algorithmes préprogrammés et des réglages prédéfinis afin de déclencher une action appropriée lorsque des conditions anormales sont détectées (surcharges, courts-circuits, défauts d'isolement, etc.) [4].

Leur principal avantage réside dans leur capacité à réduire considérablement le temps d'intervention en permettant une élimination rapide et ciblée des défauts électriques ce qui contribue à la limitation des dommages aux équipements, la préservation de la stabilité du réseau et la garantie de la sécurité des personnes.

Ces relais intègrent des fonctionnalités avancées comme :

- La communication avec d'autres systèmes de supervision comme SCADA afin d'arriver à coordonner avec les autres automates programmables soit de la même fonction ou de fonctions différentes.
- Le diagnostic en classifiant le défaut subit par son type selon la protection qui l'a détecté.
- L'enregistrement des événements, et permettent une supervision à distance, ce qui en fait des composants essentiels dans les systèmes modernes de protection, d'automatisation et de contrôle des réseaux électriques [5].

II.2.3 Le système de coupure (disjoncteur)

Dans les installations industrielles, le disjoncteur sert uniquement à couper le contact électrique entre les équipements et la source d'énergie. L'opération de fermeture ou d'ouverture est commandée à travers une bobine d'excitation et cette dernière est reliée à un signal de commande généré par l'automate programmable [3].

II.3 Coordination des protections

Les défauts arrivant sur les réseaux électriques peuvent se propager et perturber le fonctionnement des autres systèmes qui possèdent à leur tour des équipements de protection, propres à eux. Donc ces systèmes de protections peuvent être influencés par le défaut et déclenchent aussi sans que le défaut apparaisse à leur niveau. Cela engendre des pertes importantes dans les installations industrielles car le système censé couper le défaut n'a pas déclenché en premier.

Pour éviter ce problème, il faut assurer une coordination entre les systèmes de protection, où les caractéristiques de chaque protection tel que les courbes de déclenchement des disjoncteurs, leurs positions et fonctions sont regroupés et organisés afin d'assurer une bonne démarche de protection fiable et sélective [1].

II.4 Sélectivité des protections

La sélectivité de protection consiste à assurer le plus rapidement possible de déclencher que la partie concernée par le défaut pour éviter que l'énergie de défaut se propage vers les autres parties de l'installation [6].

II.4.1 Sélectivité ampèremétrique

Cette technique s'appuie sur le décalage en intensité entre les courbes de déclenchement des dispositifs de protection situés en amont et ceux en aval (Figure II.2). L'efficacité de cette sélectivité s'accroît lorsque les calibres des appareils sont bien différenciés [6].

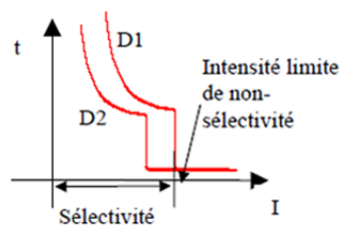


Fig. II.2 : Courbes de déclenchement avec sélectivité ampèremétrique [7]

II.4.2 Sélectivité chronométrique

Ce mode de sélectivité repose sur l'introduction d'un délai de déclenchement au niveau du disjoncteur situé en deuxième position, afin de laisser la priorité de déclenchement à l'appareil de protections le plus proche du défaut comme illustré sur la figure II.3 [6].

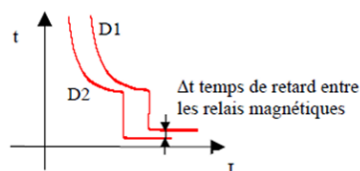


Fig. II.3 : Courbes de déclenchement avec sélectivité chronométrique [7]

II.4.3 Sélectivité logique

La sélectivité logique repose sur la communication entre les dispositifs de protection généralement à l'aide de déclencheurs électroniques intégrés aux disjoncteurs. Lorsqu'un disjoncteur

en aval détecte un défaut, il transmet un signal au disjoncteur en amont via une liaison dédiée. Ce dernier est alors temporisé, laissant le temps à l'appareil aval d'intervenir en priorité, cette méthode permet d'optimiser la sélectivité sans imposer de différences marquées dans les seuils de réglage ou de temporisations prolongées [6].

II.4.4 Sélectivité directionnelle

Cette fonction est pratiquement limitée aux équipements de transport ou de distribution mis en parallèle. Cela réduit le retour d'énergie vers l'élément sain lors de présence de défaut [6].

II.4.5 Les conséquences de l'absence de sélectivité

Dans l'absence de la sélectivité des protections, le disjoncteur loin du défaut (souvent le disjoncteur principal) se déclenche alors que d'autres disjoncteurs plus proches auraient dû intervenir pour isoler juste la partie concernée.

Les conséquences qui peuvent être causées par ce défaut :

- Risque de dommage aux équipements.
- Arrêt quasi-total de l'installation.
- Perte de production importante.
- Réduction de la fiabilité du réseau.

Afin de résoudre ce problème, il faut améliorer la sélectivité par :

- Vérification des réglages régulièrement.
- Tests fonctionnels périodiques.
- Contrôle physique des équipements.
- Analyser les historiques des déclenchements.

II.5 Conclusion

La coordination et la sélectivité des systèmes de protection est un paramètre très important dans la fiabilité des systèmes de protection, surtout dans la présence de plusieurs systèmes en cascade ou en parallèle. Le prochain chapitre est destiné à étudier le problème de système de protection au niveau de la centrale koudiet Eddraouch.

Chapitre III

Simulation et validation des scénarios des défauts

III.1 Introduction

Les systèmes alimentés en énergie électrique au niveau de la centrale thermique de Koudiet Eddraouch sont équipés d'un ensemble de protections réparties sur plusieurs niveaux de tension (400 kV, 18,5 kV, 6,6 kV et 400 V), le réglage de ces protections repose sur plusieurs paramètres techniques : seuils de courant ($I >$), temps de déclenchement, types de courbes et coordination des relais.

Ce chapitre présente l'étude des problématiques de protection constatées lors de notre stage au niveau de la centrale thermique de Koudiet Eddraouch avec une simulation de ces scénarios de défauts sous environnement ETAP.

III.2 Présentation de l'environnement de simulation ETAP

ETAP est un logiciel qui propose des outils pour analyser et dimensionner les réseaux électriques dans les secteurs de l'énergie et de l'industrie. Le logiciel ETAP propose une interface simple reposant sur plusieurs bases de données intégrées ce qui facilite la sélection des composants et équipements électriques par l'utilisateur. Il offre également un accès à des outils graphiques avancés permettant la modélisation et la simulation des systèmes électriques [10]. L'interface du logiciel est illustrée sur la figure III.1.

III.3 Etude de cas de protection de pompe d'eau de mer

Le premier problème étudié représente un déclenchement d'une tranche de production électrique. Cette tranche est connectée au jeu de barre de 400 kV. L'énergie acheminée vers les accessoires de la tranche passe par un transformateur principal (TP) de 400/18,5 kV, puis par un transformateur de soutirage (TS) de 18,5/6,6 kV pour alimenter les auxiliaires de la centrale. Le jeu de barres 6,6 kV alimente plusieurs départs, notamment ceux destinés aux pompes à eau

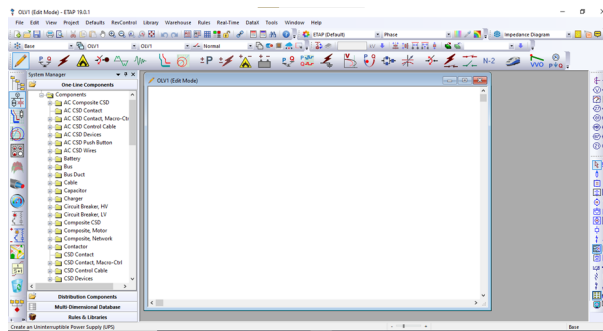


Fig. III.1 : Interface principale du logiciel ETAP

de mer nécessaires au circuit de refroidissement de la centrale.

L'installation a été simulée sous environnement ETAP comme illustré sur la figure III.2.

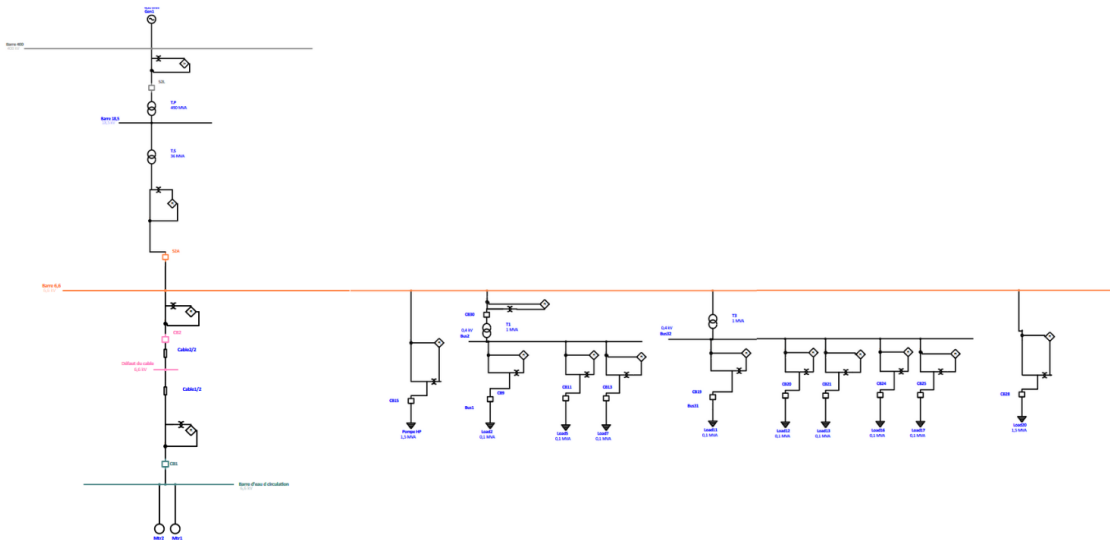


Fig. III.2 : Schéma unifilaire simulé avec défaut sur le départ eau de circulation

Le défaut dans cette installation étudiée est un court-circuit monophasé à la terre localisé au niveau du câble (de longueur 400m) reliant le départ CB2 aux pompes à eau de mer (système de condensation de vapeur), en aval de disjoncteur le jeu de barre 6,6 kV.

