

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN DE CYCLE MASTER

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electromécanique
Parcours : Master
Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

**Contribution à la réalisation d'une
caméra thermique**

Préparées par :

ABED Nadia et MANSOUR Nawel

Soutenu publiquement le : 16/ 06 / 2022, devant le jury composé de :

M. BOUZIDANE Ahmed	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. SAAD Mohamed	Maître de Conférences "B"(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M ^{me} . ASRI Aicha	Maître de Conférences "B"(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. BEY Mohamed	Maître de Conférences "B"(Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2021 – 2022

Remerciements

Nous exprimons d'abord nos profonds remerciements « ALLAH » le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous adressons nos plus vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont faits en acceptant d'être examinateurs de notre mémoire.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toutes nos reconnaissances.

Nos sentiments de reconnaissance et nos remerciements à notre promoteur Dr. BEY Mohamad, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nos réflexions.

Nous tenons à remercier nos parents qui ont été vigilants pour éduquer et pourvoir à toutes les exigences de la vie à ce jour, et à tous nos professeurs de l'école primaire à l'université spécialement Dr. GUEMMOUR Mohammed, Dr. HAMMOU Mahmoud
et

Dr. AKIRMI Mustafa, qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

Ces remerciements vont aussi au corps professoral et administratif de l'Université IBN KHALDOUN Tiaret, plus particulièrement au corps professoral du département de Génie Mécanique, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Enfin, nous adressons sincères remerciements envers les amis et collègues qui nous a apporté leur support moral et intellectuel tout au long de notre démarche

Dédicaces

Tout d'abord je dédie ce travail, à :

A Mes très chers parents, pour leur amour, leur soutien et leur confiance. Rien n'aurait été possible sans eux qui n'a pas cessé de m'encourager et de se sacrifier pour que je puisse franchir toute obstacle durant toutes mes années d'études, que Dieu me le garde en très bonne santé.

A mes frères Yacine, Amine et surtout Abdelkader et à mes sœurs Amina, Manar et surtout ma jumelle Hafida. Et toute ma famille.

A tous mes amis(es) sans exception.

La personne qui a partagé ce travail avec moi dans les bons et mauvais à très cher binôme ABED Nadia et toute sa famille.

A mes professeurs sans exception.

A tous mes collègues de la promotion 2022

Et tout qui m'a supporté pour terminer mon projet de fin d'études.

Tous ceux que j'ai oubliés.

MANSOUR Nawel

Dédicaces

Je dédie ce travail,

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi tout au long de mes études et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Mais aucune dédicace ne serait témoin de mon profond amour, mon immense gratitude, et mon plus grand respect.

A mes chers frères Mohammed et Abdeljalil pour leur encouragement indéfectible.

A mes adorables sœurs Fatiha, Khaldia, Meriem, Fatima Zohra et Amina pour leur soutien moral et leurs sacrifices tout au long de ma formation.

A mes neveux et mes nièces et ma famille paternelle et maternelle. Sans oublier la femme généreuse et noble qui je porte son prénom.

*A Celle qui m'a chaleureusement supporté et encouragé et partagée avec moi tous les moments d'émotion lors l'élaboration de ce travail
MANSOUR Nawel merci infiniment.*

ABED Nadia

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Caractéristiques de Caméra infrarouge PCE-TC 24.....	24
Tableau II.2 : Caractéristiques de Caméra infrarouge FLIR E8-XT.....	25
Tableau III.1 : Caractéristiques de l'ESP8266.....	37
Tableau III.2 : Caractéristiques de l'écran ILI9341.....	38
Tableau III.3 : Caractéristiques de capture AMG8833.....	39
Tableau III.4 : Exploitation de températures de microcontrôleur ATMEGA2560.....	46
Tableau III.5: Exploitation de températures de circuit CH341.....	47

Liste des figures

Figure I.1 : La relation entre le service maintenance et les autres services.....	6
Figure I.2 : Les différents types de maintenance.....	6
Figure I.3 : Mauvais serrage mécanique.....	9
Figure I.4 : Usure engrenage	9
Figure I.5 : Exemple de surtension	10
Figure I.6 : Etapes de contrôle par ressuage	12
Figure II.1 : Position du domaine infrarouge dans le spectre électromagnétique.	17
Figure II.2 : Schéma de principe : thermographie pulsée.	19
Figure II.3 : Schéma de principe thermographie modulée.	19
Figure II.4 : Luminance d'une source étendue ds.	20
Figure II.5 : Bilan énergétique.....	21
Figure II.6 : Courbes de la loi de déplacement de Wien.	23
Figure II.7 : Principe de fonctionnement d'une caméra infrarouge.	24
Figure II.8 : Caméra infrarouge PCE-TC 24	25
Figure II.9 : Caméra infrarouge FLIR E8-XT	26
Figure II.10 : Image visible et thermique représente un problème de roulement.....	27
Figure II.11 : Image visible et thermique représente un problème de bobine.....	27
Figure II.12 : Image visible et thermique représente une surchauffe d'un disjoncteur.....	27
Figure II.13 : Image visible et thermique représente une perte de chaleur due à un défaut d'isolation.....	28
Figure II.14 : Image visible et thermique représente une Isolation défectueuse d'un réseau canalisations.....	28
Figure II.15 : Image visible et thermique d'un transformateur triphasé	28
Figure II.16 : Image visible et thermique de rouleaux surchauffés d'un tapis convoyeur.....	28
Figure II.17 : Image visible et thermique d'un roulement à billes qui surchauffe et devrait être remplacé.....	29
Figure II.18 : Image visible et thermique d'un module de commande défectueux.....	29
Figure II.19 : Exemple de courbe de calibrage radiométrique d'une caméra infrarouge.....	30
Figure II.20 : Exemple des courbes d'étalonnage entre les mesures et les valeurs données par la loi d'étalonnage.....	31
Figure III.1 : Vue en arrière de la caméra	34
Figure III.2 : Schéma synoptique de la caméra infrarouge d'année dernière.....	35

Figure III.3 : Teste de la caméra sur un démodulateur numérique.....	35
Figure III.4 : Thermogramme obtenu par la caméra de l'année passée.....	36
Figure III.5 : ESP8266.....	37
Figure III.6 : Ecran ILI9341.....	38
Figure III.7 : Capteur AMG8833.....	39
Figure III.8 : Les différentes vues de la caméra.....	40
Figure III.9 : Appel des bibliothèques et déclaration des pins.....	41
Figure III.10 : Schéma synoptique.....	42
Figure III.11 : Vue de face du couplage de caméra.....	42
Figure III.12 : Vue de dessus de la caméra.....	42
Figure III.13 : La caméra thermique réalisé.....	43
Figure III.14 : Test sur un fer à soudeuse.....	43
Figure III.15 : Teste sur le PC portable.....	44
Figure III.16 : Carte Arduino Méga.....	44
Figure III.17 : Teste sur la première carte Arduino méga.....	45
Figure III.18 : Teste sur la deuxième carte Arduino méga.....	45
Figure III.19 : Courbes de répartition de chaleur au niveau de deux microcontrôleur ATMEGA2560 à temps réel	46
Figure III.20 : Courbes de répartition de chaleur au niveau de circuit CH341 à temps réel.....	47

Symboles et abréviations

3D :	Trois démontions.
CND :	Contrôle non destructif.
TV :	Test visuel.
Db :	décibel.
°K :	Kelvin.
°C :	Degré Celsius.
µm :	Micro mètre.
Φ :	Le flux (W).
L :	La luminance ($W.m^{-2}.sr^{-1}$).
R :	L'émittance ($W.m^{-2}$).
λ :	La longueur d'onde (m).
α, ρ et τ :	les facteurs d'absorption.
$M^0(\lambda)$:	Flux de puissance.
C :	Vitesse de la lumière (cm/s).
h :	Constante de Planck (W/s^2).
K :	Constante de Boltzmann ($Watt.s^2/°K$).
T :	Température (K).
c :	Constante de radiation (µm. K).
σ :	Constante de Stefan en luminance ($W m^{-2}K^{-4}$).
ε :	L'émissivité.
LCD :	Écran à cristaux liquides.
T_{env} :	La température environnementale(K).
T_{obj} :	La température d'objet (K).
B :	Calibrage radiométrique.
SNR :	Rapport signal sur bruit.
IR :	Infrarouge.
P_{signal} :	Puissance de signal.
P_{Bruit} :	Puissance de bruit.
T_S :	La température du corps noir.
T_M :	La température donnée par la caméra infrarouge.
S(T) :	Le signal reçu par la caméra.
$RSR(\lambda)$:	Le rendement du détecteur.
OPT :	Le rendement de l'optique.
G :	Le gain électronique.

SOMMAIRE

Remercîments

Dédicaces

Liste des tableaux

Liste des figures

Listes des symboles et abréviations

Introduction générale 1

Chapitre I : La maintenance et ses outils

<i>I.1 Introduction</i>	4
<i>I.2 Présentation de la maintenance</i>	4
<i>I.2.1 Définition de la maintenance</i>	4
<i>I.2.2 Objectifs de la maintenance</i>	4
<i>I.2.3 La stratégie de maintenance</i>	4
<i>I.3 Le service maintenance</i>	5
<i>I.3.1 Les fonctions du service maintenance</i>	5
<i>I.3.1.1 Fonction étude</i>	5
<i>I.3.1.2 Fonction préparation</i>	5
<i>I.3.1.3 Fonction ordonnancement</i>	5
<i>I.3.1.4 Réalisation</i>	5
<i>I.3.1.5 Fonction gestion</i>	5
<i>I.3.2 La relation entre le service maintenance et les autres services</i>	6
<i>I.4 Les types de maintenance</i>	6
<i>I.4.1 Maintenance corrective</i>	6
<i>I.4.1.1 Maintenance palliative</i>	7
<i>I.4.1.2 Maintenance curative</i>	7
<i>I.4.2 Maintenance préventive</i>	7
<i>I.4.2.1 Maintenance préventive systématique</i>	7
<i>I.4.2.2 Maintenance préventive conditionnelle</i>	7

1.4.2.2.1	<i>Maintenance prédictive</i>	7
1.4.2.3	<i>Maintenance préventive prévisionnelle</i>	8
1.4.2.3.1	<i>Maintenance proactive</i>	8
1.4.2.4	<i>Avantages de la maintenance prédictive par rapport à la préventive</i>	8
1.4.3	<i>Maintenance améliorative</i>	8
1.5	<i>Les modes de défaillance globalement</i>	9
1.5.1	<i>Modes de défaillance d'ordre mécanique</i>	9
1.5.1.1	<i>Le mauvais serrage mécanique (jeu de fondation)</i>	9
1.5.1.2	<i>L'usure abrasive</i>	9
1.5.1.3	<i>Fatigue thermique</i>	10
1.5.1.4	<i>Défaut des machines tournante</i>	10
1.5.2	<i>Les modes de défaillance d'ordre électrique</i>	10
1.5.2.1	<i>Surtensions</i>	10
1.5.2.2	<i>Défaut de court-circuit</i>	10
1.5.2.3	<i>Surcharges</i>	11
1.6	<i>Technique de détection des pannes</i>	11
1.6.1	<i>Le contrôle non destructif</i>	11
1.6.1.1	<i>Le contrôle visuel</i>	11
1.6.1.2	<i>Le ressuage</i>	11
1.6.1.3	<i>Le contrôle non destructif par ultrasons</i>	12
1.6.1.4	<i>L'émission acoustique</i>	12
1.6.1.5	<i>Courants de Foucault</i>	12
1.6.1.6	<i>Radiographie et gammagraphie</i>	13
1.6.1.7	<i>La thermographie</i>	13
1.6.2	<i>Le contrôle des huiles</i>	13
1.6.2.1	<i>Rôle de lubrifiant</i>	13
1.6.3	<i>L'analyse acoustique</i>	13
1.6.4	<i>Analyse vibratoire</i>	14

I.7 Conclusion.....	14
Chapitre II : La thermographie : outil de la maintenance préventive	
II.1 Introduction	16
II.2 La thermographie	16
II.3 Concept de la thermographie infrarouge	16
II.3.1 L'infrarouge et le spectre électromagnétique	16
II.3.2 Définition	17
II.3.3 Principe.....	17
II.3.4 Avantages de la thermographie infrarouge	18
II.4 La thermographie infrarouge appliquée en contrôle non destructif	18
II.4.1 La thermographie pulsée	19
II.4.2 Thermographie modulée	19
II.4.3 La thermographie à phase pulsée	20
II.5 Définition des grandeurs radiatifs.....	20
II.5.1 Le flux Φ	20
II.5.2 La luminance L	20
II.5.3 L'émittance R	21
II.6 Le rayonnement thermique	21
II.6.1 Le corps noir.....	22
II.6.1.1 Loi de Planck	22
II.6.1.2 Loi de déplacement de Wien	22
II.6.1.3 Loi de Stefan-Boltzman.....	23
II.6.1.4 L'émissivité.....	23
II.7 Appareil de mesure	24
II.7.1 Quelques types de cameras infrarouge.....	24
II.7.1.1 Caméra infrarouge PCE-TC 24.....	24
II.7.1.2 Caméra infrarouge FLIR E8-XT.....	25
II.7.2 Critères à prendre en compte lors le choix de la caméra infrarouge.....	26

