

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de fin d'études

En but de l'obtention du diplôme master
en Electromécanique

Thème

**Intégration de la thermographie dans la
maintenance des systèmes électriques
[Application SPA Tchin-Lait]**



Présenter par :

- ❖ Idir ISSAOUNE.
- ❖ Hani SELLAH.

Encadré par :

Mr K.DJERMOUNI

Jury :

Président : Mr Y.MEBARKI
Examineur : Mr Y.IMAOUCHEN

Année universitaire : 2024/2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2025
Fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : ISSAOUNE
Prénom : Idir
Matricule : 202033007121
Spécialité et/ou Option : Electromécanique
Département: Génie électrique
Faculté: Technologie
Année universitaire : 2024/2025

Et chargé de préparer un mémoire de: *Master*

Intitulé: Intégration de la thermographie dans la maintenance des systèmes électriques
[Application SPA Tchén-Lait]

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
07/07/2025

Signature de l'intéressé

Lu et approuvé

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : Sellah

Prénom : Hani

Matricule : 202033007132

Spécialité et/ou Option : Électromécanique

Département: Génie électrique

Faculté: sciences et technologies

Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : Master

Intitulé : Intégration de la Thermographie dans la maintenance des systèmes électriques
(application SPA TCHIN-LAIT)

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
07/07/2025

Signature de l'intéressé

Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Remerciements

Au début de ce travail, nous tenons à remercier Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a donné la force et le courage nécessaires pour accomplir ce travail, poursuivre nos études, et nous avoir guidés sur le droit chemin.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos chers parents, véritables clés de notre réussite, pour leurs sacrifices, leur soutien inconditionnel, et leurs encouragements constants tout au long de notre parcours académique.

Nos remerciements vont également à notre encadreur, Monsieur **Djermouni Kamel**, pour les efforts considérables qu'il a fournis pour la réussite de ce travail, ses conseils avisés, son accompagnement, ainsi que sa manière unique de nous motiver.

Nous remercions le responsable technique, **Monsieur Tounsi Farid**, ainsi que l'ensemble des responsables de la SPA Tchén-Lait pour leur accueil chaleureux et leur précieuse contribution à la réalisation de ce projet.

Enfin, nous exprimons notre sincère gratitude à toute personne qui nous a soutenus et encouragés sur ce chemin. Ce travail porte en lui une part de chacun d'eux.

Dédicaces

*À mon père **Achour**,*

Toi qui es ma paix intérieure, ma sérénité dans les tempêtes. Ta présence me rassure, ton regard me pousse à aller de l'avant. Tu es mon pilier, mon refuge et ma source inépuisable de courage.

*À ma mère **Khoukha**,*

Ta tendresse inconditionnel est mon remède dans les moments de doute. Tu me relèves quand je tombe, tu crois en moi même quand moi je doute. À tes yeux, je suis toujours capable, et grâce à toi, je le deviens.

*À vous deux, **mes parents adorés**,*

Ce travail vous appartient autant qu'à moi. C'est le fruit de votre amour, de vos sacrifices, de votre confiance, et de votre soutien sans faille.

Je vous souhaite santé, bonheur, et une longue vie. Je vous aime profondément.

*À ma sœur **Nourhan**,*

*À mes frères **Aymen** et **Yanis**,*

Merci pour votre affection, vos encouragements et votre présence. Vous êtes ma force discrète.

À toute ma famille,

À mon collègue et partenaire dans ce mémoire,

À mes enseignants,

*À toutes les personnes qui ont cru en moi, m'ont soutenu, m'ont aimé, et surtout **m'ont tendu la main** à chaque étape de mon parcours...*

Et enfin, en hommage à ceux qui vivent à jamais dans mon cœur :

*Mon grand-père **Saleh**,*

*Ma grand-mère **Sasaa**,*

*Et mon cousin **Fayçal**.*

Merci pour tout ce que vous avez été, et pour tout ce que vous êtes encore pour moi.

Hani SELLAH

Dédicaces

Tout d'abord, je dédie ce travail :

À mes très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien sans faille tout au long de mon parcours, que

Dieu me le garde en très bonne santé.

À ma sœur et toute ma famille, pour leur soutien constant.

À mes amis, collègues, et toutes les personnes qui m'ont accompagné de près ou de loin tout au long de ce parcours.

À mes enseignants sans exception.

À la personne avec qui j'ai partagé ce projet, dans les moments faciles comme dans les plus difficiles et toute sa famille.

Et à tous ceux qui m'ont soutenu jusqu'à l'aboutissement de ce projet de fin d'études.

Idir ISSAOUNE

RESUME :

Ce mémoire traite l'utilisation de la thermographie infrarouge comme technique de maintenance prédictive dans l'industrie, plus précisément au sein de l'entreprise TCHIN-LAIT/CANDIA à Béjaïa. L'étude commence par une présentation générale de la maintenance industrielle et de ses différentes approches (corrective, préventive, prédictive), avant de se focaliser sur la thermographie. Cette dernière permet de détecter les anomalies thermiques sans contact, en visualisant les élévations anormales de température. Une inspection réelle a été menée sur site, avec l'analyse d'équipements électriques via une caméra thermique Testo 885, en partenariat avec un auto-entrepreneur certifié. En complément, un programme de diagnostic automatisé basé sur des réseaux de neurones artificiels a été développé pour interpréter les images thermiques. Ce programme est conçu pour être intégré au système SAP S/4HANA de l'entreprise, afin de renforcer la stratégie de maintenance intelligente.

ABSTRACT:

This thesis explores the use of infrared thermography as a predictive maintenance technique in the industrial field, specifically within the TCHIN-LAIT/CANDIA company in Béjaïa. The study begins with an overview of industrial maintenance strategies (corrective, preventive, predictive), then focuses on thermography, which enables non-contact detection of thermal anomalies by visualizing abnormal temperature rises. A real on-site inspection was conducted using a Testo 885 thermal camera, in collaboration with a certified thermography specialist. Additionally, an automated diagnostic program based on artificial neural networks was developed to interpret thermal images. This program is designed to be integrated into the company's SAP S/4HANA management system, aiming to strengthen intelligent maintenance operations.

ملخص:

تتناول هذه الأطروحة استخدام التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء كتقنية صيانة تنبؤية في الصناعة، وتحديداً داخل شركة TCHIN-LAIT/CANDIA في بجاية. تبدأ الدراسة بعرض عام للصيانة الصناعية ومناهجها المختلفة (التصحيحية، الوقائية، التنبؤية)، قبل التركيز على التصوير الحراري. يتيح هذا الأخير اكتشاف الشذوذ الحراري دون تلامس، من خلال تصور الزيادات غير الطبيعية في درجة الحرارة. تم إجراء فحص فعلي في الموقع، مع تحليل المعدات الكهربائية باستخدام كاميرا حرارية Testo 885، بالشراكة مع مقاول مستقل معتمد. بالإضافة إلى ذلك، تم تطوير برنامج تشخيص آلي قائم على الشبكات العصبية الاصطناعية لتفسير الصور الحرارية. تم تصميم هذا البرنامج ليتم دمج في نظام SAP S/4HANA الخاص بالشركة، من أجل تعزيز استراتيجية الصيانة الذكية.

Mots clés : Caméra thermique, Maintenance industrielle prédictive, Thermogrammes.

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et abréviations

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur la maintenance industrielle

1.1	Introduction.....	3
1.2	Généralités	3
1.2.1	La maintenance.....	3
1.2.2	La fonction maintenance	3
1.2.3	Les industries et la maintenance	4
1.3	Objectifs de la maintenance	4
1.4	Les types de maintenance	4
1.4.1	Maintenance corrective	4
1.4.1.1	Maintenance palliative.....	5
1.4.1.2	Maintenance curative.....	5
1.4.2	Maintenance préventive.....	5
a)	Maintenance préventive systématique	5
b)	Maintenance préventive conditionnelle	5
c)	Maintenance prédictive (prévisionnelle).....	6
1.5	Les techniques de détection des pannes.....	7
1.5.1	L'analyse acoustique	7
1.5.2	Analyse vibratoire	7
1.5.3	Analyse des huiles	7
1.5.4	La thermographie infrarouge	8
1.6	La thermographie infrarouge en maintenance électrique	8
1.7	Conclusion	10
2	Chapitre II : La thermographie infrarouge.....	11
2.1	Introduction.....	11
2.2	Thermographie infrarouge	11
2.3	Concept de la thermographie infrarouge	11
2.3.1	Spectre électromagnétique.....	11

2.3.2	Emissivité, corps noir, gris et non gris	12
2.4	Principe de fonctionnement de la camera thermographique et les détecteurs IR utilisés dans l'imagerie thermographique	14
2.5	Applications de la thermographie	15
2.5.1	Surveillance des machines.....	15
2.5.2	Equipements électriques de haute et basse tension	16
2.5.3	Surveillance des fours et des processus industriels à haute température.....	17
2.5.4	Détection des fuites dans les systèmes de fluides	17
2.5.5	Surveillance des échangeurs thermiques et des systèmes de ventilation	17
2.5.6	Mesure du niveau des liquides dans les réservoirs	18
2.5.7	Détection des dysfonctionnements des vannes.....	18
2.5.8	Analyse de l'isolation des bâtiments	18
2.5.9	Surveillance des éléments mécaniques.....	18
2.6	Types des caméras infrarouges	19
2.7	Logiciels et traitement des images thermiques	22
2.8	Exemple de règles et consignes de sécurité	23
2.9	Conclusion	24
3	Chapitre III : Étude Pratique de la Maintenance Électrique par Thermographie Infrarouge.....	25
3.1	Introduction.....	25
3.2	Présentation d'entreprise Tchin-Lait Candia	25
3.3	Organigramme de l'entreprise	26
3.4	Perspectives et Défis	26
3.5	Equipements et sites inspectés.....	27
3.6	Matériels utilisés	34
3.6.1	Caméra thermique de type Testo 885 (320 x 240 pixels).....	34
1.	Description de la camera.....	34
2.	Caractéristiques technique de caméra	35
3.	Mode d'emploi.....	35
4.	Composants de camera.....	36
5.	Prise en main et utilisation de caméra.....	37
3.6.2	Logiciel de traitement d'image IR Testo IIRSoft	37
3.6.3	Equipements de protection individuelle (EPI)	37
3.7	Déroulement de l'inspection.....	37
3.7.1	Résultats et images IR relevée.....	38
3.7.2	Interprétation et analyse des résultats en °C	40
3.7.3	Mesures correctives et préventives proposée	40
3.7.4	Actions de maintenance réalisées	41
3.7.5	Difficultés rencontrée	42

3.8	Conclusion	42
4	Chapitre IV : Intégration de l'intelligence artificielle dans la maintenance	43
4.1	Introduction.....	42
4.2	Objectif du programme.....	42
4.3	Résumé fonctionnel du programme.....	43
4.4	Choix de l'approche par réseaux de neurones	44
4.4.1	Capacité à modéliser des relations non linéaires	44
4.5	Type de réseau utilisé : MLP (Perceptron multicouche)	44
4.6	Description des données d'entrée utilisées dans le programme	45
4.6.1	Structure des données d'entrée	45
4.6.2	Rôle des données d'entrée	45
4.6.3	Structure du code-barres binaire.....	45
4.7	Données de sortie attendues.....	47
4.7.1	Nature des sorties	47
4.7.2	Températures de référence des équipements	47
4.7.3	Objectif des sorties	49
4.8	L'architecture du programme	50
4.9	Structure générale du programme.....	51
4.10	Performance du réseau.....	53
4.11	Analyse graphique des résultats.....	55
4.12	Interprétation.....	56
4.13	Exemples de fonctionnement du programme	56
4.13.1	Exemple 01 : (Équipement en état correct)	56
4.13.2	Exemple 02 : (Surchauffe modérée - Priorité C-)	57
4.13.3	Exemple 3 : (Surchauffe critique -Priorité A-).....	58
4.14	Conclusion	59
5	Conclusion générale	60
Références bibliographiques		

Liste des figures

Figure 1.1 Organisation et Environnement de la Fonction Maintenance	4
Figure 1.2 Résumé des types de maintenance	6
Figure 1.3 Exemple de contrôle par ultrasons	7
Figure 1.4 Exemple de contrôle de vibration	7
Figure 1.5 Exemple de défaut électrique de connexion (mauvais serrage)	8
Figure 2.1 Spectre électromagnétique domaine de mesure en infrarouge	11
Figure 2.2 Emissivité ϵ d'un matériau en fonction de l'angle d'observation φ	12
Figure 2.3 Rapport entre la radiation émise et les caractéristiques de la surface du matériau.	13
Figure 2.4 Schéma bloc d'une caméra thermographique	14
Figure 2.5 Image visible et image thermique d'un moteur électrique entraînant une pompe dans la salle des machines d'un bateau-citerne	15
Figure 2.6 Images visibles et images thermiques des équipements de basse et haute tension ...	16
Figure 2.7 Image visible et image thermique d'un four industriel	16
Figure 2.8 Image visible et image thermique d'une canalisation du réseau. L'image thermique montre clairement une isolation défectueuse	17
Figure 2.9 La détection du niveau de remplissage des réservoirs est une des applications de l'imagerie thermique chez BASF	17
Figure 2.10 Image visible et image thermique d'un palier moteur surchauffé	19
Figure 2.11 Modèle : FLIR E96 Champ de vision double $14^\circ + 24^\circ$	21
Figure 2.12 Modèle : A400 + Configuration Capteur intelligent (avancé)	21
Figure 2.13 Modèle : FLIR FC-608 AI, objectif $8,6^\circ$ (75 mm) f/1.1.....	22
Figure 2.14 Modèle : FLIR X6980-HS InSb (1,5 à 5,0 μm), f/2.5	22
Figure 3.1 Organigramme hiérarchique des services de TCHIN-LAIT	26
Figure 3.2 Caméra thermique Testo 885	33
Figure 3.3 Les composants de la caméra Testo 885	35
Figure 3.4 Fiche anomalie n°01 rédigée après l'inspection de disjoncteur compresseur5.....	37

Figure 3.5 Fiche anomalie n°02 rédigée après l’inspection de 5eme batterie de bas à partir de la gauche.....	38
Figure 3.6 Fiche anomalie n°03 rédigée après l’inspection de disjoncteur QM16.....	38
Figure 4.1 Résumé fonctionnel du programme	43
Figure 4.2 Organigramme des étapes du programme	50
Figure 4.3 Schéma de réseau (net1)	51
Figure 4.4 Evolution de l’erreur MSE en fonction du nombre d’itérations	54
Figure 4.5 Relation entre les sorties prédites et les valeurs réelles	55
Figure 4.6 Comparaison entre températures de référence et prédites	56
Figure 4.7 Résultat sur MATLAB d’exemple 01	57
Figure 4.8 Résultat sur MATLAB d’exemple 02	57
Figure 4.9 Résultat sur MATLAB d’exemple 03	58

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Les valeurs d'émissivité de quelques matériaux	13
Tableau 2.2	Types des caméras thermiques selon la plage spectrale.	19
Tableau 2.3	Types des caméras thermiques selon le détecteur.	20
Tableau 3.1	armoires de DEPOT ANNEXE sous station N°1	26
Tableau 3.2	armoires de DEPOT ANNEXE sous station N°2	27
Tableau 3.3	armoires de DEPOT ANNEXE, COULOIRE DEPOT	28
Tableau 3.4	armoires de UNITE PRODUCTION UHT, SOUS STATION N°03	29
Tableau 3.5	Caractéristique de la caméra Testo 88	34
Tableau 3.6	Les trois anomalies inspectées	39
Tableau 4.1	Les codes-barres des types d'équipements	45
Tableau 4.2	Les codes-barres des températures par type d'équipement	46
Tableau 4.3	Répartition des équipements par bloc de code-barres	47
Tableau 4.4	Les températures de référence des équipements	48
Tableau 4.5	Classification des anomalies en niveaux de priorité	49
Tableau 4.6	La description des paramètres d'entraînement	52
Tableau 4.7	Résultats récapitulatif	58

Liste des symboles et abréviations

CND : Contrôle non destructif.

Db : Décibel.

°K : Kelvin.

°C : Degré Celsius.

μm : Micro mètre.

λ : La longueur d'onde (m).

E : Energie.

h : Constante de Planck (J.s).

T : Température.

c : La vitesse de la lumière (m/s).

ε : L'émissivité

IR : Infrarouge.

φ : l'angle d'observation.

σ : La constante de Stephan-Boltzmann ($\text{Wcm}^{-2} \text{K}^{-4}$).

W : Le flux radiant (W/m^2).

FPA : Focal Plan Array.

NETD : Noise Equivalent Temperature Difference.

EPI : L'équipement de protection individuelle.

MSE : Mean Squared Error.

TGBT : Tableau Général Basse Tension

Introduction générale

Introduction générale

Dans le contexte industriel actuel, marqué par une automatisation croissante et une exigence élevée en matière de performance, la fiabilité des équipements devient un enjeu stratégique. Les arrêts de production imprévus, souvent causés par des défaillances techniques sur des machines telles que les moteurs ou les dispositifs électromécaniques, engendrent des pertes économiques importantes. C'est dans cette optique que la maintenance industrielle s'est imposée comme une fonction clé, intégrée au cœur des stratégies visant à optimiser la performance, la fiabilité et la durée de vie des équipements de production.

Traditionnellement, la maintenance se fondait sur des approches correctives ou préventives, reposant sur une connaissance approfondie du fonctionnement des équipements et de leurs composants. Toutefois, ces approches montrent leurs limites face à la complexité croissante des systèmes industriels. C'est pourquoi la maintenance prédictive s'est progressivement imposée comme une alternative plus efficace, en s'appuyant sur la surveillance en temps réel des paramètres de fonctionnement et sur l'analyse de données pour anticiper les pannes avant qu'elles ne surviennent.

Cette approche prédictive, bien qu'avantageuse en termes de réduction des coûts de maintenance et d'optimisation de la disponibilité des machines, nécessite l'intégration de capteurs de haute précision et des outils d'analyse avancés, notamment issus de l'intelligence artificielle et du traitement de signal. Parmi les technologies de surveillance utilisées, l'imagerie thermique joue un rôle de plus en plus central.

En effet, la thermographie infrarouge permet de visualiser les élévations anormales de température, souvent indicatives d'un défaut imminent, tel qu'un échauffement anormal dû à une surcharge, une mauvaise isolation ou une résistance accrue dans un composant électrique. Ces anomalies thermiques, invisibles à l'œil nu, peuvent être détectées de manière non intrusive à l'aide de caméras thermiques. Toutefois, malgré leur efficacité, ces outils restent onéreux et exigent une interprétation rigoureuse des « thermogrammes », afin d'éviter des diagnostics erronés.