III.3.1 Conséquences du défaut

Le défaut survenu a entraîné des perturbations majeures dans le fonctionnement de la centrale. Les principales conséquences observées sont les suivantes :

- Interruption de l'alimentation des services auxiliaires de la tranche 2: Le défaut a provoqué la perte d'alimentation des équipements auxiliaires essentiels.

- Perte partielle de la production : une tranche complète a été mise hors service, ce qui a entraîné la perte d'un tiers de la capacité de production totale de la centrale.
- Arrêt d'urgence en période de forte demande : L'incident s'est produit en heure de pointe, ce qui a aggravé son impact sur la stabilité du réseau électrique.
- Endommagement mécanique du corps HP de la turbine : Le redémarrage forcé de la tranche, effectué dans des conditions thermiques défavorables, a provoqué une déformation du corps HP de la turbine à vapeur. Cet incident a non seulement affecté l'intégrité mécanique de la machine, mais a également entraîné des coûts de maintenance importants.
- Perte de capacité au niveau national : La mise hors service de la tranche a entraîné une perte d'environ 1,53 % de la puissance installée nationale [8].

III.3.2 Simulation du défaut et réglages

Les paramètres des équipements électriques ont été introduites sous environnement ETAP, et les protections ont été introduites. Nous souhaitons signaler que nous avons choisi des relais de protection proches à ceux existants dans la réalité, vu que nous n'avons pas trouvé les relais existants dans la bibliothèque de ETAP. Les réglages des relais de protection sont identifiés comme mentionnés dans le tableau suivant.

Tab. III.1 : Réglages des relais de protection

Nom du relais	Modèle du relais	Emplacement	Type de protection	Type de courbe de déclenchement	Temporisation
Relais 52L	ABB REB500	Disjoncteur ligne 400 kV	51/67 51N/67N 50/51	extremely inverse	0.01 s
Relais 52A	Sepam series 10	Disjoncteur 52 A entre TP et TS	46-1 49 RMS 50/51	Definite time	0.05 s
Relais 2	Sepam series 10	Départ câble vers CB1	46-1 49 RMS 87M 50/51	Definite time	0.05 s
Relais 1	Sepam series 10	Départ moteur pompe eau de mer	46-1 49 RMS 50/51	Definite time	0.05 s

La simulation du défaut est illustrée sur la figure III.3, et le rapport établi par ETAP est représenté sur la figure III.4.

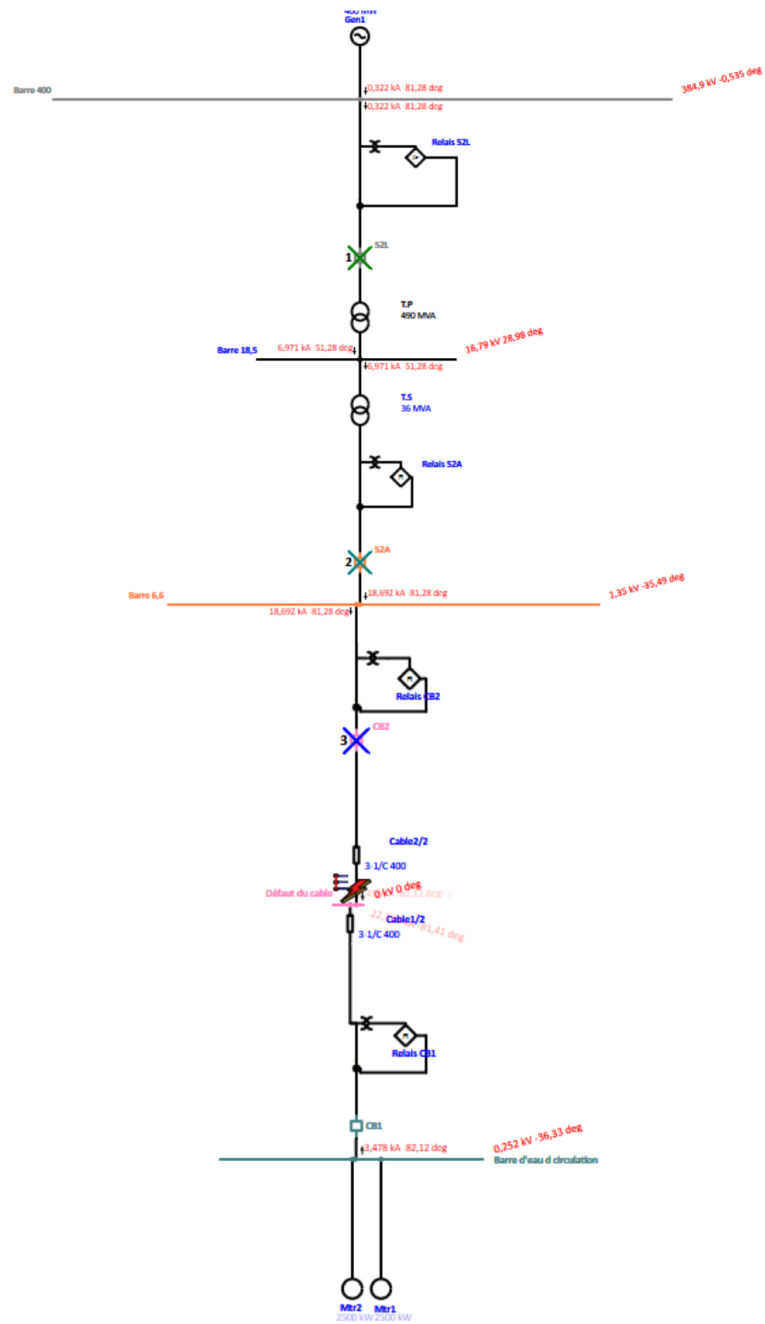


Fig. III.3 : Simulation du défaut sous environnement ETAP

Time (ms)	ID	I (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
6.3	Relais 52L	0.322	6.3		Phase - OC1 - 51
50.0	Relais 52A	18.692	50.0		Phase - OC1 - 51
55.0	Relais 2	18.692	55.0		Phase - OC1 - 51
89.3	52L		83.0		Tripped by Relais 52L Phase - OC1 - 51
133	52A		83.0		Tripped by Relais 52A Phase - OC1 - 51
138	CB2		83.0		Tripped by Relais 2 Phase - OC1 - 51

Fig. III.4 : Simulation du défaut sous environnement ETAP

Ce résultat reprend ce qui a été noté lors de défaut réel au niveau de la centrale lors de défaut électrique enregistré.

Le comportement de déclenchement des protections est classé non conforme en matière de sélectivité. Les disjoncteurs se sont ouverts dans l'ordre suivant :

- 52L (disjoncteur de ligne 400 kV) : ouverture immédiate en première position (89,3ms).
- 52A (disjoncteur entre le TS et la barre 6,6 kV) : déclenchement en second (133 ms).
- CB2 (départ vers le câble défectueux) : déclenchement en dernier (138 ms).
- CB1 (départ moteurs, en aval du défaut) : reste fermé .

Ce comportement est anormal car dans une logique de sélectivité seul CB2 devrait déclencher pour isoler la zone défectueuse , sans impacter l'alimentation générale de la tranche.

III.4 Etude de cas de HSTS

Lors d'étude de protection précédente, nous avons constaté un autre problème de fonctionnement de système High Speed Transfer System (HSTS).

Le SUE 3000 est un système de transfert de sources à grande vitesse (Figure III.5) conçu pour assurer une continuité d'alimentation électrique dans les installations critiques. Il est particulièrement adapté aux environnements industriels où la moindre interruption d'alimentation peut entraîner des pertes importantes ou des arrêts de production coûteux.

Ce système est une combinaison optimisée de dispositifs de détection et d'interrupteurs ABB de haute performance. Il permet un temps de transfert de 30 ms (soit 1,5 cycle) entre deux arrivées synchrones, garantissant ainsi une alimentation électrique ininterrompue pour les processus à criticité élevée [9].

De plus , la communication entre l'interface opérateur (IHM) et l'unité centrale du SUE3000 repose sur le protocole Modbus TCP/IP , ce qui permet un échange rapide fiable et structuré des informations d'état , des alarmes et des commandes via un réseau Ethernet . Ce protocole ouvert et largement utilisé dans l'industrie permet également une intégration facile dans les systèmes de supervision ou de contrôle-commande (DCS/SCADA) existants.

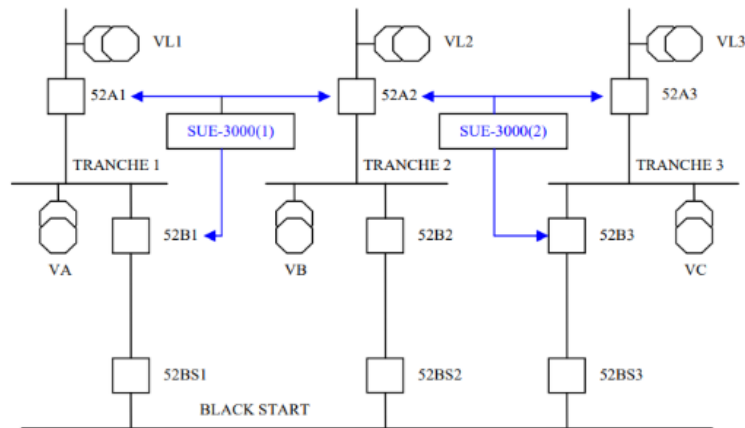


Fig. III.5 : Schéma synoptique HSTS

III.4.1 Scénarios de fonctionnement du HSTS

Le cas normal : La tranche 2 en service (Figure III.6)
 52A1, 52A2, 52A3, 52B2, 52BS1, 52BS2, 52BS3 sont fermés
 52B1, 52B3 sont ouverts