<i>II.8 Analyse de l'état d'un système par la thermographie</i>	<i>26</i>
<i>II.8.1 Analyse qualitative.....</i>	<i>26</i>
<i>II.8.1.1 Quelques exemples.....</i>	<i>27</i>
<i>II.8.2 Analyse quantitative.....</i>	<i>29</i>
<i>II.8.2.1 Mesure de la température par une caméra infrarouge.....</i>	<i>29</i>
<i>II.8.2.2 Calibrage radiométrique d'une caméra infrarouge.....</i>	<i>30</i>
<i>II.8.2.3 Rapport signal sur bruit de la caméra IR.....</i>	<i>30</i>
<i>II.8.2.4 Etalonnage des caméras</i>	<i>31</i>
<i>II.9 Défit de la thermographie.....</i>	<i>31</i>
<i>II.9.1 L'instrument de mesure.....</i>	<i>31</i>
<i>II.9.2 Les images thermiques ne traversent pas certaines matières.....</i>	<i>32</i>
<i>II.9.3 Influence de l'ambiance.....</i>	<i>32</i>
<i>II.9.4 Lecture des résultats</i>	<i>32</i>
<i>II.9.5 Investissement de départ plus important.....</i>	<i>32</i>
<i>II.10 Conclusion</i>	<i>32</i>
 <i>Chapitre III : Contribution à la réalisation d'une simple caméra thermique</i> 	
<i>III.1 Introduction</i>	<i>34</i>
<i>III.2 Aperçu général</i>	<i>34</i>
<i>III.2.1 Hardware.....</i>	<i>34</i>
<i>III.2.2 Software.....</i>	<i>34</i>
<i>III.3 Schéma synoptique l'année dernière.....</i>	<i>35</i>
<i>III.4 Résultats obtenus</i>	<i>35</i>
<i>III.5 Lacunes et recommandations</i>	<i>36</i>
<i>III.6 Travail établis dans ce projet.....</i>	<i>36</i>
<i>III.6.1 Hardware.....</i>	<i>36</i>
<i>III.6.1.1 ESP8266</i>	<i>37</i>
<i>III.6.1.1.1 Caractéristique ESP8266.....</i>	<i>37</i>
<i>III.6.1.1.2 Avantage de ESP8266.....</i>	<i>37</i>

III.6.1.1.3 L'inconvénient Raspberry PI Zero	38
III.6.1.2 Ecran ILI 9341	38
III.6.1.2.1 Caractéristiques ILI 9341	38
III.6.1.3 Le capteur AMG8833	39
III.6.1.3.1 Caractéristiques de capteur AMG8833.....	39
III.6.1.4 La carcasse	40
III.6.2 Software	40
III.6.2.1 Code téléversé dans la carte.....	40
III.6.2.1 L'alimentation	41
III.7 Schéma synoptique de montage	41
III.7.1 Le montage	42
III.7.2 Assemblage dans la carcasse	42
III.8 Test et perspectives	43
III.9 Analyse thermique	44
III.9.1 Système étudié : une carte électronique	44
III.9.2 Etude qualitative.....	45
III.9.3 Analyse quantitative	46
III.10 Conclusion.....	48
Conclusion générale.....	50

Références bibliographies et Webographies

Annexe

Introduction générale

L'apparition aléatoire de divers dysfonctionnements dans les systèmes industriels tels que les moteurs et les machines électriques obligent les spécialistes à étudier les causes de ces défauts, ce qui a conduit à l'émergence de la maintenance dite industrielle. Cette dernière s'est présentée ces dernières années comme un élément très important dans toute société de caractère industriel, considérant qu'il apportait le complément recherché dans l'amélioration de la production et la réduction des frais.

Peut-être que la définition de la maintenance industrielle traditionnelle est de fournir un modèle de maintenance d'une machine qui repose principalement sur la connaissance précise des pièces de celle-ci et de son principe de fonctionnement, après quoi vient l'étape d'identifier les types des pannes et leurs causes puis de proposer des solutions pour éviter ces défauts vient.

La maintenance prédictive s'est faite donc prendre une place importante, car elle anticipe la survenance du dysfonctionnement avant qu'il ne se produise et peut ainsi intervenir en amont, ce qui se traduit par plusieurs avantages comme la réduction des coûts de maintenance et l'évitement des arrêts de production.

La maintenance prédictive, même si elle s'est avérée efficace, nécessite en revanche une étude approfondie des systèmes, s'appuie fortement sur des capteurs précis, souvent coûteux, et s'appuie sur des analyses de données de manière complexe.

D'autre part, les images thermiques qui s'appellent aussi « **thermogramme** » capturées par les caméras thermiques ont grandement facilité le processus d'anticipation de l'apparition de dysfonctionnements, car la température élevée d'un organe ou dans un point représente souvent le début d'un véritable problème dans l'appareil, et donc une intervention urgente doit être faite avant de perdre complètement la machine.

La qualité de l'analyse des thermogrammes est malheureusement compensée par le prix élevé des caméras thermiques et s'accompagne également d'une mauvaise analyse des images thermiques capturées.

Sur la base de tout ce qui précède, nos collègues ont précédemment essayés de fabriquer une caméra thermique à moindre coût, et en effet ils ont réussi dans une large mesure au moins en prenant des images thermiques à travers l'environnement Arduino et Raspberry, mais ce projet nécessite encore beaucoup de développement pour atteindre l'objectif visé, qui est une caméra thermique produite à l'université de Tiaret à moindre coût possible.

En conséquence, nous avons décidé de poursuivre ce projet très important en complétant les différentes parties restantes telles que la conception 3D et l'ajout des différents boutons de contrôle, puis en testant la caméra thermique sur différents dispositifs pour s'assurer de son efficacité. Si une

caméra professionnelle est disponible, nous pouvons comparer les résultats obtenus pour assurer son efficacité.

Pour réaliser ce travail, nous avons le répartir en trois chapitres :

La notion de la maintenance est abordée au premier chapitre comporte les différents types ainsi une présentation des différents modes de défaillances des systèmes industriels, etc....

Dans le deuxième chapitre, nous allons parler sur la puissance de la thermographie dans la maintenance prédictive, par son principe de fonctionnement, le modèle mathématique, les avantages, etc...

Sur la base du travail fait l'année précédente, nous allons donc dans le dernier chapitre, étudie la caméra réalisée l'année passée, découvrir ce qui manque et mettre les différentes améliorations et modifications. Après la réalisation, des tests seront effectués pour tester la caméra.

Une conclusion générale avec quelques perspectives termine ce mémoire.

Chapitre I

La maintenance et ses outils

I.1 Introduction

La maintenance joue un rôle très important dans n'importe quelle structure organisationnelle d'une entreprise industrielle, elle peut assurer une bonne partie de ses dépenses proviennent de pannes, de défaillances ou d'équipements moins performants après plusieurs années d'utilisation, il faut aussi tenir compte des différentes pertes de temps d'arrêt en cas de panne, la difficile de gestion des stocks ou des achats, les risques de blessure, etc... Tous ces coûts peuvent être réduits grâce à une maintenance industrielle efficace.

Dans ce chapitre nous allons présenter une généralité sur la maintenance et sur sa stratégie puis nous finalisons par les modes de défaillance et les techniques de détection des pannes.

I.2 Présentation de la maintenance**I.2.1 Définition de la maintenance**

Si l'on cherche dans les différentes références la définition de la maintenance industrielle, on en trouvera plusieurs définitions différentes, par exemple :

La *Norme NF EN 13306* définit la maintenance comme étant l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [1].

Une autre définition est donnée par la *Norme NF : X60-010* comme suit : La maintenance est définie comme étant l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé [2].

Le dictionnaire Larousse définit la maintenance comme : L'ensemble des activités qui permet de maintenir ou de rétablir un système en état de fonctionnement [3].

I.2.2 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 est pour objectifs de [1, 2] :

- 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 ;
- Préparer le travail.

I.2.3 La stratégie de maintenance

Selon les deux *Normes NF EN 13306 & FD X 60-000*, La stratégie de maintenance est une méthode de management utilisée en vue d'atteindre un certain nombre objectif [4] :

- Développer, adapter ou mettre en place des méthodes de maintenance ;
- Élaborer et optimiser les gammes de maintenance ;
- Organiser les équipes de maintenance ;
- Internaliser et/ou externaliser partiellement ou totalement les tâches de maintenance ;
- Définir, gérer et optimiser les stocks de pièces de rechange et de consommables ;
- Étudier l'impact économique (temps de retour sur investissement) de la modernisation ou de l'amélioration de l'outil de production en matière de productivité et de maintenabilité.

I.3 Le service maintenance

I.3.1 Les fonctions du service maintenance

Cinq fonctions doivent être présentes pour qu'on puisse parler d'un service maintenance sont : Étude, Préparation, Ordonnancement, Réalisation et Gestion [4].

I.3.1.1 Fonction étude

Sa mission principale est l'analyse du travail à réaliser en fonction de la politique de maintenance choisie. Elle implique la mise en œuvre d'un plan de maintenance avec des objectifs chiffrés et des indicateurs mesurables [4].

I.3.1.2 Fonction préparation

La préparation des interventions de maintenance doit être considérée comme une fonction à part entière du processus maintenance. Toutes les conditions nécessaires à la bonne réalisation d'une intervention de maintenance seront ainsi prévues, définies et caractérisées. Une telle préparation devra bien sûr s'inscrire dans le respect des objectifs généraux tels qu'ils sont définis par la politique de maintenance (coût, délai, qualité, sécurité, etc...). Quel que soit le type d'intervention à réaliser, la préparation sera toujours présente [4].

I.3.1.3 Fonction ordonnancement

L'ordonnancement représente la fonction dans un service maintenance caractérisée par l'extrême variété des tâches en nature, durée, urgence et criticité [4].

I.3.1.4 Réalisation

La réalisation consiste à mettre en œuvre les moyens définis dans le dossier de préparation dans les règles de l'art, pour atteindre les résultats attendus dans les délais préconisés par l'ordonnancement [4].

I.3.1.5 Fonction gestion

La fonction gestion du service maintenance devra être capable d'assurer la gestion des équipements, interventions, stocks, ressources humaines et la gestion du budget [4].

I.3.2 La relation entre le service maintenance et les autres services

La figure I.1 montre la relation entre le service de la maintenance et les différents autres services, comme indiqué dans cette figure, le service maintenance représente le cœur de l'entreprise et tous les autres services ont une relation directe avec ce service [3].

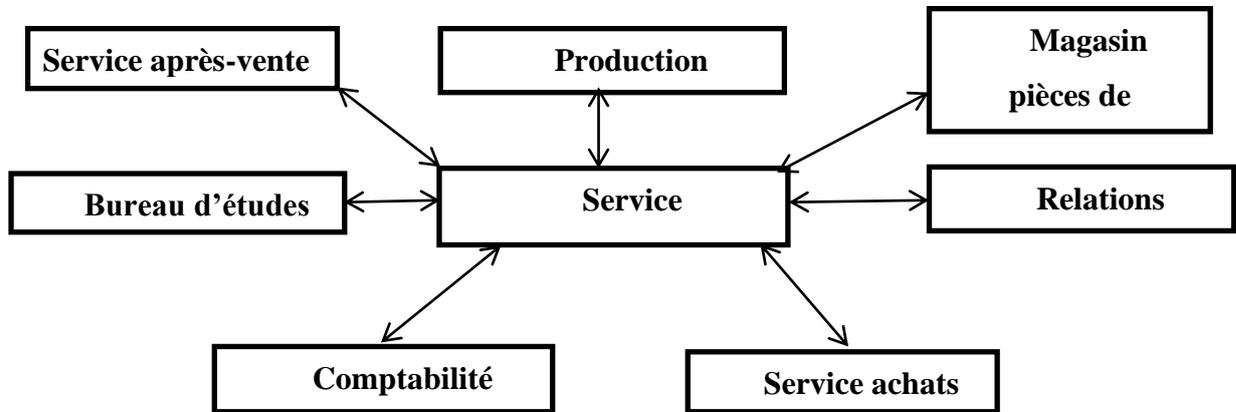


Figure I.1 : La relation entre le service maintenance et les autres services.

I.4 Les types de maintenance

Les types de maintenance sont présentés dans la figure I.2 :

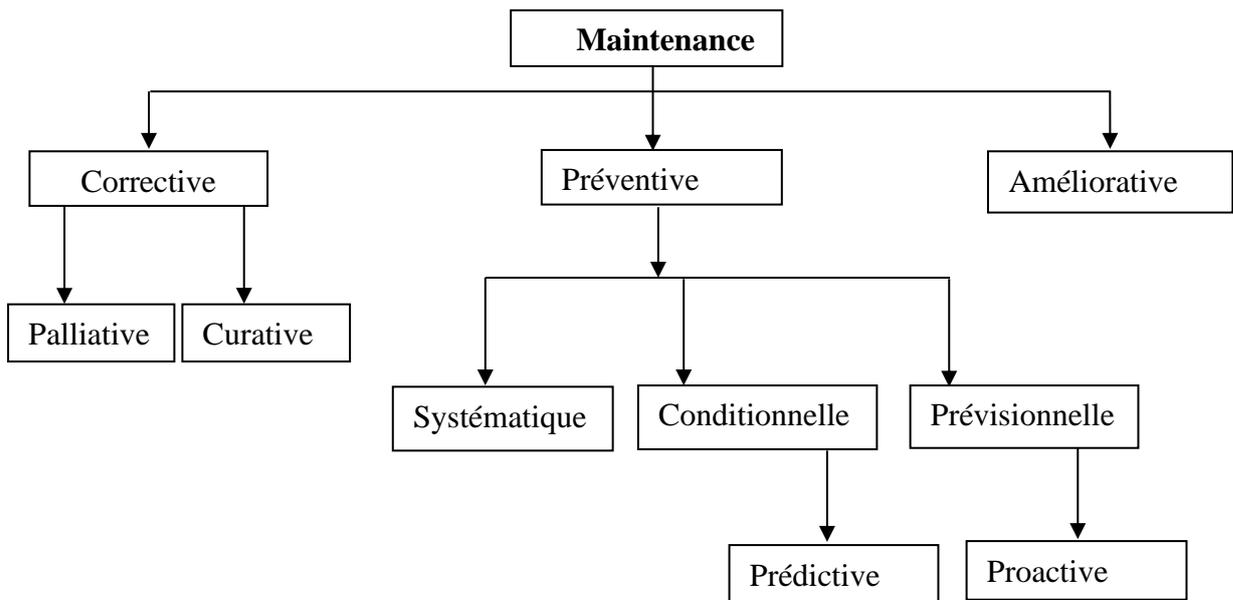


Figure I.2 : Les différents types de maintenance.

