

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure Et de La Recherche Scientifique
جامعة غرداية
Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الآلية والإلكترونيك
Département d'Automatique et d'Electromécanique
Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

Thème

**Contribution à la maintenance conditionnelle du réseau
électrique haute tension B (HTB) par le contrôle
thermvision (décision 1275)**

Présenté Par :

BERRETIMA Mahmoud Djamil

DEHRI Saddam Hocine

Soutenu publiquement le...../...../.....

Devant le jury composé de :

Prénom et nom	Grade	Université	Président
BENDAOUI Messaoud		Univ. GHARDAIA	Président
MOSBAH Charaf Abdelkarim	MCB	Univ. GHARDAIA	Examineur
MERZOUG Hocine	MAA	Univ. GHARDAIA	Encadreur

Année universitaire 2024/2025



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة عنابة

مركز تطوير المقاولاتية



عنوان المشروع:

مراقبة وتشخيص أعطال شبكة الجهد العالي (HTB) باستخدام التصوير الحراري
مشروع لنيل شهادة مؤسسة اقتصادية في إطار القرار الوزاري 008 المعدل
والمتعمم لقرار 1275

صورة العلامة التجارية

الاسم التجاري

ThermoVision HTB

السنة الجامعية

2025 _ 2024

Remercîment :

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Ensuite, notre encadreur MrR. Hocine Merzoug pour les efforts qu'il a déployés, pour nous aider, conseiller, et corriger.

Nous vifs remerciements également vont aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner.

Je remercie également tous les enseignants de département d'Automatique et d'Electromécanique de l'université de Ghardaïa ont participé à ma formation pendant tout le cycle universitaire.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce travail humble à :

Mes chers parents

Mes chers frères et sœurs ;

Au professeur respecté Hussein Marzouk

*Et tous mes amis et collègues de la deuxième année du Master en maintenance
industrielle, classe de 2024-2025*

BERRETIMA Mahmoud Djamil

Dédicaces

Je dédie ce travail humble à :

Mes chers parents

Mes chers frères ;

Au professeur respecté Hussein Marzouk

Et tous mes amis et collègues de la deuxième année du Master en maintenance industrielle, classe de 2024-2025

DEHRI Saddam Hocine

Résumé

Ce mémoire vise à étudier l'utilisation des techniques de maintenance moderne et du contrôle non destructif pour assurer la fiabilité et la continuité des réseaux électriques à très haute tension (HTB). L'accent est mis sur l'analyse thermique par infrarouge, une méthode efficace pour détecter les défaillances sans démonter les équipements.

Cette technique permet d'identifier les anomalies thermiques, telles que les points chauds, révélant des défauts électriques ou mécaniques, et contribuant ainsi à prévenir les pannes majeures et à optimiser la planification de la maintenance.

Les résultats confirment l'efficacité de l'imagerie thermique comme outil de contrôle non destructif, et recommandent son intégration dans les programmes de maintenance prédictive des installations HTB.

Mots clés : Thermovision, CND, Maintenance conditionnelle, Infrarouge, Réseaux électrique HTB, Points chauds, Thermographie.

ملخص:

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة استخدام تقنيات الصيانة الحديثة والتحكم غير المتلف لضمان استمرارية وموثوقية الشبكات الكهربائية ذات الجهد العالي جداً (HTB). تم التركيز على تقنية التحليل الحراري بالأشعة تحت الحمراء كوسيلة فعالة للكشف المبكر عن الأعطال دون تفكيك المعدات. تعتمد هذه التقنية على رصد التغيرات الحرارية التي تشير إلى اختلالات كهربائية أو ميكانيكية مثل النقاط الساخنة، مما يسمح بتفادي الأعطال الكبرى وتحسين برمجة الصيانة. تبرز الدراسة أهمية دمج الكاميرا الحرارية ضمن برامج الصيانة التنبؤية لرفع كفاءة الأداء وخفض التكاليف. تؤكد النتائج على فعالية المراقبة الحرارية كأداة غير مدمرة، وتوصي بتعميم استخدامها في منشآت الجهد العالي ضمن مقارنة صيانة ذكية واستباقية.

كلمات مفتاحية: التصوير الحراري، CND، الصيانة الشرطية، الأشعة تحت الحمراء، شبكات الجهد العالي جداً، النقاط الساخنة، الترموجرافيا.

Abstract:

This thesis aims to study the use of modern maintenance techniques and non-destructive testing to ensure the reliability and continuity of very high voltage (VHV) electrical networks. Special focus is given to infrared thermographic analysis, an effective method for early fault detection without dismantling equipment.

This technique helps identify thermal anomalies, such as hot spots, which may indicate electrical or mechanical issues, thus preventing major failures and improving maintenance scheduling.

The results confirm the effectiveness of thermal imaging as a non-destructive tool and recommend its integration into predictive maintenance programs for high-voltage installations.

Keywords: Thermovision, NDT, Condition-based maintenance, Infrared, VHV networks, Hot spots, Thermography, Electrical substation

Table des matières :

Remercîment.....	I
Dédicaces.....	II
Résumé.....	IV
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux	VIII
Liste des abréviations	IX
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Généralités sur le réseau HTB

I.1 Introduction.....	3
I.2 Généralités sur le réseau HTB	3
I.2.1 Définition du réseau HTB	3
I.2.2 Applications du réseau électrique HTB	3
I.2.3- Principes de fonctionnement d'un réseau HTB	4
I.2.4 Rôle de la chaîne de production-transport-distribution	5
I.3 Classification des réseaux HTB	6
I 3.1 Par niveau de tension	6
I.3.2 Selon la fonction (transport, interconnexion...)	6
I.4 Structure des réseaux HTB	7
I.4.1 Réseau maillé (transport national/international)	7
I.4.2 Réseau radial (liaisons régionales)	7
I.4.3 Réseau mixte ou bouclé.....	8
I.5 Composants principaux du réseau HTB	9
I.5.1 Lignes aériennes et câbles souterrains	9

I.5.2 Postes de transformation HTB/HTA	9
I.6 Choix de la tension et de la fréquence	12
I.6.1 Critères pour le choix du niveau de tension	12
I.6.2 Importance de la stabilité de la fréquence dans les réseaux HTB	12
I.7 Qualité de l'énergie dans les réseaux HTB	13
I.7.1 Tension, fréquence•facteur de puissance	13
I.7.2 Perturbations et harmoniques	13
I.7.3 Continuité de service et fiabilité	14
I.8 Contraintes et défis des réseaux HTB	15
I.8.1 Perte Joule et échauffement	15
I.8.2 Effets électromagnétiques	16
I.8.3 Gestion des pics de charge et stabilité	17
I.9 Conclusion	18

Chapitre II : La maintenance industrielle et le contrôle non destructif

II.1 Introduction	20
II.2 Généralité sur la maintenance industrielle	20
II.2.1 Définition et objectifs	20
II .2.2 Types de la maintenance industrielle	21
II.2.3 Organisation de la maintenance	24
II.2.4 Enjeux de la maintenance industrielle	25
II.3 Contrôle non destructif (CND)	25
II.3.1 Définition et principes	25
II 3.2 Objectifs du CND	26
II.3.3 Techniques de CND	28
II.3.4 Avantages et limites de chaque technique	30

II.4 Intégration du CND dans la stratégie de maintenance	33
II.4.1 Choix des techniques selon les besoins	34
II.4.2 Exemples d'applications industrielles	34
II.4.3 Cas des réseaux électriques	35
II.5 Normes et réglementations	35
II.5.1 Références normatives en maintenance et CND	35
II.5.2 Normes spécifiques à certains secteurs (ex : énergie, aéronautique...)	36
II.6 Conclusion	37
Chapitre III: Contrôle par caméra thermographie (thermovision)	
III.1 Introduction	38
III.2 Définition	38
III.3 Principe de Fonctionnement	39
III .4 Techniques d'analysed'images thermiques	40
III.5 Moyens de mesure	43
III.5.1 Thermomètre infrarouge	43
III.5.2 Caméra infrarouge	44
III.6 Domaines d'application	45
III.7 Avantages et limites de la thermographie infrarouge	46
III.8 Critères de sévérité thermique des composants sous charge nominale.....	48
III.9 Analyse de certains cas à l'aide d'une caméra thermique infrarouge.....	49
III.9.1 Étude de cas sur un pylône d'une ligne de transport de l'électricité	49
III.9.2.Étude du panneau électrique	51
III.10. Conclusion	53
Conclusion générale.....	55
Référence.....	57

Liste des Figures :

Chapitre I

Figure I.1: Réseau électrique HTB.....	3
Figure I.2: Organisation du réseau électrique.....	4
Figure I.3: Schéma du transport et de la distribution par pipeline.....	5
Figure I.4: Un transformateur de puissance dans un poste électrique.....	10
Figure I.5: Disjoncteurs haute tension.....	10
Figure I.6: Sectionneurs haute tension.....	11
Figure I.7: Transformateurs de courant.....	11
Figure I.8 : Transformateurs de tension.....	12

Chapitre II

Figure II.1 : Les différentes de la maintenance.....	21
Figure II.2 : Les phases d'une opération de maintenance corrective.....	22
Figure II.3 : Structure type avec sectorisation partielle.....	24
Figure II.4 : Synoptiques schématisent l'analyse par CND.....	26
Figure II.5: Principe de la radiographie.....	30
Figure II.6 : Les principales techniques du CND.....	31
Figure II.7 : processus mis en jeu lors d'un examen visuel.....	34
Figure II.8: poussières magnétiques et Appareils de magnétisation.....	45

Chapitre III

FigureIII.1: Bande spectrale utilisée en thermographie IR.....	38
Figure III. 2: Représentation du principe de la thermographie infrarouge.....	40
FigureIII.3: Exemple de flux de travail d'inspection infrarouge.....	41
FigureIII.4: Deux images infrarouge d'un isolateur dans une ligne électrique.....	41
FigureIII.5: Tête de transformateur haute tension avec une isotherme.....	42
Figure III.6: Exemples de différentes palettes sur une pompe.....	43
FigureIII.7 : Thermomètre infrarouge.....	44
FigureIII.8 : Caméra Infrarouge (FLIR).....	45
Figure III.9: Voici deux images infrarouge d'un bâtiment.....	45
Figure III. 10: Inspection thermique d'un tableau électrique intérieur (industriel).....	46
Figure III. 11: un pylône électrique situé dans la région de Metlili.....	49

Liste des tableaux :

Tableau I.1: Comparatif des structures de réseau HTB	9
Tableau II.1: les Méthodes CND et son symboles.....	27
Tableau II.2: Exemples de normes de référence en maintenance par thermographie.....	36
Tableau II.3: Comparaison entre normes selon les secteurs	36
Tableau II.4: Cadre normatif et réglementaire algérien.....	37
Tableau III.1: Ecart de température (ΔT) et Critère de sévérité.....	48
Tableau III.2: Analyse des écarts sévérité, causes et actions correctives	48
Tableau III.3 : Mesures et paramètre du 1 ^{er} cas pratique.....	50
Tableau III.4: Mesures et paramètre du 2 ^{ème} cas pratique	52

Liste des abréviations :

THT : Très Haute Tension.

HT : Haute Tension.

KV : Kilo Volte

AFNOR : Association française de normalisation.

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité.

NF : Norme Française.

STE: SONELGAZ Transport de l'électricité.

CND : Contrôle Non Destructif.

HTB : Haute Tension B.

ENPC

Introduction

Introduction générale :

Initialement, le réseau électrique a été conçu et dimensionné pour acheminer l'énergie électrique produite par les installations de production vers les sites de consommation les plus distants. Par conséquent, les flux de puissance vont de l'amont, où se trouvent les sources de production d'énergie électrique telles que les grandes centrales thermiques (gaz, hydraulique ou nucléaire), vers l'aval qui est constitué par les consommateurs. Le système électrique se compose de milliers de kilomètres de câbles, des milliers de stations de transformation et un grand nombre d'équipements de coupure et d'automates réglés pour garantir une fourniture d'énergie électrique fiable. Ainsi, il existe aussi des contrôles hiérarchisés assurant la tenue en tension et en fréquence. Ceux-ci sont couplés aux divers automates et ont la charge de garantir la continuité de service du système. Les réseaux HTB permettent de relier les centrales de production (hydrauliques, thermiques, nucléaires, renouvelables) aux grands postes de transformation, qui ensuite redistribuent l'électricité vers les réseaux de moyenne et basse tension. Ils jouent également un rôle central dans l'interconnexion entre pays (réseaux interconnectés), favorisant la sécurité énergétique et l'échange d'énergie à l'échelle régionale ou continentale.

Toutefois, le réseau peut être exposé à des perturbations qui se propagent rapidement et sur une vaste zone, pouvant avoir des conséquences critiques pour l'ensemble du système électrique. Ces perturbations peuvent, entre autres, être amplifiées par des productions locales intégrées au réseau de transport ou de distribution. On observe donc une multiplication de systèmes de production décentralisée qui se raccordent principalement à un réseau électrique non conçu pour les accueillir. [1]

Nous avons organisé notre mémoire en trois chapitres comme suit :
Le **premier chapitre** présente des généralités sur le réseau électrique à très haute tension (HTB), en expliquant son importance dans le transport de l'énergie, ses principes de fonctionnement, sa classification selon les niveaux de tension, ainsi que sa structure et ses principaux composants.

Le **deuxième chapitre** traite de la maintenance industrielle et du contrôle non destructif. Il comprend une définition des types de maintenance (préventive, corrective, prédictive, conditionnelle), leur organisation, et l'importance du contrôle non destructif dans la fiabilité des installations industrielles.

Le **troisième chapitre** est consacré à l'utilisation de la caméra thermographique comme outil de contrôle non destructif pour la détection des anomalies thermiques dans les réseaux HTB.

Il présente le principe de fonctionnement de cette caméra, ses composants, ainsi que ses applications pratiques dans la détection des échauffements anormaux sur les lignes et postes HTB.

À la fin de notre mémoire, nous avons pu tirer une conclusion générale basée sur l'étude des réseaux électriques HTB, de la maintenance industrielle et de l'utilisation de la caméra thermographique comme outil de contrôle non destructif. L'analyse des images infrarouges a permis de détecter efficacement les anomalies thermiques présentes sur les installations HTB. Cette détection précoce facilite la mise en place de mesures préventives, évitant ainsi les pannes critiques ou les incidents graves. L'approche adoptée contribue ainsi à renforcer la fiabilité et la disponibilité du réseau électrique, tout en réduisant les risques matériels et humains.

Chapitre I
**Généralités sur le réseau
électrique HTB**

Chapitre I: Généralités sur le réseau électrique HTB

I.1 Introduction :

Les réseaux électriques constituent l'une des réalisations d'ingénierie les plus fondamentales de l'histoire de l'humanité, formant l'épine dorsale de la vie moderne. Ce sont des systèmes complexes et intégrés conçus pour collecter et générer l'énergie électrique à partir de diverses sources, la transporter sur de vastes distances, et enfin la distribuer de manière efficace et sécurisée à chaque consommateur, des foyers aux grandes villes en passant par les usines et les établissements commerciaux. L'importance de ces réseaux ne peut être sous-estimée ; ils sont le moteur fondamental de l'économie mondiale, nous permettant de tirer parti de la technologie moderne et illuminant nos vies de jour comme de nuit.

I.2 Généralités sur le réseau HTB :

I.2.1 Définition du réseau HTB :

La Haute Tension B, quant à elle, est une catégorie qui inclut toutes les tensions supérieures à 50 kV. Ces lignes sont principalement utilisées pour le transport de l'électricité sur de longues distances, souvent entre des zones de production et des zones de consommation. [2]

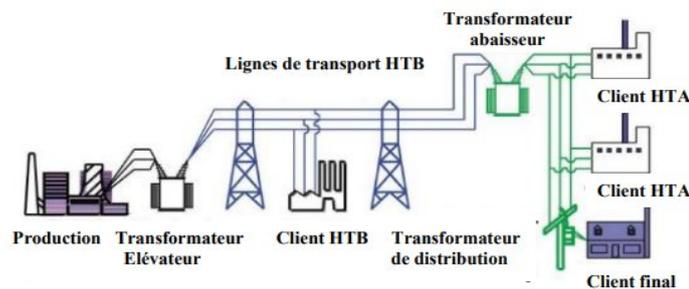


Figure I.1: Réseau électrique HTB

I.2.2 Applications du réseau électrique HTB :

- **Transport de l'électricité à grande échelle** : La HTB est utilisée pour acheminer de grandes quantités d'électricité depuis les centrales de production (hydroélectriques, thermiques, nucléaires) vers des sous-stations locales ou des réseaux de distribution.
- **Interconnexion des pays** : Les lignes HTB sont également utilisées pour relier des réseaux électriques de différents pays dans des projets d'interconnexion transfrontalière.
- **Réseaux de transport de longue distance** : En raison de la capacité élevée des lignes HTB, elles sont idéales pour transporter l'électricité sur de très longues distances, souvent sur des centaines de kilomètres.

I.2.3- Principes de fonctionnement d'un réseau HTB :

Le réseau HTB fonctionne par la transmission d'énergie électrique à haute voire très haute tension, dans le but de minimiser les pertes d'énergie, notamment celles dues à l'effet Joule, qui sont proportionnelles à l'intensité du courant au carré. En augmentant la tension (jusqu'à 400 kV dans certains réseaux), on réduit l'intensité requise pour transporter une même quantité de puissance, ce qui améliore les performances énergétiques du réseau. Les lignes HTB sont généralement aériennes, mais elles peuvent également être souterraines dans les zones urbaines ou sensibles. Elles sont composées de conducteurs en aluminium ou en alliage spécial, soutenus par des pylônes métalliques. Le réseau HTB est structuré de manière maillée, c'est-à-dire qu'il est conçu comme un ensemble de lignes interconnectées permettant plusieurs itinéraires entre deux points, ce qui renforce la fiabilité du système.

Ce fonctionnement dépend en grande partie des postes de transformation. Ils réalisent la transformation des niveaux de tension via les transformateurs de puissance, l'isolation des zones géographiques et la combinaison de diverses méthodes de production. Ces installations sont équipées de systèmes de contrôle, de sécurité et d'automatisation, pour gérer le flux énergétique, repérer les anomalies et agir en cas de surcharge ou court-circuit.

De plus, le réseau HTB est minutieusement contrôlé et dirigé en temps réel via des centres de répartition qui se servent de systèmes SCADA (Acquisition et Contrôle Supervisés de Données) pour garantir l'équilibre du réseau, la régulation des échanges interrégionaux et la réaction aux fluctuations de consommation et de production. [3]

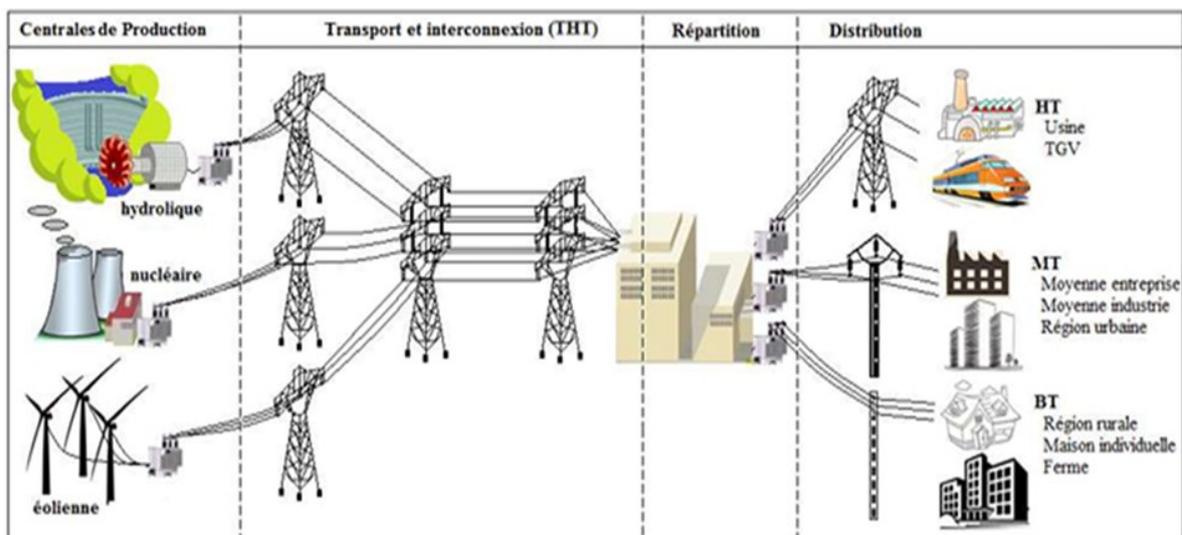


Figure I.2: Organisation du réseau électrique

I.2.4 Rôle de la chaîne de production-transport-distribution :

La production d'énergie électrique se fait au sein de centrales équipées d'éléments essentiels à la génération de courant électrique, à savoir :

- Une turbine en rotation.
- Un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

Le réseau HTB joue un rôle crucial dans la chaîne de production d'électricité, en reliant les installations de production (centrales à charbon, thermique, nucléaires, hydroélectriques, photovoltaïques ou éoliennes) aux principaux pôles de consommation ou aux réseaux de distribution à moyenne et basse tension. [4]

Il sert de « colonne vertébrale » au réseau électrique national, facilitant le transport de volumes importants d'énergie sur des distances étendues avec des pertes minimales. Ce réseau permet aux producteurs de transférer leur électricité dans un système interconnecté, tandis que les consommateurs peuvent être fournis d'énergie malgré la distance de plusieurs centaines de kilomètres qui peut les séparer des sources de production. [4]

Le réseau HTB favorise également l'incorporation des énergies renouvelables, qui sont généralement décentralisées et positionnées loin des centres urbains. Il réalise l'équilibrage des déséquilibres entre la demande et l'offre, en particulier lors des pics de demande ou lors d'irrégularités de production. [4]

Sur le plan organisationnel, le réseau HTB offre une gestion centralisée tout en restant flexible pour l'énergie, ce qui contribue à la stabilité de la fréquence et de la tension au sein du système. Il est également crucial pour les échanges de l'électricité à travers les frontières, via des réseaux régionaux, ce qui contribue à la sécurité énergétique et à l'efficacité économique. Finalement, les stratégies de mise à jour du réseau, comme l'avancement des « smart grids [4]

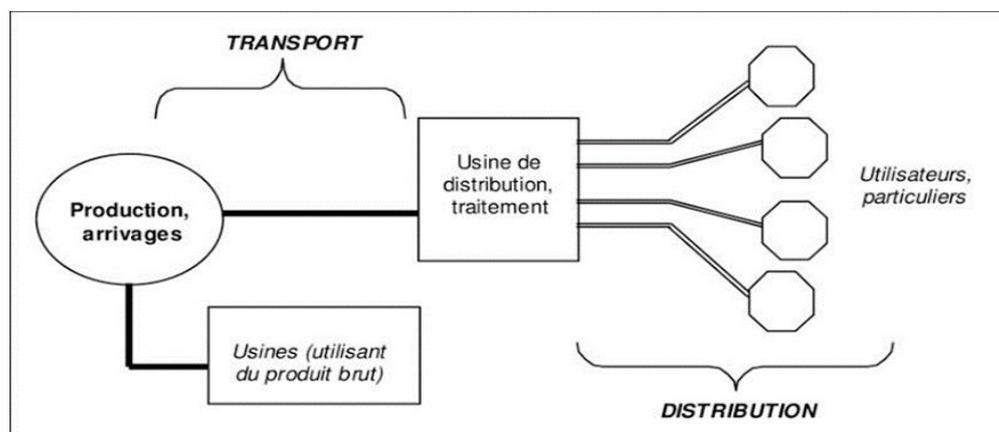


Figure I.3: Schéma du transport et de la distribution par pipeline

I.3 Classification des réseaux électriques HTB :

I.3.1 Par niveau de tension :

Les réseaux électriques HTB (Haute Tension B) peuvent être classés selon leur niveau de tension nominal, qui correspond à la tension efficace entre phases. Cette classification est essentielle pour identifier la capacité de transport d'énergie et les usages associés à chaque niveau.