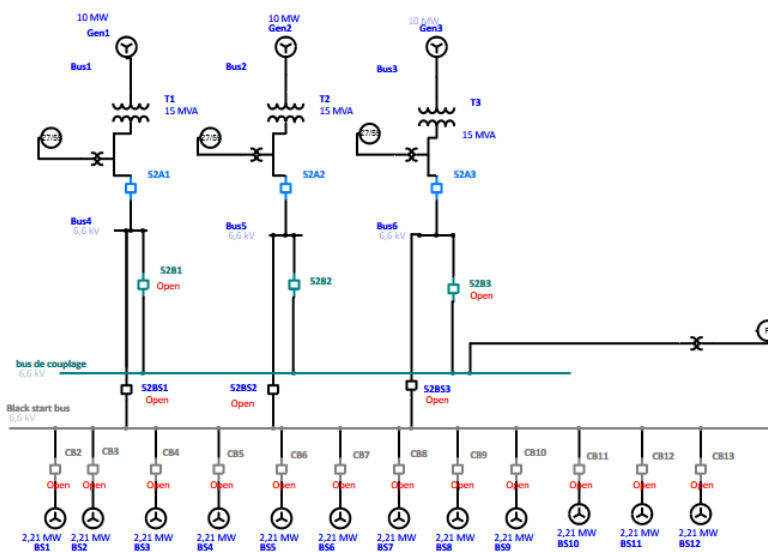


Fig. III.6 : Simulation du fonctionnement normal du HSTS par logiciel ETAP

Le cas où la tranche 2 est hors service, les tranches 1 et 3 sont opérationnelles

Après avoir détecté une chute de tension sur la barre de couplage, initialement alimentée par la tranche 2, l'automate SUE-3000 (1) procède à une vérification pour savoir si la tranche 1 est en service. Si tel est le cas, il fait le transfert d'alimentation de la barre vers la tranche 1, sinon il fait le transfert vers la tranche 3.

Les états des disjoncteurs dans cette configuration seront les suivants (Figure III.7) :
 52A1, 52A2, 52A3, 52B1, 52BS1, 52BS2, 52BS3 sont fermés
 52B2, 52B3 sont ouverts

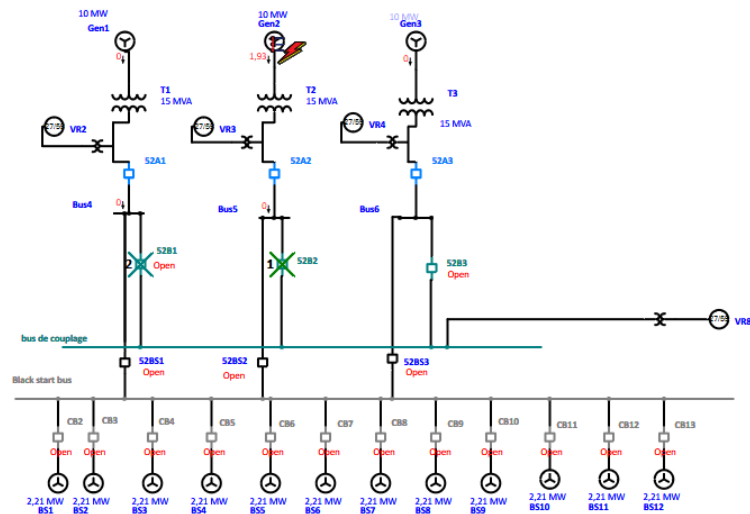


Fig. III.7 : Simulation ETAP du scénario de transfert d'alimentation par SUE-3000 (1) (défaut sur tranche 2 et alimentation par tranche 1)

Les états des disjoncteurs seront les suivants (Figure III.8) :
 52A1, 52A2, 52A3, 52B3, 52BS1, 52BS2, 52BS3 sont fermés
 52B1, 52B2 sont ouverts

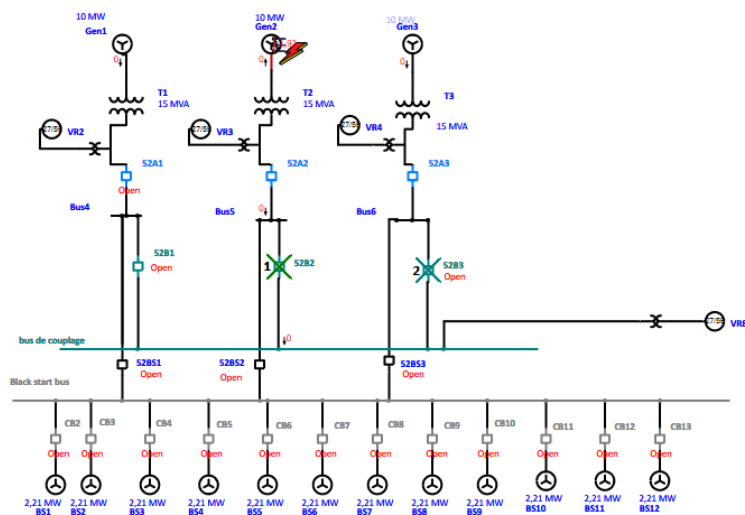


Fig. III.8 : Simulation ETAP du scénario de transfert d'alimentation par SUE-3000 (2) (défaut sur tranche 2 et alimentation par tranche 1)

Scénario Black Out – Démarrage du système Black Start En cas d'absence d'alimentation où les trois tranches de la centrale sont complètement hors tension (Black Out à titre d'exemple),

III.4.3 Diagnostic du dysfonctionnement du HSTS 2

Un autre problème lié à HSTS 2 a empêché le fonctionnement normal du système HSTS en général , l'interface (IHM) du système ABB SUE3000 a affiché un message d'erreur au démarrage comme montre la figure III.13.



Fig. III.13 : Message d'erreur de communication affiché sur l'interface RHMI du système HSTS2 (ABB SUE 3000)

- Ce message indique que l'écran (RHMI) n'arrive plus à communiquer avec l'unité centrale du système HSTS , empêchant toute supervision ou commande manuelle des disjoncteurs liés .

Face à cette alerte, plusieurs causes potentielles ont été envisagées :

- Câble de communication entre l'IHM et la base déconnecté ou endommagé.
- L'IHM essaie d'interroger une base avec une adresse erroné .
- Blocage ou arrêt complet de l'automate .

III.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de diagnostiquer à travers la modélisation et la simulation de multiples défauts qui affectent la fiabilité de plusieurs systèmes de protection électrique de la centrale . Les résultats obtenus constituent donc une base essentielle pour proposer des solutions techniques adaptées visant à renforcer la fiabilité de ces systèmes défaillants dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Solutions techniques proposées pour l'amélioration du système de protection

IV.1 Introduction

Sous la lumière de l'analyse des défauts simulés et des problèmes existants dans le système de protection, nous proposons dans ce chapitre quelques solutions techniques afin d'améliorer la coordination des relais, la sélectivité des déclenchements et la fiabilité globale du plan de protection.

IV.2 Solutions pour le problème de protection de pompe d'eau de mer

IV.2.1 Amélioration des réglages de protection et coordination

Pour corriger le défaut constaté au niveau du câble des pompes à eau de mer, une première approche consiste à revoir et améliorer les paramètres de déclenchement des relais de protection.

Les temps de déclenchement des relais concernés ont été ajustés de manière à établir une coordination temporelle (sélectivité chronométrique) cohérente entre :

- Les relais situés en amont du défaut (52L, 52A, Relais 2).
- Les relais situés en aval du défaut (Relais 1).
- Les autres protections de la tranche.

Le but est de garantir que le relais le plus proche au défaut déclenche en premier (plus rapidement par rapport aux autres relais) et isole la partie défaillante seulement.

Pour améliorer la coordination entre les relais de protection concernés par notre cas, nous avons changé leurs courbes de déclenchement, le relais 52 et le relais 2 (situés en amont de la zone du défaut) ont été initialement configurés avec des courbes à temps défini (Definite Time).

Ce type de courbe applique un temps de déclenchement fixe , quelle que soit la valeur du courant de défaut, ce qui peut provoquer un déclenchement trop lent en cas de court-circuit sévère.

Pour corriger ce problème, nous avons remplacé les courbes Definite Time par des courbes de type Extremely Inverse Time (EIT) comme montre la figures IV.1 (a) et (b). Ces courbes, beaucoup plus sensibles à l'intensité du courant , permettent un temps de réponse plus rapide en cas de défaut important , et laisse la priorité d'intervention aux protections les plus proches de la zone défectueuse .

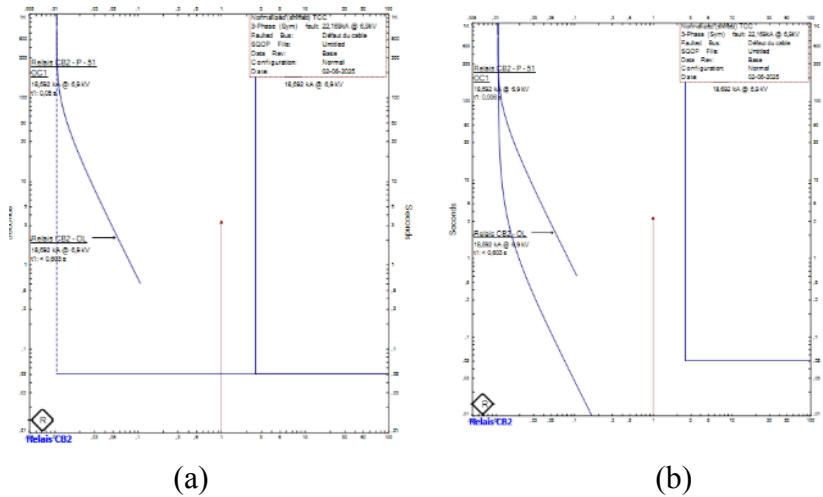


Fig. IV.1 : Mise à jour du réglage des relais de protection : (a) Courbe Definite Time du Relais 1 , (b) Courbe EIT du Relais 1

Tab. IV.1 : Mise à jour du réglage des relais de protection

Nom du relais	Modèle du relais	Emplacement	Type de protection	Type de courbe de déclenchement	Temporisation
Relais 52L	ABB REB500	Disjoncteur ligne 400 kV	51/67 51N/67N 50/51	Extremely inverse	0.02 s
Relais 52A	Sepam series 10	Disjoncteur 52 A entre TP et TS	46-1 49 RMS 50/51	Extremely inverse time	0.035 s
Relais 2	Sepam series 10	Départ câble vers CB1	46-1 49 RMS 87M 50/51	Extremely inverse time	0.03 s
Relais 1	Sepam series 10	Départ moteur pompe eau de mer	46-1 49 RMS 50/51	Definite time	0.03 s

IV.2.2 Résultats de simulation après amélioration

Après la correction des réglages des relais, les résultats de la simulation (Figure IV.2) montrent que le défaut est isolé par le disjoncteur CB2 sans affecter les autres parties de l'alimentation : Les protections réagissent de façon sélective et les auxiliaires restent alimentés, la tranche continue de fonctionner normalement ce qui confirme que les nouveaux réglages sont efficaces.