I.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 [3] :

I.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 [4].

I.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 [3] :

- 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).

I.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 [1].

I.4.2.1 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.

I.4.2.2 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-diagnostique, 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.

I.4.2.2.1 Maintenance prédictive

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 permette d'éliminer les procédures inutiles que l'on peut retrouver dans la maintenance préventive.

I.4.2.3 Maintenance préventive prévisionnelle

La maintenance prévisionnelle est une approche relativement récente qui repose comme la maintenance conditionnelle, sur la technologie des capteurs mais privilégie l'évolution des informations qu'ils délivrent plutôt que le simple franchissement de seuils prédéterminés. Ainsi, par une surveillance dictée par la progression d'une dégradation, il est possible de mieux planifier ou retarder des interventions. La maintenance prévisionnelle est particulièrement adaptée aux dégradations progressives dont on ignore les seuils [3].

I.4.2.3.1 Maintenance proactive

La maintenance proactive est un terme pour désigner le renforcement des maintenances préventives et prédictives. Ainsi, dans cette forme de maintenance est utilisée pour repérer les causes des problèmes survenant sur les machines ou les processus. Cette modalité de maintenance fournit à l'expert un moyen pour créer une réduction efficace du temps total de panne des équipements [6].

I.4.2.4 Avantages de la maintenance prédictive par rapport à la préventive

La maintenance préventive permet de :

- Les contrôles de routine ;
- Les mesures et ajustements ;
- Les changements d'huile et lubrification ;
- Les changements de pièces ;
- Les interventions pour l'identification et le changement systématique de composants endommagés.

D'autre part, la maintenance prédictive permet de :

- Diminuer le nombre d'interruptions des machines pour des opérations de maintenance ;
- Diminuer le nombre de pannes ;
- Mieux planifier les interventions ;
- Mieux préparer les équipes d'intervention ;
- Mieux échanger entre les professionnels de maintenance et les équipes de production ;
- Mieux anticiper et gérer les besoins de pièces détachées des outils.

I.4.3 Maintenance améliorative

Dans ce type de maintenance, un projet est réalisé pour adapter l'équipement d'origine aux besoins de l'entreprise par le personnel d'ingénierie, une refonte de l'équipement d'origine ou de ses pièces est réalisée pour minimiser les pannes, réalisée par le personnel de maintenance, un reconditionnement pour augmenter la durée de vie de l'équipement [7].

I.5 Les modes de défaillance globalement

Un mode de défaillance est la manière par laquelle un dispositif peut venir à être défaillant, c'est-à-dire à ne plus remplir sa fonction. Ceci peut intervenir de quatre manières différentes [8] :

- Plus de fonctions : la fonction cesse de se réaliser ;
- Pas de fonction : la fonction ne se réalise pas lorsqu'on la sollicite ;
- Fonction dégradée : la fonction ne se réalise pas parfaitement ;
- Fonction intempestive : la fonction se réalise alors qu'elle n'est pas sollicitée.

I.5.1 Modes de défaillance d'ordre mécanique

I.5.1.1 Le mauvais serrage mécanique (jeu de fondation)

Le mauvais serrage de la structure de la machine génère des vibrations et un certain bruit. Ce genre de défaut est en général directionnel (desserrage selon un axe, fissuration beaucoup plus apparente dans la direction de la charge que dans les autres directions...) [9].

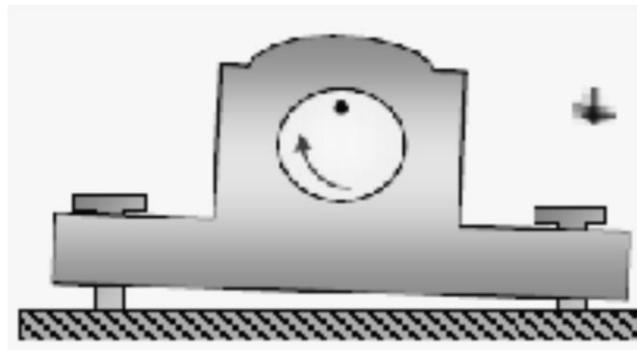


Figure I.3 : Mauvais serrage mécanique [9].

I.5.1.2 L'usure abrasive

Est un phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière dû au glissement de deux surfaces l'une contre l'autre. Le développement de l'usure est lié à la charge et à la vitesse de glissement en chaque point des surfaces de contact, ainsi qu'à la présence plus ou moins grande d'éléments abrasifs dans le lubrifiant [9].



Figure I.4 : Usure engrenage [9].

I.5.1.3 Fatigue thermique

La fatigue thermique consiste en une répétition simultanée de cycles de contrainte thermique et de contrainte mécanique qui conduit à des ruptures ou à des déformations provoquées par le phénomène de fluage[10].

I.5.1.4 Défaut des machines tournante

Dans la machine tournante, il existe différents modes de défaillance, on cite par exemple [11] :

- Défaut de balourd ;
- Désalignement ;
 - Désalignement d'arbres accouplés ;
 - Désalignement des paliers ;
- Les défauts des engrenages ;
- Défaut de roulements.

I.5.2 Les modes de défaillance d'ordre électrique

I.5.2.1 Surtensions

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un calibre définies par une norme ou une spécification est une surtension (voir figure I.5). Elles peuvent apparaître [12] :

- En mode différentiel (entre conducteurs actifs phase/phase – phase/neutre) ;
- En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).

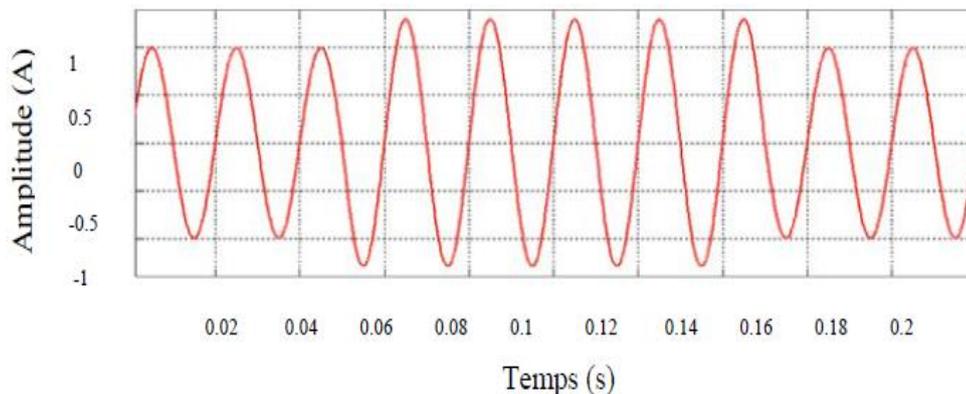


Figure I.5 : Exemple de surtension [12].

I.5.2.2 Défaut de court-circuit

Le défaut de type court-circuit d'un interrupteur apparaît quand l'un des deux interrupteurs reste continuellement à l'état passant. Le court-circuit se produit lorsque le deuxième interrupteur est à son tour commandé à la fermeture. Ce défaut se produit en raison d'une défaillance de la commande des transistors (défaillance du driver, défaillance de la carte de commande, problème de connectique entre la carte de commande et le driver) ou suite à une défaillance physique de la puce du silicium

qui résulte d'un dépassement de la température et c'est le mode de défaillance le plus probable et le plus courant [13].

I.5.2.3 Surcharges

Le terme surcharge est utilisé pour un courant excessif circulant dans un circuit en bon état électriquement. Les surcharges sont en général inférieures à dix fois le courant nominal du circuit. Les surcharges de courant ne sont pas beaucoup plus élevées que le courant maximum permanent d'une installation, mais si elles se maintiennent trop longtemps elles peuvent faire des dégâts. Les dégâts, plus particulièrement aux matières isolantes en contact avec les conducteurs de courant, sont la conséquence de l'effet thermique du courant [14].

I.6 Technique de détection des pannes

I.6.1 Le contrôle non destructif

C'est un ensemble de techniques qui permet de caractériser l'état d'intégrité des structures industrielles, sans les dégrader soit au cours de la production, soit en cours de maintenance. Les procédés de CND résultant de la mise en œuvre en grande partie des principes physiques [1].

I.6.1.1 Le contrôle visuel

Les tests visuels sont la méthode de test la plus couramment utilisée dans l'industrie. Étant donné que la plupart des méthodes d'essai exigeant que l'opérateur regarde la surface de la pièce à inspecter, l'inspection visuelle est inhérente à la plupart des autres tests méthodes. Comme son nom l'indique, le test visuel implique l'observation de la surface d'un objet et pour évaluer la présence de discontinuités de surface. Les inspections peuvent se faire par visualisation directe, ou peut-être amélioré avec l'utilisation d'instruments optiques tels que des loupes, des miroirs, des baroscopes et les systèmes de visualisation assistés par ordinateur. Corrosion, désalignement des pièces, les dommages physiques et les fissures ne sont que quelques-unes des discontinuités qui peuvent être détectées par des examens visuels [12].

I.6.1.2 Le ressuage

Le ressuage exploite les propriétés tensions superficielles de certains liquides pour faciliter le contrôle visuel des fissures. Sa mise en œuvre comporte normalement quatre phases [16] :

- D'abord nettoyer soigneusement la pièce pour enlever les salissures, les traces de graisse (mais il ne faut pas reboucher ainsi les fissures) ;
- Applique le produit pénétrant, au pinceau ou par immersion ou nébulisation ; le temps d'imprégnation est en général de quelques minutes ;
- Éliminer l'excès de pénétrant avec un produit adapté (eau, émulsifiant, solvant), le nettoyage est arrêté dès qu'il ne reste plus aucune trace visible de pénétrant et la pièce est séchée ;

- Appliquer un révélateur par immersion ou nébulisation en une couche mince et uniforme et observer aussitôt la surface de la pièce.

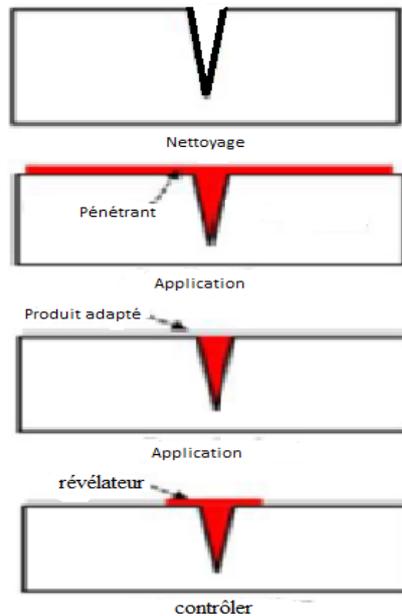


Figure I.6 : Etapes de contrôle par ressuage [17].

I.6.1.3 Le contrôle non destructif par ultrasons

Le CND par ultrasons est effectué en émettant des ondes acoustiques à l'intérieur ou à la surface des pièces à inspecter. La réception de ces ondes après propagation dans le matériau permet d'obtenir des informations sur le milieu de propagation. Les ondes acoustiques créent des modifications locales de la pression et de la vitesse des particules [18].

I.6.1.4 L'émission 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 [18].

I.6.1.5 Courants de Foucault

Un courant électrique ne peut traverser une fissure ou, tout au moins, y rencontre une certaine résistance électrique de la pièce. Ceci procure donc un moyen de détection, mais il faut être capable de comparer la résistance de la pièce fissurée à celle d'une pièce saine. Le dispositif le plus convenable utilise des courants de Foucault induits à la surface de la pièce par une bobine se déplaçant parallèlement à la surface de la pièce à contrôler, on peut détecter une variation d'impédance d'une des bobines par rapport à l'autre si les courants de Foucault sont perturbés par la présence d'une fissure [20].

I.6.1.6 Radiographie et gammagraphie

Le principe est le même, la radiographie et la gammagraphie sont des techniques couramment utilisées pour le contrôle interne des pièces. Le principe de ces méthodes est basé sur l'attaque de la matière à examiner par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, où l'énergie des photons de ce rayonnement est partiellement absorbée par la matière rencontrée selon sa densité. Un capteur (écran, film, ...) est placé derrière la pièce et fournit un radiogramme de la zone traversée. Des variations locales de l'intensité apparaissent dans cette image qui interprète la présence du défaut [20].

I.6.1.7 La thermographie

C'est une technique basée sur le principe de la radiométrie, qui permet à la fois d'établir une carte de luminance dans le domaine spectral de l'infrarouge et de mesure quantitativement ces luminances. Le thermogramme fait apparaître les écarts de température le point le plus chaud est ainsi décelé et localise le défaut [1].