On distingue généralement trois grandes classes de tension dans les réseaux HTB :

-HTB1 : de 63 kV à 90 kV. Ces niveaux sont souvent utilisés pour le transport régional d'électricité ou pour l'alimentation de zones industrielles.

-HTB2 : de 150 kV à 225 kV. Ces lignes assurent le transit interrégional et relient les grands centres de consommation aux sources de production.

-HTB3 : de 400 kV et plus. Ce sont les lignes à très haute tension, utilisées pour le transport de grandes quantités d'énergie sur de longues distances et pour interconnexions nationales et internationales.

Cette hiérarchie permet d'optimiser les infrastructures selon les besoins en puissance, les distances à couvrir, et la stabilité du réseau. En France, par exemple, RTE exploite principalement des réseaux à 225 kV et 400 kV, tandis qu'en Algérie, Sonelgaz utilise principalement des tensions de 220 kV et 400 kV pour le réseau de transport principal.

[5]

I.3.2 Selon la fonction (transport, interconnexion...) :

Outre le critère de tension, les réseaux HTB peuvent aussi être classés selon leur fonction dans le système électrique :

-Réseaux de transport : Ils relient directement les centrales de production aux grandes zones de consommation ou aux sous-stations qui alimentent les réseaux de distribution. Ils sont essentiels pour garantir un acheminement efficace de l'énergie électrique à grande échelle.

-Réseaux d'interconnexion : Ces lignes assurent la liaison entre différents réseaux nationaux ou régionaux. Par exemple, l'Algérie est interconnectée avec le Maroc et la Tunisie dans le cadre du réseau maghrébin COMELEC. Ces interconnexions permettent l'échange d'énergie, la solidarité en cas de panne, et l'optimisation des ressources à l'échelle régionale.

-Réseaux de bouclage ou de maillage : Ils servent à renforcer la sécurité d'alimentation et à éviter les ruptures de service en cas de défaillance sur une ligne. Ce maillage garantit la redondance du réseau et facilite la gestion dynamique des flux électriques.

Cette classification fonctionnelle est cruciale dans la planification, l'exploitation et la gestion des infrastructures électriques modernes, notamment face à l'essor des énergies renouvelables et à la nécessité de renforcer la flexibilité du réseau. [6]

I.4 Structure des réseaux électriques HTB :

Les réseaux de transport d'électricité à haute tension B (HTB) sont conçus selon différentes structures topologiques en fonction des exigences techniques, économiques et géographiques. Les principales structures utilisées sont : le réseau maillé, le réseau radial, et le réseau mixte ou bouclé. [7]

I.4.1 Réseau maillé (transport national/international) :

Le réseau maillé est une architecture dans laquelle plusieurs lignes de transport à haute tension interconnectent différents postes électriques, formant une grille complexe qui offre de multiples chemins pour l'acheminement de l'énergie. Ce type de structure est conçu pour garantir la continuité de service, réduire les pertes en cas de panne et permettre une meilleure gestion du flux de l'électricité. [8]

-Transport national :

Au niveau national, le réseau maillé permet d'interconnecter les différents centres de production (centrales thermiques, hydroélectriques, solaires, etc.) avec les grandes zones de consommation (villes, zones industrielles, etc.). En Algérie, la structure maillée relie des villes comme Alger, Oran, Annaba, Ghardaïa et Hassi R'mel à travers des lignes 220 kV et 400 kV, permettant une répartition équilibrée de l'énergie selon la demande régionale. Cette interconnexion rend le réseau plus stable et plus flexible, surtout face aux variations de charge ou à la défaillance de certains équipements. [8]

-Transport international :

Au niveau international, le réseau maillé est utilisé pour les interconnexions transfrontalières. L'Algérie, par exemple, est connectée au Maroc et à la Tunisie via des lignes HTB de 225 kV. Ces interconnexions permettent non seulement un échange d'énergie entre les pays du Maghreb (réseau maghrébin interconnecté), mais aussi une meilleure sécurité énergétique en cas de besoin de secours mutuel ou d'équilibrage du réseau. Ces lignes jouent aussi un rôle dans l'exportation d'énergie solaire à moyen terme vers l'Europe dans le cadre de projets de transition énergétique. [8]

I.4.2 Réseau radial (liaisons régionales) :

Dans un réseau radial, chaque point de consommation est alimenté par une seule ligne depuis un poste source, sans liaison alternative. Cela signifie qu'une coupure sur la ligne

entraîne automatiquement l'interruption de l'alimentation en aval. Ce type de structure est donc simple, peu coûteuse et facile à entretenir, mais elle présente une faible fiabilité.

Les réseaux radiaux sont couramment utilisés dans les zones à faible densité de consommation, notamment dans les zones rurales, les régions isolées ou les extensions récentes du réseau. En Algérie, ce type de réseau est fréquent dans les wilayas sahariennes ou les zones de faible densité de population. [9]

I.4.3 Réseau mixte ou bouclé :

Le réseau mixte ou bouclé est une combinaison des réseaux maillé et radial. Il est conçu pour offrir un compromis entre fiabilité, sécurité d'alimentation et coût. Dans cette configuration, certaines lignes sont bouclées de façon à permettre une alimentation de secours en cas de coupure d'une des branches.

Ce type de réseau est de plus en plus utilisés dans les zones périurbaines ou industrielles, où les besoins en alimentation sont importants mais ne justifient pas encore un maillage complet. Il permet une meilleure continuité de service par rapport au réseau radial, sans atteindre la complexité du réseau maillé. [9]

Dans le tableau I.1 ci-dessous nous trouvons une comparaison de principales caractéristiques des réseaux maillé, radial et mixte, en mettant en évidence leur fiabilité, complexité, coût et usage typique, avec des exemples en Algérie.

Tableau I.1.:Comparatif des structures de réseau HTB

Critère	Réseau maillé	Réseau radial	Réseau mixte / bouclé
Fiabilité	Très élevée	Faible	Moyenne à élevée
Redondance	Oui (plusieurs chemins)	Non (chemin unique)	Partielle
Complexité	Élevée	Faible	Moyenne
Coût de mise en œuvre	Très élevé	Faible	Modéré
Usage typique	Transport national/international	Liaisons régionales/rurales	Zones urbaines/périurbaines
Exemple en Algérie	Interconnexion entre grandes villes	Réseaux locaux dans le sud	Réseaux urbains secondaires

I.5 Composants principaux du réseau HTB :

Le réseau HTB (Haute Tension B) repose sur plusieurs composants essentiels qui assurent le transport, la protection et la transformation de l'énergie électrique entre les centres de production et les zones de consommation. Ces composants sont conçus pour fonctionner à des tensions supérieures à 50 kV, et jusqu'à 400 kV.

I.5.1 Lignes aériennes et câbles souterrains :

Les lignes aériennes sont les plus répandues dans les réseaux HTB. Elles consistent en des conducteurs nus fixés sur des pylônes métalliques, traversant de longues distances. Elles offrent une solution économique et simple à entretenir pour le transport d'électricité sur de vastes territoires. Les lignes 220 kV et 400 kV sont courantes dans le réseau algérien.

À l'inverse, les câbles souterrains sont utilisés principalement en milieu urbain dense ou dans les zones sensibles (aéroports, sites militaires, etc.) où les lignes aériennes ne sont pas possibles. Ils présentent l'avantage de la discrétion visuelle et de la protection contre les intempéries, mais sont plus coûteux à installer et à réparer. [10]

I.5.2 Postes de transformation HTB/HTA :

Les postes de transformation HTB/HTA (Haute Tension B / Haute Tension A) jouent un rôle central dans l'architecture du réseau électrique. Leur fonction principale est d'abaisser la tension de transport (généralement comprise entre 225 kV et 63 kV pour le HTB) à une tension intermédiaire (entre 20 kV et 30 kV pour le HTA), adaptée à la distribution régionale ou locale de l'électricité. [11]

Un poste HTB/HTA est constitué de plusieurs composants essentiels :

a)-Transformateur de puissance :

Le transformateur de puissance est sans aucun doute l'appareil qui a favorisé le développement puis la prédominance des réseaux alternatifs pour le transport, la distribution et l'exploitation de l'énergie électrique.

La fonction initiale d'un transformateur était d'augmenter la tension de transport pour diminuer le courant, et par conséquent, les pertes joules produites dans les lignes. Cette augmentation s'accompagne naturellement d'une diminution de la tension aux points d'usage. Sur un plan plus général, le transformateur est un composant essentiel pour la connexion des divers réseaux énergétiques. Les différentes fonctions du transformateur de puissance amènent à définir un certain nombre de grandeurs dimensionnantes, on peut citer :

- La tension assignée au primaire et secondaire (en volt ou KV).
- La puissance apparente (en VA ou KV_a).

- La fréquence de fonctionnement

Sur la plaque signalétique d'un transformateur, on peut encore trouver la chute de tension en charge, le couplage des enroulements, la classe de température, les courants primaires et secondaires, etc...



Figure I.4: Transformateur de puissance dans un poste électrique

b)-Disjoncteurs HTB :

Les disjoncteurs haute tension (HTB) sont des appareils de coupure automatique conçus pour interrompre le courant en charge ou en défaut dans un réseau électrique. Ils sont essentiels pour la protection des installations et permettent de séparer automatiquement les sections défectueuses en cas de court-circuit ou de surcharge.

Ils fonctionnent grâce à un mécanisme d'ouverture rapide des contacts, associé à un système d'extinction d'arc (souvent par gaz SF₆, air comprimé, ou vide). Les disjoncteurs sont commandés automatiquement par des relais de protection en cas de défaut, ou manuellement lors des opérations d'exploitation. [11]



Figure I. 5: Disjoncteurs haute tension

c)- Sectionneurs :

Les sectionneurs sont des dispositifs de coupure sans charge, utilisés principalement pour isoler électriquement une partie d'une installation pour des raisons de sécurité lors de travaux

de maintenance ou d'inspection. Contrairement aux disjoncteurs, les sectionneurs ne peuvent pas interrompre un courant en charge, car ils n'ont pas de système d'extinction d'arc.

Ils sont généralement associés à des disjoncteurs pour assurer une séparation visible et sécurisée. Leur rôle est donc complémentaire à celui des disjoncteurs. [11]



Figure I. 6:Sectionneurs haute tension

d)- Transformateurs de courant (TC ou TI) et de tension (TT ou TP)

Les transformateurs de courant (TC) et de tension (TT) sont des transformateurs de mesure utilisés pour abaisser les niveaux de courant et de tension dans des proportions précises afin de les rendre compatibles avec les équipements de protection, de contrôle et de mesure.

- Les TC permettent de mesurer le courant électrique sans mettre les équipements de mesure en contact direct avec la haute tension.
- Les TT, quant à eux, réduisent la tension pour alimenter les relais de protection et les voltmètres. [11]



Figure I. 7:Transformateurs de courant



Figure I.8 : Transformateurs de tension

e)-Cellules HTA : assurent la distribution vers les départs HTA.

f)-Systèmes de protection, de contrôle et de télécommunication : souvent pilotés par un système SCADA, permettant le suivi à distance en temps réel et les interventions automatisées. [12]

Ces postes sont implantés à des points stratégiques du territoire pour optimiser les flux d'énergie et sécuriser l'alimentation électrique. Ils constituent l'interface entre le réseau de transport et les réseaux de distribution (gérés par ENEDIS ou d'autres acteurs selon les zones de concession). [12]

Avec le développement des énergies renouvelables décentralisées (photovoltaïque, éolien), les postes HTB/HTA sont également sollicités pour intégrer ces productions au réseau en maintenant la stabilité en tension et en fréquence. [12]

I.6 Choix de la tension et de la fréquence :

I.6.1 Critères pour le choix du niveau de tension :

La sélection du niveau de tension dans un système électrique est primordiale car elle influence directement la fiabilité, la sûreté et l'efficacité économique du transfert et de la diffusion de l'énergie. Les critères principaux comprennent :

- Transport d'énergie sur de longues distances : Plus la distance à parcourir est grande, plus il devient bénéfique d'opter pour une tension élevée afin de minimiser les pertes en ligne et le coût des câbles.
- Transport de puissance : Pour réduire les pertes et la taille des câbles, il est nécessaire d'utiliser des tensions plus élevées pour des puissances importantes.
- Coût des installations : Les installations HTB (Haute Tension B) sont plus onéreuses, mais indispensables pour les hautes puissances et les longues distances.
- Normes de sécurité et réglementations : La sélection doit également se conformer aux standards nationaux et internationaux pour assurer la protection des opérateurs. Et du public.
- Compatibilité avec le réseau existant : Le niveau de tension choisi doit s'intégrer dans le système actuel pour assurer la continuité et la stabilité du réseau. [13]

I.6.2 Importance de la stabilité de la fréquence dans les réseaux HTB :

La fréquence électrique, souvent de 50 Hz en Algérie, est un élément crucial pour le bon fonctionnement des appareils et l'harmonisation du réseau. Une fréquence stable assure :

- Un fonctionnement efficace des machines tournantes (comme les alternateurs et moteurs) qui ont besoin d'une fréquence constante pour prévenir les dommages mécaniques et la diminution de l'efficacité.

- La synchronisation des centrales ainsi que la connexion entre différentes sections du réseau, visant à éviter les déséquilibres susceptibles de provoquer des coupures.
- Qualité de l'énergie électrique : Une fréquence instable peut causer des perturbations, des harmoniques et expose les équipements délicats à divers risques.
- Sécurisation du système : Les relais de protection exploitent la fréquence pour identifier certains défauts et irrégularités. [13]

I.7 Qualité de l'énergie dans les réseaux HTB :

I.7.1 Tension, fréquence, facteur de puissance :

Dans les réseaux HTB (Haute Tension B), la qualité de l'énergie électrique est cruciale pour assurer la fiabilité, la sécurité et la durabilité des appareils électriques ainsi que la permanence du service. Elle se base essentiellement sur trois éléments cruciaux : la tension, la fréquence et le coefficient de puissance. [14]

- Tension :

Il est essentiel que la tension soit maintenue dans des marges précises établies par les normes pour prévenir des surtensions ou des chutes de tension qui pourraient entraîner des malaises ou des détériorations de l'équipement. Une tension stable et adéquate garantit le bon fonctionnement des appareils tout en minimisant les pertes d'énergie. [14]

- Fréquence :

Il est nécessaire de garder la fréquence, qui est 50 Hz en Algérie, stable afin d'assurer une synchronisation appropriée entre les diverses sources de production et la stabilité du réseau. Des divergences substantielles ou prolongées peuvent provoquer des dysfonctionnements sur les machines rotatives, des perturbations et une augmentation du risque de coupures. [14]

- Facteur de puissance :

Le facteur de puissance représente la proportion entre la puissance active utile (mesurée en kW) et la puissance apparente globale (exprimée en kVA). Un faible facteur de puissance signale une présence importante de puissance réactive, qui n'effectue pas de travail bénéfique, mais surcharge les équipements et amplifie les pertes dans le réseau.

Conserver un facteur de puissance proche de 1 aide à maximiser l'usage des installations, minimiser les pertes et prévenir les sanctions financières infligées par les compagnies d'électricité. [14]

I.7.2 Perturbations et harmoniques :

Alors que les réseaux électriques à haute tension B (HTB) se complexifient et s'interconnectent de plus en plus, contrôler la qualité de l'énergie est devenu un défi

stratégique crucial. Les phénomènes pouvant affectés cette qualité incluent les perturbations électromagnétiques temporaires et la présence d'harmoniques, qui mettent en péril non seulement la stabilité du réseau, mais également la sécurité des équipements et des utilisateurs [15]

-Perturbations transitoires :

Les perturbations sont définies comme des événements aléatoires et souvent brefs, pouvant provoquer des variations brutales de la tension ou de la fréquence. Elles peuvent être causées par :

- des défauts sur les lignes (court-circuit, arcs électriques),
- des opérations de manœuvre (ouverture/fermeture de disjoncteurs),
- des influences atmosphériques (foudre),
- ou encore des interactions avec des systèmes électroniques de puissance.

Ces perturbations engendrent des phénomènes comme des creux ou des surtensions momentanées, affectant la continuité de service et la performance des équipements connectés au réseau. [15]

-Distorsion harmonique :

Les harmoniques font référence à l'existence de composantes sinusoïdales qui sont des multiples de la fréquence fondamentale (50 Hz). Ces charges non linéaires sont majoritairement à l'origine de leur génération, comme par exemple :

- les redresseurs contrôlés,
- les variateurs de vitesse,
- les onduleurs photovoltaïques,
- les matériels informatiques industriels.

Les conséquences négatives des harmoniques comprennent :

- le réchauffement excessif des transformateurs, câbles et moteurs,
- l'usure anticipée des isolants, • l'altération du fonctionnement des relais de protection, • et la détérioration du facteur de puissance entraînant des coûts économiques.

Pour assurer une performance stable du réseau HTB dans un environnement de plus en plus exposé aux distorsions harmoniques, il est essentiel d'adhérer à des normes comme la CEI 61000-4-7 et d'implémenter des filtres passifs ou actifs. [15]

I.7.3 Continuité de service et fiabilité :

La continuité de service et la fiabilité sont des indicateurs clés de performance pour tout réseau électrique à haute tension B (HTB). Dans un climat de demande croissante d'énergie et

de forte sensibilité des charges aux coupures, les opérateurs sont tenus d'assurer une fourniture constante, stable et sécurisée, même en présence de perturbations ou de pannes.

-Continuité du service : C'est la capacité du système électrique à assurer une alimentation ininterrompue, 24h/24. Dans le cas des réseaux HTB, elle s'appuie sur : la redondance des lignes et postes, des configurations de réseau en maillage ou en boucle, la rapidité des systèmes de protection (disjoncteurs, relais différentiels), l'automatisation nécessaire pour réajuster le réseau après une panne. Les temps de coupure doivent être réduits au minimum, notamment dans les secteurs industriels sensibles, par des dispositifs comme les automatismes de reprise rapide (ARR) ou les sources secondaires de secours. [16]

-Fiabilité :

La fiabilité quant à elle évalue la probabilité de fonctionnement correct du système dans une période donnée. Elle dépend de :

- la qualité de la maintenance préventive et corrective,
- la robustesse des composants (lignes, transformateurs, disjoncteurs),
- la surveillance en temps réel à travers les SCADA et systèmes EMS (Energy Management Systems),
- l'analyse de risques et la gestion des pannes potentielles.

Des indicateurs tels que le SAIDI (System Average Interruption Duration Index) et le SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) permettent de quantifier objectivement les performances du réseau HTB en matière de disponibilité. Une haute fiabilité contribue non seulement à la satisfaction des usagers, mais aussi à la stabilité économique, en réduisant les pertes de production et les dommages aux équipements sensibles. [16]

I.8 Contraintes et défis des réseaux HTB :

I.8.1 Perte Joule et échauffement :

Les réseaux HTB, qui sont cruciaux pour la distribution de l'énergie sur des distances étendues, font face à d'importantes limitations physiques et thermiques. Parmi celles-ci, les pertes dues à l'effet Joule et la chaleur générée par les conducteurs représentent des enjeux significatifs pour l'efficacité énergétique et la pérennité des installations. [17]

- Perte de Joule :

Les pertes dues à l'effet Les pertes de Joule résultent du flux de courant électrique à travers les conducteurs, et peuvent être calculées à l'aide de la formule $P=R \cdot I^2$, où R représente la résistance linéaire du conducteur et I correspond à l'intensité du courant. Ces pertes :

- augmentent proportionnellement au carré du courant,
- sont accentuées sur les longues distances,
- et constituent jusqu'à 5 à 10 % de l'énergie transportée selon les charges.

Pour minimiser ces pertes, il faut soit diminuer le courant en élevant la tension (concept du transport HTB), soit recourir à des conducteurs à résistance réduite, tels que les alliages aluminium-acier ou les conducteurs au cœur composite (HTLS) [17].

-Échauffement :

L'augmentation de température des fils haute tension est un résultat direct des pertes Joule. Il est capable de s'entraîner sur :

- l'expansion thermique des fils,
- une diminution de leur longévité,
- des dangers mécaniques (flèches, affaissements),
- et des pertes d'isolement au niveau des postes.

Les gestionnaires de lignes doivent contrôler la température d'exploitation, généralement restreinte entre 70 °C et 90 °C en fonction du type de câble, à l'aide de dispositifs de détection ou de modèles thermiques dynamiques (DTL). Des marges de sécurité sont incluses pour éviter les dangers liés à la surcharge thermique. [17]

I.8.2 Effets électromagnétiques :

Les effets électromagnétiques constituent une contrainte technique et sanitaire majeure dans l'exploitation des réseaux de transport HTB. Ces effets sont générés par la circulation des courants électriques à haute intensité dans les lignes aériennes ou souterraines, créant des champs électriques et magnétiques autour des conducteurs. [18]

-Champs électriques

Les champs électriques sont dus à la tension appliquée sur les lignes. Leur intensité augmente avec le niveau de tension et diminue avec la distance au sol. Dans les lignes HTB (220 kV et plus), ils peuvent atteindre jusqu'à 10 kV/m à proximité des conducteurs. Bien que facilement atténués par les structures ou la végétation, ils peuvent :

- provoquer des décharges coronas, sources de pertes et de bruit audible,
- générer des interférences avec les équipements de communication,
- influencer les installations voisines mal protégées (clôtures métalliques, câbles non blindés).