Dans le cadre de ce travail, nous avons intégré la technologie de maintenance par thermographie infrarouge au sein de l'entreprise **SPA Tchín-Lait Candia**, dans l'objectif d'améliorer la surveillance et la fiabilité de ses équipements industriels. Par ailleurs, nous avons développé un programme de diagnostic thermique automatisé basé sur des réseaux de neurones artificiels, capable d'interpréter les images thermiques capturées et de proposer des diagnostics précis. Ce programme est conçu pour être interopérable avec le logiciel de gestion interne SAP S4/HANA, permettant ainsi une intégration fluide dans le système d'information de l'entreprise.

Pour mener à bien cette étude et atteindre les objectifs fixés, le mémoire s'articule autour de quatre chapitres complémentaires décrits ci-dessous :

Le **premier chapitre** présente les généralités sur la maintenance industrielle, en abordant ses différentes formes, ses objectifs ainsi que son rôle stratégique dans la performance

des systèmes de production. Le **deuxième chapitre** est consacré à la thermographie infrarouge, en tant qu'outil de maintenance prédictive, avec une explication détaillée de ses principes de fonctionnement, des types de caméras thermiques existantes et de leurs domaines d'application. Le **troisième chapitre** traite de la partie pratique réalisée au sein de l'entreprise SPA Tchin-Lait Candia, où ont été menées des campagnes de mesures thermiques, des inspections techniques, l'identification d'anomalies et la mise en œuvre des actions correctives. Enfin, le **quatrième chapitre** est dédié au développement du programme de diagnostic thermique basé sur des réseaux de neurones artificiels, en décrivant ses étapes de conception. Ce programme a été développé et conçu pour être intégré au système de gestion SAP S/4HANA utilisé par l'entreprise, afin de renforcer le suivi et l'analyse des données thermiques à des fins de maintenance prédictive. Une conclusion générale avec quelques perspectives termine ce mémoire.

Chapitre I :

Généralités sur La Maintenance industriel

1.1 Introduction

La maintenance industrielle occupe une place essentielle au sein de toute entreprise manufacturière, influençant directement sa performance et sa rentabilité. En effet, les pannes, les défaillances et la baisse de rendement des équipements après une longue période d'exploitation engendrent des coûts considérables. De plus, les arrêts de production, la gestion complexe des stocks et des approvisionnements, ainsi que les risques liés à la sécurité des employés sont autant de défis à surmonter. Une stratégie de maintenance efficace permet de minimiser ces impacts, d'améliorer la disponibilité des machines et d'optimiser la productivité globale de l'entreprise.

Dans ce chapitre nous allons présenter quelques généralités sur la maintenance industrielle et sur ses objectifs puis nous finalisons par les types et les techniques de détection des défaillances.

1.2 Généralités

1.2.1 La maintenance

La norme AFNOR (NF X 60-010) définit la maintenance comme étant : « ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ». « Maintenir » contient la notion de « prévention » sur un système en fonctionnement ; « rétablir » contient la notion de « correction » consécutive à une perte de fonction ; « état spécifié » ou « service déterminé » implique la prédétermination d'objectif à atteindre, avec quantification des niveaux caractéristiques. Cette norme « oublie » l'aspect économique, lacune comblée dans le document d'introduction (X 60-000) : « bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût global optimal ».

1.2.2 La fonction maintenance

La fonction maintenance est l'une des trois fonctions techniques principales de l'industrie : fonction Etudes (du produit), fonction production et fonction maintenance. Le graphe suivant montre que la maintenance est une fonction intégrée à la vie de l'entreprise car elle est constamment en contact avec les différents services de l'entreprise (direction, personnel, commercial, production, études, etc.) [1].

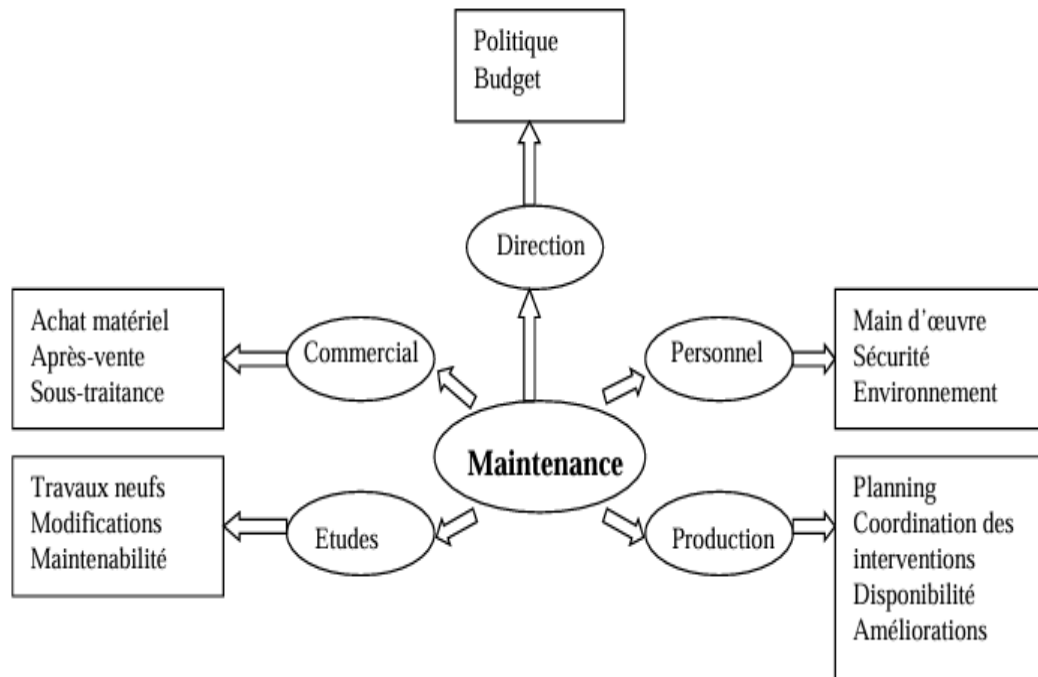


Figure 1.1 Organisation et Environnement de la Fonction Maintenance [1]

1.2.3 Les industries et la maintenance

Le coût de défaillance élevé et la disponibilité exigée aux équipements des entreprises à processus, la sécurité et la disponibilité des équipements des entreprises de service confèrent à la maintenance une importance capitale. On déduit donc :

- Plus l'indisponibilité est coûteuse, plus la maintenance est économique ;
- Plus la sécurité est en jeu, plus la maintenance s'avère obligatoire [1].

1.3 Objectifs de la maintenance

La fonction maintenance fait partie de la productique et constitue un moyen efficace d'amélioration de la rentabilité, la compétitivité et la sécurité. Cette dernière a pour objectifs de [2,3] :

- Assurer une disponibilité optimale des équipements ;
- Réduire les coûts directs d'interventions et le coût indirect occasionné ;
- Assurer une meilleure sécurité des personnes, des matérielles et de l'environnement ;
- Étudier les conditions de fonctionnement, les défaillances possibles et les conditions d'intervention.

1.4 Les types de maintenance

1.4.1 Maintenance corrective

C'est une maintenance effectuée après défaillance catalectique ou imprévue. Son but est de remettre un bien dans un état dans lequel il peut exécuter une fonction requise. De plus, il permet de réparer et de corriger la source de la panne, lorsque l'endommagement n'est ni progressif ni graduel pour éviter les accidents fréquents. Elle comprend deux types [4] :

1.4.1.1 Maintenance palliative

Appelée dépannage, dont l'objectif est de supprimer les effets de la défaillance afin de reprendre la production, cette maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives [5].

1.4.1.2 Maintenance curative

Appelée réparation, dont l'objectif est de ramener le système à un niveau de performance donné. Ce type de maintenance entraîne donc l'indisponibilité du système. Cette action comprend plusieurs phases [4] :

- Localiser (identifier les éléments défaillants) ;
- Diagnostiquer (identifier la cause de la défaillance) ;
- Corriger (appliquer le remède) ;
- Tester (vérifier les effets du remède à l'endurance).

1.4.2 Maintenance préventive

Dans la définition de la maintenance préventive, nous incluons l'ensemble des contrôles, visites et interventions de maintenance effectuées préventivement [6]. C'est une maintenance effectuée selon des critères prédéterminés dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien (NF X 60-010). Elle s'adresse aux éléments provoquant une perte de production et des coûts d'arrêts imprévisibles classés comme importants pour l'entreprise [2].

a) Maintenance préventive systématique

D'après la norme NF X60-010 la maintenance préventive systématique est une maintenance exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien. Elle vise à minimiser les arrêts par l'opération planifiée de remplacement, de réglage et de contrôle avant l'apparition d'une panne catalectique.

b) Maintenance préventive conditionnelle

D'après la norme NF X60-010 la maintenance préventive conditionnelle est une maintenance subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto-diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure...). Elle s'applique pour les grandes machines tournantes ou un démontage et un remplacement coûtant cher en perte de production et en temps.

c) Maintenance prédictive (prévisionnelle)

La maintenance prédictive est définie selon la norme NF EN 13306 X 60-319 : comme une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien. Cela signifie que l'on peut anticiper et détecter la panne avant que celle-ci ne se produise grâce à la surveillance continue et automatique par les données recueillies à l'aide des capteurs et à l'intelligence artificielle. Ainsi, elle permet d'éliminer les procédures inutiles que l'on peut retrouver dans la maintenance préventive.

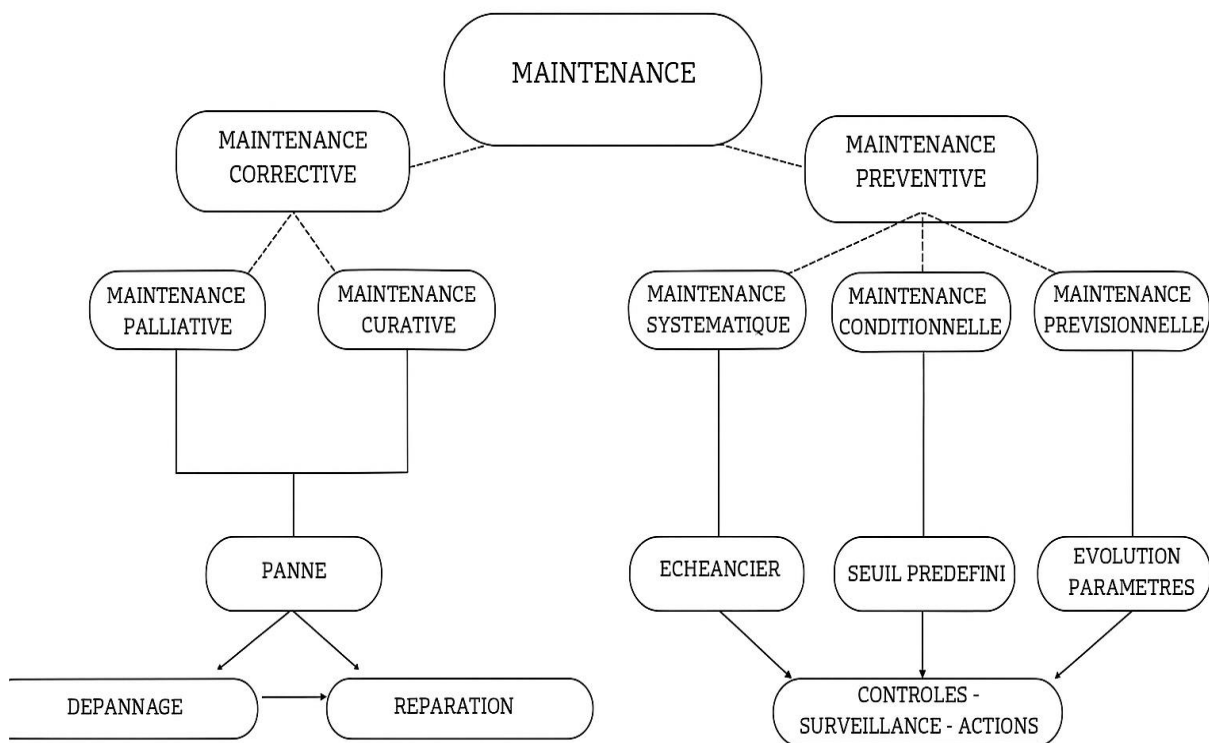


Figure 1.2 Résumé des types de maintenance

1.5 Les techniques de détection des pannes

1.5.1 L'analyse acoustique

Lorsqu'une structure comportant un défaut interne est soumise à une contrainte externe, le défaut devient une source d'émission acoustique. Les ondes sonores se propagent jusqu'à la surface de la pièce où l'on peut les détecter et les analyser.



Figure 1.3 Exemple de contrôle par ultrasons

1.5.2 Analyse vibratoire

Les vibrations d'une machine sont considérées comme une manifestation extérieure des forces internes, l'analyse de leurs signaux nous informe sur les processus de dégradation interne. La norme ISO 2041 définit la notion de vibration comme suit : vibration avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, Lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence.



Figure 1.4 Exemple de contrôle de vibration

1.5.3 Analyse des huiles

L'analyse des huiles est une technique de maintenance prédictive permettant d'évaluer trois aspects du fonctionnement des machines :

- a) **État des huiles** : Vérification de l'état de l'huile à travers des tests de propriétés (viscosité, acidité, additifs, etc.).
- b) **État du système de lubrification** : Contrôle de l'intégrité du système en analysant la contamination du lubrifiant (eau, silicium, autres particules).

- c) **État de la machine** : Évaluation de l'usure par l'analyse des particules présentes dans le lubrifiant [1].

L'analyse des huiles est principalement utilisée pour diagnostiquer l'état des machines en surveillant l'évolution des particules d'usure dans les lubrifiants des machines tournantes. En maintenance prédictive, il est crucial de contrôler l'état de l'huile et du système de lubrification, ces derniers pouvant être à l'origine de l'usure des machines.

L'existence des particules d'usure dans le lubrifiant nous permet d'identifier une dégradation d'état de la machine.

1.5.4 La thermographie infrarouge

L'analyse par thermographie infrarouge est l'une des techniques du Contrôle Non-Destructif (CND). Elle est utilisée en maintenance prédictive pour surveiller les conditions de fonctionnement des machines, structures et autres systèmes industriels. Cette technique utilise des instruments conçus pour surveiller les émissions d'énergie infrarouge (i.e. température) afin de déterminer les conditions de fonctionnement. En détectant les anomalies thermiques (i.e. les zones plus chaudes ou plus froides qu'elles devraient l'être), un ingénieur expérimenté peut localiser les débuts de défaillance dans un système quelconque [2].

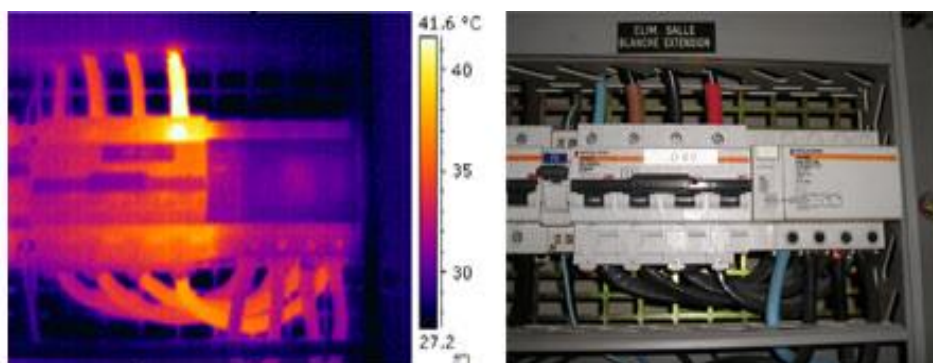


Figure 1.5 Exemple de défaut électrique de connexion (mauvais serrage)

1.6 La thermographie infrarouge en maintenance électrique

Si la thermographie est privilégiée par rapport à d'autres techniques telles que l'analyse vibratoire ou acoustique en maintenance électrique, c'est en raison de ses nombreux avantages spécifiques à ce domaine.

1. Méthode non intrusive et sans contact

- Contrairement à l'analyse vibratoire ou acoustique, qui nécessitent parfois l'installation de capteurs sur les équipements, la thermographie se fait à distance et sans contact ;
- Cela permet d'analyser les installations sous tension et en fonctionnement, évitant ainsi des interruptions de service.

2. Identification immédiate des anomalies électriques

- La thermographie permet de visualiser immédiatement les échauffements anormaux liés aux défauts électriques ;
- Mauvais serrage de connexions ;
- Déséquilibre de phases ;
- Surcharges électriques ;
- Défauts d'isolement ;
- Contrairement à l'analyse vibratoire, qui est plus adaptée aux machines tournantes, la thermographie est spécifiquement efficace pour les composants électriques.

3. Rapidité et simplicité d'analyse

- Une caméra thermique permet d'inspecter plusieurs équipements en peu de temps, tandis que l'analyse vibratoire ou acoustique nécessite un traitement des signaux et une analyse plus poussée ;
- Les images thermiques sont faciles à interpréter, même pour des techniciens non spécialisés.

4. Prévention des incendies et des pannes électriques

- En électricité, la majorité des défauts entraînent une augmentation de température avant une défaillance ;
- La thermographie permet donc de prévenir les risques d'incendie et les coupures de courant imprévues, contrairement à l'analyse vibratoire ou acoustique qui ne détecteraient pas ces problèmes.

5. Réduction des coûts et amélioration de la fiabilité

- La thermographie évite les interventions inutiles en ciblant précisément les composants à risque ;
- Elle aide à optimiser la maintenance préventive et à éviter les réparations coûteuses en intervenant avant une panne critique ;
- Elle contribue à la réduction des coûts d'assurance en démontrant l'existence d'un programme structuré de maintenance prédictive, basé sur des technologies fiables comme la thermographie, l'entreprise améliore son profil de risque auprès des assureurs. Cela peut se traduire concrètement par :
 - Une négociation de primes plus basses ;
 - Des réductions liées à la bonne gestion des risques ;
 - Ou encore des garanties étendues à meilleur coût.

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons brièvement présenté la définition de la maintenance industrielle et ses objectifs, puis nous avons cité les types de la maintenance. En outre nous avons bien détaillé les différentes méthodes de détection des pannes.

Parmi les méthodes de détection des pannes traitées dans ce chapitre on a choisi la technique de la thermographie infrarouge pour qu'elle sera détaillée lors de la phase de conception dans le chapitre suivant.

Chapitre II : La thermographie infrarouge

2.1 Introduction

La température constitue un indicateur essentiel dans le domaine industriel, tant pour le contrôle des procédés que pour la maintenance des équipements. Une variation anormale peut signaler une défaillance potentielle, affectant la sécurité, la performance énergétique et la continuité de production.