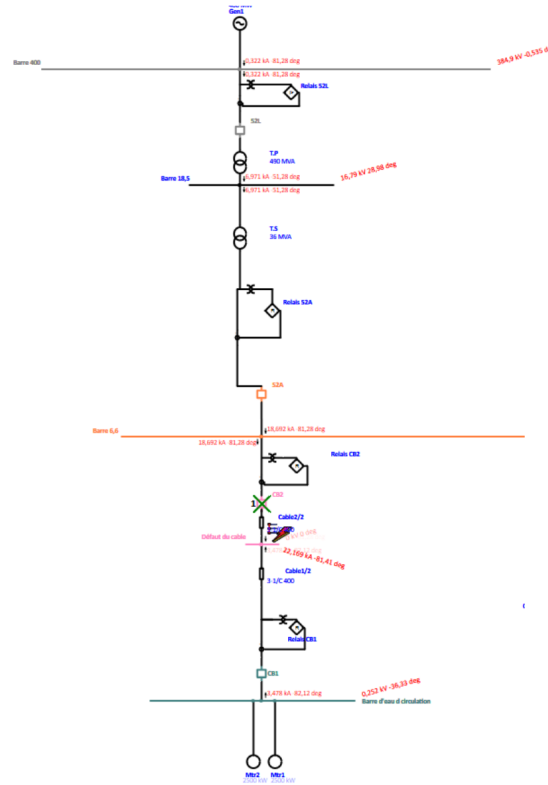


Fig. IV.2 : Simulation ETAP du défaut corrigé avec nouveaux réglages des relais

Le rapport établi par ETAP est représenté dans la figure IV.3

Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled					
3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Défaut du câble					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 14-06-2025	
Time (ms)	ID	I (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
6.0	Relais 2	18.692	6.0		Phase - OC1 - 51
89.0	CB2		83.0		Tripped by Relais 2 Phase - OC1 - 51

Fig. IV.3 : Séquence d'opération des protections après les réglages effectués

IV.2.3 Proposition d'un nouveau plan de protection pour la tranche défectueuse

L'analyse des défauts survenus dans la tranche étudiée a montré plusieurs insuffisances dans le plan de protection existant, notamment en termes de sélectivité et de coordination temporelle. Ces limites ont entraîné des conséquences significatives telles que la perte partielle de production, l'arrêt des services auxiliaires, et encore des dommages mécaniques sur des équipements

sensibles ; et face à ces constats , l'intégration de nouveaux relais numériques avec un nouveau plan de protection s'impose comme une solution technique pertinente et nécessaire.

Ce plan vise essentiellement à améliorer la coordination entre les protections de la tranche défectueuse et éviter les déclenchements intempestifs ou en cascade, et tout ça dans le but de protéger efficacement les équipements critiques et maintenir l'alimentation des services auxiliaires.

Le tableau ci dessous montre les réglages des nouveaux relais du plan de protection.

Tab. IV.2 : Réglage des nouveaux relais de protection

Nom du relais	Modèle du relais	Emplacement	Type de protection	Type de courbe de déclenchement	Temporisation
Relais 52L	ABB REB500	Disjoncteur ligne 400 kV	51/67 51N/67N 50/51	Extremely inverse	0.02 s
Relais 52A	ABB REG630	Disjoncteur 52 A entre TP et TS	46-1 49 RMS 50/51	ANSI Extremely inverse time	0.05 s
Relais 2	ABB 542plus	Départ câble vers CB1	46-1 49 RMS 87M 50/51	Extremely inverse time	0.05 s
Relais 1	ABB REG316*4	Départ moteur pompe eau de mer	46-1 49 RMS 50/51	Definite time	0.04 s

Le choix des nouveaux relais intégrés dans le plan de protection repose sur plusieurs critères techniques en mentionnant :

- Compatibilité avec les fonctions de protection requises : le choix effectué projette la lumière sur les applications des relais requises pour chaque emplacement , avec les fonctions de protection nécessaire pour leurs utilisations.
- Choix de courbes plus performantes.
- Haute précision et programmabilité : Les relais choisis permettent une programmation fine des seuils de déclenchement et des timings avec un paramétrage avancé via des logiciels ce qui facilite l'adaptation du relais aux caractéristiques réelles du réseau.

Ce plan de protection a été testé sous environnement ETAP avec plusieurs scénarios de défaut pour confirmer son bon fonctionnement dans les différentes possibilités d'apparition des anomalies .

Nous avons testé le défaut principal du premier scénario , la figure IV.4 montre le bon fonctionnement des protections avec une intervention rapide et localisée des relais, et l'élimination des déclenchements injustifiés sur les disjoncteurs amont.

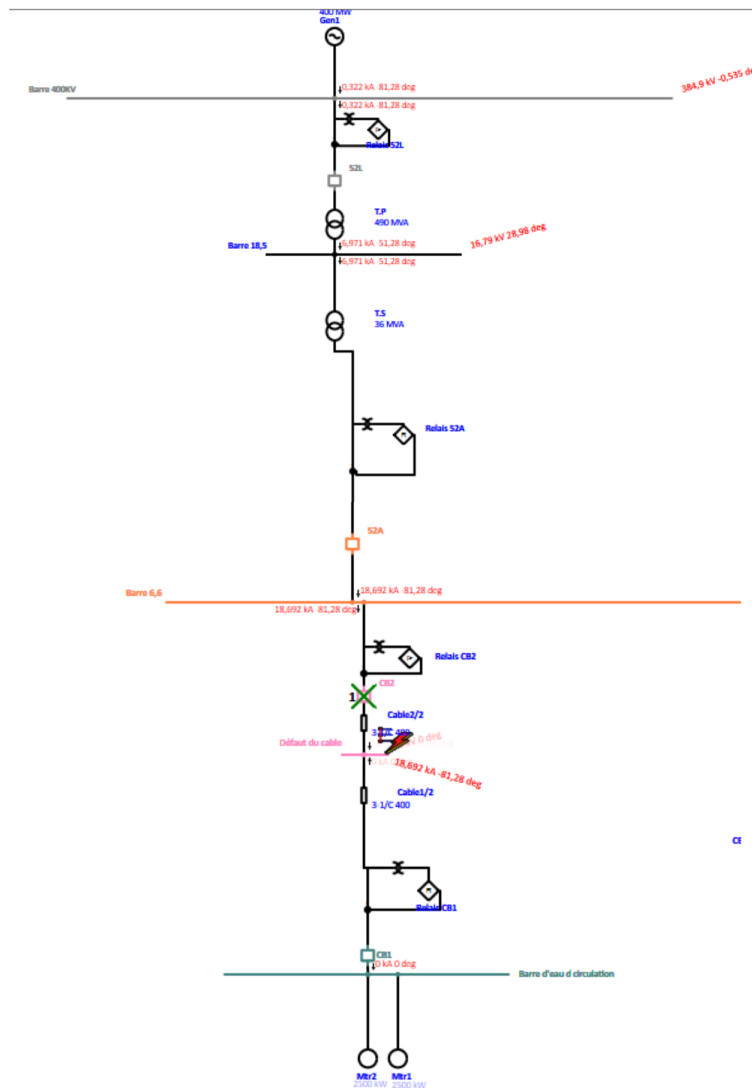


Fig. IV.4 : Simulation ETAP du défaut corrigé avec des nouveaux relais de protection

IV.3 Solutions pour le problème de HSTS

IV.3.1 Solution technique pour le système HSTS 1

Pour résoudre le dysfonctionnement du HSTS et éviter que l'automate affiche l'alarme "CB1 FAIL" et "COIL ERROR" les actions suivantes sont recommandées :

- Vérifier l'intégrité et le bon fonctionnement des contacts auxiliaires du disjoncteur (52a et 52b) qui transmettent à l'automate HSTS l'état réel (ouvert ou fermé) du disjoncteur.
- Mesurer précisément le temps réel de manœuvre (ouverture/fermeture) du disjoncteur 52A.
- Re-ajuster le paramètre "Command Timeout" dans le système SUE3000 , en intégrant une

marge de sécurité raisonnable par rapport aux réglages des disjoncteurs .

- Mettre en place un suivi régulier du fonctionnement du disjoncteur chaque six mois.

IV.3.2 Solution technique pour le système HSTS 2

Après investigation, deux causes possibles ont été identifiées :

- Une adresse d'esclave incorrecte configurée dans l'IHM ne correspondant pas à celle de l'automate .
- Un câble Ethernet (Modbus TCP/IP) potentiellement défectueux même si son apparence physique peut sembler normale (problème interne, pin tordue, connecteur oxydé ou câble détérioré) .

Les actions recommandées sont comme suit :

- Vérifier l'adresse IP et l'adresse Modbus esclave configurées dans l'IHM RHMI et s'assurer qu'elles correspondent à celles du module automate HSTS2 (base unit).
- Contrôler l'intégrité du câble réseau Ethernet (RJ45) utilisé pour la communication Modbus TCP/IP :
- Tester physiquement le câble avec un testeur Ethernet
- Vérifier les LED d'activité réseau sur les ports de communication
- Remplacer le câble si une anomalie est détectée .

IV.4 Conclusion

Les solutions présentées dans ce chapitre visent à corriger les dysfonctionnements identifiés dans les simulations du chapitre précédent. Plusieurs approches ont été proposées afin d'améliorer la coordination des protections et assurer une meilleure sélectivité et des ajustements ont été suggérés pour corriger le problème des systèmes HSTS 1 et HSTS 2.