I.6.2 Le contrôle des huiles

Le contrôle d'huile se base sur la constante diélectrique de l'huile pour calculer son niveau de dégradation et de pollution. Le suivi de cette grandeur permet de déceler des modifications des huiles minérales et synthétiques, liées à la teneur en eau, la pollution par de la combustion, la teneur en particules métallique, l'oxydation, etc... Ce contrôle est facile d'utilisation est un outil portable, qui permet d'obtenir un affichage numérique et graphique [21].

I.6.2.1 Rôle de lubrifiant

Le rôle de lubrifiant est tout d'abord la diminution du frottement la cause principale de l'usure. Il permet une fonction d'une formation d'un film qui sépare l'élément glissant l'un sur l'autre. Par ses propriétés physiques, il assure également d'autres fonctions [21] :

- Refroidissement : évacuation de la chaleur produite par le frottement ou par une source extérieure ;
- Protection contre la rouille et autres types de corrosion ;
- Filtration : mise en suspensions des particules et piégeage sur un filtre ;
- Étanchéité : matelas visqueux entre les pièces mécanique ;
- Transmission de l'énergie : dans le circuit hydraulique et automatique de véhicules.

I.6.3 L'analyse acoustique

L'analyse acoustique est une technique de la maintenance préventive conditionnelle qui permet de détecter les défauts par l'étude des ondes et des vibrations sonores acoustiques générées par les systèmes électromécaniques. La mesure de son ou de bruit effectué à l'aide d'un sonomètre qui évalue le niveau de pression acoustique. Ce dernier est ainsi transformé en un signal électrique, comparable

en amplitude et en fréquence au phénomène acoustique. Le signal électrique peut être conditionné, échantillonné et traité de manière à caractériser le bruit mesuré. On peut ainsi par exemple déterminer des valeurs acoustiques exprimées en dB, effectuer des analyses fréquentielles, des analyses statistiques, et intégrer le signal sur une durée déterminée [22].

I.6.4 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 [23].

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons brièvement présenté la définition de la maintenance industrielle, ses objectifs et sa stratégie, les fonctions des services de maintenance et leurs relations avec les autres services, puis nous avons cité les types de maintenance. En outre nous avons bien détaillé les modes de défaillance que ça soit mécanique ou électrique suivi de différentes méthodes de détection des pannes.

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

Chapitre II

La thermographie : outil de la maintenance préventive

II.1 Introduction

La température des machines, des matériaux et des produits fabriqués est l'un des facteurs les plus critiques en ce qui concerne les procédés de fabrication ainsi que le maintien, la sûreté et de l'efficacité à l'industrie. L'exploitation des températures est donc fréquemment considérée comme une clé de succès dans la maintenance industrielle et dans le contrôle du rendement énergétiques et la productivité des systèmes techniques. Les applications de la thermographie permettent également de voir les rayonnements émis par ces systèmes.

Dans ce chapitre nous allons présenter la notion de la thermographie par son concept, son principe, les avantages ainsi le rayonnement thermique et la notion de corps noir et l'émissivité, quelques appareils de mesure et l'interprétation des thermogrammes obtenue par cette dernière, l'analyse qualitative et quantitative avec les défis de la thermographie finalisons le chapitre.

II.2 La thermographie

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler. Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière ou la température représente l'indicateur mesurable. Cette méthode consiste en l'interprétation des cartes thermiques (thermogrammes) des surfaces observées [24]. D'autre part elle permette de connaître la réparation spectrale et temporelle des températures sur un objet [25].

Il existe de nombreuses méthodes de mesurer l'élévation de température à travers deux modes de mesure avec ou sans contacts parmi ces méthodes l'utilisation des batteries de thermocouples, l'analyse métallographique, l'utilisation de poudres fines à température de fusion constante, l'emploi de peintures thermosensibles et la thermographie infrarouge qui est la seule méthode de mesure sans contact.

II.3 Concept de la thermographie infrarouge**II.3.1 L'infrarouge et le spectre électromagnétique**

La source principale de rayonnement infrarouge est la chaleur. Plus un objet est chaud plus il émet un rayonnement infrarouge. Tout objet dont la température est supérieure au zéro absolu (0°K , $-273,15^{\circ}\text{C}$) émet un rayonnement dans la plage infrarouge.

Le domaine de l'infrarouge se divise en 3 plages de longueurs d'onde :

- Infrarouge court : de $0,78\ \mu\text{m}$ à $1,4\ \mu\text{m}$;
- Infrarouge moyen : de $1,4\ \mu\text{m}$ à $3\ \mu\text{m}$;
- Infrarouge long : de $3\ \mu\text{m}$ à $1000\ \mu\text{m}$.

Ces plages de longueur d'onde peuvent varier selon les domaines d'application, sans qu'elles s'éloignent significativement des valeurs références, figure II.1.

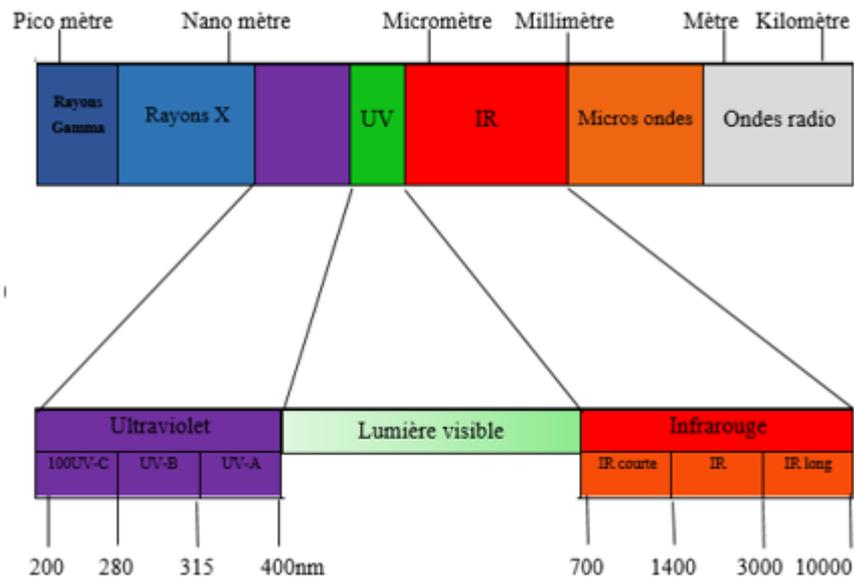


Figure II.1 : Position du domaine infrarouge dans le spectre électromagnétique [25] .

II.3.2 Définition

La thermographie infrarouge est une méthode d'imagerie utilisant des systèmes permettant d'acquérir des images infrarouges qui transcrivent la distribution spatiale de la température des objets observés et de les transformer en images visibles. C'est un moyen de mesure de l'énergie thermique d'un corps. Cette technique permet également d'observer les variations des gradients de température au cours du temps [26].

II.3.3 Principe

Son principe est basé sur la collecte des radiations thermiques invisibles émises par les objets dans le domaine des infrarouges du spectre électromagnétique. La mesure de cette radiation est réalisée à l'aide de thermomètre infrarouge pour des mesures ponctuelles ou d'une caméra thermique infrarouge qui restitue les rayonnements sous forme d'image appelée thermogramme.

Un thermogramme, véritable carter des températures permet de visualiser les points chauds de l'objet souvent conséquence d'un mauvais fonctionnement [27]. L'énergie infrarouge émise par un objet est focalisée par l'optique de la caméra thermique sur un détecteur infrarouge. Ce dernier envoie les informations à un capteur chargé du traitement de l'image.

Le rôle de la partie électrique de ce capteur est de convertir les données du détecteur en une image qui pourra être observée sur un écran et interprétée tel que :

- ❖ Transcrire les rayonnements captés en point lumineux sur écran : **VISUALISATION** ;
- ❖ Convertir la puissance de rayonnement émis en température : **QUANTIFICATION**.

Thermographie infrarouge = Visualisation+ Quantification de température.

La thermographie infrarouge consiste donc à transformer le rayonnement thermique sous forme d'image colorée ou niveau de gris ou chaque couleur est représentative d'une température.

En maintenance préventive et lors des vérifications périodiques, l'analyse et l'interprétation des thermogrammes obtenus après traitement des images enregistrées, font apparaître les zones de températures anormales, indétectables ou difficilement détectables [25].

II.3.4 Avantages de la thermographie infrarouge

Thermographie infrarouge présente de nombreux avantages par rapport aux autres technologies. En général, les principaux avantages de cette dernière sont :

- Thermographie infrarouge est une technique sans contact : les appareils utilisés ne sont pas en contact avec la source de chaleur, c'est-à-dire qu'il s'agit de thermomètres sans contact. La température d'objets extrêmement chaude ou les produits dangereux, tels que les acides, peuvent être mesurés en toute sécurité, en gardant l'utilisateur hors de danger ;
- Elle fournit des images thermiques bidimensionnelles qui font une comparaison entre les zones de la cible possible ;
- Elle n'a aucun des effets radiologiques nocifs. Ainsi, elle est adaptée à une utilisation prolongée et répétée ;
- Elle est une technique non invasive. Ainsi, il n'empiète ni n'affecte la cible de quelque manière que ce soit ;
- Thermographie infrarouge est en temps réel, ce qui permet non seulement un balayage à grande vitesse des cibles fixes, mais aussi acquisition à partir de cibles en mouvement rapide et de modèles thermiques à évolution rapide [28].

II.4 La thermographie infrarouge appliquée en contrôle non destructif

Une des premières applications de la thermographie infrarouge est de pouvoir participer aux contrôles non destructifs, c'est-à-dire un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux sans les dégrader soit au cours de la production ou en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. Ces essais sont basés sur le fait qu'une bonne continuité structurale fournit une bonne continuité thermique. Ainsi, si des matières étrangères sont incorporées dans un matériau, elles affectent le flux d'énergie thermique à travers les couches de ce matériau [26].

L'usage d'une caméra de thermographie infrarouge pour effectuer des mesures peut se faire par deux méthodes différentes : une méthode passive et une méthode active. La méthode passive consiste à effectuer les mesures sans autres apports d'énergie. La méthode active consiste à exciter thermiquement le matériau à l'aide d'une source de chaleur (laser, lampe, ...) et à mesurer l'évolution thermique restante à l'aide d'une caméra infrarouge [29].

II.4.1 La thermographie pulsée

La thermographie pulsée est une méthode rapide par stimulation optique couramment utilisée dans le cadre du contrôle non destructif. Un schéma de principe de la méthode est illustré dans la figure II.2.

La stimulation consiste à perturber l'équilibre thermique d'un échantillon pendant une courte période grâce à la propagation d'un front thermique par diffusion sous la surface, et dans une moindre mesure, en raison des pertes radiatives et convectives avec le milieu ambiant [30].

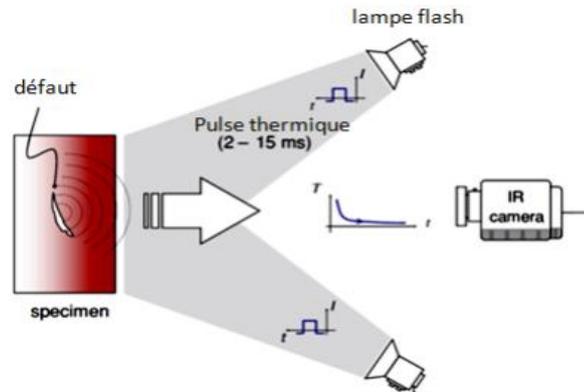


Figure II.2 : Schéma de principe de thermographie pulsée [30].

II.4.2 Thermographie modulée

La thermographie modulée consiste à appliquer une stimulation thermique sinusoïdale au spécimen étudié (figure II.3). Ce type de test est plus long (typiquement quelques minutes) qu'en thermographie pulsée. Contrairement à celle-ci, en thermographie modulée le signal est enregistré en régime permanent. Les lampes chauffantes doivent être munies d'une unité de contrôle qui module le rayonnement afin de générer une onde thermique se propageant dans l'échantillon. Il est nécessaire de synchroniser le démarrage de la stimulation harmonique avec les acquisitions de la caméra thermique [30].

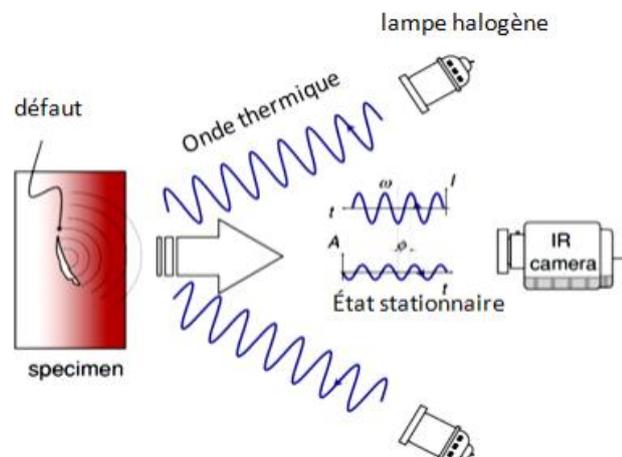


Figure II.3 : Schéma de principe thermographie modulée [30].

II.4.3 La thermographie à phase pulsée

Cette méthode d'analyse est souvent présentée comme la réunion des concepts de la thermographie modulée et de la thermographie pulsée.

Le principe de cette méthode est de soumettre une paroi à une température initiale et à une sollicitation impulsionnelle, alors sa température de surface augmente brusquement. Les premiers thermogrammes sont enregistrés à partir du moment où la température de surface de l'échantillon se retrouve dans la gamme de températures mesurables par la caméra. La décroissance de la température continue jusqu'à redevenir sensiblement température initiale [31].