La thermographie infrarouge, en tant que technique de mesure sans contact, permet de visualiser et d'analyser les émissions thermiques des équipements. Elle s'impose aujourd'hui comme un outil clé en maintenance préventive et prédictive.

Dans ce chapitre nous allons présenter les fondements de la thermographie, son principe de fonctionnement, les notions de rayonnement thermique, de corps noir et d'émissivité, ainsi qu'un aperçu des dispositifs de mesure et en fin les règles et les consignes de sécurité.

2.2 Thermographie infrarouge

Dans sa norme expérimentale A 09-400, l'AFNOR a défini la thermographie comme une « technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène thermique dans un domaine spectral de l'infrarouge ». La thermographie, c'est voir ce qui est invisible pour l'œil humain. Tout objet dont la température est supérieure au zéro absolu ($-273,15^{\circ}\text{C}$) émet un rayonnement, est dû à l'agitation thermique des atomes et des molécules qui composent l'objet, des températures ambiantes ou légèrement supérieur ce rayonnement se situe dans le domaine de l'infrarouge. Par conséquent, on associe souvent la chaleur au rayonnement infrarouge. Une variation de température entraîne une variation mesurable du rayonnement infrarouge, ces variations nous permettent d'indiquer l'état de fonctionnement d'un système.

2.3 Concept de la thermographie infrarouge

2.3.1 Spectre électromagnétique

Tout objet à une température au-dessus de zéro absolu ($-273,15^{\circ}\text{C}$) a la capacité d'émettre de la radiation infrarouge. La radiation infrarouge correspond à des longueurs d'onde entre $0,74$ et $1000\text{ }\mu\text{m}$ [7, 8, 9]. L'œil humain n'a pas la capacité de voir dans le domaine infrarouge du spectre électromagnétique et pour analyser un objet du point de vue de la radiation thermique il faut utiliser des caméras thermographiques qui reçoivent la radiation thermique et la transforment en images visibles, qui sont appelées aussi cartes thermiques ou thermogrammes.

Une surface émet de l'énergie d'une certaine température, nommée radiation spectrale et définie par la loi de Planck. L'énergie de radiation libérée dépend de la longueur d'onde. Celle-ci peut être écrite sous la forme d'une relation entre l'énergie et la longueur d'onde, en utilisant la constante de Planck :

$$E = \frac{h * c}{\lambda} \quad (2.1)$$

Où : $h = 6,626176.10^{-34}$ J.s est la constante de Planck, $c = 299792458$ m/s est la vitesse de la lumière, λ [m], la longueur d'onde et E [J] est l'énergie libérée.

La longueur d'onde est exprimée par la relation suivante, comme inverse proportionnellement avec la fréquence f :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

Le domaine de radiation infrarouge du spectre électromagnétique est partagé en [7, 8,9] :

1. Domaine infrarouge proche (0,7 - 2 μm) ;
2. Domaine infrarouge moyen (3 - 5 μm) ;
3. Domaine infrarouge éloigné (8 - 14 μm).

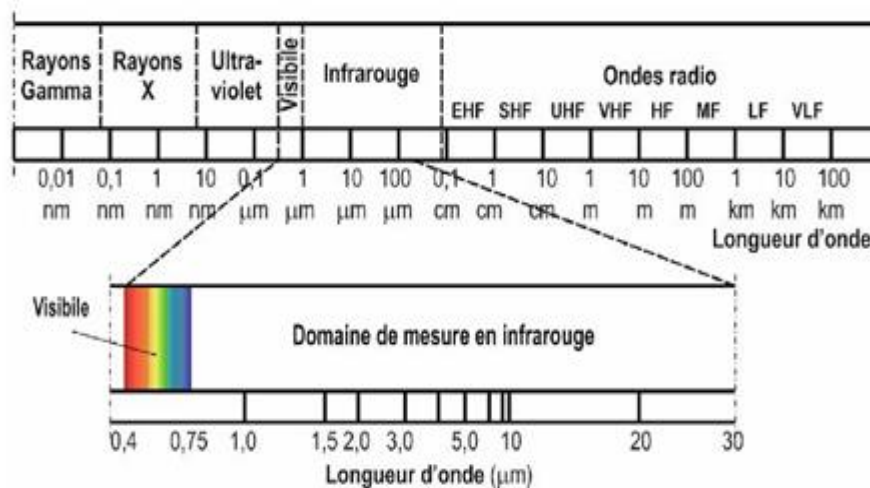


Figure 2.1 Spectre électromagnétique domaine de mesure en infrarouge [8]

2.3.2 Emissivité, corps noir, gris et non gris

L'émissivité représente la propriété d'un matériau d'émettre, d'absorber ou de réfléchir l'énergie. Elle est représentée par un coefficient qui peut varier entre 0 et 1, en même temps étant dépendant de l'angle d'observation, comme présenté dans la figure 2.2.

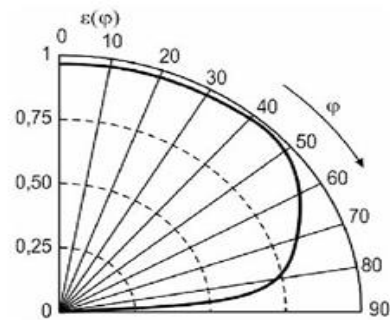


Figure 2.2 Emissivité ε d'un matériau en fonction de l'angle d'observation φ . [8]

On peut observer que la valeur du coefficient d'émissivité change avec le changement de l'angle d'observation : pour l'angle $\varphi = 0$, l'émissivité est : $\varepsilon = 1$. L'énergie thermique d'un corps est décrite par la loi de Stephan- Boltzmann [8, 9] :

$$W = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (\text{II. 3})$$

Où : W [W/m^2] est le flux radiant sur l'unité de surface, $\sigma = 5,6373 \cdot 10^{-12} \text{ Wcm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ est la constante de Stephan-Boltzmann, ε est l'émissivité de la surface du matériau et T [$^{\circ}\text{K}$] est la température de la surface.

Les caractéristiques de l'énergie émise par les trois types de matériaux du point de vue de l'émissivité – corps noir, gris et non gris, sont illustrées dans la figure 2.2. Le flux radiant (W) émis par la surface représente l'aire positionnée sous chacune des courbes.

Tableau 2.1 La valeur d'émissivité de quelques matériaux

Matériau	État de surface	Température ($^{\circ}\text{K}$)	Coefficient d'émissivité ϵ
Aluminium	Très poli	300	0.039–0.057
		373.15	0.09
	Fortement oxydé	300	0.2–0.31
		366.15	0.2
	anodisé	300	0.77
	rugueux	300	0.07
	peinture	300	0.27–0.67
fonte	Pas d'oxydation	273.15	0.21
	Fortement oxydé	377.15	0.95
		523.15	
fer	Pas d'oxydation	373.15	0.05
	oxydation	373.15	0.74
	poli	311.15	0.28
cuivre	oxydation	311.15	0.87
	poli	311.15	0.03
	rugueux	311.15	0.74
Céramique	Émaillée	294.15	0.45–0.69
Marbre	poli	311.15	0.75
Caoutchouc	Souple	300	0.86
Acier doux	poli	297.15	0.10

Du point de vue de l'émissivité propre, les corps peuvent être classifiés en :

- a) **Le corps noir** est le corps qui garde permanent la valeur de son émissivité égale à l'unité, indépendamment de la longueur d'onde. Il n'émet pas et ne transmet pas de l'énergie, ayant la réflectivité (ρ) et la transmission (t) égales à zéro.

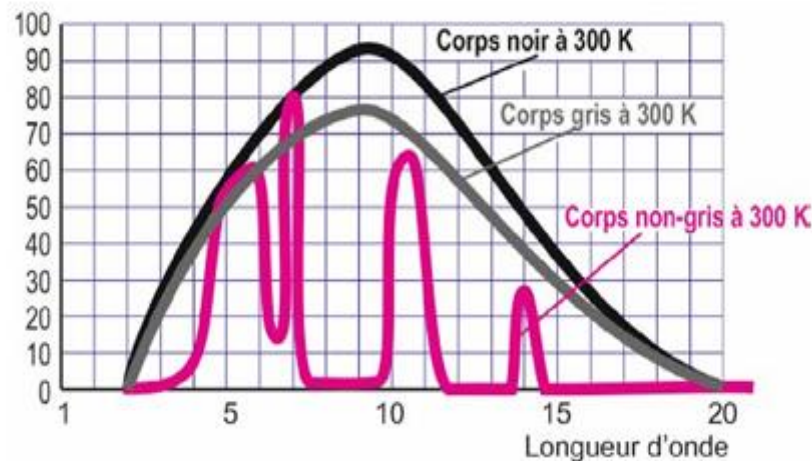


Figure 2.3 Rapport entre la radiation émise et les caractéristiques de la surface du matériau [10]

- b) **Le corps gris** à l'émissivité en dessous de la valeur maximale, entre 0 et 1, la même pour n'importe quelle longueur d'onde. Ce type de corps ne transmet pas de l'énergie, la transmission (t) étant égale à zéro. Ses composantes importantes sont celles d'émissivité et de réflexion.
- c) **Le corps non gris** a, en comparaison avec les deux autres types de corps, l'émissivité variable en fonction de la longueur d'onde – on peut dire qu'il pourrait être transparent à l'énergie en infrarouge – et transmet énergie de la source vers derrière : tous les trois composantes : émissivité, transmission et réflexion ont la même importance pour ce corps.

On peut affirmer qu'un corps noir peut exister seulement du point de vue théorique, en réalité il n'existe pas. En général, les solides organiques peints ou les métaux oxydés peuvent être considérés comme corps gris parce qu'ils n'atteignent jamais l'émissivité unitaire, mais elle est toujours constante. Si on parle des métaux lustrés et d'autres matériaux brillants, leur émissivité est réduite et on peut les appeler aussi corps gris mais avec une grande réflectivité : dans le cas des corps non-gris, on peut mentionner des matériaux qui présentent la propriété de changer leur émissivité en fonction de la longueur d'onde, comme par exemple le verre, des gazes etc. [10].

2.4 Principe de fonctionnement de la camera thermographique et les détecteurs IR utilisés dans l'imagerie thermographique

Les caméras thermographiques convertissent le rayonnement infrarouge en images visibles. Les principaux éléments composant une caméra thermographique sont : les lentilles, un détecteur en forme de matrice à plan focal (FPA - focal plan array), un système de

refroidissement du détecteur, composants électronique et les logiciels requis pour le traitement et la visualisation d'images.

Une caméra infrarouge contient un système optique qui concentre l'énergie infrarouge sur une puce de détection spéciale (ensemble de capteurs). Cette puce contient des milliers de pixels organisés dans une grille.

Chaque pixel de l'ensemble de capteurs réagit à l'énergie infrarouge qu'il reçoit et produit un signal électronique. Le processeur de la caméra reçoit le signal de chaque pixel et lui applique un calcul mathématique pour créer une carte en couleurs de la température apparente de l'objet. Une couleur différente est attribuée à chaque valeur de température. La matrice de couleurs ainsi créée est envoyée dans la mémoire et affichée sur l'écran de la caméra comme image thermique de cet objet [11].

Les conditions idéales dans le cas de la mesure de la radiation thermique seraient accomplies quand toute la radiation émise par le corps pourrait être captée et enregistrée par la camera, sans prendre en compte les possible facteurs perturbateurs comme l'atmosphère, l'émissivité du matériau etc. [12].

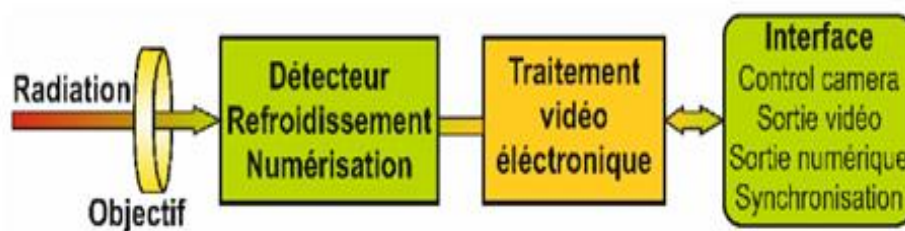


Figure 2.4 Schéma bloc d'une caméra thermographique [12]

2.5 Applications de la thermographie

2.5.1 Surveillance des machines

Une dégradation des conditions de fonctionnement d'une machine entraîne une modification des vibrations ainsi qu'une augmentation de la chaleur dégagée. Cependant, les variations de température peuvent aussi être dues au fonctionnement normal de la machine. Il est donc nécessaire de définir une plage de température normale et de détecter les écarts ou d'analyser l'évolution de la température pour identifier une surchauffe anormale.



Figure 2.5 Image visible et image thermique d'un moteur électrique entraînant une pompe dans la salle des machines d'un bateau-citerne [13]

2.5.2 Équipements électriques de haute et basse tension

Rappelons que par effet de Joule, les équipements conducteurs parcourus par un courant dissipent une énergie calorifique par échauffement. L'appareillage électrique en charge s'échauffe donc jusqu'à atteindre l'équilibre thermodynamique (l'énergie calorifique produite par le courant est égale à l'énergie dissipée dans l'environnement).

Une installation électrique est composée de nombreux appareillages par lesquels transitent des courants. Ces appareils sont reliés entre eux par des éléments conducteurs. Une installation électrique peut donc contenir des milliers de connexions. Lorsqu'une anomalie survient dans ces connexions, un échauffement local est souvent généré. Par comparaison entre les points similaires, la thermographie infra-rouge permet de détecter ses anomalies.

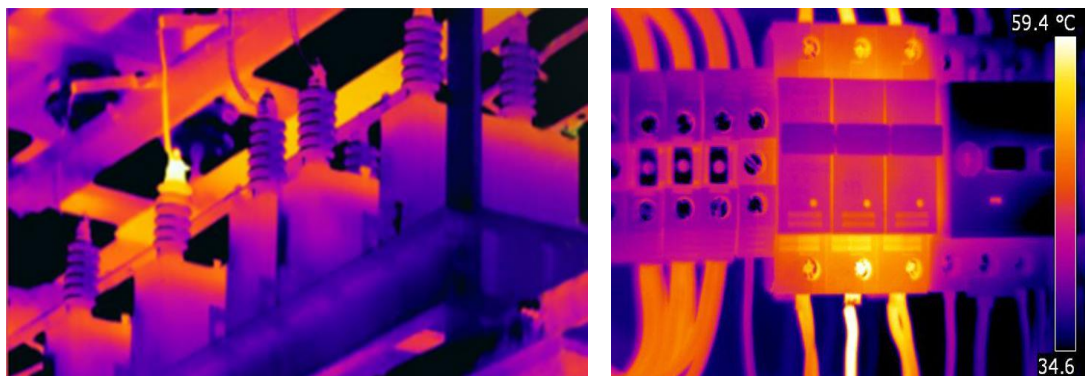


Figure 2.6 Images visibles et images thermiques des équipements de basse et haute tension [13]

- Les défauts thermiques des installations électriques les plus courants sont :
 - Mauvais serrages des connexions (bornes) ;
 - Usure, oxydation, ou corrosion de contacts ;
 - Positionnement incorrect de contacts mobiles ;
 - Problème de calibration de l'appareillage ;
 - Déséquilibre des charges entre phases ;
 - Ventilation insuffisante des tableaux et locaux électriques ;
 - Problème de conception des installations (ex. problèmes d'induction).

2.5.3 Surveillance des fours et des processus industriels à haute température

Dans les industries nécessitant des températures élevées (cimenteries, aciéries, verreries, pétrochimie, etc.), la thermographie permet de :

- Suivre la dégradation des réfractaires et des isolants ;
- Anticiper les interventions de maintenance pour éviter les défaillances.

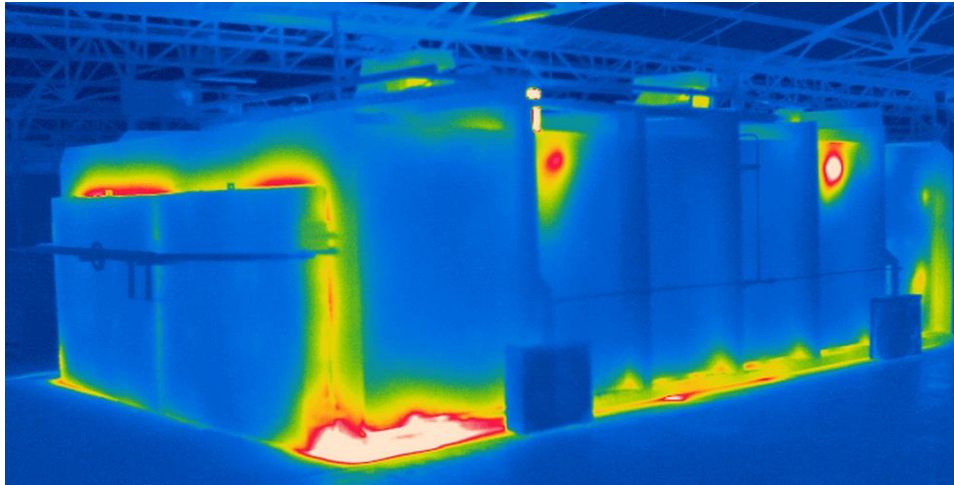


Figure 2.7 Image visible et image thermique d'un four industriel [13]

2.5.4 Détection des fuites dans les systèmes de fluides

La thermographie est efficace pour identifier les fuites dans les circuits de fluides, notamment :

- Les échauffements localisés près des fuites de liquide ;
- La baisse de température due à la détente d'un gaz ;
- La détection de certains gaz opaques dans certaines longueurs d'onde infrarouge ;
- La localisation des fuites dans les canalisations enterrées et des infiltrations d'eau.

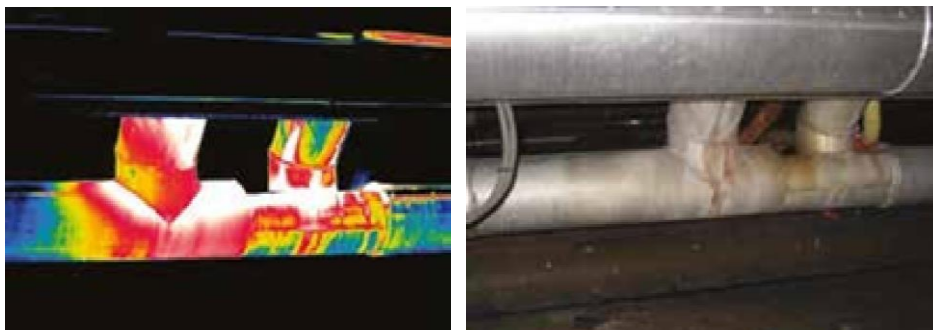


Figure 2.8 Image visible et image thermique d'une canalisation du réseau. L'image thermique montre clairement une isolation défectueuse [13]

2.5.5 Surveillance des échangeurs thermiques et des systèmes de ventilation

Les échangeurs thermiques et les systèmes de refroidissement (moteurs thermiques, moteurs électriques, climatisation, etc.) peuvent être analysés grâce à la thermographie. Elle permet de :

- Détecter l'encrassement des échangeurs thermiques ;
- Identifier une obstruction à l'intérieur d'un radiateur ou d'un conduit de ventilation en observant la répartition des températures extérieures.