L'ensemble des solutions proposées contribuent à renforcer la fiabilité du système de protection , réduire les conséquences des défauts et garantir la continuité d'alimentation des services auxiliaires en toute sécurité .

Conclusion Générale

À travers ce travail nous avons mené une étude du système de protection électrique des équipements au niveau de la centrale thermique à cycle combiné de Koudiet Eddraouch en mettant en lumière les défaillances constatées, leurs causes, ainsi que les propositions d'amélioration possibles. L'analyse a démontré que les défauts rencontrés notamment les déclenchements non sélectifs des dispositifs de protection et les dysfonctionnements des systèmes de transfert haute vitesse (HSTS) peuvent avoir un impact critique sur la disponibilité des installations, la continuité de service et la fiabilité globale du réseau.

La simulation des scénarios de défauts à l'aide du logiciel ETAP a permis de reproduire les incidents réels et de valider les hypothèses diagnostiques. Grâce aux résultats de ces simulations ainsi que de la vérification de plan de protection, nous avons proposé des solutions concrètes telles que l'ajustement des réglages des relais, l'adoption de courbes de déclenchement plus performantes, et l'intégration de relais numériques plus adaptés aux exigences de sélectivité et de coordination. En parallèle, des recommandations techniques ont été formulées pour résoudre les problèmes spécifiques au système HSTS en s'appuyant sur une analyse rigoureuse des causes observées sur le terrain.

Ce travail s'inscrit dans une logique d'amélioration continue des systèmes de protection dans les installations critiques où la moindre défaillance peut entraîner des pertes considérables. Il concentre sur l'importance d'une coordination rigoureuse entre les dispositifs de protection vu la gravité des conséquences d'un défaut touchant cette dernière, aussi, la maintenance préventive bien structurée qui préserve l'équipement industriel, notamment dans les systèmes critiques comme le HSTS où le moindre dysfonctionnement peut compromettre la continuité d'alimentation, perturber les transferts automatiques et engendrer des arrêts coûteux de production. Une stratégie de maintenance rigoureuse permet donc de garantir la réactivité et la fiabilité de ces systèmes complexes.

Enfin, ce mémoire a permis non seulement d'identifier les défauts d'un système de protection réel mais aussi de proposer des solutions concrètes, applicables et validées par simulation. Il illustre l'importance d'une approche méthodique avec observation sur le terrain et analyse technique pour réduire les incidents, limiter les pertes et garantir la continuité de service.

Bibliographie

- [1] A.Abada. “ Étude et supervision d’une centrale électrique cycle combiné Koudiet Ed-draouch”. Mémoire d’ingénieur, Université Badji Mokhtar - Annaba.(2018)
- [2] A.Zemmouri, S.Touati, & A.Haouam . “Effet de la qualité de l’eau sur les performances de la centrale thermique de Koudiet Ed Draouch”. 3ème Conférence Internationale de Mécanique , Annaba, Algérie.(2017).
- [3] H.Saada. “Etudes et essais pratiques des protections numériques installées au niveau de poste d’interconnexion”. Mémoire Master en Electrotechnique . UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA.(2019).
- [4] Relais de protection Schneider : Lien
- [5] ABB, «Relais d’automatisation du réseau REC615 et RER615», “Protection et contrôle de l’automatisation du réseau”, site ABB Medium Voltage .
- [6] CAHORS Services. “Étude de la sélectivité – principes et techniques de coordination de protections électriques dans les installations MT”. Cahors Groupe.
- [7] A. Benali. Cours “SCHEMAS ET APPAREILLAGE ÉLECTRIQUE”. Centre Universitaire Nour Bachir El Bayadh (2019).
- [8] Sonelgaz. “Chiffres clés de l’électricité en Algérie – Rapport annuel 2024”. Société Nationale de l’Électricité et du Gaz. (2024).
- [9] ABB, “High Speed Transfer System (HSTS),” ABB Medium Voltage Digital Systems, [En ligne].
- [10] ETAP – Electrical Power System Analysis Software, [En ligne].



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة -
ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGÉNIERIE - ANNABA

Département d'Électronique, d'Électrotechnique et Automatique

Étude complémentaire au PFE

En vue d'obtention du diplôme d'INGÉNIEUR D'ETAT

Spécialité : Production Electrique et Energies Renouvelables

Présenté par

Badji Sabra & Zemouli Nour El Houda

Étude de projet : Une micro-entreprise spécialisée en protection électrique HT/MT

Encadré par

MCA. Sofiane Chiheb
ENSTI Annaba

Table des matières

INTRODUCTION	4
BUSINESS MODEL CANVAS	5
BUSINESS PLAN	7
1. Résumé Exécutif	8
1.1. Présentation de l'entreprise	8
1.2. Notre mission	8
1.3. Vision	8
1.4. Nos valeurs	8
1.5. Nos services	8
1.6. Chiffres clés	9
1.7. Équipe fondatrice	9
2. Étude de marché	10
2.1. Analyse du secteur	10
2.3. Clientèle cible	11
2.4. Analyse SWOT	11
3. Offre de Service	12
3.1. Description détaillée	12
3.2. Stratégie de tarification	12
1. Suivi et réglages de protection	12
2. Maintenance + Commande et pose d'équipements	13
4. Stratégie commerciale	13
4.1. Canaux de distribution	13
4.2. Plan de communication	13
4.3. Objectifs commerciaux	14
5. Plan Opérationnel	14
5.1. Processus de prestation de services	14
5.2. Fournisseurs et partenaires	14
5.3. Locaux, logistique et équipements	15
6. Structure et gestion de l'entreprise	15
6.1. Organigramme	15
6.2. Besoins en recrutement	16
7. Plan financier	16
7.1. Le tableau des investissements initiaux :	16
7.2. Le tableau des charges fixes et variables:	17
Les charges fixes et variables	17
7.3. La prévision de capacité d'autofinancement (CAF) du projet :	18
7.4. L'évaluation du BFR du projet :	19

7.5. La prévision de flux net de trésorerie du projet :	19
7.6. La valeur actuelle nette (VAN) du projet :	20
7.7. Date de Récupération du Capital Investi :	21
Annexes	22
Stratégie de tarification détaillée	22
1. Mission de type : Suivi et Réglages de protection	22
2. Mission de type : Maintenance + Commande et pose de nouveaux équipements	22
Références	25

INTRODUCTION

Dans la continuité de notre Projet de Fin d'Études d'ingénieur qui a porté sur le diagnostic et l'amélioration des plans de protection électrique HT/MT au sein de la centrale thermique à cycle combiné de Koudiet Eddraouch nous avons souhaité approfondir notre réflexion par une extension concrète et entrepreneuriale de cette problématique.

En effet , les défaillances constatées sur le terrain liées à la mauvaise manœuvre de protection ont mis en lumière la nécessité d'une expertise spécialisée et de solutions adaptées. Ces constats ont révélé l'opportunité de créer une structure dédiée à la protection électrique industrielle , alliant modélisation , conseil et mise en œuvre sur le terrain.

Bien que l'industrie algérienne enregistre un taux de croissance élevé ces dernières années, elle souffre d'un manque de prestataires spécialisés capables d'assurer un accompagnement complet, allant de l'étude des plans de protection jusqu' à la mise en service. C'est dans ce contexte que notre projet se positionne comme une réponse concrète à un besoin non couvert, en proposant un service structuré, indépendant et entièrement dédié à la fiabilité et la sécurité des installations électriques.

Le présent document constitue donc une étude de faisabilité pour la création d'une micro-entreprise spécialisée dans la protection des installations électriques HT/MT . Il s'inscrit comme un complément professionnel et technique au travail académique , en intégrant des éléments de stratégie , de marché , d'investissement et de fonctionnement opérationnel.

Ce projet répond à une demande croissante en service technique spécialisé en protection électrique dans les installations industrielles algériennes et de valoriser le savoir-faire acquis au cours de notre formation par une démarche concrète de création d'entreprise.

BUSINESS MODEL CANVAS

Business Model Canvas

<p>Partenariats clés</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fabricants de relais et protections . • Fournisseurs d'équipements électriques . 	<p>Activités clés</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elaboration des nouveaux plans de protection validés par simulation. • Réalisation des tests et diagnostics des systèmes de protection sur site . • Maintenance préventive et curative des dispositifs de protection. • Modernisation d'anciens systèmes de protections. <p>Ressources clés</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ingénieurs et techniciens qualifiés en protection électrique. • Équipements de test (caisse d'injection, analyseurs de réseau...) • Maitrise des logiciels d'analyse. 	<p>Propositions de valeur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Spécialisation dans la résolution des défaillances des plans de protection et l'amélioration de la coordination des dispositifs. • Proposition de solutions personnalisées adaptées à validées en simulation avant toute mise en œuvre réelle. 	<p>Relations clients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Contrats de suivi et maintenance à long terme. • Support technique en cas d'urgence. • Accompagnement et garanti après intervention . • Fidélisation par le respect des délais. <p>Canaux de distribution</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réseau commercial direct (prospection ciblée). • Site web professionnel. • Participation à des salons industriels et forums techniques. • Réseaux sociaux professionnels (LinkedIn...). 	<p>Segments de clients</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entreprises industrielles . • Centrales électriques . • Postes MT/HT. • Grandes infrastructures (hôpitaux, ports, aéroports).
<p>Structure des coûts</p> <ul style="list-style-type: none"> • Salaires du personnel . • Loyer . • Assurances multi-risques professionnels (MRP) et CatNat. • Transport et logistique. • Dépenses marketing et commerciales. 		<p>Sources de revenus</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prestations (Réglages , maintenances). • Contrats de suivi annuels. • Offre packagés (maintenance/reglages+suivi) 		

BUSINESS PLAN

1. Résumé Exécutif

1.1. Présentation de l'entreprise

Notre entreprise intitulée EnerSafe est spécialisée dans les services de protection électrique se positionne sur un segment à haute valeur ajoutée : la protection des réseaux électriques haute et moyenne tension (HT/MT) . Elle est constituée sous forme de micro-entreprise (SARL) avec capital social de 100000 DA et basée à Annaba , elle vise le niveau national en réalisant des prestations techniques de diagnostic , de planification et de suivi des plans de protection.