[18]

- Champs magnétiques

Les champs magnétiques sont proportionnels à l'intensité du courant transporté. Ils pénètrent plus profondément dans les matériaux et sont plus difficiles à atténuer. Leur intensité peut

dépasser 5 à 10 μT sous les lignes à forte charge. Les préoccupations sanitaires liées à une exposition prolongée à ces champs ont été soulevées, notamment en ce qui concerne :

- les effets biologiques potentiels (troubles du sommeil, maux de tête),
- le principe de précaution pour les zones résidentielles proches des lignes,
- les normes de sécurité établies par l’OMS et l’ICNIRP. [18]

- Mesures d’atténuation

Pour limiter les effets électromagnétiques :

- on prévoit des distances de sécurité minimales par rapport aux habitations (souvent ≥ 30 m),
- on adopte des configurations bipolaires équilibrées réduisant le champ résultant,
- on utilise des écrans électromagnétiques dans les postes HTB en zones sensibles.

L’intégration de ces mesures dans la conception des réseaux HTB est désormais une exigence réglementaire et sociale, notamment dans les régions à forte densité urbaine. [18]

I.8.3 Gestion des pics de charge et stabilité :

La gestion des pics de charge est l’un des défis critiques auxquels les réseaux HTB doivent faire face. Ces pics correspondent à des périodes de forte demande électrique, généralement en matinée ou en soirée, ou durant des conditions climatiques extrêmes (fortes chaleurs ou vagues de froid). Une mauvaise gestion peut entraîner :

- une instabilité de la tension et de la fréquence,
- une surcharge des lignes et des transformateurs,
- voire des effondrements de tension ou des délestages.

Mécanismes de gestion des pointes :

Pour stabiliser le réseau durant ces pointes, plusieurs solutions techniques sont mises en œuvre :

- le dispatching temps réel par les centres de conduite régionaux (CCR),
- l'utilisation des réserves tournantes (groupes thermiques ou hydrauliques en veille),
- la modulation de charge via la gestion de la demande (DSM),
- l'interconnexion régionale, permettant d'importer rapidement de l'énergie d'autres réseaux voisins.

La stabilité dynamique du réseau repose également sur :

- l’injection de puissance réactive pour maintenir la tension,
- le bon réglage des systèmes d’excitation et des compensateurs statiques (STATCOM, SVC),
- et la surveillance en temps réel par des SCADA intégrés aux centres de contrôle HTB.

Dans le contexte algérien, SONELGAZ renforce ces dispositifs avec l'appui de la commission nationale d'équilibrage du système électrique (CNASE), surtout face à la montée en puissance des productions renouvelables intermittentes. [19]

I.9 Conclusion :

Ce premier chapitre a permis de poser les bases fondamentales des réseaux électriques HTB (Haute Tension B) en mettant en avant leur importance cruciale dans la transmission de l'énergie électrique à grande échelle. Nous avons présenté la configuration du réseau, ses principaux composants, ainsi que les indicateurs essentiels à contrôler tels que la tension, la fréquence, le facteur de puissance et la qualité de l'énergie.

En examinant des facteurs techniques tels que les pertes Joule, les effets électromagnétiques ou la gestion des pics de charge, nous avons souligné les enjeux cruciaux auxquels ces infrastructures sont confrontées pour assurer fiabilité, continuité du service et sécurité énergétique.

En somme, ce chapitre nous a offert une vision globale des exigences techniques, des normes et des limites actuelles du réseau HTB, tout en ouvrant la voie à une réflexion sur la modernisation du réseau dans un contexte de transition énergétique. Les connaissances acquises ici constituent ainsi une base solide pour aborder, dans les chapitres suivants, des aspects plus spécifiques liés à l'exploitation, à la gestion intelligente du réseau et à l'intégration des énergies renouvelables. Ce chapitre nous a donné un aperçu des contraintes techniques, des standards et des bornes actuels du réseau HTB, tout en incitant à penser à la mise à jour du réseau dans le cadre de la transition énergétique. Les informations obtenues ici servent donc de fondement robuste pour traiter, dans les sections ultérieures, des éléments plus particuliers relatifs à l'exploitation, à la gestion astucieuse du réseau et à l'incorporation des énergies renouvelables.

Chapitre II
Maintenance
industrielle

&

Contrôle non
destructif

Chapitre II: Maintenance industrielle et contrôle non destructif

II.1 Introduction :

De nos jours, la maintenance industrielle est un aspect essentiel de la gestion des infrastructures techniques au sein des entreprises. Elle comprend toutes les opérations techniques, administratives et de gestion visant à maintenir ou rétablir un bien dans un état lui permettant d'accomplir une fonction essentielle. Ce domaine a évolué d'une simple intervention corrective à une démarche globale intégrant la maintenance préventive, prédictive et conditionnelle. L'amélioration de la maintenance est essentielle pour garantir la fiabilité des équipements, réduire les coûts de production et renforcer la sécurité des opérateurs [20].

Les Contrôles Non Destructif (CND) sont des essais physiques pour l'individuation de l'éventuelle présence de défauts dans une pièce sans l'abîmer ou la détruire en évitant ainsi de la rendre inutilisable.

Les CND ont pour but de localiser les défauts d'une certaine importance et de consentir d'émettre un jugement d'acceptabilité sur les pièces examinées. La possibilité d'étendre les contrôles à toutes les pièces d'une construction donnée permet de prévenir les incidents.

Voilà qui explique la grande importance et diffusion que les CND ont eue dernièrement. Le contrôle d'un matériel ou d'un produit peut être effectué non seulement pour détecter des défauts, mais aussi pour la détermination des caractéristiques physiques, l'examen de la structure, l'analyse de la composition. [21].

II.2 Généralité sur la maintenance industrielle :

II.2.1 Définition et objectifs :

La maintenance industrielle peut se définir comme le fait de maintenir ou de rétablir un équipement de production dans un état défini en amont afin que celui-ci soit en mesure d'assurer le service prévu. Lorsqu'une entreprise installe un système pour maintenir ses équipements de production, cela lui permet de prévenir un grand nombre de problèmes et de diminuer les pertes de productivité. [22]

Elle implique une inspection des installations, mais également des données précises sur l'état des infrastructures, de l'équipement et des machines. Pour y arriver, de nombreuses entreprises se tournent vers des entreprises technologiques spécialisées dans la gestion de ces procédés industriels. Ces outils permettent de mesurer quotidiennement si les indicateurs sont bons. Mais surtout d'alerter lorsqu'un système arrive en zone critique et qu'une intervention

est nécessaire. Les opérations de maintenances consistent également à se déplacer physiquement dans le lieu dédié pour inspecter toutes les installations et effectuer les réparations nécessaires. Le travail est souvent effectué par des techniciens spécialisés dans la maintenance industrielle. [22]

Les interventions peuvent être simples comme le changement d'une ampoule, ou plus complexe et nécessiter plusieurs heures voire plusieurs jours de maintenance pour que tout fonctionne de nouveau. Plus la tâche de maintenance industrielle est spécifique et complexe, plus le technicien de maintenance industrielle doit être qualifié. Il en existe plusieurs types. Elle peut être préventive, prédictive ou curative. [22]

Par ailleurs, les enjeux de sécurité sont grands. Un technicien de maintenance industrielle doit travailler avec précision et rapidité mais sans se mettre en danger et en gardant l'équipe de production en sécurité lors de ses interventions.

La maintenance industrielle vise à :

- Maintenir les équipements en bon état de fonctionnement.
- Prévenir les pannes et les défaillances.
- Réparer les pannes rapidement et efficacement.
- Améliorer la sécurité des installations et des personnes.
- Optimiser la productivité et réduire les coûts de production.
- Prolonger la durée de vie des équipements. [23]

II .2.2 Types de la maintenance industrielle :

La figure ci-dessous est un récapitulatif de tous les types principaux de la maintenance industrielle soit préventive ou corrective.

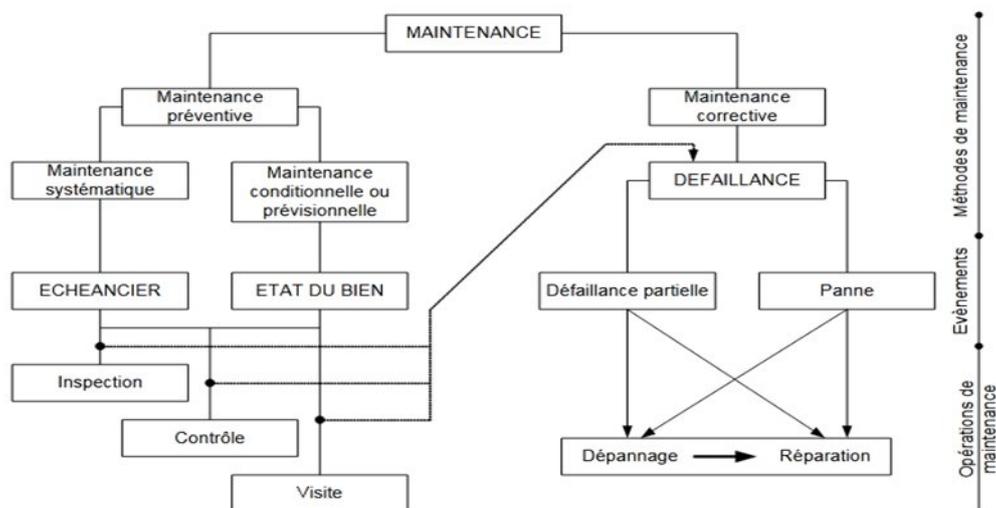


Figure II.1 : Différents types de la maintenance [23]

a- Maintenance corrective :

La **maintenance corrective** représente l'ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien ou la dégradation de sa fonction, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement.

Pour être efficace, la maintenance corrective doit comprendre la remise en état et les tests pour contrôler le bon fonctionnement. [24]

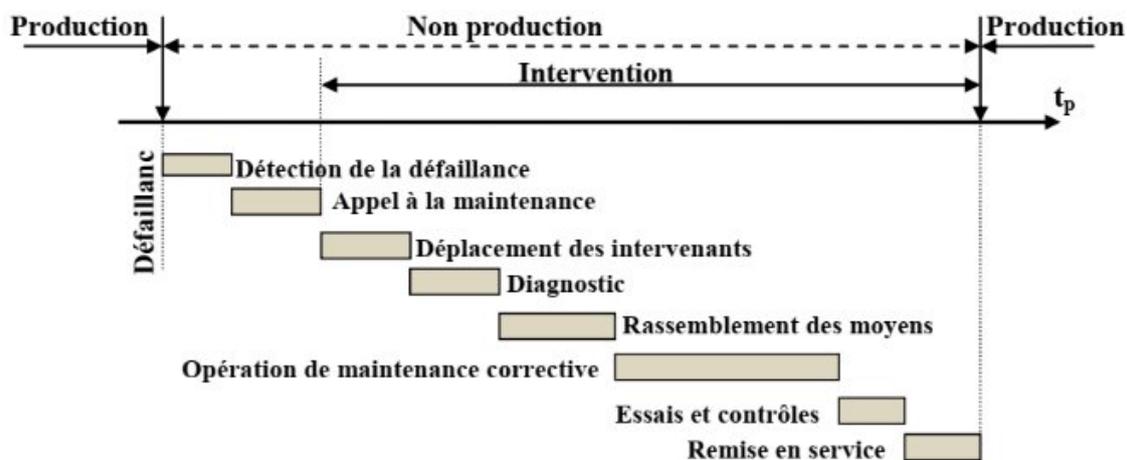


Figure II.2 : Phases d'une opération de maintenance corrective [24]

b- Maintenance préventive :

Dans un premier temps, elle a pour objectif de **réduire les éventuelles défaillances** ou dégradation de pièces détachées, de composants, ou d'une machine.

En surveillant régulièrement ces machines, et tous les composants une entreprise réduit considérablement le risque de panne. Avec la digitalisation des entrepôts et des entreprises, la maintenance préventive se digitalise. La technologie apporte désormais des informations en temps réel, et cela permet aux techniciens de suivre et planifier les opérations de maintenance préventive plus efficacement. [25]

Dans cet axe nous pouvons distinguer deux types essentiels de la maintenance :

1. Maintenance prévisionnelle (prédictive) :

Avec l'émergence des solutions de traitement et d'analyse des données ainsi que de l'intelligence artificielle, la méthode de prévention va encore plus loin. Aujourd'hui, les techniciens de maintenance industrielle sont capables de planifier les interventions selon la prédiction des pannes et des dysfonctionnements. C'est ce qu'on appelle la maintenance prédictive. Ce type de maintenance 4.0 permet aux entreprises d'anticiper les problèmes en planifiant les interventions nécessaires basées sur les prédictions. Elle permet de pousser et

d'exploiter les systèmes à leur maximum, mais aussi de réduire les dépenses causées par les pannes inattendues.

Le responsable de maintenance industrielle peut également décider de mettre en place un système préventif systématique. Ce type de maintenance préventive se distingue par sa périodicité : elle est définie à des intervalles de temps bien définis. Elle permet ainsi de remplacer les composants et les pièces détachées régulièrement, ce qui améliore la productivité des machines. Pour cela, il faudra inspecter régulièrement les différents équipements sur site pour récolter toutes les données permettant l'analyse de l'usure des pièces. [26]

2. Maintenance conditionnelle :

L'entretien préventif conditionnel se distingue par l'identification des points vulnérables. Selon les circonstances, il est recommandé de les placer sous observation et, par la suite, de déterminer la nécessité d'une intervention dès qu'un certain niveau est atteint. Cependant, les vérifications restent régulières et font partie des méthodes de contrôle non destructif.

Cela concerne tous les équipements. Cette maintenance préventive conditionnelle s'effectue par des actions appropriées sur l'équipement en service dont on peut mesurer les paramètres suivants : La qualité, le niveau de l'huile, les pressions, les températures, la tension, l'intensité des équipements électriques, les vibrations et les mouvements mécaniques, Etc.

L'acquisition de connaissances comportementales se réalise en temps réel, pourvu que les résultats soient correctement interprétés. À ce stade, l'informatique joue un rôle crucial. [27]

Pour préserver son utilité, l'équipement requis pour réaliser la maintenance préventive conditionnelle doit être digne de confiance. Il peut être coûteux, mais pour des cas sélectionnés correctement, il devient vite rentable.

Pour être efficace, cette approche de maintenance doit, sans exception, être comprise et approuvée par les responsables de production tout en bénéficiant de l'adhésion de l'ensemble du personnel.

Il est impératif que ces techniques soient, dans la mesure du possible, uniformisées à travers les différents domaines (production et périphériques), cela n'exclut pas l'ajustement indispensable de la technique au matériel.

Avec l'évolution actuelle des matériels et leurs tendances à être de plus en plus fiables, la proportion des pannes accidentelles sera mieux maîtrisée. La maintenance préventive diminuera quantitativement d'une façon systématique mais s'améliorera qualitativement par la maintenance conditionnelle. [28]

II.2.3 Organisation de la maintenance :

La programmation de la maintenance est un aspect essentiel pour garantir l'opérationnalité constante des installations industrielles. Elle offre la possibilité d'anticiper les interventions nécessaires, de rassembler les ressources humaines et matérielles requises, tout en minimisant les temps d'interruption inattendus. Dans le secteur industriel, on identifie souvent la maintenance planifiée corrective, la maintenance préventive systématique et conditionnelle ainsi que la maintenance prédictive. Une bonne organisation repose sur plusieurs étapes essentielles : l'examen des antécédents de pannes, l'estimation de la longévité des composants, l'établissement des priorités en fonction de l'importance des équipements et la création de plannings hebdomadaires ou mensuels.

En Algérie, certaines sociétés comme SONELGAZ et NAFTAL ont instauré des systèmes intégrés de planification qui contribuent à améliorer les performances générales de leurs équipements. [29]

Un exemple d'organigramme est donné ci-dessous (figure II.3), Ce n'est qu'une possibilité, chaque directeur technique étant libre de l'organiser selon sa propre conviction. Il fait apparaître par contre des fonctions indispensables pour que la fonction maintenance soit efficace.

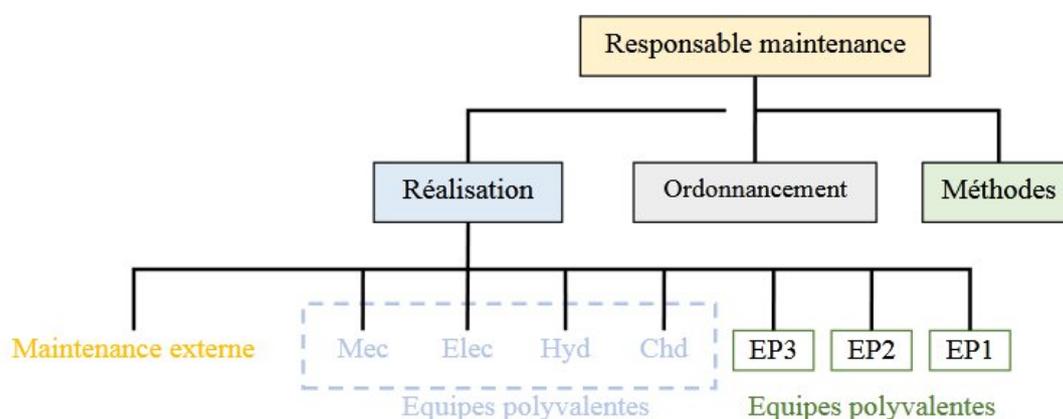


Figure II.3 : Structure type avec sectorisation partielle. [29]

Dans le cadre de la planification et de la surveillance des interventions, les sociétés utilisent des instruments informatiques de gestion, y compris la GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur). Ces programmes offrent la possibilité de :

- La gestion des historiques de maintenance.
- Le suivi des indicateurs de performance essentiels tels que le MTBF (Mean Time Between Failures) ou le MTTR (Mean Time To Repair).
- L'organisation automatique des interventions.

- L'administration des inventaires de pièces détachées.

L'implémentation d'un système de GMAO favorise une réaction plus prompte en cas de défaillance, diminue les dépenses opérationnelles et offre un suivi intégral des interventions de maintenance. Des sociétés industrielles algériennes comme Fertial et ENPC ont opté pour des systèmes de GMAO locaux ou sur mesure, fréquemment élaborés en collaboration avec des universités techniques de l'Algérie. [30]

II.2.4 Enjeux de la maintenance industrielle :

La maintenance industrielle englobe de nombreux enjeux et objectifs essentiels pour les entreprises. Ces dernières recherchent une politique de maintenance qui leur permet de réaliser plusieurs bénéfices importants. Tout d'abord, réduire les coûts liés à la non-qualité ainsi que les coûts engendrés par les arrêts de production dus aux pannes ou aux dysfonctionnements des outils de production. Ensuite, elles visent à améliorer la productivité en utilisant des outils industriels adaptés, fiables et offrant les meilleurs rendements. De plus, elles cherchent à assurer la disponibilité de tous leurs équipements au coût le plus approprié, c'est-à-dire au coût optimal. En somme, l'objectif de la maintenance est d'encourager la qualité, la quantité, le respect des délais de production et la maîtrise des coûts.

Avec les profondes mutations technologiques en cours, telles que l'avènement de l'Intelligence Artificielle et de l'Internet Industriel des Objets, la maintenance occupe une position stratégique au sein des entreprises. [31]

II.3 Contrôle non destructif (CND) :

Le Contrôle Non Destructif (C.N.D.) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux sans les dégrader ; soit au cours de la production ; soit en cours d'utilisation et même dans le cadre de maintenances. On parle aussi d'Essais ou d'Examen Non Destructifs (E.N.D.) de tous tests effectués dans le but d'obtenir une analyse sur l'état de santé de toutes structures.

II.3.1 Définition et principes :

Le Contrôle non destructif est une méthode de diagnostic des produits, afin de détecter, localiser, dimensionner et caractériser d'éventuels défauts dans leurs structures.

A cet effet, on utilise des capteurs dont le fonctionnement est basé sur les principes de la physique, tels-que : l'électromagnétisme, les rayonnements, la propagation, le champ électrique. [32]

L'analyse portera sur un groupe de paramètres que nous tenterons d'évaluer pour établir un diagnostic d'intégrité. L'implémentation d'un système CND approprié va générer

une série de signaux dépendants des paramètres souhaités. Il est souvent indispensable d'effectuer une phase d'inversion, dont la complexité peut varier, pour retrouver les paramètres originaux de la pièce. [33]

On trouve parmi les principes de base du CND :

- L'intégrité de l'échantillon examiné n'est pas compromise.
- L'identification des imperfections (fissures, porosités, inclusions, délaminations).
- Identification et caractérisation des anomalies sans intervention destructrice.

Parmi les techniques traditionnelles du contrôle non destructif, on trouve :

- Les ultrasons (UT) : identification des anomalies internes grâce à la réflexion d'ondes acoustiques.

La thermographie infrarouge (IRT) : détection des anomalies thermiques en mesurant le rayonnement infrarouge émis par les surfaces.

- Le ressuage (PT) : révélation des défauts de surface par capillarité de liquides colorés ou fluorescents.

- Les courants de Foucault (ET) : détection de défauts dans les métaux conducteurs

Afin de mieux illustrer le déroulement global d'un contrôle non destructif, nous présentons ci-après un schéma synoptique résumant les étapes clés de l'analyse par CND.

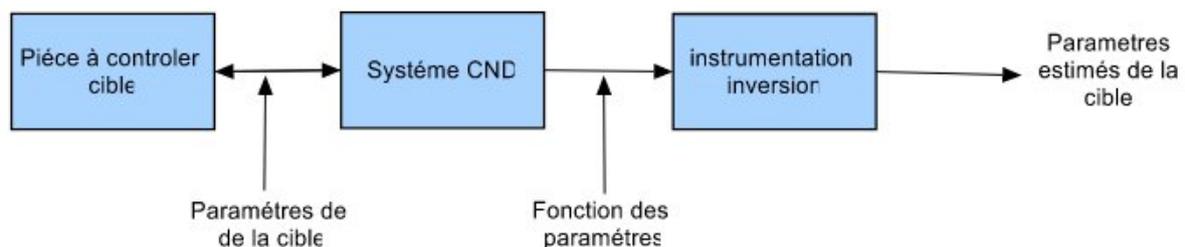


Figure II.4: Synoptiques schématise l'analyse par CND. [33]

II 3.2 Objectifs du CND :

Le contrôle non destructif a pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce comme par exemple l'épaisseur d'une paroi, la distance à un objet, les propriétés électromagnétiques constitutives du matériau ; la recherche d'une rupture de ces paramètres. Dans le deuxième cas, il s'agit en général de défauts, qui peuvent être par exemple des fissures, des inclusions, des porosités, des effets de la corrosion ou de la

fatigue mécanique. Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants. [34]

a. Détection des défauts :

Les techniques de contrôle non destructif reposent sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. Des phénomènes physiques tels que l'atténuation ou la diffraction des rayons X, la réflexion ou la diffraction des ultrasons, et la perturbation des courants de Foucault constituent le fondement des essais non destructifs, qui peuvent être utilisés pour caractériser les matériaux. En effet, le CND ne se limite pas à une simple mesure d'une grandeur physique, il s'agit aussi d'un contrôle de l'homogénéité. La cible est définie par un ensemble de paramètres que nous visons à estimer afin d'établir un diagnostic d'intégrité.