2.5.6 Mesure du niveau des liquides dans les réservoirs

La thermographie permet de déterminer le niveau d'un liquide dans un réservoir en analysant les différences de température entre les zones remplies et vides.

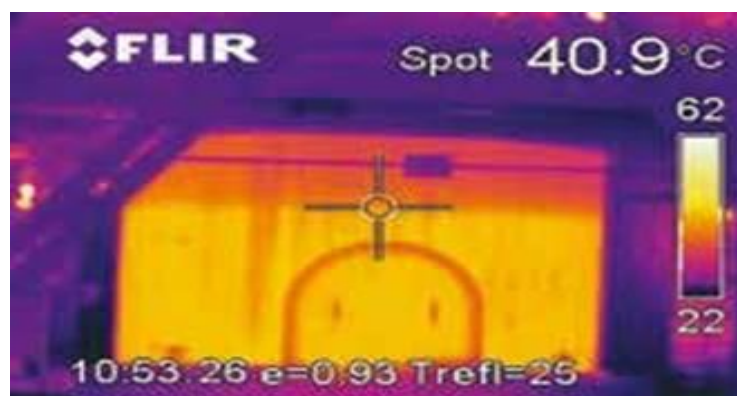


Figure 2.9 La détection du niveau de remplissage des réservoirs est une des applications de l'imagerie thermique chez BASF [13]

2.5.7 Détection des dysfonctionnements des vannes

Un blocage ou un dysfonctionnement d'une vanne peut être mis en évidence grâce aux variations de température observées avec une caméra thermique.

2.5.8 Analyse de l'isolation des bâtiments

La thermographie est un outil précieux pour identifier les défauts d'isolation thermique dans les bâtiments :

- Détection des ponts thermiques ;
- Identification des zones mal isolées ou dont l'isolant s'est détérioré.

2.5.9 Surveillance des éléments mécaniques

Les surchauffes mécaniques peuvent être causées par des défauts de montage ou des dégradations. La thermographie permet de détecter :

- Un défaut d'alignement d'arbres, de poulies ou d'accouplements ;
- Une augmentation anormale de température due à un manque de lubrifiant, une usure excessive ou un défaut de ventilation (ex. freins surchauffés) ;

- Les dégradations d'origine électrique ou hydraulique affectant les moteurs et les pompes (ex. défaut d'isolation des bobinages, obstruction des échangeurs thermiques).

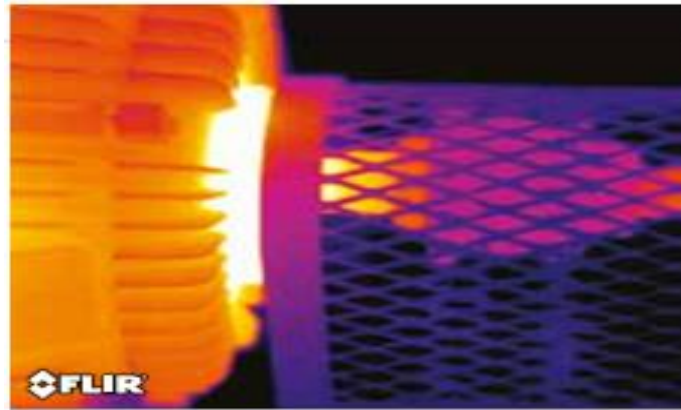


Figure 2.10 Image visible et image thermique d'un palier moteur surchauffé [13]

2.6 Types des caméras infrarouges

Les caméras thermiques peuvent être classées selon divers critères techniques et fonctionnels, en fonction de leurs caractéristiques de conception et de leurs domaines d'application. Les principales catégories de classification sont présentées ci-après.

a. Classification selon la plage spectrale (bande infrarouge utilisée)

Les caméras thermiques se distinguent selon la plage de longueurs d'onde infrarouges auxquelles elles sont sensibles. Chaque bande spectrale est associée à des propriétés optiques spécifiques qui conditionnent le type d'application pour lequel la caméra est la plus efficace. On distingue principalement trois catégories :

Tableau 2.2 Types des caméras thermique selon la plage spectrale

Type de caméra	Plage spectrale approximative	Applications courantes
SWIR (Short-Wave InfraRed)	0,9 – 1,7 μm	Vision à travers la fumée, inspection de composants électroniques ou de semi-conducteurs.
MWIR (Mid-Wave InfraRed)	3 – 5 μm	Surveillance militaire, détection de cibles à longue distance, analyse de gaz chauds.

LWIR (Long-Wave InfraRed)	7 – 14 μm	Inspection industrielle, maintenance électrique, détection de défauts thermiques sur les équipements.
---------------------------	----------------------	---

b. Classification selon la technologie du détecteur

Les caméras thermiques peuvent être équipées de deux types de détecteurs : refroidis et non refroidis, chacun présentant des caractéristiques distinctes.

Tableau 2.3 Types des caméras thermiques selon le détecteur

Type de détecteur	Avantages	Inconvénients
Refroidi	Offre une sensibilité thermique élevée, une résolution supérieure et une portée de détection accrue.	Coût élevé, encombrement plus important, nécessite un entretien régulier.
Non refroidi	Design compact, coût réduit, faible consommation énergétique.	Moins sensible aux faibles variations de température, portée limitée.

c. Classification selon la résolution thermique (NETD)

La **NETD** (Noise Equivalent Temperature Difference) est un indicateur clé de la performance d'une caméra thermique. Elle mesure la plus petite différence de température que le capteur peut détecter. Autrement dit, elle reflète la sensibilité thermique de la caméra. Plus la valeur de NETD est faible, meilleure est la capacité à détecter de faibles écarts de température.

➤ Interprétation des valeurs typiques de NETD

- NETD < 50 mK : Haute sensibilité thermique, adaptée aux analyses thermiques précises, telles que les diagnostics électroniques ou la recherche ;
- NETD entre 50 et 100 mK : Sensibilité moyenne, suffisante pour la plupart des applications industrielles comme la maintenance prédictive ;
- NETD > 100 mK : Faible sensibilité, utilisable dans des contextes où la précision thermique est moins critique (contrôle grossier, sécurité, etc.).

d. Classification selon la résolution spatiale (résolution de l'image)

La résolution spatiale dépend du nombre de pixels que possède le capteur infrarouge. Elle influence directement sur la précision et le niveau de détail de l'image thermique.

- **Haute résolution** : 640×480 pixels ou plus – permet une détection fine et détaillée, adaptée aux inspections complexes ;
- **Résolution standard** : 320×240 pixels – équilibre entre coût et performance, couramment utilisée en maintenance ;
- **Basse résolution** : 160×120 pixels ou moins – suffisante pour des diagnostics simples ou des applications à courte distance.

e. Classification selon l'usage ou l'application

Les caméras thermiques peuvent également être classées en fonction de leur domaine d'utilisation :

- **Caméras portables** : Légères et ergonomiques, elles sont couramment utilisées pour les inspections rapides en maintenance préventive ou corrective ;



Figure 2.11 Modèle : FLIR E96 Champ de vision double $14^\circ + 24^\circ$ [14]

- **Caméras fixes** : Installées en position permanente, elles assurent une surveillance continue dans des environnements industriels ou critiques ;



Figure 2.12 Modèle : A400 + Configuration Capteur intelligent (avancé) [14]

- **Caméras embarquées** : Intégrées à des drones ou robots, elles permettent l'inspection à distance de zones inaccessibles ou dangereuses ;



Figure 2.13 Modèle : FLIR FC-608 AI, objectif 8,6° (75 mm) f/1.1 [14]

- **Caméras de laboratoire / R&D** : Conçues pour des analyses de haute précision, elles sont utilisées dans des contextes scientifiques ou expérimentaux.



Figure 2.14 Modèle : FLIR X6980-HS InSb (1,5 à 5,0 μm), f/2.5 [14]

2.7 Logiciels et traitement des images thermiques

À l'issue de l'inspection, la présentation des résultats aux responsables hiérarchiques ou aux clients s'avère généralement indispensable. L'analyse des images thermiques, accompagnée de la rédaction d'un rapport d'inspection détaillé, constitue une phase essentielle du processus. Il est donc impératif de vérifier que la caméra thermique est livrée avec un logiciel approprié, capable d'assurer ces fonctions.

La majorité des caméras thermiques disponibles sur le marché sont fournies avec un logiciel intégrant des fonctionnalités d'analyse standard ainsi que des modules de génération de rapports.

Ces logiciels offrent généralement des outils de mesure de base, tels que la mesure en un point. Parmi les solutions logicielles les plus couramment utilisées, on peut citer :

- FLIR Tools ;

- FLIR Thermal Studio ;
- Testo IIRSoft ;
- HIKMICRO Analyzer.

Ces logiciels permettent une analyse approfondie des données thermographiques, la génération automatique de rapports, et l'exportation des résultats sous différents formats.

2.8 Exemple de règles et consignes de sécurité

L'opérateur en thermographie doit se conformer en tout temps aux consignes, règles et règlements de sécurité du client.

Avant de commencer les travaux, les règles et consignes de sécurité minimales suivantes doivent être respectées :

- Une initiation à la sécurité du site doit être complétée si le client le juge approprié ;
- L'équipement de protection individuelle (EPI) complet doit être porté conformément aux normes du site ;
- Une évaluation des risques liés à la tâche (JHA) doit être effectuée ;
- Une personne de surveillance du site doit être présente en tout temps et à portée de vue ;
- En cas de blessure, la personne de surveillance doit avertir les services de sécurité du site ;
- Tout incident doit être signalé via un système de déclaration d'incident approprié.

IMPORTANT : À moins de posséder les qualifications ou licences nécessaires, ou d'avoir reçu une dérogation de la part du client, l'opérateur en thermographie ne doit en aucun cas effectuer des tâches normalement réservées au personnel qualifié, notamment :

- Le retrait ou le remplacement de couvercles ;
- L'ouverture ou la fermeture d'armoires contenant des équipements électriques ou mécaniques ;
- La mesure des charges électriques des équipements ;
- le contact physique avec tout équipement inspecté, sauf si cela est absolument nécessaire, par exemple pour une mesure de température par contact ;
- L'utilisation ou l'exploitation de tout équipement.

L'opérateur en thermographie ou toute personne l'accompagnant ne doit en aucun cas modifier ou altérer les armoires de sécurité, les protections, les enceintes ou les barrières, ni désactiver les dispositifs, inter verrouillages ou systèmes de sécurité. Toute modification, altération ou désactivation doit être immédiatement signalée à la personne responsable de la santé et de la sécurité au travail [ISO 18434-1:2008].

2.9 Conclusion

La maîtrise de ces concepts fondamentaux constitue un prérequis essentiel pour exploiter pleinement le potentiel de la thermographie infrarouge en milieu industriel. Ce chapitre a pour objectif de poser les bases nécessaires à une interprétation rigoureuse des mesures thermiques, condition indispensable à l'intégration efficace de cette technologie dans une stratégie de maintenance préventive, fiable et sécurisée.

**Chapitre III : Étude
Pratique de la Maintenance
Électrique par
Thermographie Infrarouge**

3.1 Introduction

La maintenance par thermographie infrarouge consiste essentiellement au relèvement des image thermique d'un composant durant son fonctionnement normal, ensuite visualiser et analyser ces images à l'aide d'un logiciel de traitement spécial, cette analyse peut être effectuer par un expert ou bien par un programme, enfin, il faut planifier une maintenance, action et recommandation d'intervention, selon les résultats de cette analyse.

Dans ce chapitre, on va présenter une inspection réaliser en collaboration avec un auto-entrepreneur, porteur de caméra thermique Testo 885 ; et le responsable technique de l'entreprise TCHIN-LAIT, dans le site de TCHIN-LAIT CANDIA BIR ESSLAM -BEJAIA-, exposant le matériel utilisé, les différentes salles et équipements inspectés, et les actions de maintenance réalisés.

3.2 Présentation d'entreprise TchIn-Lait Candia

TCHIN-LAIT était, à l'origine une entreprise familiale dont l'ancienne dénomination était TCHIN-TCHIN, spécialisée depuis 1954, dans la production des boissons gazeuses et des sirops. Elle a été de ce fait dotée d'une longue expérience dans le conditionnement des produits sous forme liquide,

Face aux concurrences accrues au milieu des années quatre-vingt-dix, elle s'est reconvertie vers un autre domaine d'activité (le lait ultra haute température a donné naissance à la SARL TCHIN-LAIT).

Le projet séduit le leader Français en la matière « Candia», d'où le contrat de franchise conclu entre les deux parties en 1999.

La laiterie TchIn-Lait/Candia se situe à Bir Slam (Bejaia) sur la route nationale N°12, elle s'étale sur une surface de 3000 m². L'unité TchIn-Lait est une SARL (Société à Responsabilité Limitée), travaillant sous une licence de production accordée par la filiale Candia-France. Les travaux de construction ont été entamés en l'an 2000, après acquisition des locaux de la limonadière TchIn-Tchin. L'installation des machines a été effectuée par la société française Tétra Park. L'unité TchIn-Lait, opérationnelle depuis l'an 2001, demeure la seule filiale de Candia en Algérie, elle emploie environ 400 personnes et produit une gamme de jus et de produits laitiers ultra haute température (UHT) et comporte différents services fonctionnels [15].

3.3 Organigramme de l'entreprise

Pour une meilleure gestion des travaux, TCHIN-Lait a réparti les tâches entre plusieurs services.

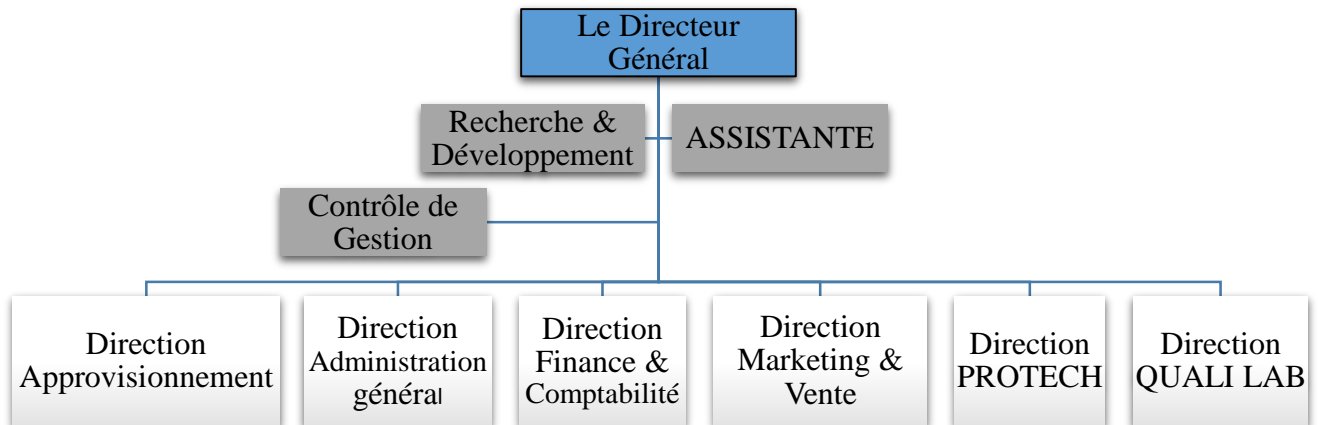


Figure 3.1 organigramme hiérarchique des services de TCHIN-LAIT [15]

3.4 Perspectives et Défis

TCHIN-LAIT est parmi les leader de production et de commercialisation des produits laitier à l'échelle national, de plus en plus la consommation de ces produits s'augmente et la concurrence s'intensifie, pour répondre au besoin de marchée et de consommateur , et pour maintenir sa place parmi les leader, l'amélioration des services de l'entreprise s'avère importante, pour en faire, TCHIN-LAIT lance de nouveau produit au marchée [15], et adopte de nouveau et modernes technique pour maintenir leur production.