1.2. Notre mission

Fournir aux acteurs industriels et aux exploitants d'infrastructures électriques des solutions fiables, conformes et sur-mesure pour garantir la sécurité , la performance et la conformité de leurs installations .

1.3. Vision

Devenir la référence nationale en matière de protection électrique industrielle HT/MT, grâce à une expertise pointue, des outils de modélisation avancés et un accompagnement technique complet.

1.4. Nos valeurs

- Fiabilité
- Expertise
- Conformité
- Spécialisation

1.5. Nos services

- Études complètes des systèmes de protection HT/MT
- Diagnostics des dysfonctionnements (coordination, sélectivité, déclenchements intempestifs)

- Élaboration de plans de protection personnalisés
 - Suivi global : de la conception au paramétrage, jusqu'aux tests et à la maintenance
 - Modélisation et simulations de défauts via logiciels spécialisés

1.6. Chiffres clés

- Investissement initial : **5160129 DA**
- Chiffre d'affaires prévisionnel (1ère année) : **3480000 DA**
- Rentabilité nette estimée de la 5ème année : **2405 KDA**

1.7. Équipe fondatrice

- ★ Badji Sabra – Ingénieure en production électrique et énergies renouvelables (part de 51%)
- ★ Zemouli Nour El Houda – Ingénieure en production électrique et énergies renouvelables(part de 49%)

2. Étude de marché

2.1. Analyse du secteur

Le secteur industriel algérien comprend un nombre important de sites nécessitant une intervention de protection électrique (plus de 1500 sites industriels MT/HT) [1] , notamment les centrales électriques , les complexes pétrochimiques , les zones industrielles etc... répartis comme montre la figure 2.1 .

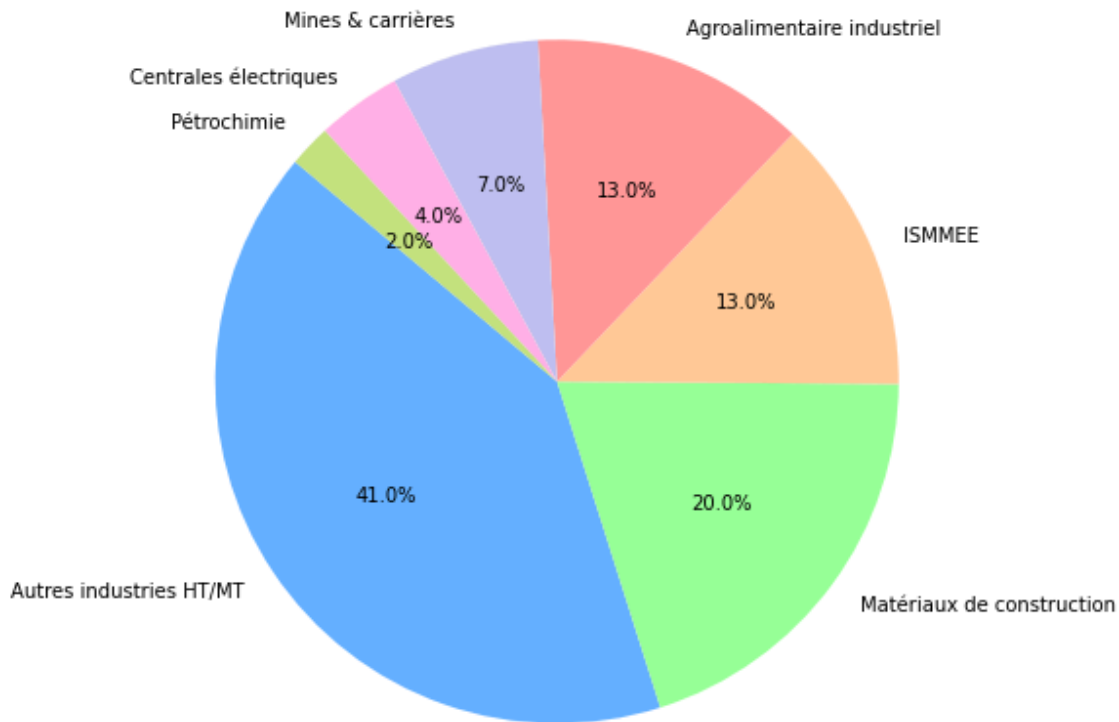


Figure 2.1. Répartition estimée des sites industriels HT/MT en Algérie par secteur d'activité [1].

2.2. Analyse de la concurrence

Le marché algérien de la protection électrique comprend plusieurs acteurs. Parmi les concurrents directs, on trouve des bureaux d'études spécialisés dans les installations électriques générales, qui proposent des services de protection de manière complémentaire mais souvent sans une spécialisation.

Notre avantage concurrentiel repose sur une expertise ciblée, une approche personnalisée, une utilisation avancée d'outils de simulation et un accompagnement global du client de l'étude initiale à la modélisation jusqu'au paramétrage sur site et à la maintenance.

En tant qu'entreprise fondée par deux jeunes ingénieurs, nous proposons une vision moderne avec un fort potentiel d'innovation.

2.3. Clientèle cible

La clientèle cible se compose principalement du secteur industriel comme les centrales électriques, les sites industriels à forte consommation énergétique (cimenteries, complexes pétrochimiques, usines) ainsi que des promoteurs des projets en énergies renouvelables. Ces acteurs ont un besoin permanent de garantir la conformité, la sécurité et la performance de leurs installations électriques, ils préfèrent des prestataires capables d'offrir des résultats concrets, des rapports détaillés, et un accompagnement sur mesure.

2.4. Analyse SWOT

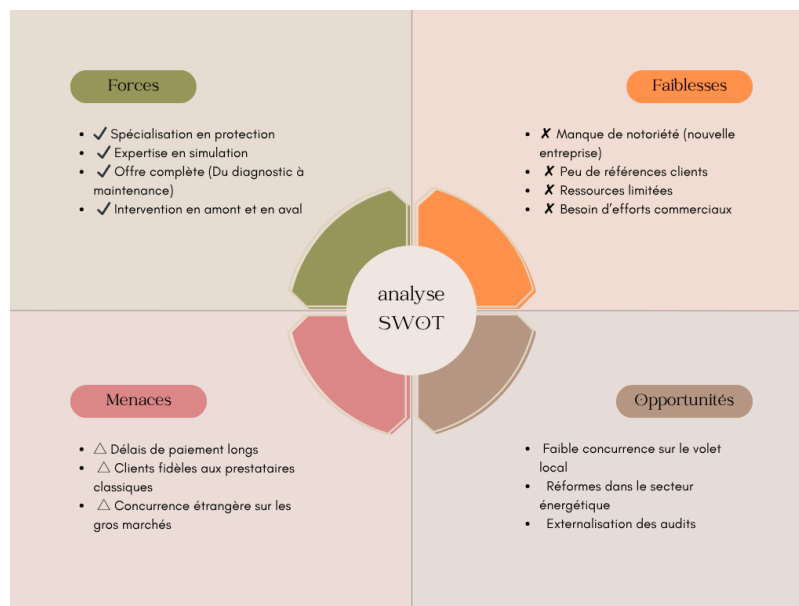


Figure 2.2. Analyse SWOT de EnerSafe

3. Offre de Service

3.1. Description détaillée

Notre entreprise propose une offre technique spécialisée dans la protection des installations électriques, à destination des sites industriels (centrales, usines, grands complexes). Elle comprend :

- Étude complète des systèmes de protection existants
- Études techniques et élaboration de plans de protection personnalisés
- Modélisation numérique et simulation de défauts
- Accompagnement complet du client

- Maintenance et mise à jour périodique des dispositifs de protection en fonction de l'évolution des charges et des normes.

3.2. Stratégie de tarification

Notre stratégie de tarification repose sur une approche fondée sur les coûts réels de la mission auxquels s'ajoute une marge bénéficiaire maîtrisée, en fonction de la nature et la complexité de l'intervention. Cette méthode est le résultat d'une analyse approfondie du marché, des charges internes, et des attentes des clients industriels.

Elle a été pensée pour garantir à la fois la viabilité économique du projet et une offre tarifaire juste et transparente. Cette approche nous permet de maîtriser les prix tout en assurant un haut niveau de qualité de service.

Deux niveaux de tarification sont ainsi proposés :

1. Suivi et réglages de protection

Ce service comprend le déplacement d'une équipe technique, l'analyse sur site et le réglage des dispositifs de protection des installations HT/MT. Le tarif est calculé sur la base des coûts directs (personnel, transport, matériel) auxquels est ajoutée une marge de 50%. Le tarif final journalier est estimé à 21 750 KDA. Cette offre se positionne de manière compétitive par rapport aux tarifs pratiqués par les concurrents, tout en assurant une transparence totale sur les coûts. (Voir annexe 1 pour plus de détails)

2. Maintenance + Commande et pose d'équipements

Cette prestation inclut, en plus des réglages de protection, l'étude technico économique du choix de la fourniture, ainsi que sa pose. Deux marges distinctes sont appliquées : 15% sur le matériel fourni, et 15% sur la prestation de pose. Ce modèle permet une tarification précise et adaptée à chaque projet, tout en restant aligné avec les pratiques du marché, voire plus avantageux en termes de rapport qualité-prix. (Voir annexe 1 pour plus de détails)

4. Stratégie commerciale

4.1. Canaux de distribution

La distribution repose principalement sur des canaux directs :

- ❖ Contact direct avec les entreprises industrielles : Nous approchons nos clients via, prise de rendez-vous, participation à des appels d'offres ou réponse à des besoins exprimés par les exploitants.

- ❖ Collaboration avec les bureaux d'études et sociétés d'ingénierie pour des projets nécessitant notre intervention en appui sur l'étude , la simulation ou le paramétrage des protections.
- ❖ Présence en ligne à travers un site web clair, ainsi qu'une activité sur LinkedIn pour être visibles et accessibles aux entreprises .