L'implémentation d'un système CND adéquat permettra de générer divers signaux en fonction des paramètres recherchés. Une phase « d'inversion » plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce. [34]

La norme EN 473 définit un certain nombre de symboles pour les méthodes usuelles (ci-dessous). Ces symboles correspondent généralement à l'abréviation de la désignation anglaise de la méthode, par exemple, le symbole PT pour le ressuage vient de Pénétrant Testing .

Tableau II.1: les Méthodes CND et son symboles

Méthode CND	Symbole
Emission acoustique	AT
Courants de Foucault	ET
Etanchéité	LT
Magnétoscopie	MT
Ressuage	PT
Radiographie	RT
Ultrasons	UT
Examen visuel	VT
Interférométrie de Speckle	ST
Thermographie	IT

b. Prévention des défaillances :

L'évitement des pannes est un élément crucial du Contrôle Non Destructif (CND), spécialement dans les domaines industriels à risque élevé tels que les raffineries, les centrales d'énergie et les infrastructures ferroviaires. En Algérie, des initiatives préventives sont

incorporées dans les stratégies de maintenance prédictive, particulièrement par des sociétés d'État comme Sonelgaz et Naftal. Par le biais d'examen fréquents par rayons X, magnétoscopie, thermographie ou ultrasons, on peut détecter la progression des défauts mineurs avant qu'ils ne se transforment en défaillances structurelles. Cette surveillance proactive diminue non seulement les interruptions inattendues, mais elle contribue aussi à améliorer la sécurité des employés et la fiabilité du matériel. Par conséquent, le CND est devenu un moyen stratégique pour la gestion des risques industriels [35]

c. Prolongation de la durée de vie des installations :

Un des atouts stratégiques du Contrôle Non Destructif (CND) est l'extension de la longévité des équipements industriels.

Le CND offre la possibilité d'allonger l'utilisation de l'équipement en toute sécurité, tout en permettant un contrôle régulier de leur état sans les endommager. En Algérie, diverses installations de production, en particulier dans les secteurs de la pétrochimie et de l'usinage mécanique, se servent des méthodes de CND pour organiser des opérations d'entretien spécifique en fonction de l'état réel des pièces. Cette approche contribue à différer le renouvellement onéreux des équipements, tout en préservant un haut degré de fiabilité dans les opérations.

La surveillance non destructive contribue également à minimiser l'usure anticipée engendrée par des interventions trop fréquentes ou inappropriées, ce qui améliore la rentabilité générale des infrastructures [36].

II.3.3 Techniques de CND :

Les techniques CND diffèrent généralement par l'énergie employée.

a. Contrôle visuel :

La méthode de vérification visuelle est la plus basique et la plus fréquemment mise en œuvre dans les procédures de Contrôle Non Destructif (CND). Elle implique une inspection visuelle d'un élément ou d'une structure pour identifier des anomalies de surface comme les fissures, déformations, corrosions ou autres irrégularités observables à l'œil nu ou grâce à des outils optiques (loupes, caméras, endoscopes). En Algérie, on observe une utilisation courante de cette technique lors des inspections de première ligne, surtout dans les secteurs métallurgiques et les sites de maintenance ferroviaire. Malgré sa simplicité, son efficacité est étroitement liée à l'expérience de l'utilisateur, aux conditions d'éclairage et à la facilité d'accès à la zone inspectée. Elle est fréquemment employée comme phase initiale avant l'utilisation de méthodes plus sophistiquées. [37]

b. Ultrasons :

L'inspection par ultrasons recourt à des ondes sonores de haute fréquence pour identifier les anomalies internes au sein des matières solides. Cette technique offre une analyse détaillée sans nuire à l'élément examiné. Elle est couramment employée dans les domaines de la pétrochimie et de l'énergie en Algérie, surtout pour le contrôle des soudures, des conduites et des structures métalliques. Elle offre l'avantage de fournir des détails exacts concernant la localisation et les dimensions des défauts internes [37]

c. Magnétoscopie :

Le contrôle magnétoscopique, également connu sous le nom de magnétoscopie, consiste à appliquer un champ magnétique sur un élément ferromagnétique. Les particules magnétiques de petite taille peuvent être utilisées pour visualiser les discontinuités de surface ou à proximité de celle-ci, qui perturbent le champ magnétique. Cette approche convient particulièrement aux matériaux métalliques employés dans les structures mécaniques, comme les essieux, les roues ou les composants de suspension. En Algérie, son utilisation est observée dans les ateliers de maintenance des chemins de fer et d'aéronautique [38]

d. Radiographie :

La radiographie est une technique d'imagerie médicale qui utilise les rayons X pour produire des images des structures internes du corps, notamment des os, des organes et des tissus mous. C'est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus couramment utilisées en radiologie. Le processus radiographique implique l'utilisation d'un appareil à rayons X qui émet un faisceau de rayons X à travers le corps du patient. Les rayons X sont absorbés de manière variable par les différentes structures corporelles, selon leur densité et leur composition. Par exemple, les os apparaissent blancs sur une image radiographique car ils absorbent plus de rayons X, tandis que les tissus mous apparaissent plus foncés car ils absorbent moins de rayons X. [38]

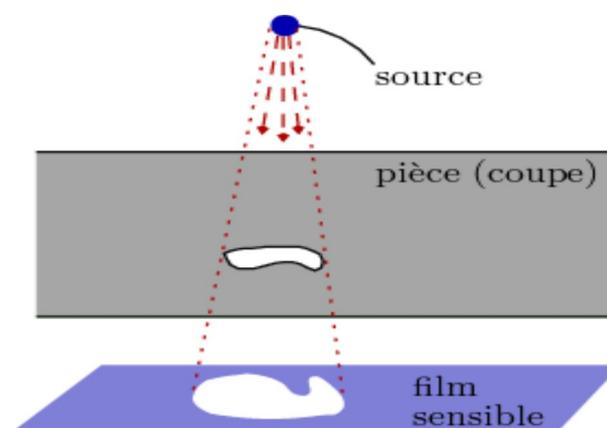


Figure II .5 : Principe de la radiographie

e. Thermographie infrarouge :

La thermographie infrarouge est une méthode de contrôle non destructif basée sur la détection du rayonnement thermique émis par les surfaces. Il permet d'identifier les changements de température qui peuvent révéler des défauts internes ou une surchauffe localisée, souvent invisible à l'œil nu. Cette technologie est utilisée, par exemple, dans le diagnostic prédictif ou l'analyse de la défaillance des turbines à gaz, en particulier dans le domaine de l'électricité. [39]

f. Ressuage :

La méthode de ressuage sert à déceler les imperfections de surface invisibles à l'œil nu, telles que les microfissures ou les porosités. Elle implique l'usage d'un liquide pénétrant sur la surface de l'objet, suivi par un révélateur qui aide à mettre en évidence les zones où le liquide a infiltré les irrégularités. Selon Bensaoula (2018), cette approche est à la fois facile à appliquer et peu coûteuse, en particulier dans les secteurs de la mécanique et de la production d'équipements en Algérie. [39]

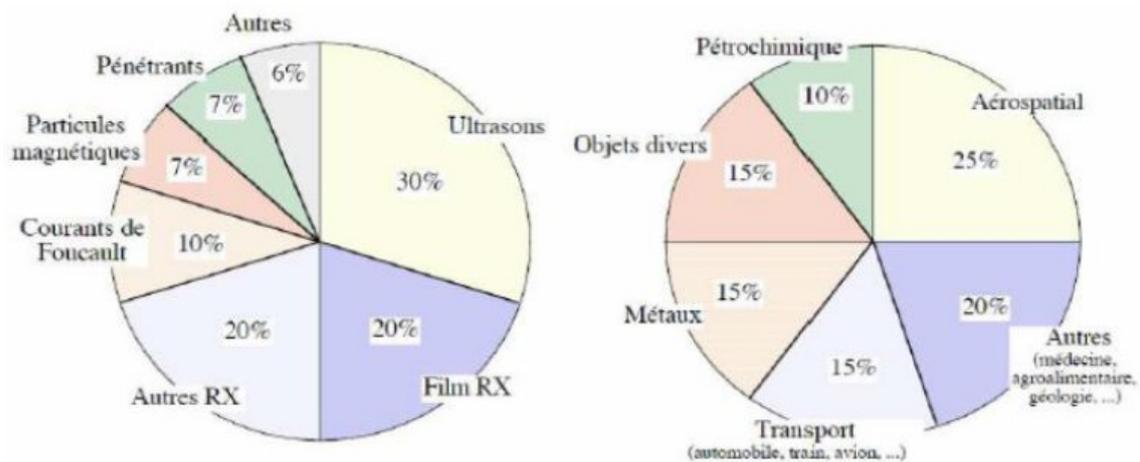


Figure II.6 : Taux d'application des principales techniques du CND [39]

II.3.4 Avantages et limites de chaque technique :

a. Contrôle visuel :

Le contrôle optique se divise en deux catégories : manuel (examen visuel) et automatisé.

L'examen visuel est la méthode la plus ancienne du CND, consistant à observer la surface d'une pièce pour détecter des anomalies visibles. Il peut être assisté par des outils comme une loupe, un éclairage laser ou un système vidéo.

Cette méthode est simple à mettre en œuvre et fournit des informations utiles sur l'état de la pièce, notamment en cas de défauts apparents (fissures, corrosion, usure, cassures).

Cependant, elle souffre de limites liées à la subjectivité de l'œil humain et à une faible productivité.

Le contrôle optique automatique, basé sur des capteurs ou balayage laser et traitement d'image, est plus fiable mais complexe et réservé à des applications spécifiques.

Toutefois, il a des limites significatives : il n'est pas capable de détecter les défauts internes ni les microfissures profondes. Sa performance est étroitement liée à l'éclairage, à la clarté et à l'expertise de l'opérateur [40]

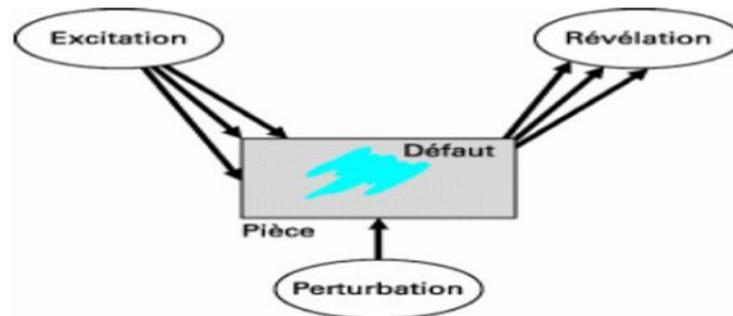


Figure II.7 : processus mis en jeu lors d'un examen visuel [40]

b. Ultrasons :

L'approche de contrôle non destructif par ultrasons présente plusieurs bénéfices, dont une sensibilité accrue pour identifier les imperfections internes, une réalisation rapide et l'option d'automatiser la procédure. Elle offre une analyse détaillée des matériaux sans détérioration de l'élément et est particulièrement adaptée aux contrôles industriels requérant exactitude et reproductibilité. L'adaptation de la méthode à différents matériaux et géométries est rendue possible grâce à l'emploi de divers types d'ondes (P, S, Rayleigh) et de transducteurs (monoélément, multiéléments, EMAT, laser). Cependant, cette méthode a aussi ses restrictions. Elle requiert une accessibilité facile aux surfaces à vérifier et l'emploi d'un couplant pour garantir la diffusion des ondes. En outre, elle présente une efficacité moindre dans l'identification des défauts de surface et possède une précision restreinte pour déterminer la taille précise des discontinuités. Et elle n'est pas adaptée aux matériaux possédant une forte atténuation acoustique, ce qui restreint son champ d'application.

Cependant, cette méthode requiert des opérateurs compétents et un soin approprié de la surface. Elle peut également être réceptive à la géométrie complexe des pièces, ce qui rend l'interprétation des résultats plus ardue. [41]

c. Magnétoscopie :

La magnétoscopie est une technique d'inspection non destructive particulièrement efficace pour identifier les irrégularités de surface ou sub-superficielles dans des matières

ferromagnétiques comme le fer, l'acier et la fonte. Elle sert à détecter des imperfections très subtiles, souvent imperceptibles à l'œil nu, par l'amasement de particules magnétiques sur les zones où il y a des fuites de flux magnétique. Cette méthode propose une sensibilité adéquate et une détection directe des anomalies, tout en étant assez rapide et facile à appliquer.

Toutefois, elle comporte d'importantes restrictions : elle est uniquement applicable aux matériaux magnétiques et requiert un matériel particulier pour la magnétisation et le déploiement des particules. En outre, il est fréquent que les composants nécessitent une démagnétisation après l'inspection, ce qui introduit un processus additionnel. Finalement, la méthode reste limitée à la détection de défauts proches de la surface et ne permet pas l'évaluation en profondeur des matériaux. [41]



Poussières magnétiques.

Appareils de magnétisation.

Figure II.8 : poussières magnétiques et appareils de magnétisation [41]

d. Radiographie :

La radiographie industrielle constitue une méthode performante pour l'inspection des défauts internes profonds dans les matériaux solides. En utilisant des rayons X ou des rayons gamma, elle permet de produire des images de haute résolution révélant la présence de lacunes, de porosités ou d'inclusions invisibles à l'œil nu. L'un des grands avantages de cette procédure est la possibilité de conserver les images obtenues à des lames de documentation ou d'archivage. La radiographie est largement normalisée et reconnue pour sa précision dans des secteurs évalués comme l'aéronautique, le nucléaire et la pétrochimie. Toutefois, elle présente plusieurs confinements :

Elle nécessite des dispositifs de sécurité stricts en raison de l'exposition aux rayonnements ionisants, et l'équipement est généralement coûteux et encombrant. Par ailleurs, le temps d'exposition peut être relativement long selon l'épaisseur et la densité du matériau, ce qui réduit parfois l'efficacité des inspections dans certaines applications sur emplacement. [42]

e. Thermographie infrarouge :

La thermographie infrarouge (IRT) est une méthode non destructive qui détecte à distance les anomalies thermiques en mesurant le rayonnement infrarouge émis par un objet. Elle est particulièrement utile en maintenance prédictive pour les installations électriques et mécaniques, offrant une visualisation immédiate des zones de surchauffe. Bien que sûre (sans rayonnement ionisant), son efficacité dépend d'un gradient thermique suffisant et peut être perturbée par des conditions environnementales (vent, soleil) ou les matériaux à faible émissivité. Une calibration précise et une expertise dans l'interprétation des images sont essentielles pour des résultats fiables. [42]

f. Ressuage :

La technique de ressuage offre de multiples bénéfices qui justifient son emploi répandu dans le secteur du contrôle non destructif. Elle est facile à appliquer, n'exige que peu de matériel, et assure une identification efficace des discontinuités qui se manifestent en surface, même sur des éléments de difficile accès. En outre, elle est applicable à une vaste gamme de matériaux, qu'ils soient de nature ferromagnétique ou pas. Cependant, cette méthode présente également des contraintes significatives : elle n'est pas capable de détecter les défauts internes ou dissimulés, et son efficacité est largement tributaire de la propreté de la surface examinée. En présence de contaminants, d'oxydes ou de couches de peinture, le pénétrant ne peut pas s'introduire correctement. De plus, la technique peut se révéler lente en raison de plusieurs phases requises, et son empreinte écologique doit être considérée en raison de l'utilisation de produits chimiques. [43]

II.4 Intégration du CND dans la stratégie de maintenance :

L'inclusion du CND dans la stratégie de maintenance moderne a pour objectif de transiter d'une maintenance corrective vers une maintenance préventive et prédictive. Les techniques de contrôle non destructif facilitent l'identification des anomalies ou détériorations possibles des appareils sans les altérer, diminuant par conséquent les interruptions imprévues, les dangers potentiels, et les dépenses associées.

Le CND s'intègre essentiellement dans la maintenance conditionnelle, fournissant des informations détaillées sur l'état actuel des composants. Cela favorise une planification plus efficace des interventions et prolonge la longévité des équipements.

Illustrations de l'intégration stratégique :

-Suivi régulier de la corrosion dans les récipients sous pression.

-Repérage des fissures dans les structures métalliques des équipements électriques ou mécaniques. [44]

II.4.1 Choix des techniques selon les besoins :

Plusieurs éléments déterminent la sélection de la méthode de CND :

- Le type de matériau (métal, composite, etc.).
- La configuration et la facilité d'accès à la pièce.
- Le genre de vice recherché (fissuration, corrosion, porosité, etc.).
- Le degré de précision nécessaire et le coût associé à la méthode.

Méthodes fréquemment utilisées :

- Ultrasons (UT) : Excellente capacité de pénétration, identification interne des fissures.
- Radiographie (RT) : Inspection des défauts internes, toutefois onéreuse.
- Thermographie infrarouge (IRT) : Analyse des variations de température en surface pour détecter des anomalies thermiques liées à des défauts internes ou de surface.
- Magnétoscopie (MT) : Utilisée pour les matériaux ferromagnétiques, elle permet de détecter les fissures à la surface.
- Ressuage (PT) : Efficace pour les défauts ouverts sur des matériaux non magnétiques.
- Courants de Foucault (ET). [45]

II.4.2 Exemples d'applications industrielles :

Application des techniques de contrôle non destructif (CND) dans la stratégie de maintenance des équipements électriques : Cas de SONELGAZ Ouargla est situé dans la wilaya d'Ouargla, à l'intérieur des installations de SONELGAZ qui sont spécialisées dans la transmission d'électricité à très haute tension (HTB). Dans cette zone, essentielle pour l'approvisionnement en électricité du sud de l'Algérie, des opérations fréquentes de maintenance conditionnelle sont effectuées en utilisant des caméras thermographiques portatives, conformément aux instructions du dispositif 1275 concernant l'innovation et le développement de projets technologiques dans les secteurs clés. Ici, la thermographie infrarouge est employée pour contrôler la température des lignes HTB, des isolateurs, des liaisons de barres omnibus et aussi des transformateurs. Cette technique facilite l'identification anticipée des zones à risque susceptibles de générer des arcs électriques, des courts-circuits ou des pertes d'isolation, tout en prévenant les interruptions imprévues du fonctionnement des équipements. [46]

L'analyse des images thermiques produites par des caméras de haute définition permet non seulement une localisation précise des anomalies, mais aussi une appréciation de leur

gravité. Cette méthode, appliquée sur le terrain lors de la phase pratique de notre projet, met en évidence l'intérêt de l'inspection thermovision comme instrument d'aide à la décision pour organiser les actions de maintenance corrective. L'exemple d'Ouargla démontre ainsi de manière tangible comment l'inspection non destructive par caméra thermographique favorise la fiabilité, la sécurité et l'opération continue du réseau HTB, tout en étant aligné sur les buts stratégiques de mise à jour des infrastructures électriques nationales. [46]

II.4.3 Cas des réseaux électriques :

Dans le cadre des réseaux électriques à Haute Tension B (HTB), la fiabilité des équipements constitue un enjeu crucial pour assurer la continuité de l'approvisionnement en énergie, surtout dans les zones délicates telles que le sud algérien. L'utilisation de méthodes de contrôle non destructif, notamment la thermographie infrarouge, offre la possibilité de contrôler la température des composants essentiels tels que les raccords de fixation et de liaisons assurant la continuité de service dans les lignes et les postes HTB, sans nécessité de la coupure de l'électricité.

Notre initiative, qui s'inscrit dans le programme national 1275 pour l'innovation technologique, répond directement à cette question. En effet, l'utilisation du contrôle thermovision pour la maintenance conditionnelle et prévisionnelle du réseau HTB vise à prouver l'efficacité de cette technologie en tant qu'instrument de diagnostic préventif.

L'étude de cas réalisée sur site à Ouargla, dans une installation SONEGAS, illustre concrètement l'impact positif de l'imagerie thermique dans la détection des défauts invisibles à l'œil nu, contribuant ainsi à une gestion plus intelligente et anticipative du réseau électrique. [46]

II.5 Normes et réglementations :

II.5.1 Références normatives en maintenance et CND :

L'application du contrôle non destructif (CND) dans l'entretien conditionnel des appareils électriques HTB nécessite l'observance de standards techniques rigoureux. Ces standards assurent non seulement la sûreté des opérations, mais également la qualité et la répétabilité des contrôles thermographiques.

La norme NF EN 13187 est mise en œuvre pour les évaluations qualitatives à l'aide de la thermographie, alors que la norme ISO 18436-7 régit l'habilitation des opérateurs qui emploient la thermographie dans le contexte d'une surveillance conditionnelle.

Tableau II.2 : Exemples de normes de référence en maintenance par thermographie [47]

Norme	Objet	Domaine
NF EN 13187	Inspection qualitative par thermographie infrarouge	Inspection thermique (CND)
ISO 18436-7	Compétences du personnel en thermographie	Maintenance prédictive
ISO 9712	Certification du personnel en CND (toutes méthodes)	Tous secteurs industriels
ISO 17359	Stratégies générales de surveillance de condition	Maintenance conditionnelle

II.5.2 Normes spécifiques à certains secteurs (ex : énergie, aéronautique...) :

Chaque secteur industriel possède ses propres normes techniques, adaptées à ses contraintes opérationnelles. Dans le **secteur de l'énergie électrique**, notamment pour les réseaux HTB, les normes de l'IEC jouent un rôle clé pour encadrer la conception, la maintenance et le contrôle.

Tableau II. 3: Comparaison entre normes selon les secteurs [48]

Secteur	Norme	Domaine d'application	Particularité
Énergie (HTB)	IEC 60076	Transformateurs de puissance	Températures de fonctionnement, essais diélectriques
Énergie (HTB)	IEC 60826	Lignes aériennes HT	Calcul mécanique, contraintes climatiques
Aéronautique	NAS 410 / EN 4179	Qualification du personnel CND	Haut niveau d'exigence, traçabilité
Industrie générale	ISO 9712	Certification du personnel en contrôle non destructif	Reconnu internationalement

- Application au contexte algérien : SONELGAZ et la décision 1275 :

Dans le cadre algérien, les normes concernant l'entretien sont en constante évolution afin d'incorporer les technologies de pointe et de favoriser l'innovation. La résolution 1275 du MESRS (ministère de l'enseignement supérieur) encourage la mise en œuvre de projets technologiques pratiques, particulièrement dans des domaines clés tels que l'énergie.