Chapitre III : Étude Pratique de la Maintenance Électrique par Thermographie Infrarouge

3.5 Equipements et sites inspectés

Tableau 3.1 armoires de DEPOT ANNEXE sous station N°1

Localisation, nature et désignation du matériel	article	Code équipement (étiquetage)	Conditions d'utilisation lors de l'examen et/ou % de la charge ou raison du non examen	Défaut n° fiche	R.A.S	Examen impossible	Degré de priorité	Date
SOUS STATION N°1	<u>CELLULES BT ET HT</u>							
	CELLULE IM ARRIVEE SONALGAZ		Non équipées de hublot thermique			X		
	CELLULE IM DEPART (BOUCLAGE)		Charge usuelle		X			
	CELLULE CM DE COMPTAGE		Bornes aval non visibles		X			
	CELLULE DM2 COUPLAGE GROUPE							
	CELLULE IM DEPART SOUS STATION N°2							
	CELLULE D'ARRIVEE DE LA SOUS STATION N°2							
	CELLULE QM DEPART TRANSFO 630KVA							
	CELLULE DM1-A DEPART VERS SOUS STATION N°3							
	<u>TRANSFORMATEUR 630KVA</u>							
	TRANSFORMATEUR 630KVA							
	<u>CHASSIS DE DESTRIIBUTION</u>							
	CHASSIS DESTRIBUTION ONDULE							
	CHASSIS DESTRIBUTION NON ONDULE							

Chapitre III : Étude Pratique de la Maintenance Électrique par Thermographie Infrarouge

Tableau 3.2 armoires de DEPOT ANNEXE sous station N°2

Localisation, nature et désignation du matériel	article	Code équipement (étiquetage)	Conditions d'utilisation lors de l'examen et/ou % de la charge ou raison du non examen	Défaut n° fiche	R.A.S.	Examen impossible	Degré de priori té	Date
SOUS STATION N°2	<u>CELLULES BT</u>							
	CELLULE IM ARRIVEE							
	CELLULE IM DEPART							
	CELLULE DM2 COUPLAGE GROUPE							
	ARMOIRE INVERSEUR							
	<u>TRANSFORMATEUR</u>							
	TRANSFORMATEUR 2500KVA							
	<u>GROUPE ELECTROGENE 2500KVA</u>							
	ARMOIRE DE COMMANDE EXTERIEUR							
	ARMOIRE DE COMMANDE INTERNE							
	ARMOIRE DE COMMANDE REFROIDISSEUR							

Chapitre III : Étude Pratique de la Maintenance Électrique par Thermographie Infrarouge

Tableau 3.3 armoires de DEPOT ANNEXE, COULOIRE DEPOT

Localisation, nature et désignation du matériel	article	Code équipement (étiquetage)	Conditions d'utilisation lors de l'examen et/ou % de la charge ou raison du non examen	Défaut n° fiche	R.A.S.	Examen impossible	Degré de priorité	Date
<u>COULOIRE DEPOT</u>	<u>ARMOIRES</u>							
	ARMOIRE ECLIRAGE EXTERIEUR TRANSTOCKEUR							
	ARMOIRE ECLIRAGE INTERIEUR TRANSTOCKEUR							
	ARMOIRE ET TABLEAU DE CHARGEUR BATTRIES N°1							
	ARMOIRE ET TABLEAU DE CHARGEUR BATTRIES N°2							
	ARMOIRE ET TABLEAU DE CHARGEUR BATTRIES N°3							
	ARMOIRE DESTRIBUTION LABO							
	ARMOIRE CHAMBRE ETUVAGE 1 et 2							
	ARMOIRE ABB							
	ARMOIRE D'ARRIVE CHAMBRES FROIDES							
	ARMOIRE CHAMBRE FROID N°01							
	ARMOIRE CHAMBRE FROID N°02							
	ARMOIRE CHAMBRE FROID N°03							
	ARMOIRE CHAMBRE FROID N°04							
	ARMOIRE CHAMBRE FROID N°05							
	ARMOIRE CHAMBRE CHAUDE							
	ARMOIRE STATION LAVAGE AUTO							

Chapitre III : Étude Pratique de la Maintenance Électrique par Thermographie Infrarouge

Tableau 3.4 armoires de UNITE PRODUCTION UHT, SOUS STATION N°03

Localisation, nature et désignation du matériel	article	Code équipement (étiquetage)	Conditions d'utilisation lors de l'examen et/ou % de la charge ou raison du non examen	Défaut n° fiche	R.A.S.	Examen impossible	Degré de priorité	Date
SOUS STATION N°03								
	COFFRET ECLAIRAGE EXTERIEUR		HORS CHARGE			X		
	COFFRET INVERSEUR SOURCE		Faible charge		X			
	COFFRET PROTECTION POSTE		Faible charge		X			
	<u>LOCAL TGBT RDC</u>							
	TGBT BUREAUX RDC		Charge usuelle		X			
	COFFRET DIVISIONNAIRE ECL PC		Faible charge		X			
	BORNES ONDULEUR SOCOMEC B002741/1		Non visible sans démontage			X		
	<u>SALLE REUNION ETAGE</u>							
	ARMOIRE DSI04		Faible charge		X			
	COFFRET INVERSEUR		Faible charge		X			
	COFFRET BORNIER		Faible charge		X			
	COFFRET ALLUMAGE		Faible charge		X			
	<u>SANITAIRES HOMMES BUREAUX ETAGE</u>							
	COFFRET PROTECTION		Faible charge		X			
	<u>LOCAL CHAUFFE EA U INFO BUREAU ETAGE</u>							
	COFFRET ECL PC		Charge usuelle		X			
	<u>CIRCULATION BUREAUX ETAGE</u>							
	TABLEAU 1		Faible charge		X			
	BORNES AVAL DISJONCTEUR SECOURU		Faible charge		X			
	COFFRET POINTEUSE		Faible charge		X			
	TABLEAU 2		Faible charge		X			
	<u>RESTAURANT PERSONNEL</u>							
	ARMOIRE RESTAURANT X2		CHARGE USUELLE		X			

Chapitre III : Étude Pratique de la Maintenance Électrique par Thermographie Infrarouge

ARMOIRE RESERVE EPICERIE		CHARGE USUELLE		X			
DEPOT EPICERIE							
ARMOIRE POSTE N°2		CHARGE USUELLE		X			
ARMOIRE ECL DEPOT		CHARGE USUELLE		X			
ARMOIRE APPARTEMENT		CHARGE USUELLE		X			
ARMOIRE ECL EXTERIEUR		HORS CHARGE			X		
COFFRET SALLE REPOS QUAI 1		FAIBLE CHARGE		X			
COFFRETS CHARGEURS X3 QUAI 1		FAIBLE CHARGE		X			
COFFRET PGC COTE EXPEDITION		FAIBLE CHARGE		X			
Nouveau coffret Chargeur zone PGC 1		FAIBLE CHARGE		X			
Coffret distribution PGC1							
<u>CHAUFFERIE COTE B UREAUX</u>							
ARMOIRE CHAUFFERIE		CHARGE USUELLE		X			
<u>BUREAUX TRANSPO RTS</u>							
COFFRET ECL PC CHEF TRANSPORT		FAIBLE CHARGE		X			
COFFRET COTE CHEF TRANSPORTX4		FAIBLE CHARGE		X			
COFFRET CHEF EXPEDITION		FAIBLE CHARGE		X			
<u>RESERVE BUREAUX PRODUITS FRAIS</u>							
COFFRET DISTRIBUTION		En travaux			X		
<u>BUREAUX PRODUITS FRAIS</u>							
3 COFFRET EN HAUTEUR		En travaux			X		
2 COFFRETS SAS		En travaux			X		
2 COFFRETS BUREAU RESPONSABLE FRAIS		En travaux			X		
<u>DEPOT FRAIS</u>							
ARMOIRE EVAPORATEURS QUAIS		Hors charge			X		
ARMOIRE CHAUFFAGE C5		FAIBLE CHARGE		X			
ARMOIRE ECL PC		CHARGE USUELLE		X			
COFFRET PORTES		FAIBLE CHARGE		X			
COFFRET ALLUMAGE		FAIBLE CHARGE		X			

Chapitre III : Étude Pratique de la Maintenance Électrique par Thermographie Infrarouge

<u>POSTE TRANSFORMATION T2</u>							
CELLULES HT		Non équipées de hublot thermique			X		
TRANSFORMATEUR AREVA 400KVA		CHARGE USUELLE		X			
BORNES DISJONCTEUR GENERAL BT		Bornes aval non visibles		X			
DISJONCTEUR Q2		FAIBLE CHARGE		X			
ARMOIRE 6		CHARGE USUELLE		X			
ARMOIRE 7		CHARGE USUELLE		X			
COFFRET SOUS ARMOIRE 7		CHARGE USUELLE		X			
ARMOIRE 1		FAIBLE CHARGE		X			
ARMOIRE 2		FAIBLE CHARGE		X			
ARMOIRE 5		FAIBLE CHARGE		X			
ARMOIRE 3		FAIBLE CHARGE		X			
ARMOIRE 4		FAIBLE CHARGE		X			
COFFRET RESEAU 2		FAIBLE CHARGE		X			
COFFRET RESEAU 1		FAIBLE CHARGE		X			
ARMOIRE GENERAL ECLAIRAGE EPICERIE		CHARGE USUELLE		X			
COFFRET OPTIMISEUR		FAIBLE CHARGE		X			
<u>LOCAL CHARGE COTE T2</u>							
ARMOIRE ET COFFRET CHARGE		FAIBLE CHARGE		X			
COFFRET EXTRACTEUR		FAIBLE CHARGE		X			
<u>ENTREPOT CHAI</u>							
ARMOIRE C3 A3		FAIBLE CHARGE		X			
ARMOIRE C2 A1		FAIBLE CHARGE		X			
2 COFFRETS COTE RIA		FAIBLE CHARGE		X			
COFFRET BUREAU MAGASINIER		FAIBLE CHARGE		X			
COFFRET BUREAU CHEF GROUPE X2		FAIBLE CHARGE		X			
COFFRET DERRIER BUREAU MAGASINIER		FAIBLE CHARGE		X			

Chapitre III : Étude Pratique de la Maintenance Électrique par Thermographie Infrarouge

COFFRET ECL EXTERIEUR		HORS CHARGE			X		
COFFRET AU DESSUS BUREAU MAGASINIER		Inaccessible			X		
<u>QUAI EMBALLAGES</u>							
Coffret bungalow		FAIBLE CHARGE		X			
Coffret CF G1/3		FAIBLE CHARGE		X			
3 COFFRET SALLE REPOS		CHARGE USUELLE		X			
Coffret CF 2		FAIBLE CHARGE		X			
Coffret distribution CF		FAIBLE CHARGE		X			
<u>CHAUFFERIE COTE GROUPE ELECTROGENE</u>							
COFFRET CHAUFFERIE		FAIBLE CHARGE		X			
COFFRET DTU		FAIBLE CHARGE		X			
<u>LOCAL GROUPE ELE CTROGENE</u>							
ARMOIRE GROUPE		HORS CHARGE			X		
<u>LOCAL GROUPE FROID</u>							
ARMOIRE GENERALE FROID		HORS CHARGE			X		
COFFRET FROID BOF 10CV		HORS CHARGE			X		
ARMOIRE CONDENSATEURS		HORS CHARGE			X		
<u>AUVENT PRESSES</u>							
ARMOIRES ET COFFRETS PRESSES CARTONS X3		HORS CHARGE			X		
<u>EXTERIEUR</u>							
COFFRET FUEL		HORS CHARGE			X		
COFFRET POMPES CARBURANT		HORS CHARGE			X		
COFFRET PORTAIL ENTREE		HORS CHARGE			X		
<u>GARAGE</u>							
ARMOIRE GENERAL X2		CHARGE USUELLE		X			
COFFRET CIRCULATION SANITAIRES		FAIBLE CHARGE		X			
ARMOIRES LOCAL ECLATEMENT		FAIBLE CHARGE		X			
<u>LOCAL SPRINKLER</u>							
ARMOIRE DISTRIBUTION		FAIBLE CHARGE		X			
ARMOIRE SOURCE		FAIBLE CHARGE		X			

Chapitre III : Étude Pratique de la Maintenance Électrique par Thermographie Infrarouge

	COFFRET VARIATEUR		FAIBLE CHARGE		X			
	COFFRET COMMANDE		FAIBLE CHARGE		X			
	<u>POSTE LIVRAISON</u>							
	CELLULES HT		Non équipées de hublot thermique			X		
	COFFRET ECL EXTERIEUR		HORS CHARGE			X		
	COFFRET POSTE		FAIBLE CHARGE		X			

3.6 Matériels utilisés

3.6.1 Caméra thermique de type Testo 885 (320 x 240 pixels)

C'est l'élément clé de notre étude et dans cette inspection, plusieurs types de camera existe sur le marché international tels que HIKMICRO B10 camera, FLIR C2 noir, BOSCH Universaltemp. Pour notre cas, nous allons nous concentrer sur la camera utilisée lors de l'inspection, la Testo 885 [16].



Figure 3.2 Caméra thermique Testo 885 [16]

1. Description de la camera

La caméra thermique Testo 885 est un instrument de mesure professionnel, permettant de détecter des anomalies extrêmement précises, et les points faibles des matériaux et des composants, sans aucun contact.

Grâce à son système de mesure infrarouge de haute qualité, elle permet également :

- De déceler les pertes d'énergie les plus faibles ;
- De repérer les plus petits ponts thermiques sur les bâtiments ;
- De détecter en toute sécurité les dommages ou surchauffes au niveau des installations industrielles [16].

Chapitre III : Étude Pratique de la Maintenance Électrique par Thermographie Infrarouge

2. Caractéristiques technique de caméra

Ce type de camera possède plusieurs fonctionnalités et avantages [18], qui facilitent l'usage, et qui permet une mesure précise, ci-après quelques-unes plus essentielles :

Tableau 3.5 Caractéristique de la caméra Testo 885 [16]

Résolution infrarouge	320 x 240 pixels
Mise au point	Automatique / manuelle
Taille de l'image /Minimum de focalisation	3.1 MP / 0.5 m
Température de fonctionnement	-15 ... +50 °C
Format de fichier des images individuelles	bmt ; exportation possible aux formats .bmp, .jpg, .png, .csv, .xls
Type de piles	Station de charge rapide, accu Lithium-Ion remplaçable sur site
Mesures à haute température	Jusqu'à +1200 °C
Précision	± 2 °C, ± 2 % de la valeur de mesure (la valeur la plus élevée s'applique) (± 3 °C v.m. à -30 ... -22 °C)
Possibilités d'affichage	Image IR / Image réelle

3. Mode d'emploi

Pour un usage sécurisée et écologique on doit suivre des instructions bien déterminée par le constructeur, là où on va mentionner quelques-unes :

➤ Assurer la sécurité

- Utilisez toujours le produit conformément à l'usage prévu et dans les limites des paramètres décrits dans les caractéristiques techniques. Ne faites pas usage de la force ;
- Ne mettez pas l'appareil en service si le boîtier, le bloc d'alimentation ou les câbles d'alimentation sont endommagés ;
- Pendant son utilisation, la caméra ne peut pas être orientée vers le soleil ou d'autres sources de rayonnement intenses (p.ex. vers des objets d'une température supérieure à 550°C / 1022°F ou 1400°C / 2552°F en cas d'utilisation de la plage de mesure haute température). Ceci peut sérieusement endommager le détecteur. Le fabricant n'assume aucune responsabilité pour les dommages de ce type occasionnés au détecteur micro bolomètre ;
- Les installations à mesurer ou environnements de mesure peuvent également être la source de dangers : Lors de la réalisation de mesures, respectez les dispositions de sécurité en vigueur sur site ;
- Ne stockez pas le produit conjointement avec des solvants. N'utilisez pas de dessicant.

➤ Protéger l'environnement

- Éliminez les accus défectueux / piles vides conformément aux prescriptions légales en vigueur ;
- Au terme de la durée d'utilisation du produit, apportez-le dans un centre de collecte sélective des déchets d'équipements électriques et électroniques (respectez les règlements locaux en vigueur) ou renvoyez-le à Testo en vue de son élimination [16].

4. Composants de camera



Figure 3.3 Les composants de la caméra Testo 885 [16]

- 1- Le rôle de l'appareil photo numérique est la prise d'images visuelles, par contre les deux LED puissantes sont utilisées pour l'éclairage de l'image ;
- 2- Objectif à travers l'introduction de la caméra infrarouge est la prise d'images thermographiques ;
- 3- [Déverrouillage de l'objectif] pour déverrouiller le système de blocage de l'objectif ;
- 4- Filetage (1/4" - 20UNC), pour la fixation d'un trépied (face inférieure de la caméra). Ne pas utiliser de trépied de table ! Risques de basculement !
- 5- Laser (indisponible dans certains pays), pour le marquage de l'objet de mesure ;
- 6- Bague de mise au point, pour la mise au point manuelle ;
- 7- Poignée rotative avec poignée de maintien réglable et boucle de fixation pour le couvercle de l'objectif ;
- 8- Compartiment de l'accumulateur (face inférieure de la caméra) ;
- 9- Touches de commande (faces arrière et supérieure de la caméra) ;
- 10- Deux œillets de fixation pour sangle de transport / dragonne ;
- 11- Interfaces ;
- 12- Écran, rabattable à 90° et rotatif à 270° [16].

5. Prise en main et utilisation de caméra

Pour faciliter l'utilisation de ce dispositif avec ses différentes fonctions (activation, désactivation, premier chargement de l'accu, enregistrement. etc.), et afin d'effectuer des mesures pertinentes et aussi pour l'entretenir et le garder en bon état, le constructeur a mis en disposition un mode d'emploi complet et détaillé [19, 16].

3.6.2 Logiciel de traitement d'image IR Testo IRSoft

Le logiciel nous permet d'éditer et d'analyser confortablement les images infrarouges au PC. De nombreuses fonctions sont disponibles pour une analyse professionnelle des images thermiques, tels que :

- Edition confortable des images thermiques : correction des émissivités pour des sections d'image jusqu'aux pixels individuels ;
- Visualisation des températures critiques dans l'image thermique ainsi que détermination des points chauds et froids ;
- Création de rapports thermographiques professionnels en quelques clics [16].

❖ Mode d'emploi

Plusieurs fonctions et commande sont disponibles sur ce logiciel, permet de modifier les paramètres d'affichage, ajuster la température, superposer des images réel et thermiques, crée des rapports détaillés. Le logiciel propose aussi des fonctions d'analyse comme les profils de température, histogrammes, repères thermiques. On trouve des onglets : Analyse, Rapport, Camera, Vidéo, Archives et Paramètres, dans l'interface. L'utilité de ces onglets et les autres fonctions est bien détaillées par le constructeur [20].

3.6.3 Equipements de protection individuelle (EPI)

Les équipements de protection individuelle (EPI) sont des dispositifs destinés à protéger une personne contre un ou plusieurs risques pour sa santé et sa sécurité (casque, gants, lunette de protection, etc.) [18].

3.7 Déroulement de l'inspection

- **Date d'intervention :** 17/03/2025
- **Conditions de prise :**
 - Service : continu
 - Température ambiante : 25 °C
- **Etapes chronologique de l'intervention :**
 - Préparation des intervenants :
 - Responsable de service utilité ;
 - Porteur de camera ;
 - Technicien.

Chapitre III : Étude Pratique de la Maintenance Électrique par Thermographie Infrarouge

Munie d'équipements de protection individuelle

- Le déplacement sur site et la présence effective dans les salles ciblées en vue de leur inspection ;
- Réglage des paramètres de caméra thermique ;
- Prise de vue globale des TGBT et des différents équipements ;
- Prise de vue ciblée sur les composants suspects d'anomalie ;
- Interprétation et analyse des images thermographiques ;
- Rédaction de rapport et des fiches d'anomalies ;
- Préparation des actions de maintenance correctives.