II.5 Définition des grandeurs radiatifs

On peut distinguer trois types de densité de puissance émise par un corps : l'intensité ou flux, la luminance et l'émittance (L'émittance R).

II.5.1 Le flux Φ

C'est la grandeur instantanée d'un débit de rayonnement, ou puissance instantanée rayonnée par une surface S . Le flux quantifie un débit émis par une source, transporté par un faisceau, ou absorbé par un récepteur. Dans le cas d'une source finie, invariante au cours du temps, le flux est l'énergie totale (pour toutes les longueurs d'onde et dans toutes les directions) émise par cette source en une seconde et s'exprime donc sous la forme [32] :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.1)$$

II.5.2 La luminance L

La luminance énergétique est définie par le flux énergétique $d^2\Phi$ émit par un élément de surface dS dans un angle solide $d\Omega$ dans la direction θ . Elle s'étend sur toutes les longueurs d'onde et s'exprime en $W.m^{-2}.sr^{-1}$. Elle est différente de l'émittance qui décrit le flux émis par la surface sur toutes les directions comme illustrées sur la Figure II.4. Cette luminance totale est donnée dans la relation 2.2 [33] :

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega.dS.\cos\theta} \text{ (en } W.m^{-2}.sr^{-1}) \quad (2.2)$$

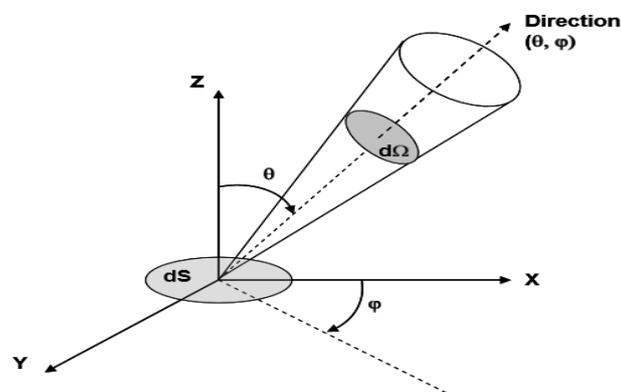


Figure II.4 : Luminance d'une source étendue ds .

La Figure II.4 illustre la luminance d'une source étendue ds. La source est dite lambertienne si la luminance ne dépend pas de l'étendue, c'est-à-dire si elle est la même dans toutes les directions. La luminance permet de caractériser la perception du rayonnement par un observateur [32].

II.5.3 L'émittance R

L'émittance R (ou exittance) correspond au flux émis par unité de surface d'une source étendue dans tout un hémisphère. Il s'agit donc de la luminance intégrée sur toutes les directions d'un demi-espace :

$$R = \frac{d\Phi}{dS} = \int_{\Omega} L \cos \theta d\Omega \quad (\text{en } W.m^{-2}) \quad (2.3)$$

Pour une surface lambertienne, la luminance et l'émittance sont donc liées par la relation suivante [32] :

$$R = L \pi \quad (2.4)$$

II.6 Le rayonnement thermique

Le rayonnement constitue l'un des trois types de transferts thermiques existants. C'est un phénomène caractérisé par un échange d'énergie électromagnétique entre deux corps, sans que le milieu intermédiaire ne participe nécessairement à cet échange. Le rayonnement thermique dans sa définition usuelle est caractérisé par des longueurs d'onde de $0.1\mu\text{m}$ à $1000\mu\text{m}$ [33].

Comme illustre dans la figure II.5, le rayonnement mesurable d'un corps en équilibre thermique dont la température est T_0 résulte de la superposition de différents phénomènes :

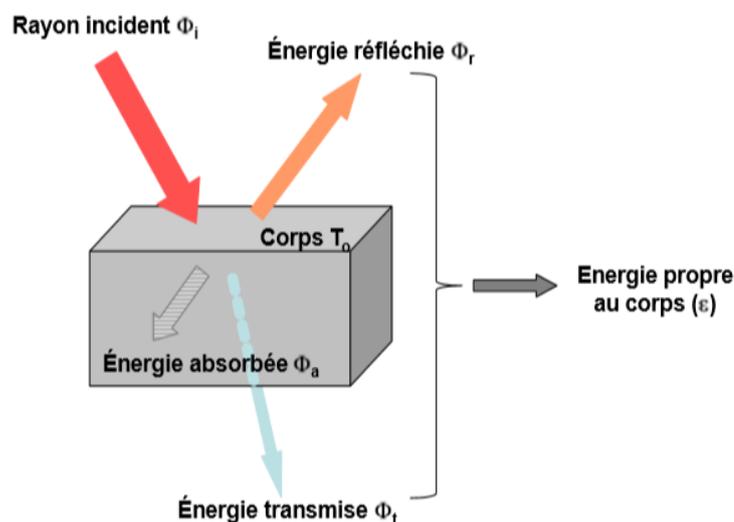


Figure II.5 : Bilan énergétique [33].

En effet, lorsqu'un rayonnement incident (Φ_i) rencontre un objet le corps réfléchit une partie de l'énergie rayonnée (Φ_r) par le milieu ambiant, une autre partie du rayonnement est absorbée par l'objet (Φ_a) et dans le cas d'objet transparent le reste est transmis (Φ_t).

Chacun de ces flux dépend de la longueur d'onde. Ils sont reliés par les relations suivantes :

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad (2.5)$$

$$\Phi_a(\lambda) = \alpha(\lambda) \Phi_i(\lambda) \quad (2.6)$$

$$\Phi_r(\lambda) = \rho(\lambda) \Phi_i(\lambda) \quad (2.7)$$

$$\Phi_t(\lambda) = \tau(\lambda) \Phi_i(\lambda) \quad (2.8)$$

Où λ est la longueur d'onde et α , ρ et τ sont respectivement les facteurs d'absorption, réflexion et transmission d'énergie rayonnée. De ces relations nous pouvons également déduire l'expression suivante :

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (2.9)$$

On peut noter que pour un corps opaque on a : $\tau(\lambda) = 0$ et $\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$ alors que pour un corps transparent on a : $\alpha(\lambda) = 0$ et $\rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$ [34].

II.6.1 Le corps noir

Le corps noir est un objet capable d'absorber totalement tout rayonnement incident, quelle que soit sa longueur d'onde [34], le corps noir est défini comme étant un corps qui à une température donnée émet par rayonnement tout le flux énergétique. Mais si le corps noir est un « émetteur parfait » il est aussi un « absorbeur parfait » en ayant pour propriété d'absorber l'intégralité du rayonnement incident qu'il reçoit, quelle qu'en soient la longueur d'onde et la direction [32].

II.6.1.1 Loi de Planck

La loi de Planck est l'une des lois les plus importantes en émission thermique. Elle décrit la distribution de l'énergie émise en fonction de la longueur d'onde λ et de la température T . Pour un corps noir on a [33] :

$$M^0(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda T}\right) - 1} \quad (2.10)$$

Avec :

- λ : Longueur d'onde;
- $M^0(\lambda)$: Flux de puissance émis par un corps noir à la longueur d'onde ;
- C : Vitesse de la lumière = 3.10^{10} cm/s ;
- h : Constante de Planck = $6,6.10^{-34}$ Watt.s² ;
- K : Constante de Boltzmann = $1,4.10^{-23}$ Watt.s²/°K ;
- T : Température absolue du corps noir en Kelvin.

II.6.1.2 Loi de déplacement de Wien

La loi du déplacement de Wien obtenue en dérivant la formule de la loi de Planck stipule que le maximum de la radiance spectrale se trouve à la longueur d'onde λ_{\max} suivante [35] :

$$\lambda_{\max} = \frac{c^3}{T} = \frac{2897.7}{T} \quad (2.11)$$

Avec :

- λ_{max} : Longueur d'onde à laquelle se produit l'émission maximale ;
- T : Température absolue du corps en Kelvin ;
- c : est la troisième constante de radiation avec comme unité $\mu\text{m} \cdot \text{K}$.

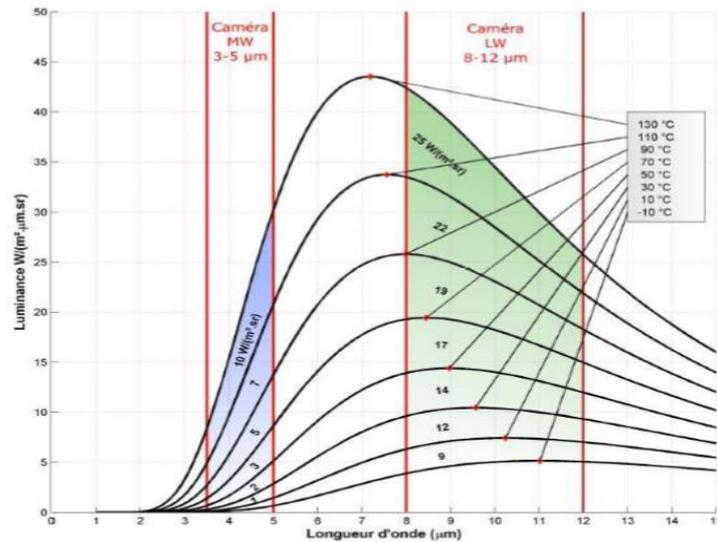


Figure II.6 : Courbes de la loi de déplacement de Wien [35].

II.6.1.3 Loi de Stefan-Boltzman

Établie expérimentalement par Stefan et théoriquement par Boltzmann, cette loi qui résulte de l'intégration spectrale et directionnelle de la luminance émise par un élément de surface du corps noir [36].

$$M = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2.12)$$

Avec :

$\sigma = 5,67032 \times 10^{-6}$. En $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-4}$ constante de Stefan en luminance ;

T (K) : Température absolue du corps en Kelvin.

II.6.1.4 L'émissivité

Par définition, on appelle émissivité le rapport entre l'émission du corps réel et celle du corps idéal, appelé corps noir, porté à la même température T [37].

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{L_{corp\ réel}(T)}{L_{corp\ idéal}(T)} \quad (2.13)$$

- Corps noir : $\varepsilon(\lambda) = 1$;
- Corps non noir : dont l'émissivité est inférieure à un : $0 < \varepsilon(\lambda) < 1$;
- Corps lambertien dont l'émissivité indépendante de la direction : $\varepsilon(\lambda) = \text{constante}$, $\varepsilon < 1$.

II.7 Appareil de mesure

L'énergie infrarouge (A) provenant d'un objet est focalisée par l'optique (B) sur un détecteur infrarouge (C). Ce détecteur envoie les informations à la partie électronique du capteur (D) chargée du traitement d'images. Cette partie électronique convertit les données du détecteur en une image (E) qui peut être observée dans le viseur, ou sur un écran vidéo ou LCD.

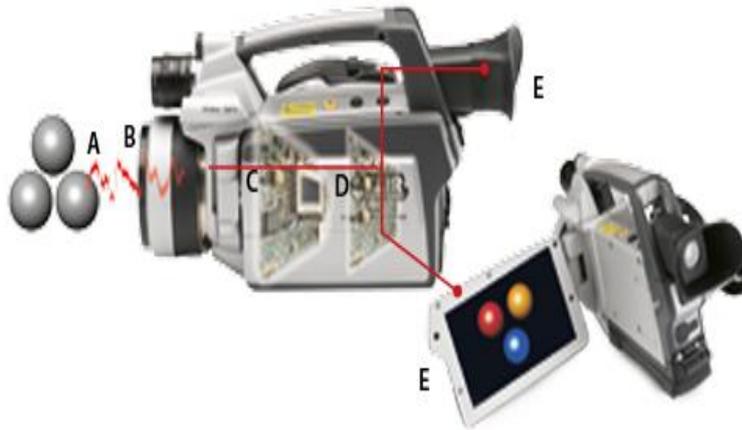


Figure II.7 : Principe de fonctionnement d'une caméra infrarouge [38].

II.7.1 Quelques types de cameras infrarouge

II.7.1.1 Caméra infrarouge PCE-TC 24

Tableau II.1 : caractéristiques de Caméra infrarouge PCE-TC 24.

Résolution	33 x 33 pixels
Plage de température	-20 ... 380 °C
Distance focale	0,5 m
Précision (entre 18 et 28 °C)	> 0 °C : ± 2 % de la valeur ou ± 2 °C < 0 °C : ± 3 °C
Degrés d'émissivité	0,1 ... 1
Sensibilité thermique	0,15 °C
Plage spectrale	8 ... 14 µm
Mémoire	Carte micro SD jusqu'à 8 GB
Alimentation	4 x piles de 1,5 V, type AA
Conditions de fonctionnement	-5 ... +40 °C / 10 ... 80 % H.r.
Conditions de conservation	-20 ... +55 °C
Dimensions	195 x 100 x 55 mm
Poids	Environ 295 g



Figure II.8 : Caméra infrarouge PCE-TC 24 [39].

II.7.1.2 Caméra infrarouge FLIR E8-XT

Tableau II.2 : Caractéristiques de Caméra infrarouge FLIR E8-XT.

Résolution	240 × 180 (43 200 pixels)
Précision	±2 °C (±3,6 °F) ou ±2 % du relevé, pour une température ambiante
Sensibilité	<0,05 °C (0,09 °F) / <50 mK
Degrés d'émissivité	0,1 et 1,0
Gamme spectrale	7,5–13 μm
Plage de température	–20°C à 550°C
Conditions de fonctionnement	–15°C à 50°C
Conditions de conservation	–40 °C à 70 °C
Dimensions	244 × 95 × 140 mm
Batterie	Batterie li-ion 3,6v rechargeable
Poids	0,575kg
Prix	3658,80 €



Figure II.9 : Caméra infrarouge FLIR E8-XT [40].