La société nationale SONELGAZ, responsable du transport d'électricité haute tension, met en œuvre des procédures de maintenance conditionnelle basées sur la thermographie infrarouge, conformément aux standards IEC et aux buts de modernisation du pays. [49]

Tableau II. 4: Cadre normatif et réglementaire algérien [49]

Cadre	Contenu	Application concrète
Décision 1275 (2022)	Soutien aux projets de fin d'étude innovants, création de startups	Intégration de la thermovision dans le réseau HTB
Cahiers des charges SONELGAZ	Protocoles internes de maintenance HTB, inspections programmées	Inspections thermographiques à Ouargla
Normes IEC (référence)	Normes techniques internationales adoptées localement	IEC 60076, IEC 60826

II.6 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'établir les fondements théoriques et pratiques de la maintenance industrielle moderne, en mettant en évidence l'importance stratégique du contrôle non destructif (CND). Après avoir défini les différents types de maintenance (corrective, préventive, prédictive et conditionnelle), nous avons souligné leur impact sur la disponibilité des équipements, la sécurité et la réduction des coûts. L'organisation de la maintenance, notamment via la GMAO, s'est révélée essentielle pour une gestion optimisée.

Le CND a été présenté comme un outil clé permettant d'évaluer l'intégrité des installations sans les endommager, favorisant ainsi la détection précoce des défauts et l'optimisation de la durée de vie des équipements. Les différentes méthodes (visuel, ultrasons, magnétoscopie, thermographie, etc.) ont été comparées selon leurs avantages et limites, en fonction des contextes industriels.

Ainsi, ce chapitre a posé les bases nécessaires pour comprendre l'articulation entre la maintenance industrielle et les CND, démontrant leur rôle central dans l'efficacité, la sécurité et la durabilité des installations.

Chapitre III
Contrôle par caméra
thermographie
(thermovision)

Chapitre III: Contrôle par caméra thermographie (thermovision)

III.1.Introduction :

La température d'un corps, une grandeur physique essentielle qui caractérise son niveau énergétique, se mesure traditionnellement par contact avec des thermomètres. Cependant, pour des applications spécifiques comme la détection de hautes températures, des appareils tels que les pyromètres sont utilisés. L'évolution de cette technique a donné naissance à la caméra infrarouge, un équipement sophistiqué qui associe un système radiométrique de captation spatiale à un ordinateur. Ce ordinateur a la capacité de convertir les rayonnements infrarouges en points lumineux et en données de température, offrant ainsi une visualisation et une quantification précises des températures d'une scène thermique. Cette technique, connue sous le nom de thermographie infrarouge, s'est imposée comme un outil indispensable dans de nombreux domaines, et notamment la maintenance industrielle.

III .2.Définition :

La thermographie infrarouge (IRT) est la science de l'acquisition et de l'analyse d'informations thermiques à l'aide d'équipements d'imagerie thermique à distance. La norme française A 09-400 définit la thermographie infrarouge comme « la technique d'obtention d'images thermiques de scènes thermiques dans le domaine spectral infrarouge à l'aide d'un équipement approprié ». La technologie d'imagerie thermique infrarouge est utilisée dans le domaine de la surveillance de l'état pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le processus de production et pour minimiser les coûts de maintenance.

En thermographie infrarouge, on travaille généralement dans une bande spectrale qui s'étend de 2 à 15 μm et plus particulièrement dans les fenêtres 2-5 μm et 7,5-13 μm .

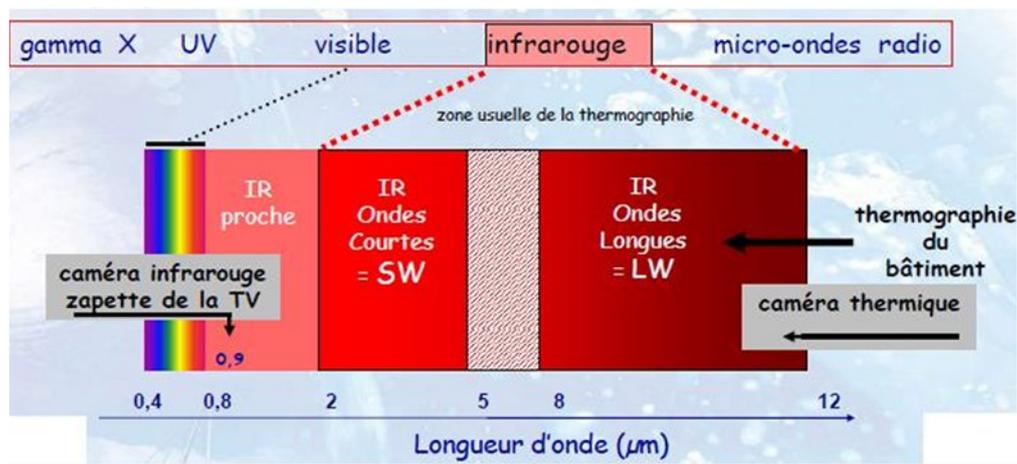


Figure III.1: Bande spectrale utilisée en thermographie IR [50]

III.3. Principe de Fonctionnement :

Le principe de travail d'une caméra thermographique repose sur le fait que tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu (-273.15 °C ou 0 Kelvin) émet un rayonnement électromagnétique dans la gamme de l'infrarouge. Plus la température de ce corps est élevée, plus l'intensité du rayonnement infrarouge émis est forte.

La caméra thermographique est conçue pour capturer ce rayonnement infrarouge invisible à l'œil humain. Elle ne mesure pas directement la température, mais plutôt l'énergie infrarouge rayonnée par la surface d'un objet.

Voici les étapes clés du principe de fonctionnement :

- **Rayonnement infrarouge et température de surface :** Chaque objet émet un spectre de rayonnement électromagnétique qui dépend de sa température. Pour des températures courantes dans les applications industrielles, une part significative de cette énergie est émise dans le domaine de l'infrarouge thermique. La caméra détecte cette énergie infrarouge émise par la surface de l'objet.
- **Émissivité :** L'émissivité est un facteur crucial. C'est une propriété de la surface d'un matériau qui décrit son efficacité à émettre de l'énergie thermique par rayonnement. Une surface parfaitement noire (corps noir idéal) a une émissivité de 1, ce qui signifie qu'elle émet le maximum de rayonnement possible pour une température donnée. Les matériaux réels ont une émissivité inférieure à 1. La caméra prend en compte ce paramètre pour convertir le rayonnement infrarouge détecté en une estimation de la température de surface. Sans une valeur d'émissivité correcte, les mesures de température peuvent être inexactes.
- **Conversion du rayonnement thermique en image visible :**
 - a) **Captation :** Le rayonnement infrarouge émis par la scène est collecté par l'objectif de la caméra, qui est transparent aux infrarouges (souvent en germanium).
 - b) **Détection :** Ce rayonnement est ensuite dirigé vers un capteur IR (ou détecteur matriciel), composé de milliers d'éléments sensibles à l'infrarouge. Chaque élément du capteur absorbe le rayonnement infrarouge et le convertit en un signal électrique proportionnel à l'intensité du rayonnement reçu.
 - c) **Traitement du signal :** Les signaux électriques de chaque élément du capteur sont numérisés et traités par un ordinateur intégré. Ce ordinateur applique des algorithmes complexes qui prennent en compte l'émissivité du matériau, la température ambiante,

et la distance à l'objet pour convertir les intensités de rayonnement en valeurs de température.

- d) Affichage de l'image thermique :** Enfin, ces valeurs de température sont assignées à des couleurs sur une palette prédéfinie (par exemple, du bleu pour les zones froides au rouge/blanc pour les zones chaudes). L'ensemble de ces points colorés forme une image thermique (ou thermogramme) qui est affichée sur l'écran de la caméra, rendant ainsi visible la distribution de la chaleur sur la scène observée.

En somme, la caméra thermographique agit comme un "œil" qui perçoit la chaleur sous forme de rayonnement infrarouge et la traduit en une image visuelle intelligible pour l'opérateur, permettant de détecter les variations de température et d'identifier les anomalies thermiques.

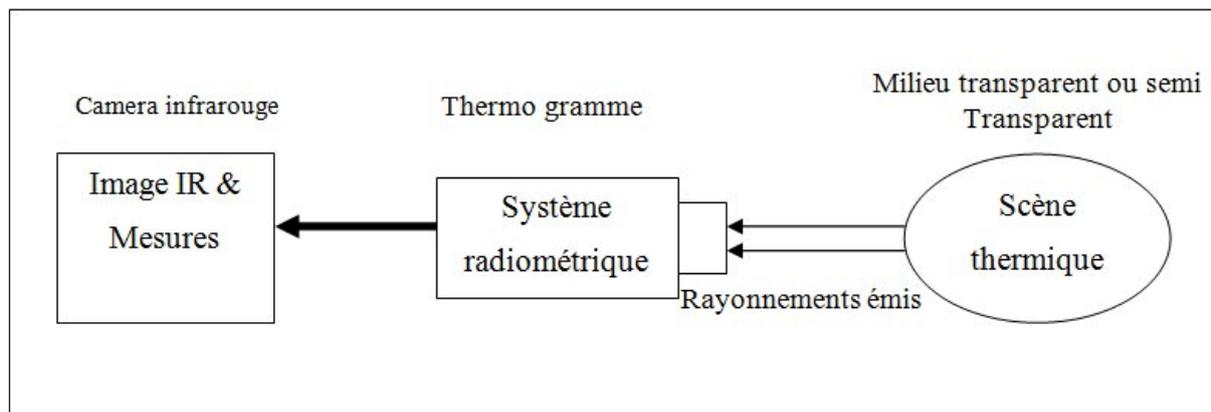


Figure III.2: Représentation du principe de la thermographie infrarouge

III .4. Techniques d'analyse des images thermiques :

Dans l'analyse d'images thermiques, il est souvent nécessaire de détecter des zones spécifiques qui se comportent différemment du reste de l'image. Les imageurs thermiques disposent d'un certain nombre de fonctionnalités qui peuvent augmenter artificiellement le contraste local pour faciliter l'inspection de ces zones. Les trois caractéristiques les plus importantes pour améliorer les images de surfaces de verre chaudes sont les cadres thermiques, les isothermes et les palettes de couleurs. [51]

Cette figure III.3 présente un flux de travail méthodique et exhaustif pour une inspection par infrarouge, depuis la préparation de l'équipement jusqu'à la création et la distribution des rapports finaux. Il met en lumière le rôle crucial de cette technologie dans la fourniture d'informations précises et vitales sur l'état des systèmes et des équipements.

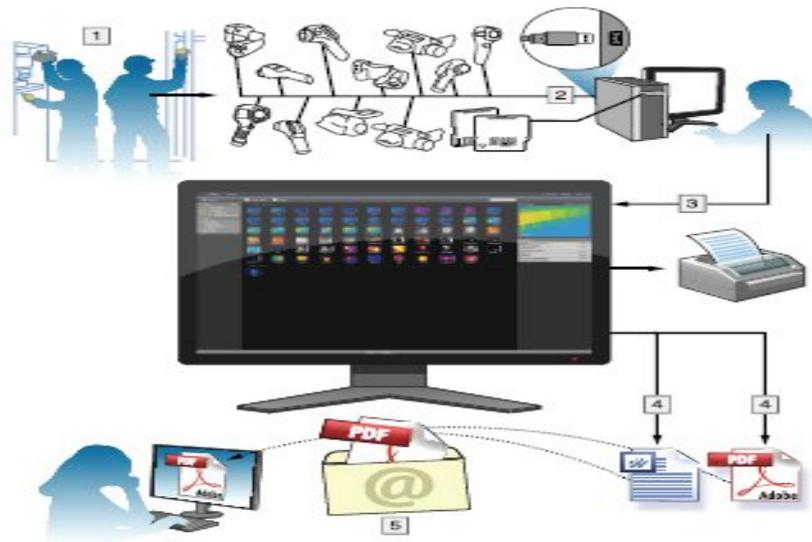


Figure III.3 : Exemple de flux de travail d'inspection infrarouge

Ces fonctionnalités sont utilisées pour mettre en évidence les différences de température et les changements de couleur sur la surface du verre. Leur manipulation permet une analyse précise des images et aide à l'interprétation des données thermiques :

1) Cadrage thermique (Thermal Framing) :

Le cadrage thermique, ou "thermal framing", est une technique d'optimisation du contraste d'une image thermique en ajustant l'échelle des couleurs. Cette fonction exploite les contrôles de niveau et de gain de la caméra infrarouge. L'objectif est de concentrer la plage de couleurs de la palette sur la zone d'intérêt (ROI) de l'image, afin d'en maximiser la visibilité et l'analyse. Les zones de l'image moins pertinentes peuvent être délibérément exclues de cette échelle, apparaissant alors en noir ou blanc pour indiquer qu'elles sont en dehors de la plage de températures représentée. [52]

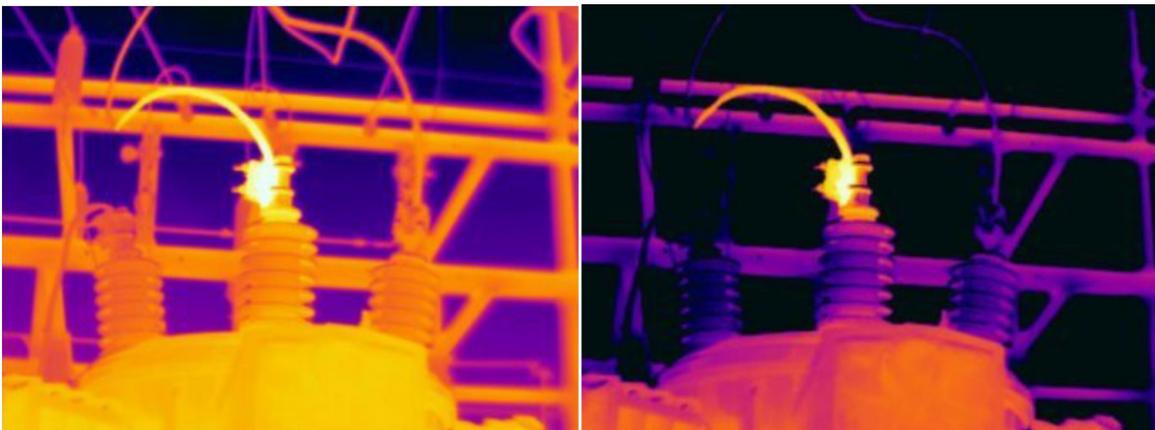


Figure III.4: Deux images infrarouge d'un isolateur dans une ligne électrique avec une différence de contraste

Ci-dessus deux images infrarouges d'un isolateur dans une ligne électrique. Pour faciliter l'analyse des variations de température dans l'isolateur, l'échelle de température sur l'image de droite a été changée à des valeurs proches de la température de l'isolateur.

2) Isotherme :

L'isotherme est une fonction en thermographie qui permet de mettre en évidence des plages de températures spécifiques. Elle agit en remplaçant un ensemble de couleurs dans la palette thermique par une nouvelle couleur, généralement très contrastée, afin de marquer visuellement un intervalle de température apparente égale. Cette fonction ne se contente pas de changer toutes les couleurs, elle ciblera une plage précise et la substituera par une couleur qui se distinguera nettement des autres couleurs de la palette. L'isotherme peut être ajustée en la déplaçant verticalement sur l'échelle des températures, et sa largeur (l'étendue de la plage de températures qu'elle représente) peut être augmentée ou diminuée en fonction des besoins d'analyse de l'utilisateur. [53]

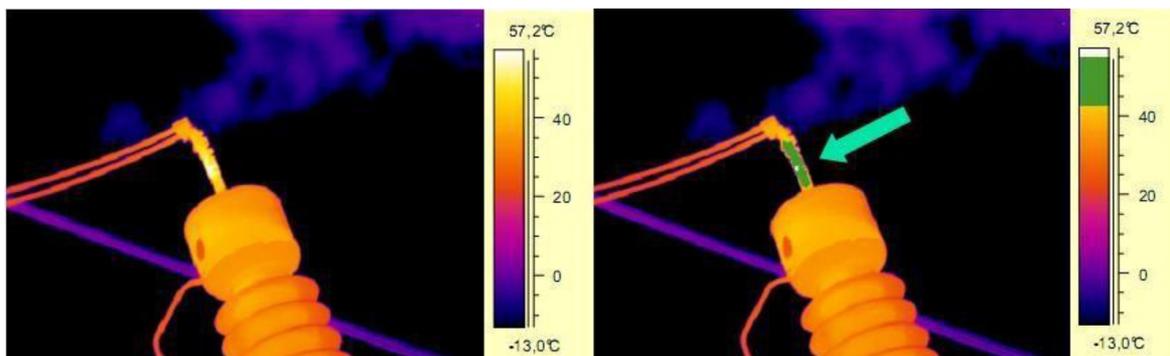


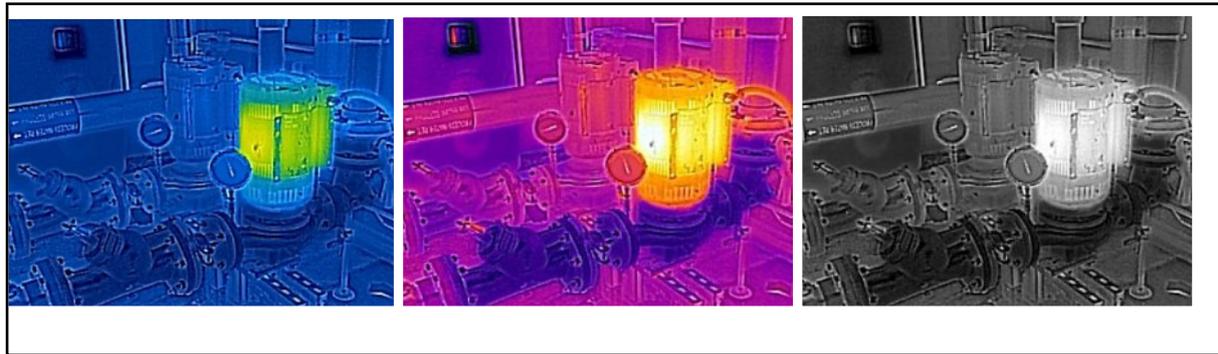
Figure III.5: Tête de transformateur haute tension avec une isotherme

3) Palette de Couleurs (Collor Palette) :

La palette de couleurs en thermographie est un outil essentiel qui attribue des couleurs spécifiques à des niveaux de température apparente prédéfinis. Cela crée un contraste visuel qui permet de distinguer facilement les différentes températures au sein d'une image thermique. La clarté de ce contraste dépend directement des couleurs choisies pour la palette. Généralement, une image thermique peut afficher jusqu'à 256 nuances de couleur ou de gris simultanément. Dans le cas d'une échelle de gris, l'extrémité la plus froide est représentée par le noir, et la couleur s'éclaircit progressivement à travers les 256 niveaux pour atteindre le blanc à l'extrémité la plus chaude. Il est important de noter qu'avec 256 nuances, le contraste entre deux niveaux de gris adjacents sera très subtil

D'autre part, en utilisant une image en couleur, une gamme plus étendue de couleurs peut être exploitée pour obtenir un meilleur contraste. Les couleurs doivent être soigneusement choisies afin de créer une image homogène et agréable à l'œil.

La **Figure III.6** montre un exemple de thermogramme de moteurs de pompe pris avec une palette de couleurs variée. [54]



Froid

Fer

Gris

Figure III.6: Exemples de différentes palettes sur une pompe

III.5 - Moyens de mesure :

Pour évaluer l'état de santé d'une installation et prévenir les risques (incendie, arrêt de production, etc.), il est impératif d'observer et de mesurer. Ces actions permettent d'assurer une analyse fiable lorsque l'état de santé est corrélé aux températures.

Matériel nécessaire pour l'analyse thermique :

Pour réaliser une analyse d'images thermiques, l'équipement essentiel comprend une caméra infrarouge (généralement 3-5 ou 8-12 μm) avec une résolution thermique de 0,1°C à 20°C, ainsi qu'une unité de traitement d'images. Il est également nécessaire de disposer d'un magnétoscope ou d'un système de stockage numérique pour enregistrer les données sur site. Un ordinateur est requis pour l'analyse des résultats en temps réel, tandis qu'un ensemble de mesures portatif doit être utilisé pour mesurer la température ambiante, la vitesse du vent, etc. Des logiciels d'analyse spécifiques, tels que Thermogramme, The monitor ou TIC8000, peuvent aussi être employés en laboratoire. Ce matériel est mobile et portable, ou peut être monté sur un chariot, et ne nécessite pas d'alimentation externe. Il est important de noter que l'ensemble du matériel infrarouge doit être étalonné annuellement en respectant les normes [55]

Les deux instruments les plus connus sont :

III.5.1. Le thermomètre infrarouge :

Le thermomètre infrarouge est particulièrement recommandé dans les situations où la mesure de température par contact direct est impossible. Son usage est privilégié dans les cas suivants

- Lorsqu'une réponse rapide est essentielle.
- Pour la mesure sur des objets en mouvement.

- Pour des mesures à travers une fenêtre ou un autre obstacle transparent.
- Si le contact risquerait de détruire le thermomètre.
- En présence d'un profil de température complexe sur la surface.
- Si le contact physique pourrait affecter la température de l'objet mesuré. [56].



Figure III.7: Thermomètre infrarouge

III.5.2. La Caméra Infrarouge :

La caméra infrarouge ne mesure pas directement les températures, mais plutôt les rayonnements émis par les objets. Cependant, l'image thermique qu'elle capte peut être transformée en thermogramme (une représentation des températures) par le thermographe. C'est précisément ce que l'on recherche pour évaluer l'état de santé des équipements et surtout anticiper les problèmes futurs dans le cadre de la maintenance prédictive. Le thermographe, à l'aide de sa caméra, visualise les objets dans le spectre infrarouge et identifie ceux qui présentent des températures anormalement élevées ou basses. Une fois ces anomalies détectées, le thermographe peut quantifier les températures et fournir une cartographie détaillée de leur répartition.



Figure III.8: Caméra Infrarouge (FLIR)

III.6. Domaines d'application :

La thermographie infrarouge est une technologie permettant de détecter et de mesurer le rayonnement thermique émis par les objets. Il a de larges applications dans divers domaines. Voici quelques exemples :

- ❖ **Maintenance prédictive** : La thermographie infrarouge est utilisée pour inspecter et surveiller les installations électriques, mécaniques et thermiques. Il permet de détecter les points chauds, les surcharges, les pertes d'efficacité et les pannes potentielles, permettant ainsi de planifier les interventions de maintenance avant que les pannes ne surviennent.
- ❖ **Construction** : Dans le secteur de la construction, la thermographie infrarouge est utilisée pour identifier les défauts d'isolation, les infiltrations d'air, les fuites d'eau, les ponts thermiques et les problèmes liés à la ventilation. Ces informations permettent d'économiser de l'énergie, d'améliorer le confort des occupants et d'optimiser la performance énergétique du bâtiment.