3.7.1 Résultats et images IR relevées

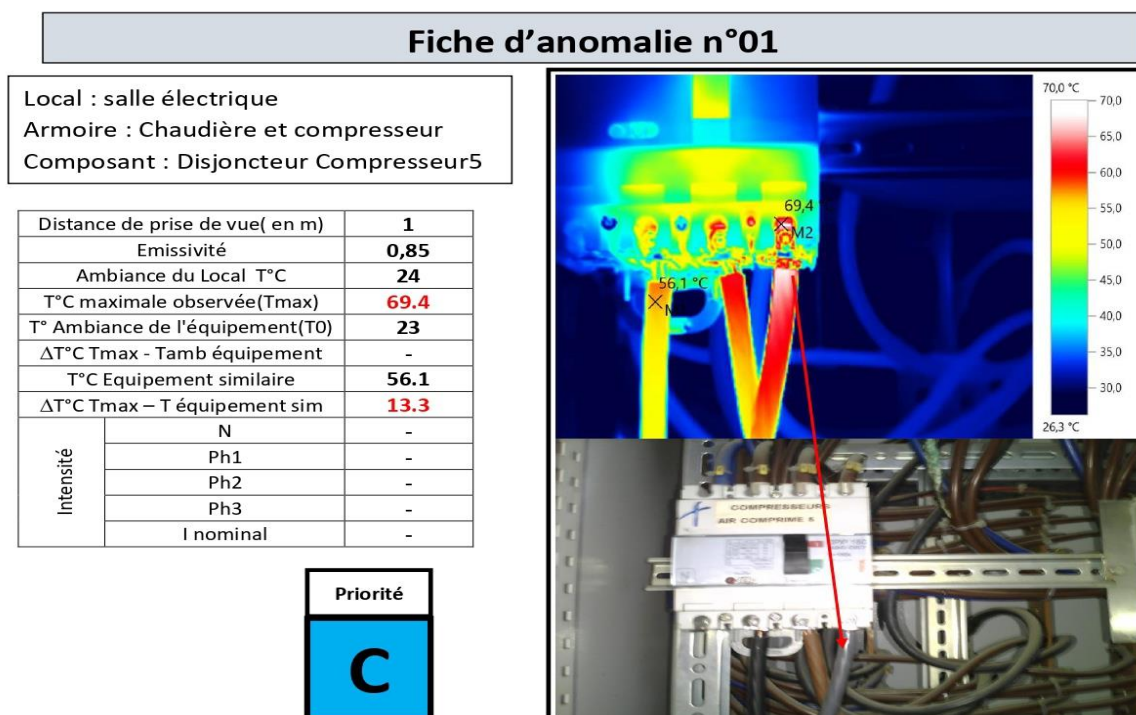


Figure 3.4 Fiche anomalie n°01 rédigée après l'inspection de disjoncteur compresseur5

Chapitre III : Étude Pratique de la Maintenance Électrique par Thermographie Infrarouge

Fiche d'anomalie n°02

Local : salle électrique
Équipement: 5 ème batterie du bas à partir de la gauche

Distance de prise de vue(en m)		1
Emissivité		0,85
Ambiance du Local T°C		23
T°C maximale observée(Tmax)		31.8
T° Ambiance de l'équipement(TO)		-
ΔT°C Tmax - Tamb équipement		-
T°C Equipement similaire		27
ΔT°C Tmax – T équipement sim		4.8
Intensité	N	-
	Ph1	-
	Ph2	-
	Ph3	-
	I nominal	-

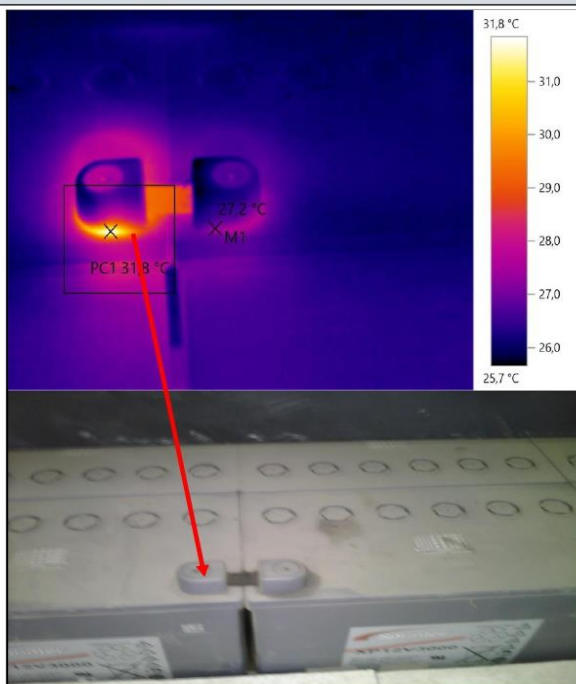


Figure 3.5 Fiche anomalie n°02 rédigée après l'inspection de 5 ème batterie du bas à partir de la gauche

Fiche d'anomalie n° 03

Local :salle electrique
Armoire :pompe de refroidissement
Composant : Disjoncteur QM16

Distance de prise de vue(en m)		1
Emissivité		0,85
T°C max observée(Tmax)		74.5
T°C Equipement similaire		-
$\Delta T^{\circ}C$ Tmax – T équip sim		-
Charge (%)		-
Intensité	N	—
	Ph1	—
	Ph2	—
	Ph3	—
	I nominal	—

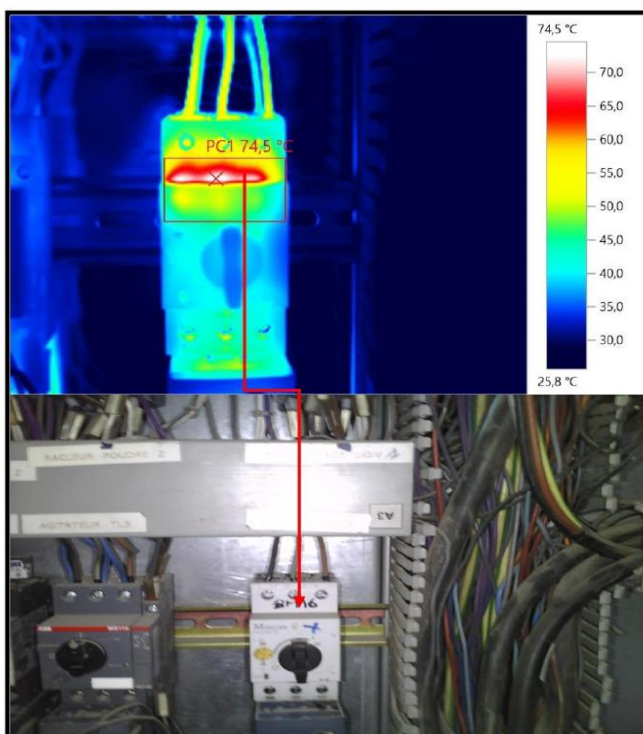
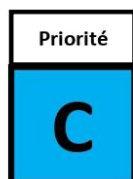


Figure 3.6 Fiche anomalie n°03 rédigée après l'inspection de disjoncteur QM16

Chapitre III : Étude Pratique de la Maintenance Électrique par Thermographie Infrarouge

3.7.2 Interprétation et analyse des résultats en °C

❖ Anomalie n°01 :

➤ Anomalies constatées :

- Leger échauffement relevé au niveau de la connexion à la sortie de la phase 03 du disjoncteur compresseur 5 ;
- La température relevée est de 69.4°C alors que la connexion de la phase 01 affiche 56.1°C soit une différence de 13.3°C .

➤ Analyses de cause :

- Défaut de connexion (serrage, oxydation).

❖ Anomalie n°02 :

➤ Anomalies constatées :

- A partir du thermogramme on constate un échauffement anormal au niveau de la cosse de la batterie ;
- La température n'est pas trop élevée mais peut s'aggraver avec le temps.

➤ Analyses des causes

- Mauvais serrage de la cosse ;
- Vieillesse de la batterie.

❖ Anomalie n°03 :

➤ Anomalies constatées :

- Echauffement anormal relevé sur le corps du disjoncteur ;
- La température relevée est (74,5°C) dépasse de 4°C la limite de température maximale admissible.

➤ Analyses des causes

- Surcharge ;
- Dégradation interne du disjoncteur.

3.7.3 Mesures correctives et préventives proposée

Tableau3.6 Les trois anomalies inspectées

Anomalies	Action Préconisé
Anomalie n°01	Revoir le serrage et nettoyage du câble et des surfaces de contacts
Anomalie n°02	Vérifier le serrage de la cosse. Si problème persiste procéder au changement de la batterie
Anomalie n°03	Relever le courant du disjoncteur et comparer avec le courant nominal pour détecter d'éventuel surcharge.

Fréquence suggérée des inspections

La norme NFPA 70B recommande deux (02) contrôles thermographiques des installations électriques par an.

3.7.4 Actions de maintenance réalisées

Après l'inspection, nous allons procéder à des actions de maintenance selon les analyses précédentes :

❖ Anomalie 01 :

- On commence d'abord par la coupure de l'alimentation sur ce disjoncteur, et cela par l'interruption du disjoncteur de niveau supérieur ;
- Ensuite, on va desserrer les câbles des trois phases, couper une partie similaire de 15 cm de chaque câble, nettoyer les extrémités des câbles coupés, puis les resserrer ;
- Enfin, on active le disjoncteur de niveau supérieur et on reprend le service.

❖ Anomalie 02 :

- Dans cette situation, le composant doit être réparé pendant son service. Il est donc nécessaire de prendre des mesures de sécurité ;
- Tout d'abord, on monte sur un tabouret isolant spécial, en s'assurant qu'il n'y ait aucun contact direct pouvant endommager les batteries ;
- Ensuite, on resserre la cosse à l'aide d'une clé dynamométrique ;
- Une fois le couple de serrage optimal atteint, on descend avec précaution, et le service peut se poursuivre normalement.

❖ Anomalie 03 :

- Le composant est défectueux et son état est jugé non réparable. Nous procédons donc au remplacement du dispositif ;
- Dans un premier temps, nous vérifions la disponibilité de la pièce de rechange dans le stock de l'entreprise ;
- Une fois la pièce disponible, nous interrompons son alimentation en désactivant le disjoncteur de niveau supérieur ;
- Ensuite, nous démontons les câbles, retirons le disjoncteur défectueux, puis le remplaçons par un disjoncteur en bon état ;
- Nous resserrons tous les câbles et assurons la connexion correcte de l'alimentation du disjoncteur ;
- Une fois le montage terminé, nous réactivons le disjoncteur de niveau supérieur, puis nous contrôlons les phases et l'alimentation du composant à l'aide d'un multimètre, en service.

3.7.5 Difficultés rencontrée

Bien que la maintenance par Thermographie infrarouge soit une méthode non destructive, et avantageuse par rapport à d'autres techniques, mais certains composants présents des contraintes, d'où la difficulté de les inspecter, soit par mesure de sécurité ou à cause de son architecture de fabrication. On prend les deux exemples suivants :

Onduleur

- Accès difficile ;
- Le rayonnement infrarouge émis par l'appareil couvre toute la scène sans cibler un composant précis, ce qui réduit la précision du diagnostic.

Transformateur (type sec)

- Par mesure de sécurité ;
- Accès difficile.

3.8 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif le contrôle et la réalisation de la maintenance des équipements électriques et électromécaniques, par thermographie infrarouge, sur le site de TCHIN-LAIT CANDIA à Bir Esslam – Béjaïa-.

Pour ce faire, nous avons inspecté les différents sites et équipements liés au service utilité, en collaboration avec un auto-entrepreneur et le responsable de ce service, en utilisant la caméra thermique « Testo 885 ».

Les images obtenues ont été traitées à l'aide du logiciel IRSoft, puis analysées et interprétées grâce à l'expertise des intervenants. Cette analyse a permis de détecter un fonctionnement anormal au niveau de trois équipements. Les résultats ont ensuite été exploités pour la préparation et la réalisation des actions de maintenance corrective.

Afin de rendre l'analyse plus fiable, précise et rapide, nous avons eu recours à d'autres méthodes modernes et avancées, notamment, le développement d'un programme d'intelligence artificielle, qui sera détaillé dans le prochain chapitre.

Chapitre IV : Intégration de l'intelligence artificielle dans la maintenance

4.1 Introduction

Dans un contexte industriel où la rapidité et la fiabilité du diagnostic sont essentielles. Une petite application sera conçu dans cette optique, avec un objectif principal est de faciliter les tâches des agents de maintenance. En automatisant l'identification des anomalies thermiques à partir d'un simple code-barres et d'une température mesurée, ce système permet de réduire le temps d'analyse, de limiter les erreurs humaines et d'améliorer la prise de décision sur le terrain.

Dans ce chapitre nous allons présenter le développement et le fonctionnement d'un programme intelligent de diagnostic thermique, le choix de l'architecture du réseau de neurones, les étapes d'entraînement et d'évaluation des performances du réseau, le processus de diagnostic thermique automatisé à partir une température capter (mesurée), et enfin, des exemples pratiques d'utilisation du programme seront présentés.

4.2 Objectif du programme

L'objectif de l'application proposée est de mettre en œuvre un outil intelligent de diagnostic thermique d'équipements électriques, basé sur l'utilisation d'un réseau de neurones artificiels et d'un codage binaire d'identification des équipements. D'une manière générale, le programme principal permet :

- D'identifier automatiquement le type d'équipement (moteur, câble, disjoncteur, roulement, contacteur, cosse de batterie) à partir d'un code-barres binaire unique ;
- De prédire la température de référence de l'équipement grâce à un réseau de neurones entraîné sur des données de référence ;
- De comparer cette température de référence à une température mesurée sur le terrain, saisie manuellement par l'utilisateur (par exemple via une caméra thermique) ;
- De détecter un écart thermique anormal (ΔT), indicateur d'un échauffement ou d'un dysfonctionnement potentiel ;
- D'évaluer automatiquement le niveau de criticité du défaut détecté, en se basant sur une grille de priorisation thermique spécifique au type d'équipement ;
- De fournir un diagnostic immédiat sous forme textuelle indiquant l'état de l'équipement (bon ou non) et le niveau de priorité de l'intervention (A, B ou C).

En complément, ce programme a été conçu pour être intégré dans l'environnement **SAP S/4HANA** utilisé par l'entreprise, dans le but d'automatiser l'enregistrement, le suivi et l'analyse des données de maintenance thermique au sein du système de gestion centralisé. Cette intégration permet d'assurer une traçabilité complète, d'optimiser la planification des interventions, et de faciliter la prise de décision en temps réel à l'échelle de l'entreprise.

Cet outil s'inscrit pleinement dans une démarche de maintenance prédictive et conditionnelle, visant à améliorer la surveillance des équipements électriques, à réduire les risques de panne, et à anticiper les actions correctives avec plus de précision, tout en s'intégrant efficacement dans l'écosystème numérique de l'entreprise.

4.3 Résumé fonctionnel du programme

Le schéma suivant présente les principales fonctionnalités du programme développé ainsi que leur rôle dans le processus global de diagnostic thermique assisté par intelligence artificielle :

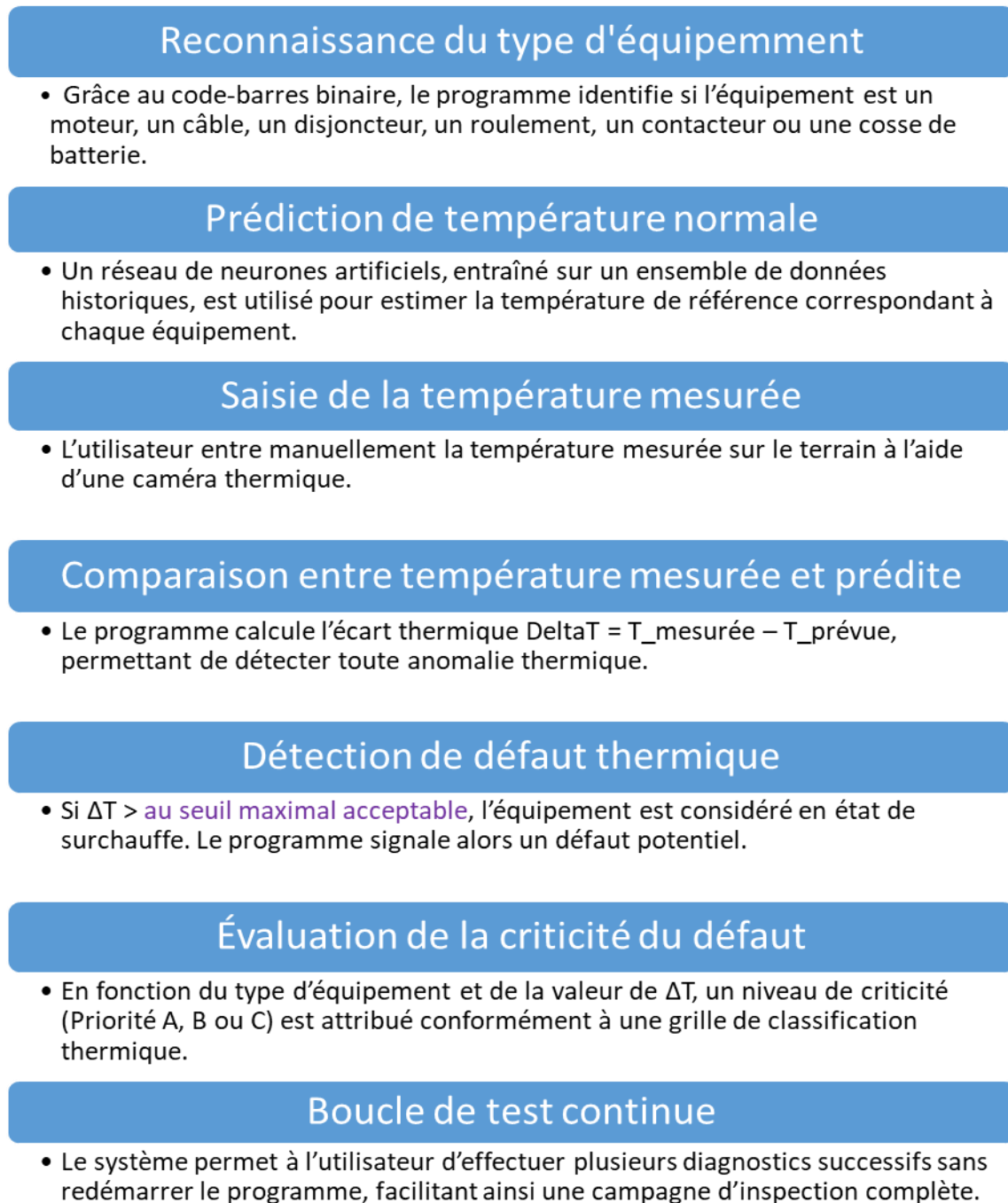


Figure 4.1 Résumé fonctionnel du programme

4.4 Choix de l'approche par réseaux de neurones

L'approche par réseaux de neurones artificiels a été retenue pour la conception de notre système de diagnostic thermique, en raison de ses nombreux avantages dans le traitement de données issues de la maintenance. Ce choix repose sur des arguments à la fois techniques et pratiques, adaptés à la nature des données et aux objectifs de prédiction thermique de notre application.

4.4.1 Capacité à modéliser des relations non linéaires

Les réseaux de neurones sont capables d'apprendre des relations complexes et non linéaires entre les variables d'entrée et les variables de sortie. Dans notre cas, il s'agit de relier un code-barres binaire à 7 bits (représentant un équipement électrique spécifique) à une température de référence, valeur continue issue de données réelles.

Ce type de relation ne peut pas être décrit par une fonction linéaire simple, et justifie pleinement l'utilisation d'un modèle neuronal pour capter les interactions implicites entre les bits du code-barres et le comportement thermique attendu.