II.7.2 Critères à prendre en compte lors le choix de la caméra infrarouge

Les caméras thermiques possèdent de nombreuses caractéristiques pour cela pour le choix d'une caméra performante par rapporte aux besoins il est conseillé de prendre en compte :

- Plage de températures ;
- Qualité-résolution de l'image ;
- Précision ;
- Sensibilisé ;
- Degrés d'émissivité ;
- Distance focale ;
- Nombre du pixel des capteurs ;
- Logiciel pour l'analyse des images thermiques.

II.8 Analyse de l'état d'un système par la thermographie

Les analyses quantitatives et qualitatives représentent des approches complémentaires. Que l'on associé dans notre étude pour obtenir des résultats à la fois détaillés et à large portée.

II.8.1 Analyse qualitative

L'analyse d'une image thermique est considérée comme bonne lorsqu'elle permet la réalisation d'une image exploitable spatialement et thermiquement. Pour cela, cette image doit présenter peu de distorsion, une finesse et une cadence, adaptées à l'observation visuelle, tout en possédant un spectre vidéo de largeur minimale pour réduire au mieux le bruit. D'autre part grâce à cette analyse on peut identifier et localiser les défauts qui apparaîtraient sur l'objet surveillé.

II.8.1.1 Quelques exemples

Les moteurs sont également inspectés par l'imagerie thermique. Certains problèmes comme une usure par frottement ou un défaut structurel ne sont pas détectés par une analyse des vibrations car ils n'en provoquent pas ou peu. Mais ils produisent de la chaleur avant de provoquer une panne. L'image thermique donne une vue d'ensemble et permet de comparer la température des différents moteurs [38].

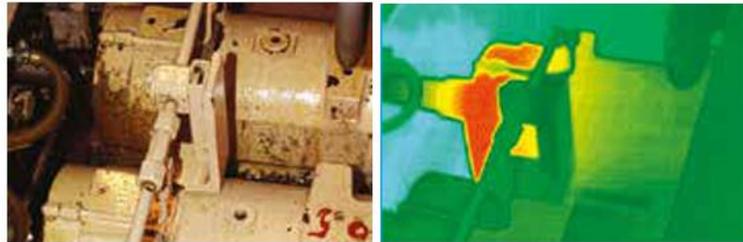


Figure II.10 : Image visible et thermique représente un problème de roulement [38].

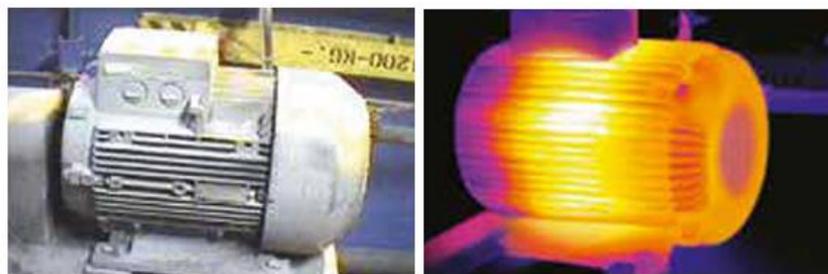


Figure II.11 : Image visible et thermique représente un problème de bobine [38].

a) Surchauffe d'une pièce résultant de la défaillance d'un autre composant

Une pièce peut parfois subir une surchauffe alors que son état est normal. En effet, deux conducteurs peuvent partager la charge. L'un des conducteurs a une résistance accrue, tandis que l'autre est normal. Le composant défaillant transporte donc une charge moindre et l'autre doit supporter une charge plus importante, potentiellement excessive, qui est responsable de l'augmentation de la température [41].

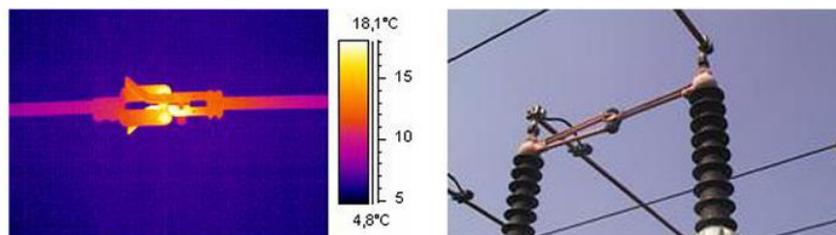


Figure II.12 : Image visible et thermique représente une surchauffe d'un disjoncteur [41].

La surchauffe de ce disjoncteur est probablement due à un mauvais contact de la patte la plus proche du contacteur. La patte éloignée supporte plus de courant et chauffe. Il ne s'agit pas du même composant sur les deux images (ils sont cependant similaires) [41].

b) Réseau de canalisations

Un réseau de canalisations transportant des produits chimiques gazeux ou liquides très chauds, la qualité de l'isolation revêt une importance cruciale. Les inspections à l'aide de caméras thermiques FLIR peuvent aider à détecter les pertes de chaleur, ce qui permet ensuite de corriger les défauts d'isolation [42].

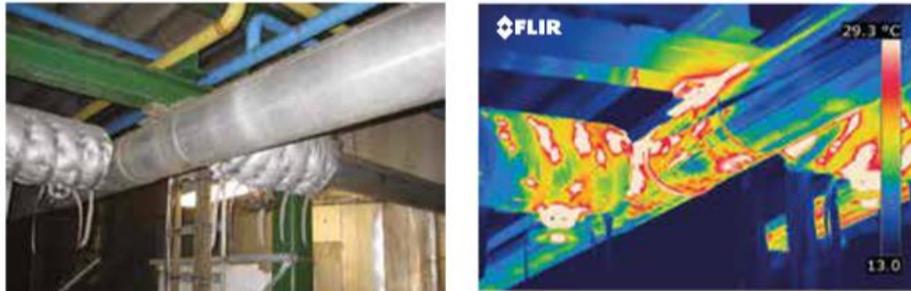


Figure II.13 : Image visible et thermique représente une perte de chaleur due à un défaut d'isolation [42].

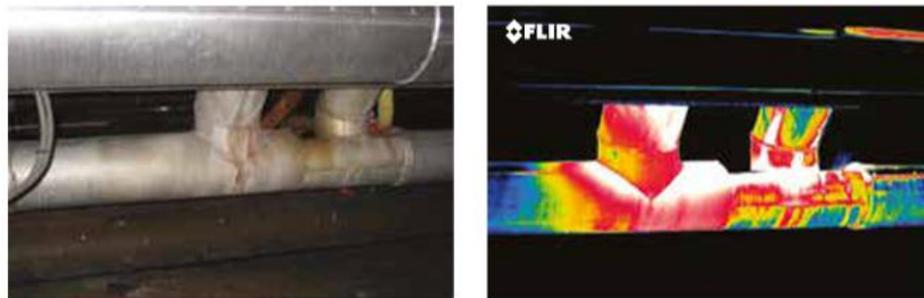


Figure II.14 : Image visible et thermique représente une Isolation défectueuse d'un réseau canalisations [42].



Figure II.15 : Image visible et thermique d'un transformateur triphasé [42].



Figure II.16 : Image visible et thermique de rouleaux surchauffés d'un tapis convoyeur [42].



Figure II.17 : Image visible et thermique d'un roulement à billes qui surchauffe et devrait être remplacé [42].

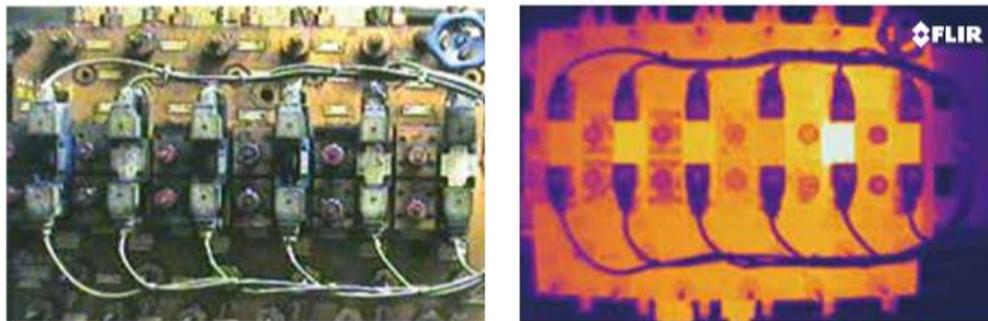


Figure II.18 : Image visible et thermique d'un module de commande défectueux [42].

II.8.2 Analyse quantitative

Elle s'agit d'une méthode de recherche plus descriptive et en ce qui concentre les interprétations, des expériences et leur signification [43].

II.8.2.1 Mesure de la température par une caméra infrarouge

Lorsque les matériaux sont très réfléchissants, très peu émissifs et fortement diffusants et que les élévations de température au cours des essais restent faibles, le problème majeur qui se pose est alors la contribution de l'environnement dans le calcul des températures. Une méthode simple d'usage est proposée au travers de la norme ASTM E1862-97.

Pour estimer le rayonnement issu de l'environnement, cette norme préconise de placer un miroir diffusant dans le champ de la caméra à l'emplacement du matériau visé. Ce miroir peut être obtenu en froissant puis défroissant une feuille de papier d'aluminium tout en s'assurant que l'émissivité est assez faible. Une émissivité de 1 est réglée au niveau de la caméra, et dans ce cas, le signal mesuré par la caméra constitue la contribution de l'environnement.

L'erreur de mesure réalisée sur la température environnementale entraîne des erreurs sur la température mesurée pour le matériau. Cette erreur peut être estimée en dérivant l'équation radiométrique par rapport à T_{env} . L'équation radiométrique décrite dans la relation (2.14) peut être écrite sous la forme [32] :

$$L = \frac{1}{\pi} (\varepsilon \sigma_c T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon) \cdot \sigma_c T_{env}^4) \quad (2.14)$$

Avec σ_c une constante dépendante de la longueur d'onde de la caméra. Dans ce cas l'expression de la température de l'objet est donnée par :

$$T_{obj} = \left(\frac{\pi L - (1 - \epsilon) \sigma_c T_{env}^4}{\epsilon \sigma_c} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.15)$$

II.8.2.2 Calibrage radiométrique d'une caméra infrarouge

L'énergie M^{totale} reçue par la caméra est convertie en un signal électrique puis codée en niveau binaire B dans l'image infrarouge.

$$B(T_c) = \frac{B^{totale} - (1 - \epsilon_c) B_b(T_e)}{\epsilon_c} \quad (2.16)$$

L'inversion de la relation (2.16), c'est-à-dire l'obtention de la température de l'objet à partir du niveau binaire correspondant, est obtenue par calibrage à l'aide d'un corps noir de laboratoire. On fait varier la température du corps noir d'une valeur minimale à une valeur maximale et pour chaque valeur de température, on note le niveau binaire renvoyé par la caméra. On obtient ainsi la courbe $T = f(B)$ que l'on peut interpoler par un polynôme. Les courbes de calibrage sont une famille de courbes $T = f(B)$ correspondant chacune à une valeur de la température interne de la caméra IR la figure II.19 présente un exemple de courbe de calibrage radiométrique d'une caméra infrarouge [44].

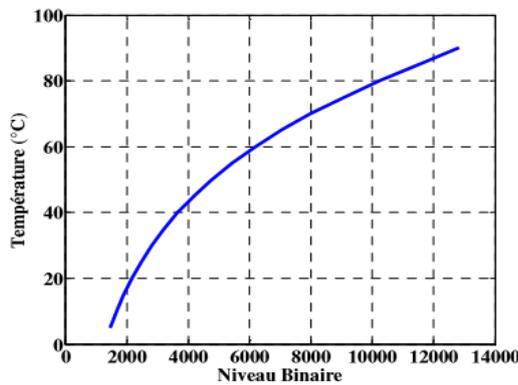


Figure II.19 : Exemple de courbe de calibrage radiométrique d'une caméra infrarouge.

II.8.2.3 Rapport signal sur bruit de la caméra IR

Le rapport signal sur bruit d'un signal est défini comme le rapport entre la puissance P_{signal} de ce signal et la puissance bruit P_{Bruit} du bruit. Il est donné par l'équation (2.17) [43] :

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_{signal}}{P_{Bruit}} \right) \quad (2.17)$$

En écrivant :

$$P_{signal} = n(T_s)^2 \quad \text{et} \quad P_{Bruit} = \sum_{i=1}^{i=n} (T_m(t_i) - T_s)^2 \quad \text{L'équation (2.18) devient :}$$

$$SNR = 10 \log \left(\frac{n(T_s)^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (T_m(t_i) - T_s)^2} \right) \quad (2.18)$$

Avec

- T_s La température du corps noir ;
- $T_m(t)$ La température donnée par la caméra infrarouge.

II.8.2.4 Etalonnage des caméras

La loi d'étalonnage (T) : $T \rightarrow NN$ relie la température de corps noir au niveau numérique obtenue avec la caméra. En théorie, le signal reçu par les détecteurs peut être calculé à l'aide de l'expression (2.19)

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(T) \cdot OPT_{(\lambda)} \cdot RSR_{(\lambda)} \cdot G \, d\lambda \quad (2.19)$$

Avec $S(T)$ le signal reçu par la caméra, $L_{\lambda}(T)$ la luminance du corps noir, $RSR_{(\lambda)}$ le rendement du détecteur, OPT le rendement de l'optique et G le gain électronique.