4.2. Plan de communication

Notre plan de communication repose sur une combinaison de visibilité digitale , de réseaux sociaux professionnels , et d'actions ciblées sur le terrain. En ligne nous développons un site Web professionnel présentant nos compétences , nos références et nos outils. Nous serons actifs sur LinkedIn qui constitue le réseau principal des ingénieurs , techniciens et porteurs de projet dans le secteur énergétique , donc on a besoin de publications régulières permettant de démontrer notre savoir-faire.

Sur le terrain nous organisons des rencontres techniques , participons à des salons professionnels (énergie, industrie, maintenance) . Notre communication mettra en avant notre spécialisation dans le domaine et notre positionnement dans le marché.

4.3. Objectifs commerciaux

Pour la première année d'activité, notre objectif est de réaliser entre **8 missions complètes** de l'étude , la simulation , le paramétrage . Cette cible est appropriée avec le temps moyen par mission et les ressources humaines disponibles . Nous visons un chiffre d'affaires de 3480000 **DA** dans la première année et un chiffre d'affaires de 7395000 **DA** dans la 5ème année avec une rentabilité nette estimée dans la 5ème année : **2405 KDA** en nous concentrant d'abord sur la région Est puis en élargissant progressivement notre activité à l'échelle nationale.

5. Plan Opérationnel

5.1. Processus de prestation de services

Le fonctionnement de notre entreprise repose sur un processus structuré adapté aux exigences techniques des installations industrielles , nous débutons par une prise de contact suivi d'une visite sur site pour la collecte des données , ensuite nous faisons étude de la configuration actuelle du système de protection afin de détecter les anomalies existantes , en cas de défaut ou de besoin d'intervention technique le réseau est modélisé dans un logiciel spécialisé , après effectuer des tests les nouveaux paramètres sont appliqués directement sur

site , et enfin un rapport complet est remis au client incluant tous les détails du projet de l'étude jusqu' au résultat final .

5.2. Fournisseurs et partenaires

Nos fournisseurs sont soigneusement sélectionnés pour garantir la fiabilité du matériel et des logiciels utilisés . Pour les fournitures en équipements électriques nécessaires lors des interventions , nous traitons avec des distributeurs internationaux tels que Schneider Electric , ABB , GE . Pour les logiciels de simulation et de calcul , nous avons recours à des licences professionnelles des logiciels qu' on aura besoin , acquises via des distributeurs agréés.

5.3. Locaux, logistique et équipements

Dans le cadre de notre projet, plusieurs équipements sont nécessaires pour assurer l'efficacité et la fiabilité des tests et analyses . Un injecteur de courant secondaire (caisse d' injection) est requis pour simuler les déclenchements et vérifier les relais de protection . Un analyseur de réseau permettra d'évaluer la qualité de l'énergie électrique . Pour les mesures de tension , courant et continuité , un multimètre numérique TRMS est indispensable. Des pinces ampèremétriques sont nécessaires pour mesurer les courants sans coupure de l'alimentation. Une caméra thermique est également essentielle pour vérifier l'échauffement des équipements et détecter d'éventuels points chauds . Un relais de protection est requis pour effectuer les tests de bon fonctionnement des relais en conditions réelles . Enfin , un ordinateur portable sera utilisé pour l'exploitation des logiciels nécessaires à l'analyse et à la configuration des systèmes de protection.

Par rapport au loyer , nous allons louer un local qui se compose de 2 pièces , l'une pour la réception des clients et les travaux bureautiques , et la 2eme pièce pour stocker le matériel et l'équipement du travail .

Par rapport au logistique nous allons travailler avec un sous traitant de transport , les coûts de cette sous traitance sont mentionnés dans Tableau 2.1 .

6. Structure et gestion de l'entreprise

6.1. Organigramme

L'entreprise est dirigée par deux ingénieures co-fondatrices chacune responsable d'un pôle technique spécifique , l'une supervise la partie réglage des protections incluant la modélisation , et l'élaboration des plans de coordination . L'autre est chargé de la maintenance préventive et corrective , l'analyse des défauts , du suivi technique des sites et de l'assistance à long terme . Elles sont assistées par trois techniciens supérieurs répartis selon les missions de terrain et un responsable commercial assure la gestion du site web , la relation client , les

appels entrants et la coordination des demandes , la figure 6.1 montre l' organigramme de la micro entreprise :

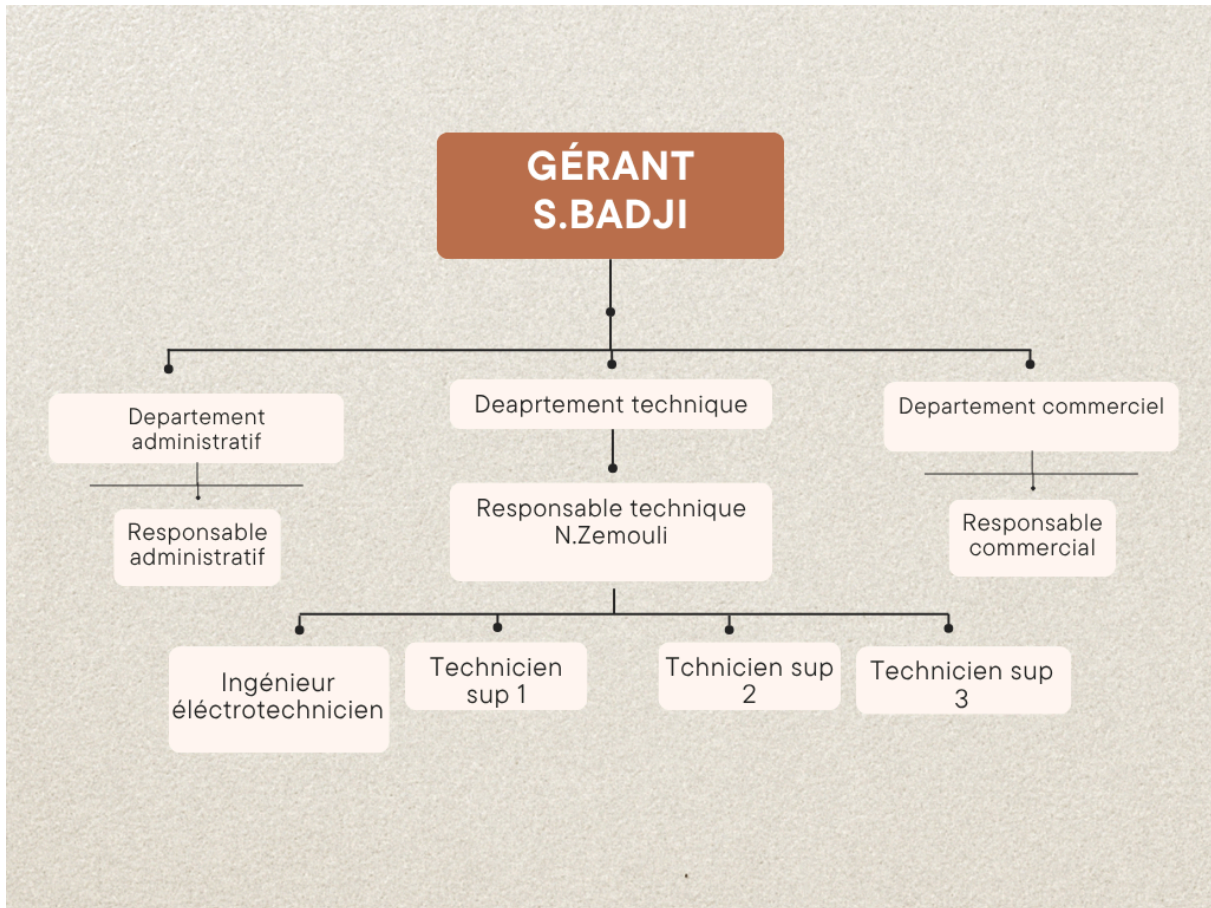


Figure 6.1. Organigramme fonctionnel de EnerSafe

6.2. Besoins en recrutement

Pour assurer un bon fonctionnement de l'entreprise et répondre à la demande croissante nous avons besoin de renforcer notre équipe. Actuellement trois techniciens supérieurs sont déjà intégrés : deux spécialisés dans la maintenance industrielle et un dans l'assistance aux études de protection et nous prévoyons de recruter une personne chargée de l'assistance administrative et technique qui pourra gérer les dossiers clients , préparer les rapports , suivre les plannings de mission et organiser les documents techniques.

En résumé , si l'activité commerciale évolue rapidement , un chargé de développement commercial pourra être intégré pour gérer les appels d'offres , rechercher de nouveaux clients et assurer le suivi des relations avec les entreprises industrielles , aussi , d'autres techniciens supérieurs dans la spécialité s' il le faut .

7. Plan financier

Le plan financier constitue une étape essentielle de notre business plan. Il permet de traduire en chiffres notre vision stratégique, d'évaluer la viabilité économique du projet et d'anticiper les besoins financiers à court et moyen terme.

7.1. Le tableau des investissements initiaux :

Le tableau des investissements initiaux recense les **dépenses nécessaires au démarrage** du projet : acquisition de matériel spécialisé et d'équipements informatiques. Il permet d'évaluer le capital initial requis. (Pour plus de détails sur le matériel voir annexe 2).

Tableau 1.1. Investissements initiaux

Type	Équipement / Instrument	Prix estimé (DA)
Matériel	Caisse d'injection	3.549.229
	Analyseur de réseau	696.828
	Multimètre numérique TRMS	40.000
	Pinces ampèremétriques	37.500
	Caméra thermique	67.500
	Relais de protection numérique	75.000
	Ordinateur portable	261.571
Immatériel	Site web	500.000 DA
Total	5.160.130 DA	

7.2. Le tableau des charges fixes et variables:

Le tableau des charges fixes et variables détaille l'ensemble des charges nécessaires au fonctionnement de l'activité, réparties entre **charges fixes** (indépendantes du volume d'activité) et **charges variables** (qui évoluent en fonction de l'utilisation ou des prestations réalisées).