4.5 Type de réseau utilisé : MLP (Perceptron multicouche)

Pour répondre à notre besoin spécifique, nous avons opté pour un réseau de type MLP (Multilayer Perceptron), architecture simple et efficace pour des tâches de régression supervisée.

Ce réseau est constitué de :

- Une couche d'entrée à 7 neurones, correspondant aux 7 bits du code-barres ;
- Une couche cachée avec 3 neurones et une fonction d'activation non linéaire « logsig » (sigmoïde logistique) ;
- Une couche de sortie avec un seul neurone et une fonction « purelin » (linéaire), adaptée à la sortie numérique continue (température prédite).

Le choix du MLP s'explique par :

- La structure matricielle de nos données ;
- L'objectif de prédiction d'une valeur unique (régression) ;
- La faible complexité de l'architecture, suffisante pour obtenir des résultats précis avec un temps d'entraînement très réduit.

Le réseau de neurones utilisé dans notre programme constitue une solution à la fois performante, robuste et adaptée à la problématique de maintenance à travers un diagnostic thermique. Il permet une automatisation du diagnostic, une personnalisation selon le type d'équipement, et une généralisation efficace à de nouveaux cas.

4.6 Description des données d'entrée utilisées dans le programme

Les données d'entrée utilisées dans notre programme sont constituées de vecteurs binaires codés sur 7 bits, servant à identifier de manière unique chaque type d'équipement électrique. Ce format de codage simple et structuré permet au réseau de neurones d'associer directement chaque code-barres à une température normale de fonctionnement prédite.

4.6.1 Structure des données d'entrée

Chaque vecteur d'entrée est composé de 7 valeurs binaires (0 ou 1), correspondant aux 7 bits d'un code-barres. L'ensemble des données est organisé sous forme d'une matrice de dimension $[7 \times N]$, où chaque colonne représente un code-barres complet (un échantillon) associé à un équipement.

4.6.2 Rôle des données d'entrée

Ces vecteurs binaires permettent :

- De coder efficacement des classes d'équipements sous forme numérique exploitable par un réseau de neurones ;
- D'éviter le recours à des identifiants textuels, en conservant une structure matricielle adaptée au traitement mathématique ;
- De généraliser le modèle à de nouveaux équipements en ajoutant de nouveaux codes sans modifier l'architecture.

Le format binaire à 7 bits a été choisi pour sa simplicité, sa compacité et sa capacité à coder plusieurs combinaisons uniques, pour un large éventail d'équipements électriques industriels.

4.6.3 Structure du code-barres binaire

- 3 bits pour le type d'équipement.

Tableau 4.1 Les codes-barres des types d'équipements

Type d'équipement	Code Type (3 bits)
Moteur	000
Câble	001
Disjoncteur	010
Roulement	011
Contacteur	100
Cosse batterie	101

- 4 bits pour le rang de température dans ce type (jusqu'à 16 entrées par type)

Tableau 4.2 Les codes-barres des températures par type d'équipement

Code-barres	Type	Désignation / Classe
000-0001	Moteur	Classe A
000-0010	Moteur	Classe B
000-0011	Moteur	Classe F
000-0100	Moteur	Classe H
000-0101	Moteur	Classe C
001-0001	Câble	Polychlorure de vinyle PVC
001-0010	Câble	Polyéthylène non réticulé PE
001-0011	Câble	Polyéthylène réticulé XLPE
001-0100	Câble	Caoutchouc naturel ou synthétique RUB
001-0101	Câble	Sans halogène (LSZH, ZHFR)
001-0110	Câble	Caoutchouc éthylène-propylène EPR
001-1001	Câble	Silicone
010-0001	Disjoncteur	Schneider NSX 630N
010-0010	Disjoncteur	ABB SACE E3N 25
010-0011	Disjoncteur	Schneider Masterpact NW20 H1
011-0001	Roulement	C317C3 (38g)
100-0001	Contacteur	Telemecanique CAD32
100-0010	Contacteur	Telemecanique LC1D09
101-0001	Cosse	Cosse batterie salle électrique Tchén Lait

Code barre d'entrée :

[0 0 0 0 0 1] % Moteur

[0 0 1 0 0 1 1] % Câble

[0 1 0 0 0 1 1] % Disjoncteur

[0 1 1 0 0 0 1] % Roulement

[1 0 0 0 0 0 1] % Contacteur

[1 0 1 0 0 0 1] % Cosse de batterie

Chaque code-barres est attribué à un type précis d'équipement, selon la répartition suivante :

Tableau 4.3 Répartition des équipements par bloc de code-barres

Blocs	Type d'équipement
p1	Moteur
p2	Câble / conducteur
p3	Disjoncteur
p4	Roulement (palier)
p5	Contacteur / relais
p6	Cosse de batterie

4.7 Données de sortie attendues

Les données de sortie du programme correspondent à des valeurs de température de référence, exprimées en degrés Celsius (°C), qui représentent la température normale attendue de fonctionnement pour chaque équipement identifié par son code-barres.

4.7.1 Nature des sorties

Il s'agit de données numériques continues, produites par le réseau de neurones artificiels sous forme d'un vecteur ligne de dimension $[1 \times N]$, où N est le nombre total d'échantillons d'entraînement, de telle sorte que chaque valeur prédit la température considérée comme normale ou acceptable pour un équipement donné.

4.7.2 Températures de référence des équipements

Les températures de référence utilisées dans ce programme sont approximatives et ne proviennent pas directement de normes officielles. Elles ont été estimées à partir de seuils observés sur le terrain.

De plus, les équipements analysés correspondent à quelques machines réelles de l'entreprise ;(SPA Tchin-Lait), sélectionnées à titre d'exemple pour cette étude.

Ainsi, le modèle développé constitue une base fonctionnelle adaptable, qui pourrait être enrichie avec des températures issues de normes officielles ou calibrée à plus grande échelle dans le cadre d'un déploiement industriel complet.

Tableau 4.4 Les températures de référence des équipements

Equipements	Température de référence (°c)
Moteur	
Moteur classe A (T ambiante=40°c)	105
Moteur classe B (T ambiante=40°c)	130
Moteur classe F (T ambiante=40°c)	155
Moteur classe H (T ambiante=40°c)	180
Moteur classe C (T ambiante=40°c)	>180
Câble électrique	
Polychlorure de vinyle PVC	70
Polyéthylène non réticulé PE	80
Polyéthylène réticulé XLPE	90
Caoutchouc naturel ou synthétique RUB	90
Sans halogène (LSZH, ZHFR)	90
Caoutchouc éthylène-propylène EPR	110
Silicone	180
Disjoncteur	
Schneider Compact NSX 630N	105-140
ABB SACE E3N 25	105-150
Schneider Masterpact NW20 H1	105-150
Roulement	
Roulement C317C3 volume 38 g	120
Contacteur	
Telemecanique CAD32	125
Telemecanique LC1D09	125
Cosse de batterie	
Cosse de batterie salle électrique Tchénait	27

Vecteur de sortie

t = [105; 130; 155; 180; 200; 90; 120; 220; 70; 125; 27];

Chaque température dans ce vecteur est associée à un vecteur d'entrée (code-barres binaire), permettant au réseau de faire l'apprentissage de la correspondance entre un équipement donné et son température de référence.

4.7.3 Objectif des sorties

Ces températures de sortie servent de référentiel de comparaison lors de l'analyse de la température mesurée sur le terrain. Elles sont utilisées pour :

- Évaluer l'écart thermique (ΔT) par rapport à une température réelle mesurée ;
- Détecter une éventuelle surchauffe, signe d'un défaut ou d'un vieillissement de l'équipement ;
- Déterminer un niveau de criticité basé sur l'intensité de cet écart (Priorité A, B ou C) ;
- Déterminer l'action recommandée.

Ainsi, la sortie du réseau constitue un élément central du diagnostic, car elle représente le seuil thermique au-delà duquel un écart devient suspect.

ΔT : C'est l'écart de température entre une température réelle mesurée et la température de référence d'équipement

$$\Delta T = T_{mes} - T_{ref} \quad (4.1)$$

Niveau de criticité

La classification des anomalies thermiques en trois niveaux de priorité (A, B, C) repose sur une approche couramment utilisée dans l'industrie, fondée sur la différence de température (ΔT) observée par la caméra infrarouge. Bien qu'aucune norme internationale ne fixe de seuils absolus applicables à tous les équipements, des documents tels que la norme NFPA 70B (2023), l'ISO 18434-1/2 et l'IEC TS 62446-3 recommandent de définir ces seuils en fonction de l'expérience, des conditions de fonctionnement, et des recommandations des fabricants. Le tableau 4.6 présenté ci-dessous est établi à partir de ces sources et de pratiques reconnues dans la maintenance conditionnelle (cf. ISO 17359), et constitue une base fiable pour l'évaluation du niveau de criticité thermique des équipements électriques et mécaniques.

Tableau 4.5 Classification des anomalies en niveaux de priorité

Équipement	ΔT Priorité C	ΔT Priorité B	ΔT Priorité A
Câble / conducteur	3 – 10 °C	10 – 25 °C	25 – 30 °C
Disjoncteur	3 – 10 °C	10 – 20 °C	20 – 30 °C
Contacteur / relais	5 – 10 °C	10 – 25 °C	>25 °C
Moteur électrique	5 – 15 °C	15 – 30 °C	30 – 40 °C
Roulement (palier)	2 – 5 °C	5 – 10 °C	10 °C

Cosse de batterie	°C	°C	°C
-------------------	----	----	----

4.8 L'architecture du programme

Les étapes implémentation de notre application sont basées sur l'organigramme 4.2 représenté ci-dessous.

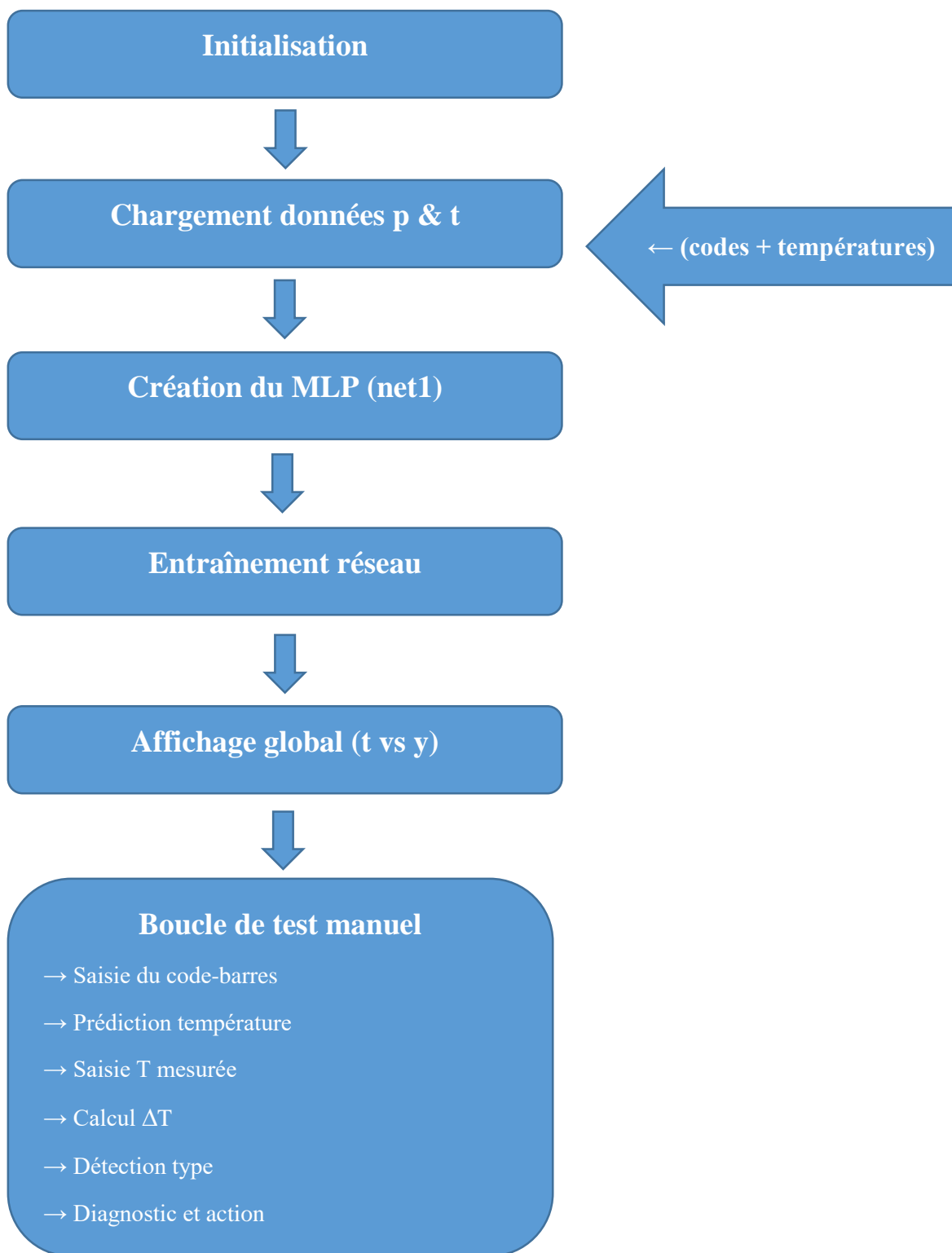


Figure 4.2 Organigramme des étapes du programme

4.9 Structure générale du programme

- **Initialisation (clc, clear all, close all) :** Nettoie la console, la mémoire et les fenêtres de figures.
- **Définition des blocs p1 à p6 :** Contient les codes-barres binaires, chaque bloc représentant un type d'équipement électrique.
- **Définition des blocs t1 à t6 :** Températures de référence correspondantes à chaque code-barres.
- **Construction des matrices p et t :** Matrices finales utilisées pour entraîner le réseau : p contient les entrées, t les sorties.
- **Création du réseau de neurones net1 :**

```
net1 = feedforwardnet(3);
net1.layers{1}.transferFcn = 'logsig';
net1.layers{2}.transferFcn = 'purelin';
```

Utilise un MLP (Multilayer Perceptron) :

- 7 neurones en entrée (7 bits)
- 3 neurones dans la couche cachée (« logsig »)
- 1 neurone en sortie (« purelin ») pour produire une température réelle continue.

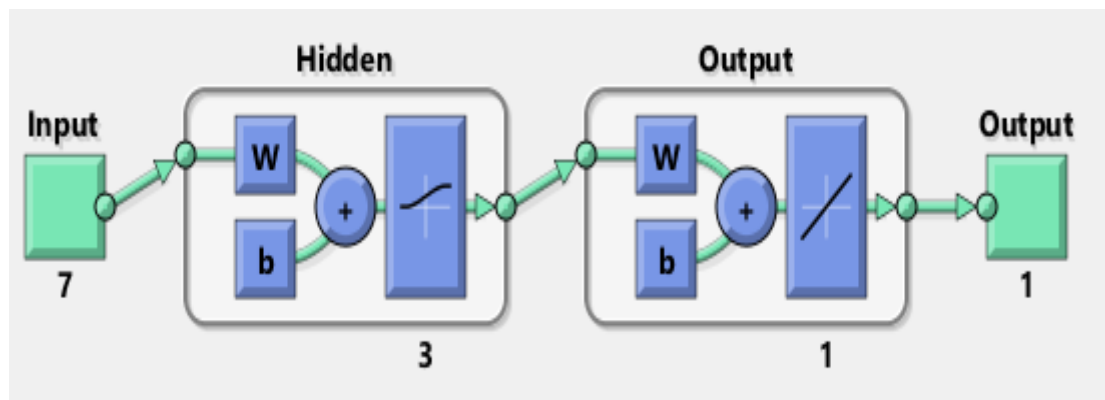


Figure 4.2 Schéma de réseau (net1)

- **La fonction feedforwardnet :** Dans ce programme, le réseau de neurones est construit à l'aide de la fonction MATLAB feedforwardnet, qui permet de créer un réseau de neurones à propagation avant (ou réseau de type MLP – Multilayer Perceptron). Cette fonction fait partie de la boîte à outils Deep Learning Toolbox de MATLAB.

Syntaxe générale

```
net = feedforwardnet(hiddenLayerSize)
```

Où :

(hiddenLayerSize) : nombre de neurones dans la couche cachée.

➤ Fonctions d'activation

```
net1.layers{1}.transferFcn = 'logsig';    ( couche cachée)
net1.layers{2}.transferFcn = 'purelin';   (couche de sortie)
```

- « logsig » permet d'introduire une non-linéarité dans le modèle, essentielle pour capter des relations complexes.
- « purelin » est adaptée pour produire une sortie continue réelle, ce qui est le cas ici (température en °C).

➤ Entraînement du réseau

L'entraînement du réseau de neurones « net1 » est effectué à l'aide de la fonction « train », qui applique un algorithme d'apprentissage supervisé pour ajuster les poids synaptiques et les biais du réseau. L'objectif est de minimiser l'erreur de prédiction entre les températures cibles (t) et les températures estimées par le modèle.

Syntaxe générale

```
net1 = train (net1, p, t) ;
```

➤ Paramètres d'entraînement du réseau

Dans ce projet, plusieurs paramètres d'entraînement ont été configurés manuellement pour optimiser l'apprentissage :

Définition des paramètres

```
net1.trainParam.lr = 0.1;
net1.trainParam.min_grad = 10-20;
net1.trainParam.goal = 10-30;
net1.trainParam.epochs = 300;
```

Tableau 4.6 La description des paramètres d'entrainement

Paramètre	Description
lr (learning rate)	Taux d'apprentissage. Fixé à 0.1, il détermine la vitesse de mise à jour des poids à chaque itération. Plus il est élevé, plus l'apprentissage est rapide, mais instable.
min_grad	Valeur minimale du gradient de l'erreur pour arrêter l'entraînement. Ici, 10e ⁻²⁰ correspond à une condition d'arrêt très stricte.
goal	Erreur de performance cible. Si l'erreur devient inférieure à 1e ⁻³⁰ , l'entraînement s'arrête automatiquement (valeur très ambitieuse ici).
epochs	Nombre maximal d'itérations (ou cycles) d'apprentissage. Ici, limité à 300 époques.

Division des données

```
net1.divideParam.trainRatio = 1;  
net1.divideParam.valRatio = 0;  
net1.divideParam.testRatio = 0;
```

Ces lignes indiquent que 100 % des données sont utilisées pour l'entraînement, sans séparation pour la validation ou le test.

Les paramètres définis permettent :

- Un entraînement rapide ;
- Un contrôle précis des conditions d'arrêt ;
- Et une utilisation complète des données disponibles pour obtenir un modèle prédictif précis dans le cadre du projet.

➤ Affichage global des performances

- Compare visuellement les valeurs cibles et les valeurs prédites.
- Permet de juger la qualité de la prédiction du modèle.