Figure III. 9:Voici deux images infrarouge d'un bâtiment

- ❖ **Sécurité** : La technologie d'imagerie thermique infrarouge est utilisée dans les applications de sécurité pour la surveillance et la détection d'anomalies. Il peut localiser les personnes cachées dans l'obscurité, détecter les incendies, surveiller les infrastructures critiques telles que les centrales électriques et les pipelines, et contrôler l'accès aux zones sensibles.
- ❖ **Industrie** : Dans le secteur industriel, la thermographie infrarouge est utilisée pour examiner les procédés de fabrication, les équipements industriels, les lignes de production et les systèmes de refroidissement. Elle facilite la détection des surchauffes, des problèmes de qualité, des pannes d'équipement et des fuites de chaleur, améliorant ainsi l'efficacité et la fiabilité des opérations industrielles. [57][58]



Figure III.10: Inspection thermique d'un tableau électrique intérieur (industriel)

III.7. Avantages et limites de la thermographie infrarouge :

- Avantages :

- ✓ Contrôle Non Destructif (CND).
- ✓ **Inspection sans contact** : Permet une analyse à distance des équipements, même ceux soumis à des conditions de fonctionnement non maximales.
- ✓ **Rapidité et précision du diagnostic** : Détection rapide et précise des anomalies grâce à la sensibilité accrue des scanners infrarouges modernes.
- ✓ **Fiabilité des mesures** : Les appareils à haute performance garantissent des mesures thermiques exactes, améliorant ainsi la crédibilité des résultats.
- ✓ **Sécurité lors de l'inspection** : Évaluation des températures à distance, réduisant les risques pour les techniciens.
- ✓ **Maintenance prédictive** : Identification précoce des composants défectueux, permettant :
 - Une réduction des coûts de maintenance directe.
 - Une amélioration de la fiabilité des installations.
- ✓ **Maintenance préventive** : Détection proactive des anomalies potentielles et évaluation de leur gravité, ce qui permet :
 - D'optimiser la fréquence des inspections périodiques.
 - De prévenir la dégradation progressive des équipements.
- ✓ **Rentabilité économique** : Coût réduit par rapport aux méthodes de maintenance traditionnelles et aux pertes liées aux arrêts de production.
- ✓ **Vision nocturne** : La caméra infrarouge permet une observation efficace dans l'obscurité totale, en détectant le rayonnement thermique émis par les objets au lieu de la lumière visible. Cette capacité en fait un outil précieux pour les applications de surveillance nocturne et d'inspection dans des environnements à faible luminosité.

- ✓ **Apport des logiciels de traitement d'images thermiques :** L'utilisation de logiciels spécialisés, tels que FLIR Tools, renforce considérablement les performances de la thermographie. Ces outils offrent :
 - Une analyse détaillée et automatisée des images thermiques.
 - La génération de rapports professionnels avec localisation précise des points chauds.
 - La comparaison facile entre les mesures actuelles et les valeurs de référence.
 - Ces fonctionnalités contribuent à une meilleure prise de décision et à une planification efficace des interventions de maintenance. [59] [60]

- Limites :

- ✓ Nécessité de former les techniciens à l'utilisation efficace de la caméra thermique et des logiciels associés.
- ✓ Ne détecte que les défauts générant une différence de température (non visible = non détecté).
- ✓ Influencée par les conditions environnementales (vent, ensoleillement).
- ✓ Requiert une bonne calibration et expérience dans l'interprétation des images

III.8. Critères de sévérité thermique des composants sous charge nominale :

Dans le cadre de la maintenance conditionnelle par analyse thermique (thermographie infrarouge), l'écart de température entre les composants similaires ou symétriques permet de détecter des anomalies de fonctionnement. Afin de hiérarchiser les défauts détectés et de prioriser les interventions, un référentiel de sévérité basé sur la valeur de l'écart thermique sous charge nominale est utilisé.

(ΔT) (Delta T) Élévation de température au-dessus de l'ambiance ou de la référence : C'est souvent le facteur le plus critique.

Le tableau III.1 ci-dessous présente les critères d'évaluation selon l'ampleur de cet écart, en identifiant le niveau de gravité et l'action corrective recommandée

Tableau III.1: Ecart de température (ΔT) et Critère de sévérité

Écart de température (ΔT)	Critère de sévérité
Moins de 10 °C (<10°C)	Il peut s'agir d'un défaut. En cas de doute, une surveillance est recommandée.
De 10 à 20 °C	Défaut de niveau 1 (confirmé). Une intervention corrective doit être planifiée.
De 20 à 40 °C	Défaut de niveau 2 (grave). Une intervention urgente est requise, dans un délai d'une semaine à quinze jours.
.Plus de 40 °C (>40°C)	Défaut de niveau 3 (critique). Une intervention immédiate est nécessaire.

Dans les cas où le composant présente une différence de température (ΔT°) supérieure à 40°, un niveau seuil doit être respecté ; dans le cas contraire, une gravité est constatée.

Tableau III.2: Analyse des écarts sévérité, causes et actions correctives

Écart ΔT (°C)	Critère de sévérité	Cause probable	Action recommandée
10 – 25	Probable	Connexion légèrement desserrée	Surveillance régulière
25 – 40	Important	Surcharge modérée ou début d'usure	Inspection recommandée
40 – 70	Obligatoire	Mauvais contact, défaillance partielle	Réparation urgente
> 70	Immédiat	Court-circuit, risque d'incendie	Arrêt immédiat et intervention rapide

III.9. Analyse de certains cas à l'aide d'une caméra thermique infrarouge :

Cette étude a pour objectif d'analyser des cas réels à l'aide d'une caméra thermique. Des images thermiques de composants électriques en fonctionnement ont été enregistrées et analysées.

Cette approche permet de détecter précocement les défauts potentiels, contribuant ainsi à l'amélioration de la maintenance préventive, à la réduction des pannes imprévues et au renforcement de la sécurité et de la fiabilité du système.

III.9.1. Étude de cas sur un pylône d'une ligne de transport de l'électricité :

1. Présentation du 1^{er} cas pratique

La campagne de thermographie infrarouge a été réalisée le 06 mai 2025 à 10h48 sur un pylône électrique situé dans la région de Metlili, dans la wilaya de Ghardaïa. Le pylône fait partie du réseau de transport HTA (Haute Tension A) de tension 30KV et supporte plusieurs conducteurs aériens. L'objectif de cette inspection était de détecter d'éventuelles anomalies thermiques pouvant compromettre la sécurité ou la fiabilité de l'installation.

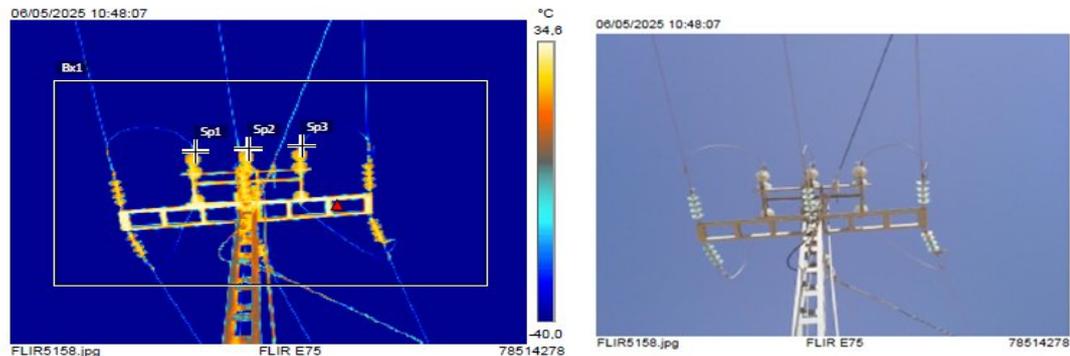


Figure III. 11: un pylône électrique situé dans la région de Metlili

2. Matériel et outils utilisés :

- Caméra thermique utilisée : FLIR E75
- Logiciel d'analyse : FLIR Tools
- Autres équipements : Ordinateur pour l'analyse, équipements de sécurité (casque, gants, harnais).

3. Déroulement de la campagne thermographique

L'inspection a été effectuée sous un climat chaud et sec typique du sud algérien (wilaya de Ghardaïa), avec une température ambiante avoisinant les 27,5°C.

Les mesures ont été prises à une distance normalisée en respectant toutes les précautions de sécurité, Avec la caméra thermographique nous avons capturé plusieurs images à différents angles pour une couverture thermique complète.

4. Résultats obtenus et interprétation :

Date et heure de l'opération : Le 06/05/2025 à 10h : 48m : 07s

- **Image supérieure** : Vue thermique (infrarouge) d'un pylône électrique (...kV), montrant clairement un échauffement dans la zone des isolateurs et des connexions principales en haut du poteau.
- **Tableau de mesures** : Fournit les relevés de température pour des points spécifiques (Bx1, Sp1, Sp2, Sp3) et des paramètres tels que l'émissivité et la température réfléchie.
- Bx1 : Max 39.4°C. (C'est la température maximale dans la zone définie par le cadre.)

- Sp1 : 26.0°C.
- Sp2 : 29.0°C.
- Sp3 : 28.3°C.
- Émissivité : 0.97 (bonne valeur indiquant des lectures précises).
- Température réfléchi : 20°C (température ambiante).

Tableau III. 3: Mesures et paramètre du 1^{er} cas pratique

Mesures	
Bx1 (Box Area)	39,4 °C
Sp1 (Spot measurement)	26,6 °C
Sp2 (Spot measurement)	29,0 °C
Sp3 (Spot measurement)	25,3 °C
Paramètres	
Emissivité	0.97
Température. réfléchi.	20 °C

(Box Area) : Température maximale mesurée dans la zone désignée par le symbole Bx1.

(Spot measurement) : Il se réfère à la mesure de température à un point spécifique et très précis choisi par l'utilisateur.

- Analyse des données d'image par rapport aux normes :

température réfléchi: 20°C et température maximale mesurée : 39.4°C (de Bx1, qui couvre la zone chaude principale).

Calcul du (ΔT) : Pour le point le plus chaud (Bx1)

$$(\Delta T) = 39.4^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C} = 19.4^{\circ}\text{C}.$$

Le (ΔT) de 19.4°C se situe dans la plage de 10°C à 20°C selon les directives. Cela indique un problème potentiel nécessitant des actions urgentes. Il est très proche de la limite de 20°C considérée comme grave.

Emplacement de l'anomalie : L'image thermique montre clairement que la zone la plus chaude se trouve dans la partie supérieure du poteau, là où se trouvent les isolateurs et les connexions électriques. L'échauffement semble particulièrement concentré au niveau d'un point de connexion ou d'un isolateur spécifique. Les points Sp1, Sp2 et Sp3 sont situés dans des zones moins chaudes par rapport au point chaud à l'intérieur de Bx1, ce qui confirme que le problème est localisé dans une zone restreinte

- Recommandations et actions correctives proposées :

Il est recommandé d'effectuer des inspections périodiques de cette zone, sachant que la température critique pour les équipements électriques est généralement de 75 °C et que la température maximale de sécurité reste de 80 °C selon les normes industrielles. Une vérification mécanique du serrage au niveau du point de connexion concerné est également conseillée. Si la température continue d'augmenter, il convient d'envisager un renforcement ou un remplacement localisé du conducteur.

III.9.2.Étude du panneau électrique :

1.Présentation du 2^{ème}cas pratique :

L'étude a été menée le 07 mai 2025 dans le local technique d'une installation industrielle à Metlili, sur un panneau électrique. Ce tableau alimente plusieurs circuits critiques (machines, éclairage, commandes). L'objectif de cette inspection thermographique est de détecter toute anomalie thermique susceptible de causer un défaut, une panne ou un départ d'incendie.

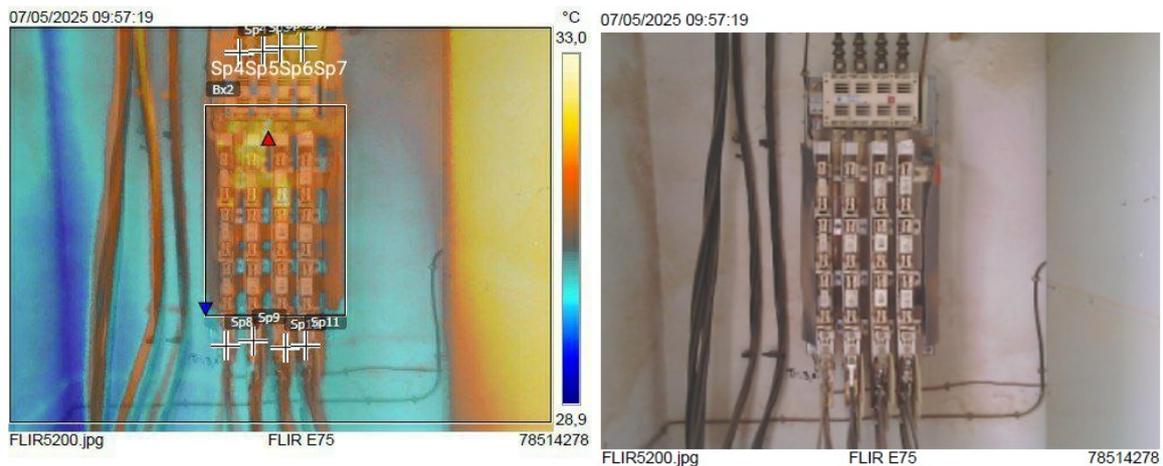


Figure12 : Panneau électrique situé dans la région de Metlili

2. Résultats obtenus et interprétation :

Image supérieure : Vue thermique (infrarouge) du tableau électrique, montrant divers composants avec des températures différentes. Un point chaud est clairement visible dans la partie centrale du panneau, correspondant aux disjoncteurs.

Tableau de mesures : Fournit les relevés de température pour des points spécifiques (Bx1, Bx2, Sp4 à Sp11) et des paramètres comme l'émissivité et la température réfléchie.

- Bx1 : Max 33.2°C, Min 30.1°C, Moyenne 31.3°C
- Bx2 : Max 33.2°C, Min 30.1°C, Moyenne 31.3°C. (Il semble que Bx1 et Bx2 mesurent la même zone ou ont des lectures identiques, ce qui est inhabituel pour des boîtes séparées à moins qu'elles n'englobent toute la zone visible.)
- Températures ponctuelles (Sp4-Sp11) : Variaient de 31.0°C à 33.2°C.

- Émissivité : 0.97 (C'est une bonne valeur pour les composants électriques, indiquant des lectures de température précises).
- Température réfléchiée : 20°C (C'est la température ambiante réfléchiée par la surface, ce qui est bon à savoir pour le contexte).

Tableau III. 4: Mesures et paramètre du 2^{ème} cas pratique

Mesures		
Bx1	Max	33,2 °C
Bx1	Max	33,2 °C
	Min	30,1 °C
Sp4		31,6 °C
Sp5		31,7 °C
Sp6		31,9 °C
Sp7		32,0 °C
Sp8		33,5 °C
Sp9		31,3 °C
Sp10		31,3 °C
Sp11		31,1 °C
Paramètres		
Emissivité		0.97
Temp. réfl.		20 °C

- Analyse des données d'image:

L'image thermique capturée à l'aide de la caméra FLIR E75 révèle un point chaud clairement visible dans la zone centrale du panneau électrique, correspondant à la section des disjoncteurs. D'après les données de mesure, les températures maximales enregistrées aux points Bx1 et Bx2 atteignent 33,2 °C, avec une température ambiante réfléchiée estimée à 20 °C.

Calcul du ΔT pour le point le plus chaud : $\Delta T = 33,2^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 13,2^\circ\text{C}$

La différence de température (ΔT) calculé est donc de 13,2 °C, dans se situe dans la plage de 10 °C à 20°C selon les directives. Cela indique un problème potentiel qui nécessite une attention. Correspond à une anomalie modérée nécessitant une action rapide, sans urgence immédiate.

Les points Sp4 à Sp11 affichent des températures comprises entre 31,0 °C et 33,2 °C, confirmant que l'élévation thermique est localisée autour des disjoncteurs, tandis que le reste du panneau semble fonctionner dans une plage thermique normale.

1. Recommandations et actions correctives proposées :

Étant donné que la différence de température ΔT dépasse les 10 °C, il est recommandé d'appliquer un plan d'intervention préventif dès que possible afin d'éviter toute dégradation ultérieure du système.

Les actions proposées sont les suivantes :

- ✓ Vérification des charges : Contrôler si les disjoncteurs concernés supportent des charges proches ou supérieures à leur capacité nominale, ce qui pourrait provoquer une surchauffe.
- ✓ Inspection des connexions électriques : Vérifier le serrage de toutes les bornes (entrée et sortie) associées aux disjoncteurs affectés. Resserrer les connexions selon les recommandations du fabricant.
- ✓ Détection de corrosion ou d'oxydation : Examiner visuellement les bornes pour repérer d'éventuelles traces de corrosion ou de piqûres thermiques, et les nettoyer si nécessaire.
- ✓ Vérification de la ventilation : Bien que la température ambiante de 20 °C soit acceptable, il faut s'assurer que l'armoire électrique bénéficie d'une ventilation suffisante pour évacuer la chaleur produite.
- ✓ Réinspection post-intervention : Une seconde inspection thermographique doit être réalisée après les corrections, en régime normal, afin de confirmer la diminution du ΔT à des niveaux acceptables (inférieurs à 10 °C).

III.9. Conclusion:

Nous avons exploré en détail le contrôle par caméra thermographique infrarouge, une méthode non destructive qui s'est avérée indispensable dans de nombreux secteurs.

L'analyse des émissions infrarouges permet d'identifier rapidement et précisément les anomalies thermiques, révélatrices de défauts ou de dysfonctionnements.

L'importance de cette technologie, notamment dans la maintenance prédictive et le contrôle qualité, ne saurait être sous-estimée. Elle offre une approche proactive pour garantir la fiabilité et la sécurité des équipements, tout en optimisant les performances opérationnelles.

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'examen du réseau électrique Haute Tension B (HTB) souligne son importance cruciale dans la transmission sûre et performante de l'énergie électrique sur de vastes étendues.

Ces réseaux, organisés en fonction de la tension et de leur rôle dans le système de transport, constituent une infrastructure essentielle et complexe pour l'équilibre énergétique d'une nation. La fiabilité et la capacité d'interconnexion des systèmes électriques à l'échelle nationale et internationale sont déterminées par leur configuration, qu'elle soit de type maillé, radiale ou mixte.

Dans ce cadre, l'entretien industriel s'avère essentiel pour garantir le fonctionnement constant et sécurisé des équipements HTB, qu'il s'agisse de maintenance corrective, préventive ou améliorative, cela permet de minimiser les pannes, de diminuer les dépenses et d'améliorer la disponibilité des équipements.

Le contrôle non destructif (CND), en particulier, représente un élément central de cette maintenance innovante, en proposant des techniques d'examen fiables sans endommager les composants évalués.

La thermographie infrarouge se distingue parmi ces techniques comme un instrument efficace et non intrusif pour le suivi des installations HTB. Elle permet d'anticiper les pannes électriques potentielles, d'optimiser l'entretien préventif et de renforcer la sûreté des infrastructures en identifiant les anomalies thermiques qui sont invisibles à l'œil nu.

L'emploi de caméras thermographiques dans les processus de vérification des lignes et des postes de transformation illustre la transition vers une maintenance plus intelligente et proactive.

Par conséquent, l'association d'une expertise en réseaux HTB, d'un entretien organisé et de l'application de technologies sophistiquées de contrôle telles que la thermographie représente un atout stratégique pour améliorer la fiabilité, l'efficacité et la pérennité du système électrique contemporain.

Dans cette optique, est née l'idée de notre projet qui consiste à mettre en place une micro-entreprise spécialisée dans le diagnostic thermique des installations HTB. Le projet vise à proposer aux acteurs majeurs du secteur énergétique (tels que Sonelgaz, ou les sites industriels) un service de contrôle thermique intelligent, mobile, rapide et à coût compétitif, contribuant ainsi à renforcer la fiabilité, la sécurité et la durabilité du système électrique.

Bibliographie

Référence

- [1] RTE (Réseau de Transport d'Électricité). Le réseau de transport d'électricité en France. RTE France, 2022
- [2] Belkacem, M. Électrotechnique : réseaux électriques et transport de l'énergie. Éditions universitaires européennes, 2019.
- [3] Messalti, S. Introduction aux systèmes électriques de puissance. Université de Biskra, Département d'Électrotechnique, 2020.
- [4] Sonelgaz – Groupe de Transport de l'Électricité (GRTG). Rapport annuel sur le réseau de transport d'électricité en Algérie. Alger : Sonelgaz, 2021.
- [5] CEREFÉ (Comité d'Électricité et des Énergies Renouvelables en Afrique du Nord). Les interconnexions électriques en Afrique du Nord : enjeux et perspectives. Rapport technique, Tunis,
- [6] Ministère de l'Énergie et des Mines, Décret exécutif n° 10-138 du 10 mai 2010 fixant les modalités de raccordement au réseau public d'électricité, Journal Officiel de la République Algérienne, 2010, p. 3–5.
- [7] Berkane Samir, Technologies des équipements électriques des postes HTB, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017, p. 25–35.
- [8] Fetha Cherif, Cours de réseaux de transport et de distribution, Université de Batna 2, 2021, p. 36–42.
- [9] Saifi Kamel, Étude d'un poste électrique 60/30 kV – Protection et équipements HT, Mémoire de Master, Université de Boumerdès, 2016, p. 18–27.
- [10] Djalti Zakaria, Les postes électriques HTB/HTA : fonctionnement et équipements, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, 2018, p. 40–50.
- [11] Hachani Rachid, Équipements des postes HT et principes de protection, Institut de Génie Électrique, Université de Biskra, 2020, p. 12–20.
- [12] Benkhelifa Ahmed, Étude des réseaux HTB : choix des niveaux de tension et contrôle de la fréquence, Mémoire de Master, Université de Constantine 2, 2019, p. 10–18.
- [13] Ouali Samira, La stabilité de la fréquence dans les réseaux électriques HTB, Mémoire de Master, Université de Sétif 1, 2020, p. 22–30.
- [14] Belkacem Farid, Analyse du dimensionnement des réseaux haute tension, Université de Tizi-Ouzou, 2018, p. 45–53.
- [15] Ministère de l'Énergie et des Mines, Guide technique des réseaux électriques HTB en Algérie, 2021, p. 12–25.