Tableau 2.1.Charges fixes et variables

Les charges fixes et variables			
Charges fixes	2.844.000 DA / an	Loyer local professionnel (bureau)	30.000 DA / mois
		Internet et téléphonie	7.000 DA / mois
		Masse salariale	90.000 DA / mois
		Assurances	10.000 DA / mois
		Frais de transport	80.000 DA / mois
Charges variables	168000 DA / an	Matériel consommable	10.000 DA / mois
		Electricité et eau	4.000 DA / mois

7.3. La prévision de capacité d'autofinancement (CAF) du projet :

La Capacité d'Autofinancement (CAF) représente la capacité du projet à générer de la trésorerie par son activité, une fois les charges et les impôts réglés. Elle est un indicateur clé de rentabilité et de viabilité financière à moyen terme. Le tableau ci-dessous présente l'évolution prévisionnelle de la CAF sur cinq ans, en tenant compte du chiffre d'affaires, des charges fixes et variables, de l'amortissement, ainsi que des impôts sur le bénéfice des sociétés.

Tableau 3.1.La prévision de capacité d'autofinancement (CAF) sur 5 ans

Année	2026	2027	2028	2029	2030
Chiffre d'affaires (KDA)	3480	5347	6525	6742	7395
Charge fixe (KDA)	2844	2844	2844	2844	2844
Charge variable (KDA)	168	192	204	216	240

Amortissement (KDA)	1032	1032	1032	1032	1032
Résultat net avant impôts (KDA)	-564	1279	2445	2650	3279
Impôts (IBS) en (KDA)	0	0	0	503	623
Résultat net comptable (KDA)	-564	1279	2445	2146	2656
CAF (KDA)	468	2311	3477	3178	3688

- **2026** : première année déficitaire mais amortie par la CAF positive grâce aux amortissements.
- **À partir de 2027**, le projet devient bénéficiaire, avec une CAF croissante, signe de la capacité du projet à s'autofinancer progressivement.
- En **2030**, la CAF atteint près de 3,7 millions de DA, ce qui permettrait d'envisager des réinvestissements.

7.4. L'évaluation du BFR du projet :

Le Besoin en Fonds de Roulement (BFR) représente les ressources nécessaires pour financer l'activité courante de l'entreprise. Le tableau suivant illustre l'évolution du BFR et de ses variations d'une année à l'autre.

Tableau 4.1. Prévision du Besoin en Fonds de Roulement sur 5 ans

Année	2026	2027	2028	2029	2030
Chiffre d'affaires (KDA)	3480	5347	6525	6742	7395
BFR	348	535	652	674	740
ΔBFR(KDA)	187	118	212	65	0
ΔBFR récupéré (KDA)	0	0	0	0	392

7.5. La prévision de flux net de trésorerie du projet :

La prévision de flux net de trésorerie du projet présente l'analyse prévisionnelle de la trésorerie générée par le projet sur 5 ans. Elle repose sur la Capacité d'Autofinancement (CAF), l'investissement initial, la valeur résiduelle en fin de période, et les variations du besoin en fonds de roulement (Δ BFR).

Tableau 5.1. Prévision du Besoin en Fonds de Roulement sur 5 ans

Année	2026	2027	2028	2029	2030
CAF en (KDA)	468	2311	3477	3178,5	3687,99
Valeur résiduelle (KDA)					120
T1(KDA)	468	2311	3477	3178,5	3807,99
Investissements (KDA)	5160,129	0	0	0	0
Δ BFR (KDA)	186,75	117,75	21,75	65,25	0
T2 (KDA)	5346,879	117,75	21,75	65,25	0
FNT (KDA)	-4879	2193	3455	3113	3808

- 2026 : L'année de lancement montre une trésorerie négative importante (-4,87 MDA) due à l'investissement initial élevé, ce qui est normal pour une phase de démarrage.
- À partir de 2027, le projet commence à générer des flux nets positifs croissants, ce qui traduit une rentabilité progressive.
- Le FNT augmente significativement chaque année, signe d'une gestion maîtrisée des charges et du BFR.

7.6. La valeur actuelle nette (VAN) du projet :

La valeur actuelle nette permet de suivre l'évolution des flux nets générés par le projet sur une période, en tenant compte de la valeur temporelle de l'argent (actualisation). Il constitue une étape essentielle dans l'évaluation de la rentabilité financière du projet.

Tableau 6.1. La valeur actuelle nette (VAN) du projet sur 5 ans

Année	2026	2027	2028	2029	2030
FNT(KDA)	-4879	2193	3455	3113	3808
FNT actualisé (KDA)	-4435	1813	2596	2126	2364
VAN (KDA)			4464		
FNT cumulé (KDA)	-4435	-2623	4409	47229	4491

- **FNT (Flux Net de Trésorerie)** : montant de trésorerie généré chaque année par le projet, après prise en compte de tous les décaissements (investissements, BFR, charges).
- **FNT actualisé** : chaque flux est ajusté en fonction d'un taux d'actualisation pour refléter sa valeur réelle à aujourd'hui.
- **FNT cumulé** : cumul des flux actualisés année après année, montrant le point de retour sur investissement (passage d'un FNT cumulé négatif à positif).
- **VAN (Valeur Actuelle Nette)** : somme totale des flux actualisés. Elle représente la richesse nette créée par le projet : ici, 4.464 KDA, ce qui est positif, donc le projet est rentable.

7.7. Date de Récupération du Capital Investi :

Grâce à cet un indicateur financier nous pouvons déterminer en combien de temps notre investissement initial sera récupéré en se basant sur les flux de trésorerie générés.

Après le calcul nous constatons que le capital investi sera récupéré au **4ème mois de la 2ème année.**

Annexes

Annexe 1

Stratégie de tarification détaillée

Notre stratégie de tarification repose sur une approche basée sur les coûts réels de la mission à laquelle s'ajoute une marge bénéficiaire maîtrisée, selon la nature de l'intervention :

1. Mission de type : Suivi et Réglages de protection

Dans ce cas, le tarif est calculé selon :

- **Coût journalier du personnel :**
 - 2 ingénieures : $3\,000\text{ DA} \times 2 = 6\,000\text{ DA/jour}$
 - 3 techniciens supérieurs : $1\,000\text{ DA} \times 3 = 3\,000\text{ DA/jour}$
- **Frais de transport : 2 700 DA/jour**
- **Frais d'utilisation du matériel spécialisé : 2 800 DA/jour**
Tel que les frais d'utilisation du matériel spécialisé = l'investissement initial / période de remboursement (365 jours \times 5 ans)
→ **Total des coûts directs par jour = $6\,000 + 3\,000 + 2\,700 + 2\,800 = 14\,500\text{ DA}$**

À ce montant s'ajoute une **marge bénéficiaire nette de 50 %** pour couvrir les frais indirects, l'amortissement, et assurer la rentabilité.

$$\text{Tarif final/jour} = 14500 \times 1,5 = 21750\text{ DA}$$

2. Mission de type : Maintenance + Commande et pose de nouveaux équipements

Dans ce cas on reprend la base précédente (réglage de protection) avec les mêmes calculs journaliers et on ajoute deux composantes :

- **Coût du choix et de la commande de fourniture nécessaire à l'intervention**
- **Coût de la pose (installation)**

Deux marges sont appliquées :

- **15 % de marge bénéficiaire sur le matériel fourni**

- **15 % de marge bénéficiaire sur la prestation de pose**

→ **Tarif final = (Coût mission de réglage × nb jours × 1,3)**

Annexe 2

Nous montrons ici les investissements initiaux détaillés

Tableau. Investissements initiaux détaillés

Type	Équipement / Instrument	Modèle	Utilité principale	Prix estimé (\$)	Prix estimé (DA)
Matériel	Caisse d'injection	CMC-256PLU S[2]	Simulation de déclenchement, tests de relais de protection	27208	3.549.229
	Analyseur de réseau	Hioki PQ3100 [3]	Analyse la qualité de l'énergie du réseau	5340	696.828
	Multimètre numérique TRMS	Multimètre numérique Fluke 283 FC CAT III et IV[4]	Mesures de tension, courant, continuité	/	40.000
	Pincés ampèremétriques	Fluke PA AC FLUKE[5]	Mesure du courant sans coupure pour diagnostics	/	37.500
	Caméra thermique	HIKMICO HM-TP30-1AQF [5]	Vérification des câblages de protection	/	67.500
	Relais de protection numérique	SCHNEIDER ELECTRIC	Pour le test des réglage et la validation	/	75.000
	Ordinateur portable	ASUS Zenbook [6]	Utilisation Software	/	261.571
Immatériel	Site web	500.000 DA			
	Total	5.160.130			DA

Références

- [1] Office National des Statistiques (ONS), *Activité industrielle de 2012 à 2021*, Coll. Statistiques n°229, Série E : Statistiques Économiques n°116, Alger, Algérie, juin 2023. [En ligne]. Disponible : <http://www.ons.dz>
- [2] OMICRON electronics, « CMC 256plus – Ensemble de test de relais de haute précision et calibrateur universel », OMICRON, [en ligne].
Disponible : <https://www.omicronenergy.com/en/products/cmc-256plus/>
- [3] ITM, « Hioki PQ3100 Analyseur de Qualité de l'Énergie » , [en ligne].
Disponible: <https://www.itm.com/fr/produit/hioki-pq3100-power-quality-analyzer>
- [4] GAMA Outillage, « Pince ampèremétrique 400 A AC Fluke », [en ligne].
Disponible : <https://gamaoutillage.net/produit/pince-ampermetrique-400a-ac-fluke/>
- [5] PROTEC IT Network & Security, « HIKMICRO HM-TP30-1AQF – imageur thermique », [en ligne].
Disponible :
<https://www.protec-dz.com/shop/hm-tp30-hikmicro-hm-tp30-1aqf-imageur-thermique-20-a-550-degc-96-x-96-pixel-25-hz-18072>
- [6] “ASUS Zenbook S 14 AI-UX5406-68W OLED 14 Inch 3K (2880 x 1800) 120Hz Portable (Intel Core Ultra 7 Processor, 32GB LPDDR5X, 1TB NVMe SSD, Intel Arc Graphics, Windows 11 Home) - AZERTY Keyboard,” *Amazon.fr*, 2024. [En ligne].
Disponible : <https://www.amazon.fr/gp/aw/d/B0DD4FCD4H/>