➤ Test manuel en boucle interactive

- Permet à l'utilisateur de tester un ou plusieurs équipements successivement.
- Chaque test comprend :
 - La prédiction de la température de référence ;
 - La saisie de la température réelle mesurée ;
 - Le calcul du delta thermique (ΔT) ;
 - L'identification automatique du type d'équipement ;
 - La détection d'un éventuel défaut thermique ;
 - La classification de la criticité (A, B, C) ;
 - Et l'action de maintenance recommandée.

4.10 Performance du réseau

Performance

La figure ci-dessous présente l'évolution de l'erreur quadratique moyenne (MSE) en fonction du nombre d'itérations (epochs) au cours de l'entraînement du réseau de neurones.

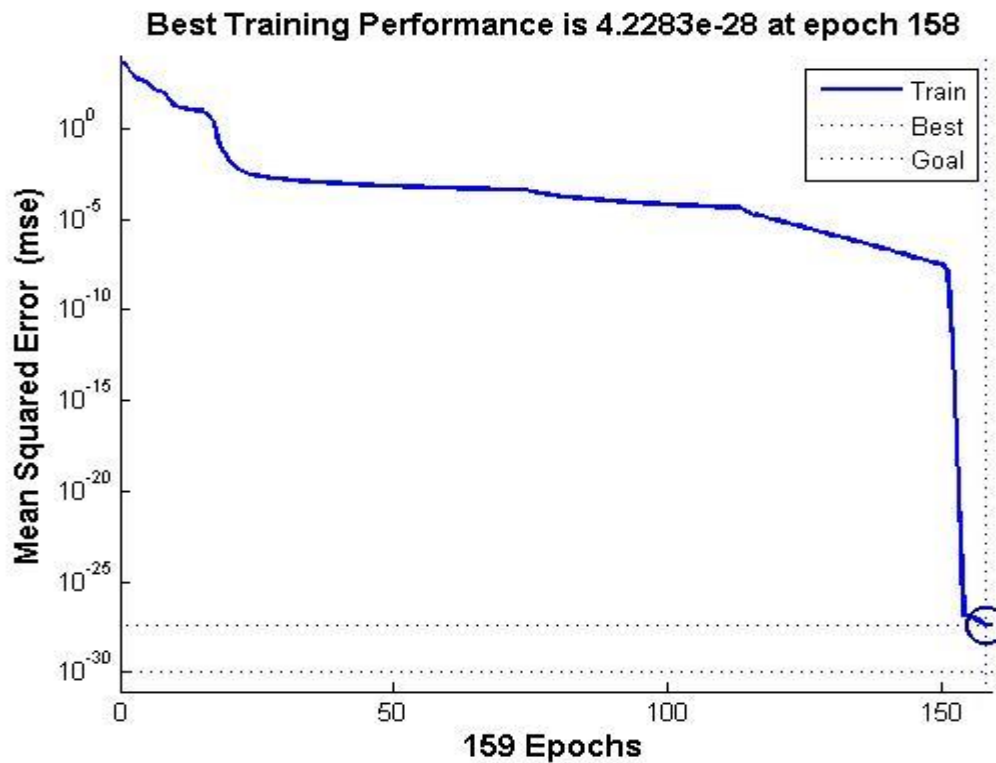


Figure 4.3 Evolution de l'erreur MSE en fonction du nombre d'itérations

Commentaire

La courbe montre une diminution rapide et continue de l'erreur MSE au fil des itérations, indiquant un apprentissage efficace du réseau. À l'époque 158, le réseau atteint une erreur extrêmement faible (4.23×10^{-28}), traduisant une convergence quasi parfaite. L'objectif d'erreur fixé (goal = 10^{-30}) est quasiment atteint, ce qui confirme la qualité des paramètres d'entraînement et la bonne capacité du modèle à apprendre les données.

Régression

Cette figure 4.3 illustre la relation entre les sorties prédites par le réseau de neurones (axe vertical) et les valeurs réelles (axe horizontal). Chaque point représente un échantillon de l'ensemble d'apprentissage.

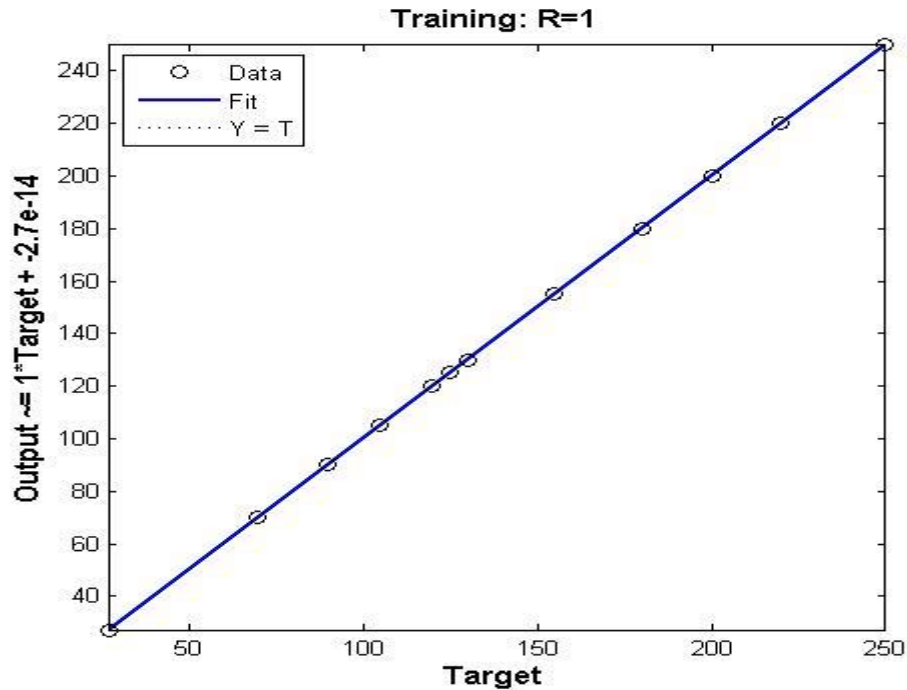


Figure 4.4 Relation entre les sorties prédites et les valeurs réelles

Commentaire

La figure 4.4 montre une correspondance presque parfaite entre les sorties du réseau et les valeurs cibles, avec un alignement quasi total sur la diagonale et un coefficient de corrélation $R = 1$, ce qui confirme un apprentissage optimal sans erreur apparente sur les données d'entraînement.

4.11 Analyse graphique des résultats

La figure 4.5, ci-dessous illustre la performance du réseau à travers une comparaison entre les valeurs réelles (en bleu) et les valeurs prédites pour chaque échantillon (en rouge).

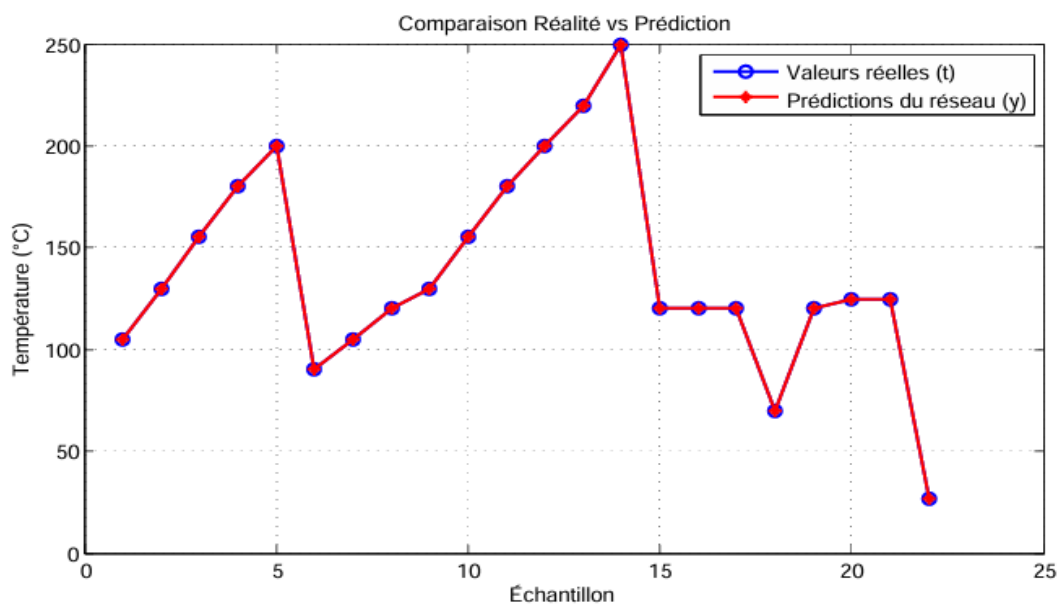


Figure 4.5 Comparaison entre températures de référence et prédites

Commentaire

On observe une superposition correcte entre la courbe des températures réelles et prédites, confirmant la capacité du modèle à reproduire fidèlement les comportements attendus.

4.12 Interprétation

Les résultats obtenus montrent que le réseau est capable de prédire avec précision les températures de référence, avec :

- Une précision élevée pour les équipements disposant d'un plus grand nombre d'exemples (moteurs, câbles).
- Des légères déviations sur des équipements moins représentés (roulements, cosses de batterie), ce qui souligne l'importance d'un échantillonnage équilibré.
- Un modèle bien ajusté, sans surapprentissage apparent, grâce à la simplicité de l'architecture (MLP avec une seule couche cachée).

4.13 Exemples de fonctionnement du programme

Afin d'illustrer concrètement le fonctionnement du programme développé, cette section présente des cas d'utilisation simulés. Chaque exemple correspond à une saisie utilisateur dans l'interface MATLAB, suivie du diagnostic généré automatiquement par le système.

4.13.1 Exemple 01 : (Équipement en état correct)

Entrées utilisateur

- Code-barres saisi : [0 0 1 1 0 0 0] % câble
- Température mesurée : 190 °C

Résultats du programme

```
--- NOUVEAU TEST MANUEL ---
Entrez un code-barres binaire entre crochets [ ] (ou tapez "q" pour quitter) : [0 0 1 1 0 0 0]
Pour le code-barres [0 0 1 1 0 0 0], la température prédite est : 220.00 °C
Entrez la température mesurée (°C) : 190
Type d'équipement détecté : Câble
DeltaT mesuré : -30.00 °C
L'équipement est bon. Pas d'échauffement anormal.
```

Figure 4.6 Résultat sur MATLAB d'exemple 01

Analyse

L'écart de température est négatif (inférieur à la référence). Le programme considère donc que l'équipement fonctionne normalement, et aucune intervention n'est requise.

4.13.2 Exemple 02 : (Surchauffe modérée - Priorité C-)

Entrées utilisateur

- Code-barres saisi : [0 0 0 0 0 1 1] % moteur
- Température mesurée : 160.24 °C

Résultats du programme :

```
--- NOUVEAU TEST MANUEL ---
Entrez un code-barres binaire entre crochets [ ] (ou tapez "q" pour quitter) : [0 0 0 0 0 1 1]
Pour le code-barres [0 0 0 0 0 1 1], la température prédite est : 155.00 °C
Entrez la température mesurée (°C) : 160.24
Type d'équipement détecté : Moteur
DeltaT mesuré : 5.24 °C
L'équipement n'est pas bon. Surchauffe détectée.
Niveau de criticité : Priorité C
Action : Intervention lors de la prochaine maintenance.
```

Figure 4.7 Résultat sur MATLAB d'exemple 02

Analyse :

L'écart de 5.24 °C reste modéré pour un moteur (seuil de 15 °C). Le diagnostic est correct : le moteur est chauffé.

4.13.3 Exemple 3 : (Surchauffe critique -Priorité A-)

Entrées utilisateur

- Code-barres saisi : [0 1 0 0 0 1 1] % Disjoncteur
- Température mesurée : 150 °C

Résultats du programme

```

--- NOUVEAU TEST MANUEL ---
Entrez un code-barres binaire entre crochets [ ] (ou tapez "q" pour quitter) : [0 1 0 0 0 1 1]
Pour le code-barres [0 1 0 0 0 1 1], la température prédite est : 120.00 °C
Entrez la température mesurée (°C) : 150
Type d'équipement détecté : Disjoncteur
DeltaT mesuré : 30.00 °C
L'équipement n'est pas bon. Surchauffe détectée.
Niveau de criticité : Priorité A
Action : Intervention immédiate requise.

```

Figure 4.8 Résultat sur MATLAB d'exemple 03

Analyse :

L'écart très important (30 °C) dépasse largement les seuils critiques pour un disjoncteur. Le programme réagit de manière appropriée en classant ce cas comme prioritaire de niveau A.

Tableau récapitulatif des exemples

Tableau 4.7 Résultats récapitulatif

Code barre	[0 1 0 0 0 1 1]	[0 0 0 0 0 1 1]	[0 0 1 1 0 0 0]
Équipement	Disjoncteur	Moteur	Câble
T° mesurée (°C)	150	160.24	190
T° prédite (°C)	120	155	220
ΔT (°C)	30	5.24	-30
État	Pas bon	Pas bon	Bon
Criticité	A	C	-
Action recommandée	Intervention immédiate requise	Intervention lors de la prochaine maintenance	-

4.14 Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons exposé les étapes de développement du programme, depuis le choix de l'architecture du réseau jusqu'à la mise en œuvre complète du diagnostic automatisé. Les performances obtenues ainsi que les exemples pratiques ont démontré l'efficacité du système dans un contexte de maintenance prédictive, offrant aux techniciens un outil décisionnel concret, adaptable et performant.

Conclusion générale

Conclusion générale

La maintenance industrielle, pierre angulaire de la fiabilité et de la performance des équipements, s'est transformée au fil des années grâce à l'émergence des technologies avancées, dont la thermographie infrarouge. Ce mémoire a illustré comment l'intégration de cette technologie innovante, alliée à l'intelligence artificielle via les réseaux de neurones artificiels, ouvre de nouvelles perspectives pour la maintenance prédictive au sein des industries modernes. Le travail réalisé au sein de l'entreprise SPA Tchin-Lait Candia a permis non seulement de mettre en pratique les principes théoriques, mais aussi de développer un programme de diagnostic thermique automatisé conçu pour s'intégrer harmonieusement aux outils de gestion existants, notamment SAP HANA.

Les résultats obtenus confirment l'efficacité de cette approche pour détecter précocement les anomalies thermiques, anticiper les défaillances et optimiser les interventions de maintenance, dans un monde où tout événement non prévenu peut engendrer un manque à gagner, cet avantage, ainsi que d'autres peuvent être un très bon argument pour convaincre les assureurs. En combinant des mesures précises, une analyse intelligente et une gestion intégrée des données, cette démarche contribue à renforcer la compétitivité et la pérennité des systèmes industriels.

Au-delà des accomplissements de cette étude, de nombreuses pistes d'amélioration et d'évolution restent envisageables. Le perfectionnement des algorithmes de diagnostic, l'élargissement du périmètre d'application à d'autres types d'équipements, ainsi que l'intégration de nouvelles sources de données, constituent autant de défis passionnants pour poursuivre l'innovation dans le domaine de la maintenance industrielle. Ce mémoire ouvre ainsi la voie à un futur où la maintenance prédictive, assistée par l'intelligence artificielle, sera un levier incontournable de l'efficacité industrielle.

Références bibliographiques

- [1] E. Ait Mokhtar, Technique de détection des défaillances, Support de cours Master 2, Univ, de Bejaïa, Algérie, 2024/2025.
- [2] M. Chafai, Management de la maintenance industrielle : Organisation, gestion, méthode et technique, application et étude de cas, Office des Publications Universitaires, Algérie, 2015.
- [3] M. Saad, Méthodes et organisation de la maintenance, Support de cours, Univ. Ibn Khaldoun, Tiaret, Algérie, 2019/2020.
- [4] J.-M. Auberville, Maintenance industrielle : De l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté, Ellipses, France, 2004.
- [5] A. Belhomme, Stratégies de maintenance, Support de cours, BTS Maintenance Industrielle, France, 2010/2011.
- [6] J. Heng, Pratique de la maintenance préventive : Mécanique – Pneumatique – Hydraulique – Électricité – Froid, 2^e éd., Dunod, France, 2012.
- [7] X. P. V. Maldague, Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, Canada, 2001.
- [8] X. Maldague, Applications of Infrared Thermography in Nondestructive Evaluation, Univ. Laval, Québec, Canada, 2000.
- [9] C. A. Balaras and A. A. Argiriou, "Infrared thermography for building diagnostics," Energy and Buildings, vol. 34, pp. 171–183, 2002.
- [10] F. Ammirato and P. Zayicek, Infrared Thermography Field Application Guide, Californie, USA, 1999.
- [12] R. G. Dragan, Études sur le diagnostic des systèmes par thermographie infrarouge, Thèse de doctorat, Univ. d'Artois, France, 2014.
- [15] Y. Chibane and B. Kechroud, Analyse thermodynamique d'une installation de froid industriel de l'entreprise Tchén-lait/Candia, Mémoire de Master, Univ. de Bejaïa, Algérie, 2011.

Références en ligne :

- [11] Fluke, *Comment les caméras infrarouges fonctionnent-elles*, [En ligne]. Disponible : <https://www.fluke.com/fr/apprendre/blog/thermographie/comment-les-cameras-infrarouges-fonctionnent-elles>. [Consulté le 29 mai 2025].
- [13] FLIR, *Guide d'utilisation des caméras thermiques dans l'industrie*, Infrared Training Center, [En ligne]. Disponible : <https://www.flir.fr/discover/instruments/thermal-imaging-guidebook-for-industrial-applications/>. [Consulté le 25 mai 2025].

[14] FLIR, *X6980HS – Caméra scientifique InSb*, [En ligne]. Disponible : <https://www.flir.fr/products/x6980hs-insb/?vertical=rd%20science&segment=solutions>. [Consulté le 29 mai 2025].

[16] Testo, *testo 885 – Caméra thermique avec un objectif*, France, [En ligne]. Disponible : <https://www.testo.com/fr-FR/testo-885/p/0563-0885-X>. [Consulté le 29 mai 2025].

[17] Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, *Équipement de protection individuelle*, France, [En ligne]. Disponible : <https://www.economie.gouv.fr>. [Consulté le 04 juin 2025].

[18] Fiche technique de caméra testo 885 [en ligne]. Disponible : <https://www.testo.com/fr>. [Consulté le 27 mai 2025]

[19] Mode d'emploi de la camera testo 885 [en ligne]. Disponible : <https://www.testo.com/fr>. [Consulté le 27 mai 2025]

[20] Mode d'emploi de logiciel IIRSoft [en ligne]. Disponible : <https://www.testo.com/fr>. [Consulté le 27 mai 2025]