La plupart des paramètres du flux sont inconnus ainsi l'expression $S(T)$ est supposée être similaire à la loi de Planck. Dans ces conditions, on suppose que les paramètres de l'équation (2.19) sont indépendants de λ . On considère généralement trois degrés de liberté pour compenser les erreurs générées par la simplification. La relation (2.20) définit la loi d'étalonnage de la caméra [33].

$$S(T) = \frac{R}{\exp\left(\frac{B}{T}\right) - F} \quad (2.20)$$

La Figure II.20 présente la courbe d'étalonnage pour une caméra infrarouge, nous pouvons constater une bonne correspondance entre les mesures et les valeurs données par la loi d'étalonnage.

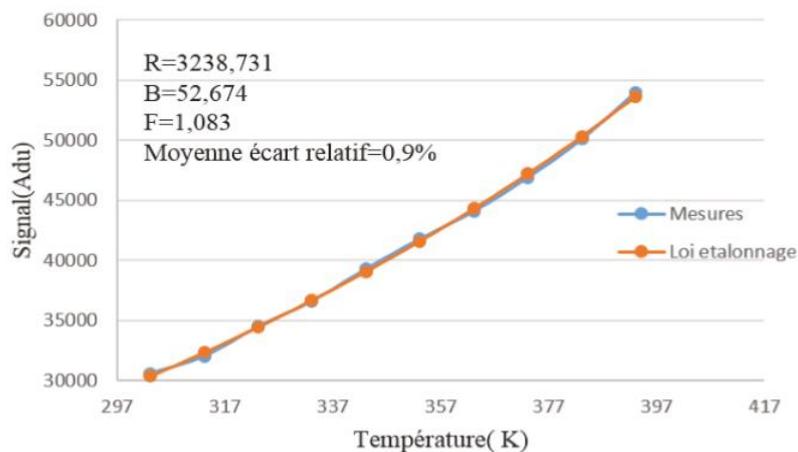


Figure II.20 : Exemple des courbes d'étalonnage entre les mesures et les valeurs données par la loi d'étalonnage [33].

II.9 Déficit de la thermographie

II.9.1 L'instrument de mesure

L'instrument doit pouvoir effectuer des mesures de façon répétable et dans une certaine gamme de températures fixée par le constructeur. Dans cette gamme de températures, l'instrument présente un degré de précision décrit au préalable. On doit également pouvoir connaître la plus petite variation de température que l'instrument est capable de déceler sa sensibilité. Cette dernière caractéristique conditionne généralement une partie du le prix de l'instrument. La vitesse de la réponse de l'instrument à un changement de température de la cible est également à prendre en compte. En général, lorsqu'on gagne en vitesse de réponse il faut s'attendre à perdre en sensibilité [26].

II.9.2 Les images thermiques ne traversent pas certaines matières

En effet, les rayonnements thermiques ne traversent pas le verre ni l'eau. Pour le verre, le rayonnement infrarouge s'y réfléchit et agit donc comme un miroir pour une caméra thermique. Cela représente un inconvénient de taille pour certaines applications [45].

II.9.3 Influence de l'ambiance

Il ne suffit pas de pointer sa caméra thermique infrarouge sur l'endroit que vous souhaitez mesurer pour obtenir un résultat immédiat et exploitable. Il vous faut savoir que pour obtenir une mesure cohérente, il vous faudra vérifier les conditions extérieures et environnantes. En raison du principe de fonctionnement caméra thermique et suivant le type de mesures effectuées, les conditions climatiques telles que la température, le vent, l'ensoleillement direct ou indirect et la pression atmosphérique sont des éléments à prendre en compte lors de l'utilisation de ce type des appareils [47].

II.9.4 Lecture des résultats

L'analyse thermique est l'obtention des thermogrammes qu'il faudra rendre exploitables. Toutes les caméras thermiques ne sont pas livrées avec un logiciel de post-traitement, dans ce cas il est temps de contacter un spécialiste qui pourra mettre en évidence les données utiles.

II.9.5 Investissement de départ plus important

Les caméras thermiques sont des équipements perfectionnés conçus à partir de composants très élaborés qui représentent un investissement non négligeable. En effet, les systèmes d'optique et de détection, moins répandus que sur des caméras visibles, vont coûter plus cher et faire augmenter l'étiquette de prix. C'est pourquoi cet équipement est rarement utilisé par d'autres que les grandes entreprises, les services publics ou les établissements d'enseignement [48].

II.10 Conclusion

Dans le domaine de la recherche et industrie et jusqu'au dépannage, les applications de la thermographie infrarouge sont nombreuses et variées. La thermographie infrarouge est un outil de diagnostic précieux qui permet la réalisation d'opérations, la réduction des coûts de maintenance, et le suivi des procédés de fabrication. L'imagerie infrarouge présente l'avantage de son innocuité ou sa capacité de mesure à distance de révéler de nombreux types d'anomalies.

Chapitre III

Contribution à la réalisation d'une simple caméra thermique

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, l'objectif visé est une caméra thermique produite dans une université algérienne à moindre coût possible, basé sur le travail de l'année passée réaliser par nos camarades. Nous allons présenter un aperçu général sur leur travail et résultats obtenus, ensuite nous citons leurs lacunes et recommandations. Puis nous présenterons les étapes de réalisation de notre travail établi dans ce projet.

En vouloir davantage pour valoriser le projet, une analyse thermique comprend une étude qualitative et quantitative sera établie.

III.2 Aperçu général

L'année passée nos collègues ont lancé un projet de réalisation d'une caméra thermique (voir figure III.1), pour cela ils avaient suivi les étapes suivantes :



Figure III.1 : Vue en arrière de la caméra.

III.2.1 Hardware

Pour le matériel utilisé, il avait opté la solution Arduino et Raspberry, les deux plateformes sont du type open sources et très utiles dans le monde, noté que ces deux environnements sont complètement différents que ça soient en hard ou en soft.

Le capteur AMG8833 représente l'élément vertébral du projet, sans lui, aucune capture ou image ne peut prendre.

En vue d'afficher les thermogrammes obtenus, les réalisateurs ont opté à une solution n'est pas vraiment pratiquée dans les caméras thermiques, où ils ont exploité le protocole SSH pour connecter un smart phone avec le Raspberry zéro et récupérer les thermogrammes.

III.2.2 Software

Du côté software, le logiciel python qu'est l'environnement de programmation de la carte Raspberry est utilisé, ce dernier qui représente actuellement le langage le plus puissant dans le monde, demande un spécialiste en informatique et montre trop de difficultés pour les amateurs.

III.3 Schéma synoptique l'année dernière

La figure III.2 ci-dessous représente le schéma de base de la réalisation de caméra thermique de l'année dernière, selon ce schéma on peut constater l'absence de nombreuses parties et accessoires. Le schéma de montage est simple, mais nécessite une connaissance approfondie de l'environnement utilisé et du langage de programmation.

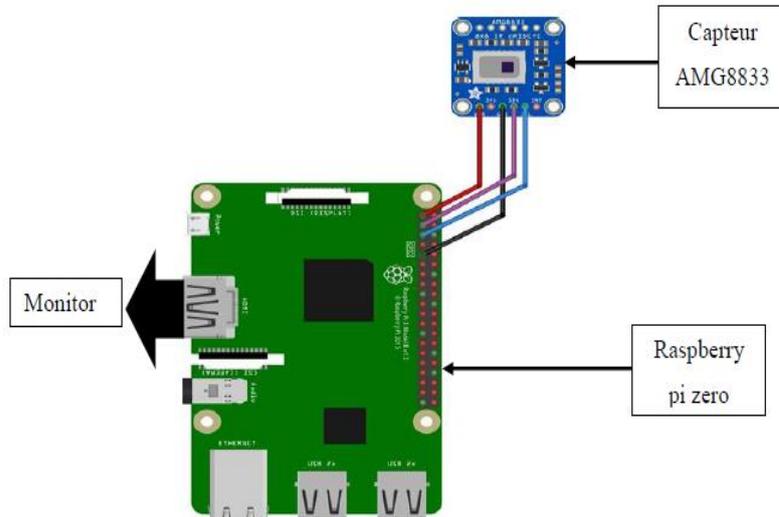


Figure III.2 : Schéma synoptique de la caméra infrarouge d'année dernier.

III.4 Résultats obtenus

La figure III.3 représente le thermogramme obtenu par l'application mobile de mode de fonctionnement portable de la caméra thermique :



Figure III.3 : Teste de la caméra sur un démodulateur numérique.

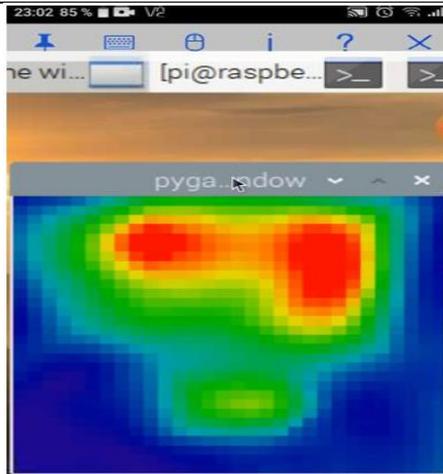


Figure III.4 : Thermogramme obtenu par la caméra de l'année passée.

III.5 Lacunes et recommandations

Selon les discussions de nos collègues, ils ont trouvé trop de lacunes ainsi des recommandations ont été proposées pour améliorer le travail fait, voilà donc quelques lacunes et perspectives :

- Absence de l'échelle de température jointre aux thermogrammes à cause de la difficulté de programmation ;
- Aucun affichage intégré n'est installé ;
- Alimentation par un câble ;
- L'utilisation de Raspberry semble qu'elle était délicate ;
- Etalonnage de capteur ;
- Carcasse et boutons de manipulation (ON/OFF) à ajouter.

III.6 Travail établis dans ce projet

Sur la base du travail de l'année passée, les lacunes et les recommandations citées auparavant, nous avons décidé d'améliorer la caméra, des recherches approfondies ont été effectué afin de trouver des solutions efficaces aux problèmes cités ci-dessus.

III.6.1 Hardware

Commençant par la partie matérielle, l'environnement Raspberry est complètement changé vu sa difficulté, nos recherches nous ont conduite à une nouvelle carte de développement plus récente que l'Arduino et le Raspberry qu'est la carte ESP8266.

Pour l'affichage, un afficheur TFT Type ILI9341 est choisi a installé dans la caméra vue ces performances citées ci-dessous.

Pour le capteur, et malgré sa résolution faible (8X8), nous gardant toujours le capteur AMG8833 à cause de cout très cher des autres capteurs tels que le FLIR ou MLX,

III.6.1.1 ESP8266

L'ESP8266 est un circuit intégré avec un microcontrôleur permettant la connexion en WIFI. Les modules intégrant ce circuit sont très utilisés pour contrôler des périphériques par Internet.



Figure III.5 : ESP8266.

III.6.1.1.1 Caractéristique ESP8266

Le tableau III.1 ci-dessous montre les caractéristiques de caractéristiques ESP8266.

Tableau III.1 : Caractéristiques ESP8266.

Alimentation	5 Vcc via micro-USB 5 à 9 Vcc via broche Vin (régulateur intégré)
Microcontrôleur	ESP8266
Microprocesseur	Tensilica LX106 32 bits
Fréquence	80 MHz
Mémoire RAM	64 kB
Mémoire Flash	96 kB
Interfaces	I2C, SPI, UART
Interface WIFI	802.11 b/g/n 2,4 GHz
Température de service	-40 à 125 °C
Dimensions	58 x 31 x 12 mm

III.6.1.1.2 Avantage de ESP8266

L'avantage d'un ESP8266 par rapport à de nombreux microcontrôleurs du marché est la présence d'une architecture capable de se connecter à un réseau WIFI, sans pour autant augmenter son coût de manière significative. Afin d'utiliser les fonctions des cartes ESP8266 liées à l'utilisation du WIFI dans un programme.

L'ESP8266 possède de nombreuses broches numériques. Celles-ci peuvent être configurées (et donc utilisées) soit en entrée pour effectuer une lecture de l'état de la broche, soit en sortie pour

imposer un état dans le but de commander un dispositif extérieur. Afin de configurer une broche numérique.

III.6.1.1.3 L'inconvénient Raspberry PI Zero

- Stockage interne MMC manquant ;
- Processeur graphique manquant ;
- Peu pratique comme ordinateur de bureau ;
- Impossible d'exécuter le système d'exploitation Windows ;
- Surchauffe ;
- Prix élevé par rapport au ESP8266.

III.6.1.2 Ecran ILI 9341

Cet afficheur SPI TFT est un écran lumineux et antireflet avec un grand écran de 2.8 pouces et un lecteur de carte SD intégré.



Figure III.6 : Ecran ILI9341.

III.6.1.2.1 Caractéristiques ILI 9341

Le tableau III.2 ci-dessous montre les caractéristiques de Caractéristiques ILI9341.

Tableau III.2 : Caractéristiques ILI9341.

Tension d'alimentation VCC	3.3V~5V
Couleur d'affichage	Couleur RVB 65K
Taille de l'écran	2,8 (pouces)
Taper	TFT
Température de fonctionnement	-20°C~60°C
Taille	86 x 50 mm
Température de stockage	-30°C~70°C
Pilote IC	ILI9341
Résolution	320*240 (pixels)
Interface des modules	Interface SPI 4 fils

Tension du port IO logique	3.3V (TTL)
Poids brut	26(g)
Zone d'affichage	46 (L) x 65 (H) mm

III.6.1.3 Le capteur AMG8833

Le capteur de caméra infrarouge AMG8833 est un réseau de capteurs thermiques infrarouges 8x8. Lorsqu'il est connecté à votre microcontrôleur, il renvoie un ensemble de 64 lectures de température infrarouge individuelle via I2C, C'est comme ces caméras thermiques sophistiquées, mais c'est un appareil compact, simple et facile à intégrer. L'AMG8833 offre des performances supérieures à celles de l'ancien AMG8831.