- [16] Mekki Abdelkader, Analyse de la qualité de l'énergie dans les réseaux HTB, Mémoire de Master, Université de Boumerdès, 2022, p. 30–40.
- [17] Khelifa Djamila, Gestion de la tension et du facteur de puissance dans les réseaux HTB, Université de Batna 1, 2021, p. 15–25.
- [18] Ministère de l'Énergie, Régulation de la fréquence dans les réseaux électriques, Rapport technique, Alger, 2020, p. 8–18.
- [19] Boudjemaa Samir, Optimisation de la qualité de l'énergie dans les réseaux HTB, Université de Constantine 3, 2019, p. 22–30.
- [20] Kherbouche Mohamed, Étude de la pollution harmonique dans un réseau de transport HTB : cas de Sonelgaz, Mémoire de Master, Université de M'Sila, 2021, p. 22–37.
- [21] Yahi Samir, Impact des perturbations électromagnétiques sur les équipements de protection dans les réseaux HTB, Mémoire de Master, Université de Laghouat, 2022, p. 18–31.
- [22] Sadeg Amina, Qualité de l'énergie et filtres harmoniques dans un réseau industriel, Université de Skikda, 2020, p. 28–42.
- [23] SONELGAZ – Direction Technique, Rapport sur l'analyse harmonique et les perturbations dans les réseaux HTB, Alger, édition interne, 2023, p. 10–26.
- [24] Boukhalfa Houda, Analyse de la continuité de service dans les réseaux HTB et étude de la fiabilité des postes électriques, Mémoire de Master, Université de Boumerdès, 2021, p. 30–45.
- [25] Laggoune Rachid, Évaluation de la fiabilité dans les réseaux électriques de transport HTB en Algérie, Mémoire de Master, Université de Batna 2, 2022, p. 18–33.
- [26] Benachour Nadjet, Méthodologie d'optimisation de la continuité de service dans un réseau de transport Sonelgaz, Mémoire de Master, Université de Sétif, 2020, p. 25–40.
- [27] Bounar Rabah, Étude thermique des lignes HTB et impact des pertes Joule sur la performance du réseau, Mémoire de Master, Université de Biskra, 2021, p. 20–35.
- [28] Mahdaoui Yassine, Simulation des pertes d'énergie dans les lignes HTB en fonction des charges et des températures, Mémoire de Master, Université de Blida 1, 2022, p. 25–40.
- [29] Boualem Mounir, Gestion des pertes Joule et refroidissement des câbles HTB dans les réseaux SONELGAZ, Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2020, p. 29–41.
- [30] Laifa Youcef, Étude des champs électromagnétiques autour des lignes HTB et évaluation de l'exposition humaine, Mémoire de Master, Université de Constantine 1, 2022, p. 28–44.

- [31] Bouchareb Safia, Impact des champs électromagnétiques des réseaux HTB sur l'environnement et la santé publique, Mémoire de Master, Université de Béjaïa, 2021, p. 33–49.
- [32] Amari Anis, Modélisation des effets magnétiques dans les postes HTB et solutions de blindage, Mémoire de Master, Université de Tizi Ouzou, 2020, p. 22–38.
- [33] Bouzidi Rania, Étude de la stabilité des réseaux HTB lors des pics de charge, Mémoire de Master, Université de Boumerdès, 2022, p. 36–53.
- [34] Djelloul Meriem, Gestion de la demande et régulation dynamique dans le réseau HTB de SONELGAZ, Mémoire de Master, Université de Blida 1, 2021, p. 40–57.
- [35] Khelifa Amar, Stratégies d'équilibrage en période de charge maximale sur les lignes HTB algériennes, Mémoire de Master, Université de Sétif 1, 2020, p. 45–61.
- [36] Cherfaoui, A. (2020). Optimisation des coûts de maintenance à l'aide de la GMAO : étude de cas dans une entreprise de mécanique. *Revue des Sciences Appliquées*, Université de Blida, Vol. 6, p. 61.
- [37] Haddad, S., & Hanouti, Y.. Maintenance préventive conditionnelle pour les systèmes soumis à des dégradations par corrosion : Cas du pipeline GG1 Sonatrach [Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira – Béjaïa 2021.
- [38] Belakroum, R., Kious, M. M., & Bousbia, S. A. (2020). Maintenance conditionnelle par analyse vibratoire dans une centrale électrique à turbine à gaz [Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah - Ouargla].
- [39] Bensaci, M.. Méthodes et outils de planification de la maintenance dans les entreprises énergétiques algériennes. Mémoire de Master, Université de Boumerdès, Faculté de Génie Mécanique, 2018 p. 41.
- [40] Gherbi, Y. Implémentation d'un système GMAO dans une entreprise industrielle : cas de l'unité Fertial d'Annaba. *Revue des Techniques Industrielles*, Université Badji Mokhtar, Annaba, Vol. 12, 2021 p. 69
- [45] **Guentri** Hocine , Organisation et gestion de la maintenance Industrielle, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf –Mila ,Département de génie mécanique et électromécanique 2023 .
- [46] Khenfri, S. Sécurité industrielle et maintenance dans les complexes pétrochimiques : cas de SONATRACH Arzew. *Revue Sécurité et Environnement*, Université de Ouargla, Vol. 8, 2021 p. 23.

- [47] ISO 18436-7: Condition monitoring and diagnostics of machines — Requirements for qualification and assessment of personnel — Part 7: Thermography. International Organization for Standardization. 2017 .
- [48] AFNOR. NF EN 13187 : Thermographie infrarouge — Méthodes qualitatives pour la détection des défauts thermiques. Association Française de Normalisation 2020 .
- [49] Kherbouche, F. (2018). La maintenance et son impact sur la qualité dans les unités agroalimentaires algériennes. Mémoire de Master, Université de Constantine 1, Faculté des Sciences Techniques, p. 39
- [50] (La thermographie infrarouge, G. Gaussorgues, Ed. Tec&Doc, 1999
- [51] Haddadi, M., Bouzitouna, M., & Draoui, B. (2017). Thermographie infrarouge appliquée aux Matériaux. Mémoires Algériens, 2(1), 9-16
- [52] Jafari, M., Nouri, H., & Nejat, P. (2018). An overview on the applications of thermography in building diagnostics. Energy and Buildings, 170, 49-64.
- [53] Jafari, M., Nouri, H., & Nejat, P. (2018). An overview on the applications of thermography in building diagnostics. Energy and Buildings, 170, 49-64
- [54] BOUHALI Abdelhakim . Application du contrôle non destructif dans le suivi de l'intégrité des installations industrielles 2018 Mémoire d'ingénieur, Université de Tiaret.
- [55] Yan, Y., & Li, H. (2018). Non-destructive detection of building insulation defects using infrared thermal imaging technology. International Journal of Heat and Technology, 36(2), 503-511.
- [56] Belmokhtar .A(2023), Analyse et contribution à l'amélioration de la maintenance conditionnelle par thermovision d'un réseau électrique HTB (au sein du poste de transformation de STE -Ghardaïa), Université de Ghardaïa
- [57] Tachon, G. (2017). Thermographie infrarouge: principes, domaines d'application et mise en oeuvre. Les cahiers de l'énergie, (81), 25-29.
- [58] Ouellet, M. (2013). Utilisation de la thermographie infrarouge en industrie. Le Journal de l'énergie, (18), 11-13.
- [59] Bucher, C. A. (2017). La thermographie infrarouge: principes et applications en maintenance prédictive. Revue des Composites et des Matériaux Avancés, 27(1), 23-29.
- [60] Meniai.N (2014) ,Application et diagnostic thermographie, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة غرداية

مركز تطوير المقاولاتية



عنوان المشروع:

مراقبة وتشخيص أعطال شبكة الجهد العالي (HTB) باستخدام التصوير

الحراري

مشروع لنيل شهادة مؤسسة اقتصادية في اطار القرار الوزاري 008 المعدل

والمتمم لقرار 1275

صورة العلامة التجارية

الاسم التجاري

ThermoVision HTB

السنة الجامعية

2025 _ 2024

بطاقة معلومات:

حول فريق الاشراف وفريق العمل

1- فريق الاشراف:

فريق الاشراف	
المشرف الرئيسي (01): مرزوق حسين	التخصص: صيانة صناعية
المشرف الرئيسي (01): /	التخصص: /
المشرف المساعد: /	التخصص: /

2- فريق العمل:

فريق المشروع	التخصص	الكلية
الطالب: برتيمه محمود جميل	صيانة صناعية	قسم الآلية والكهروميكانيك
الطالب: دهري صدام حسين	صيانة صناعية	قسم الآلية والكهروميكانيك
الطالب: /	/	/

عنوان المشروع : مراقبة وتشخيص أعطال شبكة الجهد العالي (HTB) باستخدام التصوير الحراري

فهرس المحتويات

المحور الأول: تقديم المشروع

المحور الثاني: الجدوى الاقتصادية للمشروع

المحور الثالث: النموذج التجاري (BMC)

المحور الأول: تقديم المشروع

1. فكرة المشروع:

بالنظر إلى التحديات التقنية والبيئية التي تواجه شبكة الجهد العالي جدًا (HTB) في المنطقة الجنوبية، وخاصة في الولايات التابعة للإدارة الإقليمية لحاسي مسعود سونلغاز (ورقلة، توقرت، غرداية، إليزي، الوادي، إلخ) فمن الضروري الاعتماد على حلول ذكية واستباقية للكشف عن الأعطال وتجنب الانقطاعات المفاجئة التي قد تؤثر سلبيًا على خدمات التوزيع والأنشطة المؤسسية الحيوية.

ومن هذا المنطلق، فإن فكرة مشروعنا المبتكر هي إنشاء شركة صغيرة متخصصة في مراقبة وتشخيص أعطال شبكة HTB باستخدام التصوير الحراري (Thermo Vision)، وهي تقنية حديثة تعتمد على تحليل فروق درجات الحرارة للكشف عن الأعطال غير المرئية مثل الدوائر القصيرة أو العزل الضعيف أو الشقوق في الموصلات.

ويهدف المشروع إلى تزويد الشركات مثل سونطراك أو سونلغاز وفروعها المحلية بخدمات فنية دقيقة وشاملة، وتعزيز الصيانة الوقائية وتقليل التدخلات الطارئة التي تتطلب الكثير من القوى العاملة والمواد. ويقدم المشروع أيضًا حلاً اقتصاديًا بتكلفة معقولة من خلال اعتماد معدات فعالة مقارنة بالخدمات التقليدية أو الأجنبية.

مهمتنا هي توفير تقارير رقمية دقيقة ومنتظمة، مدعومة بالتصوير الحراري والتحليل المهني، وإرسالها مباشرة إلى الأقسام الفنية ذات الصلة. يؤدي هذا إلى تسريع عملية اتخاذ القرار ويساعد في تحسين موثوقية الشبكة.

أهداف المشروع الأساسية:

- ✓ تعزيز المراقبة الاستباقية للشبكات الكهربائية.
- ✓ تقليل حوادث الصيانة العشوائية والمفاجئة.
- ✓ تحسين موثوقية الشبكة في السوق المحلي.
- ✓ تقديم خدمة مهنية بتكلفة أقل وجودة عالية.
- ✓ توظيف التكنولوجيا في خدمة البنية التحتية الوطنية

المحور الثاني: الجدوى الاقتصادية للمشروع

1. وصف المشروع:

1.1 الأهداف:

يهدف المشروع إلى إنشاء شركة صغيرة متخصصة في مراقبة وتشخيص أعطال شبكة الجهد العالي جدًا (HTB) في المنطقة الجنوبية من الجزائر، وخاصة في الولايات التابعة للإدارة الإقليمية لحاسي مسعود سونلغاز (ورقلة، توقرت، غرداية، إليزي، الوادي، إلخ).

ويهدف إلى:

- تعزيز المراقبة الاستباقية للشبكات الكهربائية.
- تقليل حوادث الصيانة العشوائية والمفاجئة.
- تحسين موثوقية الشبكة في السوق المحلي.
- تقديم خدمة مهنية بتكلفة أقل وجودة عالية.
- توظيف التكنولوجيا في خدمة البنية التحتية الوطنية.
- توفير تقارير رقمية دقيقة ومنتظمة، مدعومة بالتصوير الحراري والتحليل المهني.

2.1. المنتجات/الخدمات:

ستقدم الشركة خدمات فنية دقيقة وشاملة لمراقبة وتشخيص أعطال شبكة HTB باستخدام تقنية التصوير الحراري (Thermo Vision).

تشمل الخدمات:

- مسح حراري شامل لخطوط ومكونات شبكة HTB.
- اكتشاف الأعطال غير المرئية مثل الدوائر القصيرة، العزل الضعيف، والشقوق في الموصلات.
- تحليل البيانات الحرارية وتقديم تقارير رقمية مفصلة تتضمن الصور الحرارية والتحليل المهني.
- تحديد مواقع الأعطال بدقة والمساعدة في تحديد أولويات الصيانة.
- خدمات استشارية حول تحسين موثوقية الشبكة.

3.1 السوق المستهدف:

العملاء المحتملون هم الشركات الكبرى التي تعتمد على شبكات الجهد العالي جدًا في عملياتها، مثل:

سوناطراك و شركات النفط والغاز في الجزائر، التي تمتلك بنية تحتية كهربائية واسعة النطاق.

ايضا سونلغاز وفروعها المحلية (الشركة الوطنية للكهرباء والغاز في الجزائر المسؤولة عن نقل وتوزيع الكهرباء)

الشركات الصناعية الكبرى والمصانع في المنطقة الجنوبية التي تعتمد على إمدادات كهربائية مستقرة.

المجمعات السكنية الكبيرة والمرافق الحيوية التي تتطلب موثوقية عالية للكهرباء الى جانب المطارات واهيمة احتياجها الى الكهرباء

4.1 الشراكات:

نطمح لإقامة شراكات استراتيجية مع سونلغاز وسوناطراك و بعض الشركات الخاصة لضمان عقود طويلة الأمد وتوفير خدمات متكاملة ومع موردي المعدات الحرارية و الكاميرات للحصول على أحدث التقنيات وأفضل الأسعار ; إقامة شراكة مع الجامعات والمعاهد التقنية للبحث والتطوير وتدريب الكوادر المحلية. شركات الصيانة الكهربائية: لتقديم حلول متكاملة تشمل التشخيص والإصلاح.

2. دراسة السوق:

1.2 دراسة المنافسة:

المنافسون المباشرون: قد يكون هناك عدد قليل من الشركات المحلية أو الأجنبية التي تقدم خدمات مشابهة، غالبًا ما تكون شركات استشارية أو مقاولين للصيانة الكهربائية. قد تعتمد بعض هذه الشركات على تقنيات تقليدية أو أقل تطورًا.

المنافسون غير المباشرون: أقسام الصيانة الداخلية في شركات مثل سونلغاز وسوناطراك، والتي قد تقوم ببعض أعمال المراقبة بأنفسهم، ولكن غالبًا ما تفتقر إلى المعدات المتخصصة والخبرة في التصوير الحراري.

2.2 تحليل SWOT:

نقاط القوة (Strengths):

- تقنية التصوير الحراري: تسمح باكتشاف الأعطال دون إيقاف الشبكة، مما يقلل من الانقطاعات.
- حل فعال من حيث التكلفة: أسعار تنافسية مقارنة بالخدمات الأجنبية.
- خبرة متخصصة للبيئة الجنوبية: فهم تحديات درجات الحرارة العالية والمسافات الطويلة.
- تقارير رقمية دقيقة وسريعة: خلال 48/24 ساعة.
- تحسين السلامة: استخدام تقنية عدم التلامس لفرق الصيانة.
- تنمية الموارد البشرية المحلية.
- سهولة نقل المعدات والتدخل السريع في المناطق النائية (باستخدام الدرون).
- استخدام كاميرات حرارية عالية الجودة وطائرات درون للأماكن الصعبة.

نقاط الضعف (Weaknesses):

- شركة ناشئة: قد تواجه تحديات في بناء الثقة والسمعة في البداية.
- الحاجة إلى استثمار أولي كبير: لشراء المعدات المتخصصة (كاميرات حرارية، درون).

- الاعتماد على الخبرة الفنية: الحاجة إلى فريق مؤهل ومدرب بشكل جيد.
- التعرض لظروف الطقس القاسية: قد تؤثر على عمليات التصوير الحراري في بعض الأحيان.

الفرص (Opportunities):

- زيادة الطلب على موثوقية الشبكات الكهربائية في المنطقة الجنوبية.
- التركيز الحكومي على تطوير البنية التحتية المحلية.
- توجه الشركات الكبرى نحو الصيانة الوقائية والتقنيات الذكية.
- إمكانية التوسع في مناطق أخرى من الجزائر أو حتى دول الجوار.
- تطور التكنولوجيا (الذكاء الاصطناعي، تعلم الآلة) لتعزيز التحليل التنبؤي.

التحديات (Threats):

- المنافسة من الشركات الأجنبية ذات الخبرة الطويلة والموارد الكبيرة.
- تغيرات في السياسات الحكومية أو اللوائح المتعلقة بالكهرباء.
- التطور السريع للتكنولوجيا قد يتطلب تحديثات مستمرة للمعدات.
- صعوبة الوصول إلى بعض المناطق النائية أو التي تعاني من تحديات أمنية.
- تقلبات أسعار صرف العملات الأجنبية لشراء المعدات.

3.2 اتجاهات السوق:

يشهد السوق الجزائري والعالمي اتجاهًا متزايدًا نحو:

- الصيانة التنبؤية: التحول من الصيانة التفاعلية إلى الصيانة التي تعتمد على البيانات والتنبؤ بالأعطال.
- التحول الرقمي: توظيف التكنولوجيا الرقمية بهدف تطوير الأداء وتحسين جودة العمليات والخدمات.
- زيادة الاعتماد على الطاقة الكهربائية: مما يستلزم شبكات أكثر موثوقية.
- الاهتمام بالاستدامة والكفاءة: تقليل الانقطاعات يساهم في كفاءة الطاقة.
- تزايد استخدام الدرون في الصناعات المختلفة: لتسهيل الوصول والتفتيش.

4.2 حجم السوق:

إمكانيات السوق كبيرة جدًا، نظرًا لحجم شبكة الجهد العالي جدًا في المنطقة الجنوبية للجزائر، ووجود شركات عملاقة مثل سوناطراك وسونلغاز التي تحتاج باستمرار إلى خدمات صيانة ومراقبة متطورة. المنطقة الجنوبية تتميز بالمسافات الطويلة والظروف البيئية الصعبة، مما يجعل الحلول الذكية والفعالة مثل التصوير الحراري ضرورية.

3. الخطة العملية:

1.3 الموارد البشرية:

سنحتاج إلى فريق مؤهل ومتخصص يتكون من:

مدير مشروع: ذو خبرة في إدارة المشاريع والتواصل مع العملاء.

مهندسين: متخصصون في شبكات الجهد العالي وتحليل البيانات الحرارية.

تقنين لتصوير الحراري: مدربون على استخدام الكاميرات الحرارية والدرون.

دعم وتقارير: لإعداد التقارير الرقمية والتواصل مع الأقسام الفنية.

فريق إداري ومحاسبي صغير: لإدارة العمليات اليومية.

2.3 المسار:

سيتم تنفيذ الأنشطة على النحو التالي:

المرحلة الأولى: التأسيس والتجهيز (أشهر 1-6):

تأسيس الشركة وتسجيلها قانونيًا.

شراء المعدات اللازمة (كاميرات حرارية عالية الجودة، درون متطور، برامج تحليل).

توظيف وتدريب الفريق الفني.

تطوير نظام إعداد التقارير الرقمية.

وضع خطط العمليات والسلامة.

المرحلة الثانية: بناء العلاقات والتسويق (أشهر 3-12):

التواصل مع سونلغاز وسوناطراك وتقديم عروض الخدمات.

المشاركة في المعارض والمؤتمرات الصناعية.

بناء حضور رقمي فعال (موقع إلكتروني، وسائل تواصل اجتماعي).

إجراء دراسات تجريبية أو مشاريع صغيرة لإثبات القيمة.

المرحلة الثالثة: تقديم الخدمات وتوسيع العمليات (بعد 12 شهرًا):

بدء تقديم الخدمات بشكل منتظم للعملاء.

تحسين جودة الخدمات استنادًا إلى ملاحظات واقتراحات وشكاوى الزبائن.

البحث عن فرص للتوسع في مناطق جغرافية أخرى أو تقديم خدمات إضافية.

3.3 التكنولوجيا:

سيتم استخدام التقنيات والأدوات التالية:

كاميرات حرارية عالية الدقة: مثل Flir أو Testo ، قادرة على التقاط صور حرارية دقيقة حتى في الظروف الصعبة.
طائرات درون متقدمة: مزودة بكاميرات حرارية مدمجة وقادرة على الطيران لمسافات طويلة وارتفاعات عالية (مثل DJI Matrice 300 RTK مع حمولات حرارية).

برامج تحليل التصوير الحراري: لمعالجة البيانات وتحديد الشذوذات الحرارية.

منصات سحابية: لتخزين البيانات والتقارير وتسهيل الوصول إليها من قبل العملاء.

أنظمة إدارة المشاريع: لتتبع سير العمل وإدارة المواعيد.

أنظمة الاتصالات المشفرة: لضمان أمن نقل البيانات الحساسة.

4.3 الموقع:

يفضل أن يكون مقر المشروع في إحدى الولايات الرئيسية في المنطقة الجنوبية مثل ورقلة أو حاسي مسعود، وذلك لقرها من العملاء المحتملين وتسهيل الوصول إلى شبكات HTB المستهدفة. يمكن أن يكون هناك مكتب إداري صغير وورشنة لتخزين المعدات وصيانتها.

4. تقييم المخاطر:

1.4 تحديد المخاطر:

مخاطر فنية: عدم دقة الكشف عن الأعطال بسبب ظروف بيئية قاسية (رياح ، حرارة شديدة)، كما قد تحدث أعطال في المعدات (كاميرات حرارية،) وربما اثناء العمل ايضا قد نجد صعوبات في تحليل البيانات المعقدة أو تفسيرها.
معوّقات مهنية: صعوبة الوصول إلى بعض المواقع النائية أو الخطرة بسبب بعد الطريق في الصحراء قد نتعطل في إصدار التقارير. وهذا بسبب نقص الكوادر الفنية المؤهلة أو صعوبة استقطابها.
مخاطر سوقية وتنافسية: دخول منافسين جدد بقوة أو تقديم خدمات بأسعار أقل.
عدم تقبل العملاء للتقنية الجديدة أو تفضيلهم للحلول التقليدية
صعوبة في شراء المعدات الغير متوفرة داخل الوطن وإيجاد موردين ذو ثقة وكفاءة.
مخاطر مالية:

تكاليف العمال أعلى من المتوقع.

عدم كفاية العقود لتغطية التكاليف التشغيلية.

تقلبات في أسعار قطع الغيار أو العملات.

مخاطر قانونية وتنظيمية:

تغيرات في لوائح الطيران المتعلقة بالدرون.

الحصول على التراخيص والتصاريح اللازمة للعمل في مناطق حساسة كالحدود مثلا.

صعوبة ادخال المعدات من خارج الوطن.

2.4 تقييم الأثر:

عدم دقة الكشف أو أعطال المعدات: قد يؤدي إلى فقدان الثقة، خسارة العملاء، وتكاليف إصلاح أو استبدال عالية.

صعوبة الوصول أو تأخر التقارير: يؤثر على رضا العملاء وقد يؤدي إلى فقدان العقود.

نقص الكوادر: يحد من القدرة على التوسع وقد يؤثر على جودة الخدمة.

المنافسة الشديدة: قد تضغط على هوامش الربح وتجعل الحصول على العقود أكثر صعوبة.

المخاطر المالية: تهدد استمرارية المشروع بشكل مباشر.

المخاطر القانونية: قد تؤدي إلى غرامات مالية أو حتى إيقاف العمليات.

3.4 إجراءات تخفيف المخاطر:

للمخاطر الفنية والتشغيلية:

الاستثمار في معدات عالية الجودة ومعايرة دورية.

تدريب مكثف للفريق على تحليل البيانات في ظروف مختلفة.

وضع بروتوكولات صارمة للسلامة والصيانة التنبؤية.

تطوير خطط بديلة للوصول إلى المواقع الصعبة.

التعاقد مع استشاريين متخصصين عند الحاجة.

للمخاطر السوقية والتنافسية:

بناء علاقات قوية مع العملاء المحتملين وتقديم عروض قيمة مميزة.

التركيز على الجودة العالية والخدمة المتميزة للتمييز عن المنافسين.

التسويق الفعال لفوائد التصوير الحراري والصيانة التنبؤية.

مراقبة السوق باستمرار والتكيف مع التغيرات.

للمخاطر المالية:

إعداد دراسة جدوى مالية مفصلة وواقعية.

تأمين تمويل كافٍ في البداية.

إدارة التكاليف بفعالية والبحث عن موردين بأسعار تنافسية.

تنوع مصادر الدخل إذا أمكن في المستقبل.

للمخاطر القانونية والتنظيمية:

التعاون مع مستشارين قانونيين متخصصين لضمان الامتثال للوائح.

الحصول على جميع التراخيص والتصاريح المطلوبة قبل بدء العمليات.

مراقبة التغييرات في التشريعات المتعلقة بالدرون والعمل الكهربائي.

5. الخلاصة والتوصيات:

يُظهر هذا المشروع إمكانات كبيرة في سوق الجزائر الجنوبي، لا سيما مع التحديات البيئية والتقنية التي تواجه شبكة HTB هناك. إن الاعتماد على التصوير الحراري كحل ذكي ومبتكر يوفر ميزة تنافسية واضحة من حيث الكفاءة، تقليل التكاليف، وتحسين السلامة.

السوق المستهدف (سوناطراك، سونلغاز..) يمثل عملاء محتملين كبيرًا ولديهم حاجة ماسة لمثل هذه الخدمات. نقاط القوة الرئيسية للمشروع تتمثل في التقنية المبتكرة، الحل الاقتصادي، والخبرة المحلية المتخصصة. على الرغم من وجود مخاطر مثل المنافسة الأجنبية والتحديات التشغيلية، إلا أن هناك إجراءات واضحة للتخفيف من هذه المخاطر.

بناءً على دراسة الجدوى هذه، فإن فكرة المشروع قابلة للتطبيق وواعدة للغاية. الطلب على موثوقية الشبكة الكهربائية في المنطقة الجنوبية في تزايد مستمر، والحل المقترح يقدم قيمة مضافة حقيقية. القدرة على اكتشاف الأعطال دون إيقاف الشبكة، وتقليل تكاليف الصيانة الطارئة، وتحسين السلامة، كلها عوامل تدعم جدوى المشروع.

نوصي بالاستمرار في المشروع والمضي قدمًا في خطة العمل التفصيلية. الخطوات التالية يجب أن تركز على تأمين التمويل اللازم، استكمال توظيف وتدريب الفريق، وبدء حملة تسويقية مكثفة لبناء العلاقات مع العملاء الرئيسيين. من الضروري أيضًا الاستثمار في أفضل المعدات وتطوير نظام قوي لإدارة البيانات والتقارير لضمان أعلى مستويات الجودة والفعالية

المحور الثالث: النموذج التجاري (BMC)

مع تطور بيئة الأعمال، برزت الحاجة إلى أدوات فعالة لفهم وتطوير نماذج الأعمال. وتعد لوحة نموذج الأعمال (BMC - Business Model Canvas) من أبرز هذه الأدوات، حيث توفر رؤية شاملة ومبسطة تساعد الشركات والمشاريع الناشئة على وصف وتحليل وتصميم نماذج أعمالها بطريقة منهجية ومتكاملة وتتكون من تسعة أحجار أو عناصر أساسية توضح كيف تُنشئ مؤسسة وتحقق منها أرباحاً.

تتمثل العناصر التسعة في:

- (1) شرائح العملاء (Customer Segments):
- (2) عرض القيمة (Value Proposition):
- (3) القنوات (Channels):
- (4) علاقات العملاء (Customer Relationships):
- (5) مصادر الإيرادات (Revenue Streams):
- (6) الموارد الرئيسية (Key Resources):
- (7) الأنشطة الرئيسية (Key Activities):
- (8) الشراكات الرئيسية (Key Partnerships):
- (9) هيكل التكاليف (Cost Structure)

يمثل الجدول التالي نموذج الأعمال BMC لمشروعنا

 <p>الشركاء الرئيسيون</p> <p>-مديريات سونلغاز -موردي معدات حرارية -مطوري تطبيقات وتقارير رقمية -حاضنة الاعمال لجامعة غرداية -شركات استشارية قانونية ومالية</p>	<p>الأنشطة الرئيسية</p> <p>-الفحص الميداني بالكاميرات الحرارية -تحليل الصور والبيانات -إعداد التقارير الفنية -التواصل وتقديم التوصيات للعميل</p> <p>الموارد الرئيسية</p> <p>-كاميرا حرارية احترافية -حاسوب وبرمجيات تحليل -سيارة للتنقل الميداني - فريق تقني مدرب (مهندسون، محللون)</p>	<p>عرض القيمة</p> <p>-تقليل تكاليف الصيانة الطارئة والتدخلات غير المخطط لها في الموقع. -العمل بكاميرات ذات جودة عالية. - تقارير تحليلية احترافية خلال 24-48 ساعة. - تقليل التكاليف والأعطال المفاجئة. - رفع موثوقية وأمان الشبكات. -خدمات متخصصة ومكيفة للبيئة الجنوبية</p>	<p>العلاقة مع العملاء</p> <p>-دعم ميداني وتقني مستمر. -إنشاء منصة رقمية او رقم هاتف خاص للرد على استفسارات العملاء. - عروض تجريبية مجانية. -حملات ترويجية على خدماتنا. - خدمة ما بعد الفحص والتوصيات.</p> <p>قنوات التوزيع</p> <p>-زيارات ميدانية مباشرة للمؤسسات -موقع إلكتروني رسمي. - مشاركات في فعاليات تقنية وصناعية . -التسويق الالكتروني. -مواقع في صفحات التواصل الاجتماعي.</p>	<p>العملاء (الشرائح المستهدفة)</p> <p>- الشركات الصناعية الحكومية . - شركات النفط والغاز الوطنية او الخاصة. -الشركات الصناعية الكبرى المحلية. -مكاتب الدراسات الكهربائية والمقاولات. -المستثمرين الكبار في مجال الزراعة - المطارات ومحطات توليد الطاقة .</p>
<p>التكاليف</p> <p>-شراء الكاميرا والمعدات -تكوين الفريق -تنقلات ميدانية وصيانة -تطوير الموقع والتقارير -التسويق والعروض التقديمية</p>	<p>المداهيل (مصادر الدخل)</p> <p>-عقود صيانة دورية مع سونلغاز والمؤسسات. -خدمات التحليل الحراري عند الطلب. -عقود شهرية/سنوية للشركات. -ورشات تكوين مهنية للفرق التقنية.</p>			

1. العملاء:

نركز في مشروعنا على تقديم قيمة مضافة للمؤسسات والشركات الكبرى التي تعتمد بشكل حيوي على شبكات الجهد العالي جدًا (HTB) في المنطقة الجنوبية من الجزائر. عملائنا الأساسيون هم سونلغاز وفروعها المحلية في الولايات مثل ورقلة، توقرت، غرداية، والوادي، كونها المسؤولة عن تشغيل وصيانة هذه الشبكات الحيوية. كما نستهدف سوناطراك وفروعها، نظرًا لامتلاكها بنية تحتية كهربائية ضخمة ومعقدة تدعم عملياتها في حقول النفط والغاز. بالإضافة إلى ذلك، تشمل قائمة عملائنا المحتملين المجمعات الصناعية الكبرى و المطارات ومحطات توليد الطاقة والمصانع التي تتطلب إمدادًا كهربائيًا مستقرًا وموثوقًا لتجنب توقف الإنتاج والخسائر الفادحة. وعلى الرغم من أن عدد هؤلاء العملاء قد لا يكون كبيرًا، إلا أن كل منهم يمثل عقدًا ذا قيمة استراتيجية عالية، خاصة وأنهم من الجهات الحكومية أو الشركات الوطنية الكبرى.

2. عرض القيمة:

نقدم لعملائنا مجموعة من القيم الجوهرية التي تهدف إلى حل مشكلاتهم المتعلقة بانقطاعات التيار الكهربائي وتقليل التكاليف وتحسين موثوقية الشبكة. تتمثل ميزتنا الأساسية في الكشف الاستباقي والدقيق للأعطال الحرارية غير المرئية في شبكات HTB، مثل الدوائر القصيرة أو العزل الضعيف أو الشقوق في الموصلات، وذلك دون الحاجة لإيقاف الشبكة أو التسبب في أي تعطيل للخدمة. هذا الكشف المبكر يساهم بشكل كبير في تقليل تكاليف الصيانة الطارئة والتدخلات غير المخطط لها، حيث يمكن للعملاء جدولة الصيانة الوقائية بكفاءة أكبر. نحن ملتزمون بتحسين موثوقية الشبكة واستمرارية الخدمة، مما يضمن تدفقًا مستمرًا للكهرباء لخدماتهم وأنشطتهم الحيوية. تتميز خدماتنا بكونها متخصصة ومكيفة للبيئة الجنوبية، مع فهم عميق لتحديات درجات الحرارة العالية والمسافات الطويلة. نقدم تقارير رقمية دقيقة ومفصلة ومدعومة بالصور الحرارية والتحليل المهني خلال 24 إلى 48 ساعة، مما يسرع عملية اتخاذ القرار لدى الأقسام الفنية. فضلًا عن ذلك، تساهم خدماتنا في تحسين سلامة فرق الصيانة من خلال استخدام تقنية عدم التلامس (التصوير من بعد بواسطة الدرون)، ونقدم كل ذلك بتكلفة فعالة وجودة عالية تنافس الخدمات التقليدية أو الأجنبية، مع توظيف أحدث التقنيات مثل كاميرات التصوير الحراري عالية الدقة والدرون المتقدمة.

3. قنوات التوزيع:

ل للوصول إلى عملائنا المستهدفين بفعالية، سنركز على قنوات توزيع مباشرة وموجهة تناسب مع طبيعة سوق والعملاء الكبار. القناة الأكثر أهمية هي العلاقات المباشرة، حيث سنقوم بزيارات وعروض تقديمية مباشرة للأقسام الفنية والإدارات العليا المسؤولة عن الصيانة والتشغيل في شركات مثل سونلغاز وسوناطراك. كما سنتابع ونشارك بجدية في المناقصات والعقود الحكومية التي تطرحها هذه الشركات، مقدمين عروضًا فنية ومالية تنافسية. سنعزز وجودنا أيضًا من خلال الشبكات المهنية والعلاقات الصناعية بالمشاركة في المؤتمرات والمنتديات المتخصصة لبناء شبكة علاقات قوية. أما على الصعيد الرقمي، فسيكون لدينا موقع إلكتروني احترافي يعرض خدماتنا وقيمة أعمالنا في النهاية، سيؤدي تقديم خدمات عالية الجودة إلى توصيات إيجابية من العملاء الراضين، مما يعزز من انتشارنا وزيادة الثقة في خدماتنا.

4. العلاقة مع العملاء:

نسعى لإقامة علاقات مبنية على الثقة، الخبرة، الاستمرارية، والاحترافية مع عملائنا. هذا يعني تقديم خدمة شخصية ومخصصة تتفهم الاحتياجات الفريدة لكل عميل وتحديات شبكته. هدفنا هو بناء شراكات استراتيجية طويلة

الأمد، حيث لا نكتفي بتقديم خدمة لمرة واحدة، بل نصبح شريكاً تقنياً موثوقاً على المدى الطويل في صيانة ومراقبة شبكاتهم. يتطلب ذلك دعمًا فنيًا مستمرًا وسريع الاستجابة، مع القدرة على تلبية الاستفسارات والطلبات الطارئة وتقديم المشورة الفنية الفورية. نلتزم بالشفافية التامة في التقارير والاتصال، مع تقديم تقارير واضحة ومفهومة والحفاظ على قنوات اتصال مفتوحة. يتطلب بناء هذه العلاقات استثماراً في فريق عمل مؤهل ومحترف، ونظم دعم عملاء فعالة، وزيارات ميدانية منتظمة لتعزيز التواصل المباشر. هذه العلاقات المتينة تضمن تدفقاً مستمراً للإيرادات من خلال العقود طويلة الأجل، وتساهم بشكل مباشر في تعزيز قيمة خدماتنا.

5. المداخل:

سيكون مصدر الدخل الرئيسي لـ "ThermoVision HTB" هو الخدمات الفنية المتخصصة القائمة على التصوير الحراري. سنعتمد في نموذج التسعير بشكل أساسي على العقود السنوية أو الدورية، حيث سيتم توقيع اتفاقيات لتقديم خدمات مراقبة دورية لشبكات العملاء (مثلاً، مسح حراري كل 3 أشهر أو ربع سنوي)، مما يوفر استقراراً في الإيرادات. بالإضافة إلى ذلك، سنقدم خدمات على أساس أجر محدد لكل للمشروع الفردية أو المهام الخاصة، حيث يتم تحديد سعر الخدمة بناءً على حجم الشبكة، المسافة، وعدد المكونات المراد فحصها. قد نقدم أيضاً رسوماً استشارية في حال تقديم خدمات استشارية إضافية تتجاوز نطاق المسح الحراري الأساسي. في البداية، نتوقع أن تكون العقود الدورية هي المصدر الأكبر للدخل، وستتم عملية الدفع عادة عبر تحويلات بنكية بعد تقديم الخدمة وتقديم الفواتير، وفقاً للشروط المتفق عليها في العقود.

6. الموارد الرئيسية:

لتحقيق عرض القيمة بكفاءة وتقديم خدماتنا بجودة عالية، تعتمد "ThermoVision HTB" على مجموعة من الموارد الرئيسية. على رأس هذه الموارد تأتي الموارد البشرية، والتي تشمل مهندسين وفنيين متخصصين في الهندسة الكهربائية وتحليل التصوير الحراري وتشغيل الدرون، كما يضم فريقنا كوادر للدعم التقني والإداري. أما بالنسبة للموارد المادية، فهي تشمل كاميرات تصوير حراري عالية الدقة والجودة، وطائرات درون متقدمة قادرة على حمل الكاميرات والعمل في الظروف البيئية الصعبة. نحتاج أيضاً إلى أجهزة كمبيوتر قوية وبرامج تحليل بيانات متخصصة، ومركبات مجهزة للوصول إلى المواقع النائية، بالإضافة إلى معدات السلامة الضرورية. من الناحية الفكرية نعتبر الخبرة المتخصصة والمعرفة الفنية في التصوير الحراري وتشخيص أعطال الشبكات الكهربائية أصولاً لا تقدر بثمن، بالإضافة إلى منهجيات العمل وبروتوكولات إعداد التقارير، والسمعة الطيبة للعلامة التجارية التي ستبني بمرور الوقت.

7. الأنشطة الرئيسية:

لضمان نجاح المشروع وتقديم خدماتنا بفعالية، تتضمن الأنشطة الرئيسية عدة مراحل. نبدأ بالتشخيص والمراقبة الحرارية، حيث نقوم بتخطيط وتنسيق عمليات المسح مع العملاء، وتحضير المعدات اللازمة، ثم إجراء المسح الحراري الميداني باستخدام الكاميرات المحمولة والدرون لالتقاط صور ومقاطع فيديو حرارية لمكونات شبكة HTB. ذلك تحليل البيانات وإعداد التقارير، حيث تتم معالجة البيانات الحرارية باستخدام برامج متخصصة لتحديد الشذوذات وتشخيص الأعطال، ثم إعداد تقارير فنية رقمية مفصلة تتضمن الصور الحرارية والتحليل والتوصيات. كما نولي أهمية قصوى لإدارة علاقات العملاء، من خلال التواصل المستمر معهم، وتقديم التقارير، والرد على الاستفسارات، وبناء الثقة والولاء.

. وأخيرًا، تتضمن الإدارة والعمليات اليومية إدارة المشاريع، الموارد البشرية، الشؤون المالية، والصيانة الدورية للمعدات لضمان جاهزيتها وسلامتها.

8. الشركاء الرئيسيون:

لإنجاح مشروعنا وتوسيع نطاق أعمالنا، سنعتمد على شبكة قوية من الشركاء الرئيسيين. على رأس القائمة يأتي موردو المعدات التكنولوجية، مثل شركات تصنيع كاميرات التصوير الحراري كـ (FLIR Systems) وطائرات الدرون المتخصصة، لضمان توفير أحدث وأجود المعدات والدعم الفني اللازم. بالإضافة إلى ذلك، نعتبر العملاء الرئيسيين (مثل سونلغاز وسوناطراك) شركاء استراتيجيين، إذ تعد عقود التعاون طويلة الأجل وسيلة فعالة لضمان استمرارية النشاط وخلق فرص لمبادرات مستقبلية متقدمة. نسعى أيضًا للتعاون مع المؤسسات الأكاديمية ومراكز البحث في الجزائر، مثل الجامعات والمعاهد التقنية، للبحث والتطوير وتدريب الكوادر المحلية. ولا غنى لنا عن شركات النقل لتسهيل حركة المعدات والفريق إلى المواقع النائية. وأخيرًا، نعتمد على شركات استشارية قانونية ومالية لضمان الامتثال للوائح، وعلى شركات التأمين لتغطية المخاطر المتعلقة بالعمل في بيئة الجهد العالي وتشغيل الدرون.

9. التكاليف:

تتوزع التكاليف الرئيسية لـ "ThermoVision HTB" بين تكاليف استثمارية وأخرى وظيفية ضرورية لضمان استمرارية وجود الخدمة. تشمل التكاليف الاستثمارية بشكل أساسي شراء المعدات المتخصصة عالية التقنية، مثل كاميرات التصوير الحراري عالية الدقة التي يمكن أن تصل تكلفتها إلى عشرات الآلاف من الدولارات، وطائرات الدرون الصناعية المتقدمة المزودة بحمولات حرارية كما تشمل هذه التكاليف أجهزة الكمبيوتر القوية وبرامج تحليل البيانات المتخصصة وشراء وتجهيز المركبات المناسبة للعمل في المناطق الصحراوية. أما التكاليف الوظيفية فتمثل الجزء الأكبر من النفقات المتكررة، وعلى رأسها رواتب وأجور الفريق المتخصص من المهندسين والفنيين وطياري الدرون. تضاف إلى ذلك تكاليف صيانة وإصلاح المعدات بشكل دوري، ونفقات الوقود والسفر الباهظة بسبب المسافات الطويلة، ورسوم تراخيص التشغيل والتأمين اللازمة. كما تشمل هذه الفئة تكاليف التسويق والمبيعات، وفواتير الاتصالات والإنترنت، وإيجار مقر الشركة، إضافة إلى المواد الاستهلاكية وتكاليف التدريب والتطوير المستمر للفريق. إن الاستثمار الأولي الكبير في المعدات المتخصصة ورواتب الفريق الفني الماهر يمثلان العنصرين الأبرز في هيكل التكاليف.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

وزارة اقتصاد المعرفة والمؤسسات الناشئة
والمؤسسات المصغرة



الوكالة الوطنية لدعم وتنمية المقاولاتية



جامعة غرداية

الرقم: 47/015 / 127521

شهادة تكوين في المقاولاتية مؤقتة

برتيمة محمود جميل

100011099002040001

الحامل (ة) للرقم التعريفي الوطني الوحيد:

سلمت هذه الشهادة الى السيد (ة):

إبناتنا المتابعته (ها) للدورة التكوينية في المقاولاتية وإنشاء المؤسسات المصغرة، المنظمة خلال الفترة الممتدة: من 2025/05/18 الى 2025/06/05

حرد بغرداية في: 2025/06/18

مدير تطوير المقاولاتية

مركز تطوير الصغرة والتأهيل

مراكشي عبد الحميد



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

وزارة اقتصاد المعرفة والمؤسسات الناشئة
والمؤسسات المصغرة



الوكالة الوطنية لدعم وتنمية المقاولاتية



جامعة غرداية
الرقم: 127526 / 47/015

شهادة تكوين في المقاولاتية مؤقتة

سلمت هذه الشهادة الى السيد (ة): **دهري صدام حسين** الحامل (ة) للرقم التعرّفي الوطني الوحيد: 109910362000940009

إثباتا لتابعته (ها) للدورة التكوينية في المقاولاتية و إنشاء المؤسسات المصغرة. المنظمة خلال الفترة الممتدة: من 2025/05/18 الى 2025/06/05

حرد بغرداية في: 2025/06/18

مدير تطوير المقاولاتية
مستشار
مركز تطوير المقاولاتية
د. راكشي عبد الحميد



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie

جامعة غرداية
كلية العلوم و التكنولوجيا

غرداية في : ... / 06 / 2025

القسم : الآلية و الكهروميكانيك .
الشعبة : إلكتروميكانيك .
التخصص : 2 ماستر صيانة صناعية .

شهادة ترخيص بالتصحيح والإيداع:

أنا الأستاذ(ة): بن داوي مسعود.

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (البياس / ماستر / دكتوراه) المعنونة بـ:

« Contribution à la maintenance conditionnelle du réseau électrique HTB par le contrôle thermo vision »

من إنجاز الطلبة:

محمود جميل برتيمة

دهري صدام حسين

التي نوقشت بتاريخ: 2025 / 06 / 24.

أشهد أن الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

مصادقة رئيس القسم :

إمضاء المسؤول عن التصحيح:

رئيس قسم الآلية والكهروميكانيك

عزواي محمد