Le capteur prend uniquement en charge I2C et possède une broche d'interruption configurable qui peut être déclenchée lorsqu'un pixel unique est supérieur ou inférieur au seuil défini.

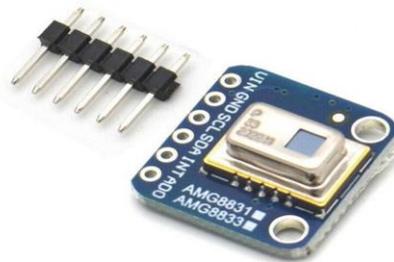


Figure III.7 : Capteur AMG8833.

III.6.1.3.1 Caractéristiques de capteur AMG8833

Le tableau III.3 ci-dessous montre les caractéristiques d'un capteur AMG8833 :

Tableau III.3 : Caractéristiques de capteur AMG8833.

Mesure de température à matrice carrée	64 points (8×8 pixels)
Tension d'utilisation	3.3V ou 5V
Plage de mesure de température	-20°C à +80°C (ou 0°C à +80°C en mode haute performance)
Précision de la température	± 2,5°C ou ±4,5°F (typique)
Distance de détection humaine	7m maximum
Angle de mesure	60°
Consommation de courant	4,5mA (mode normal), 0,2mA (mode sommeil), 0,8mA (mode veille)
Interface	I2C
Fréquence d'images	De 1 ou 10 images par seconde
Différence de température équivalente au bruit	De 0,05°C à 1 Hz

Temps pour activer la communication après la configuration	50ms puis 15ms
--	----------------

III.6.1.4 La carcasse

Opter pour une solution d'impression 3D, la figure III.8 présente les différentes vues face, haut, bas et bras dessiné par le logiciel 3D Builder.

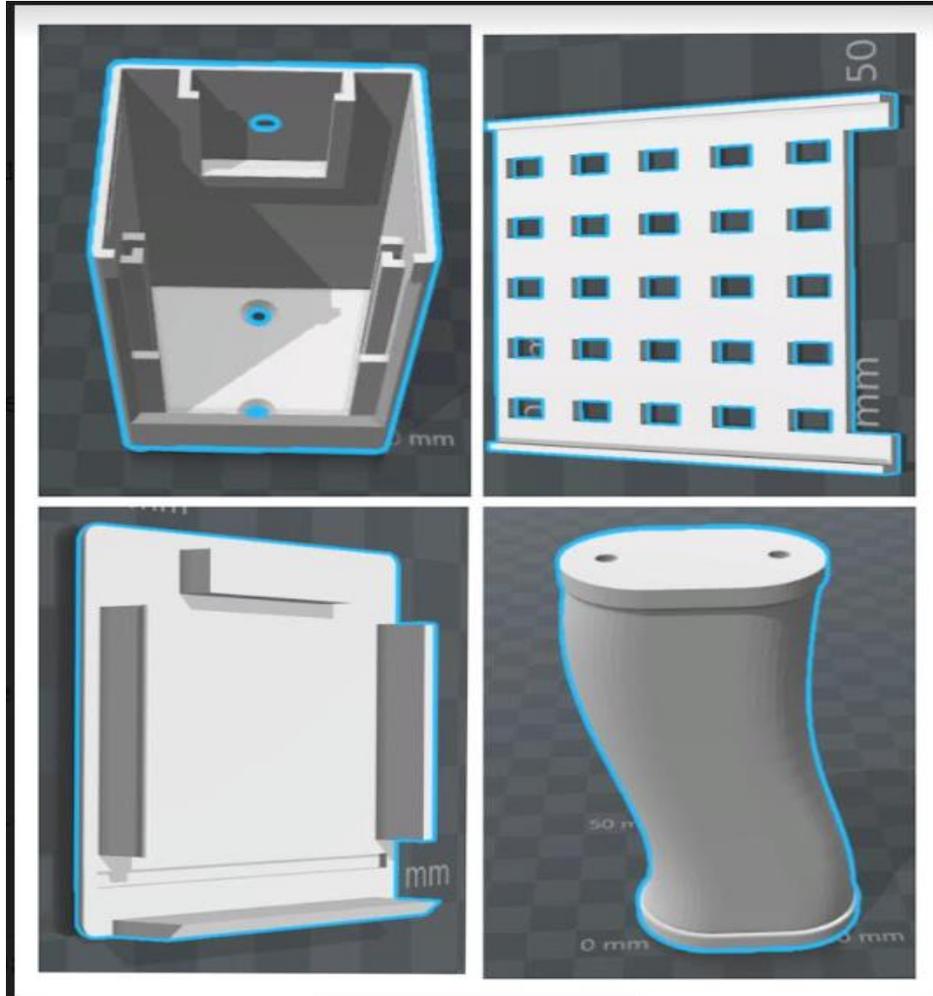


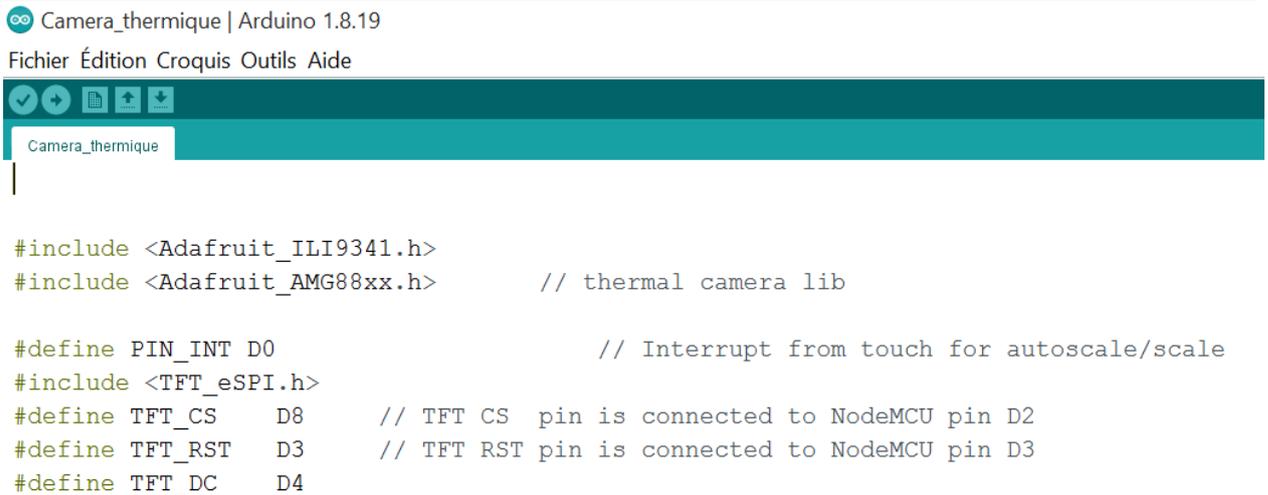
Figure III.8 : les différentes vues de la caméra.

III.6.2 Software

Quoique que le python soit le langage de programmation le plus répandu dans le monde, il est difficile de maîtriser dans une période limitée, ce qui est signalé par nos collègues aussi, pour cela, l'avantage de l'ESP8266, non seulement dans le côté hard, mais aussi dans l'environnement de programmation qui est basé sur le langage le plus simple dans le monde qui est le langage C.

III.6.2.1 Code téléversé dans la carte

Un programme est écrit utilisant le logiciel Arduino IDE, le programme est inspiré à partir du programme de base proposé par les développeurs Arduino, à cause de la longueur du programme, le début de ce dernier se trouve dans l'annexe, voilà quelques lignes clés pour le bon fonctionnement de la caméra.



```
#include <Adafruit_ILI9341.h>
#include <Adafruit_AMG88xx.h>          // thermal camera lib

#define PIN_INT D0                    // Interrupt from touch for autoscale/scale
#include <TFT_eSPI.h>
#define TFT_CS   D8    // TFT CS  pin is connected to NodeMCU pin D2
#define TFT_RST  D3    // TFT RST pin is connected to NodeMCU pin D3
#define TFT_DC   D4
```

Figure III.9 : Appel des bibliothèques et déclaration des pins.

Comme nous pouvons voir dans la figure III.9, deux bibliothèques ont été utilisées l'une est pour le capteur AMG et l'autre pour l'afficheur ILI9341, les bibliothèques contiennent les instructions qui nous permettent de manipuler les deux composants.

Après l'appel des bibliothèques nécessaires, la déclaration des pins de connexion des deux composants (capteur et affichage avec l'ESP).

III.6.2.1 L'alimentation

Pour alimenter les différents périphériques de notre circuit on a choisi une batterie de 5V qui fournit du courant électrique continue à l'ensemble des composants.

III.7 Schéma synoptique de montage

La figure III.10 montre le schéma synoptique de branchement des différentes composantes avec la carte ESP.

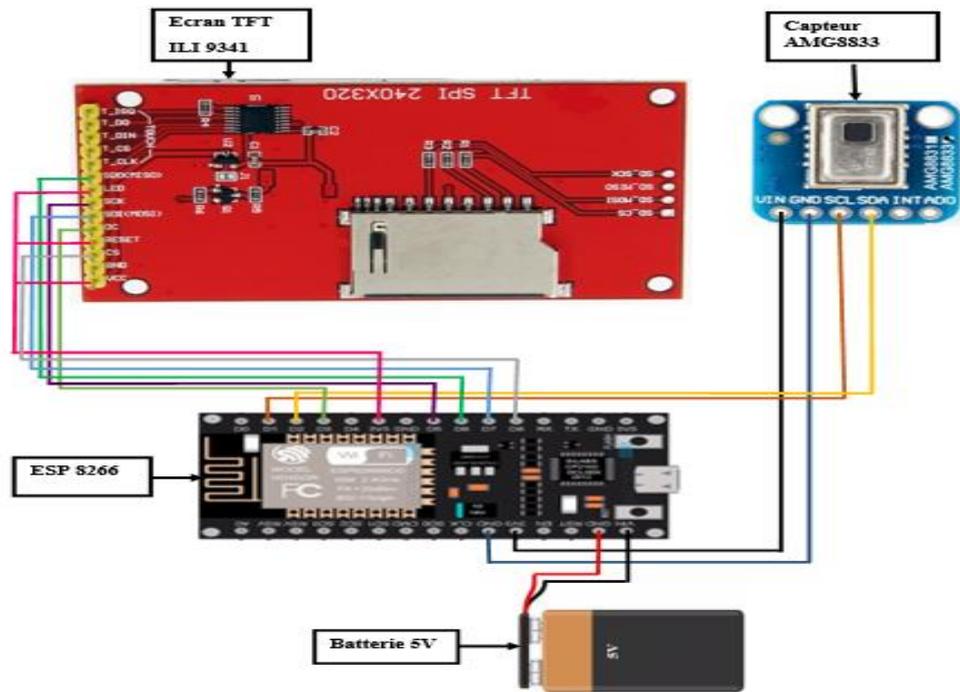


Figure III.10 : Schéma synoptique.

III.7.1 Le montage

Les figures III.11 et figure III.12 montrent le branchement réel de l'ensemble des composants construit notre projet.

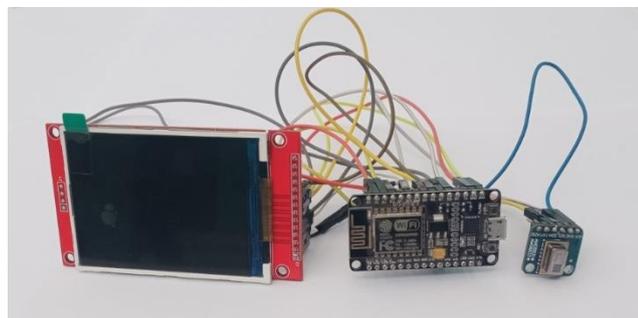


Figure III.11 : Vue de face du couplage de caméra.

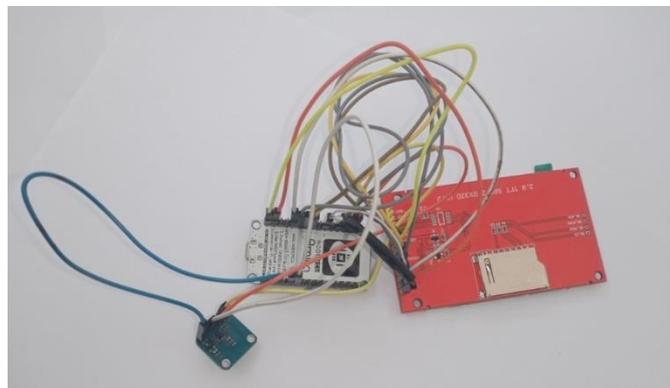


Figure III.12 : Vue de dessus de la caméra.

III.7.2 Assemblage dans la carcasse

La figure III.13 Présente l'état final de la caméra thermique réalisé.



Figure III.13 : La caméra thermique réalisé.

III.8 Test et perspectives

Nous avons testé notre appareil sur un fer à souder et un PC portable. Pour le but de la détection des points chauds afin d'identifier le positionnement de l'anomalie, le majeur avantage de la thermographie non seulement le diagnostic de l'appareil à l'état de fonctionnement, mais sans besoin d'ouvrir la carcasse ou de démonter le dispositif.

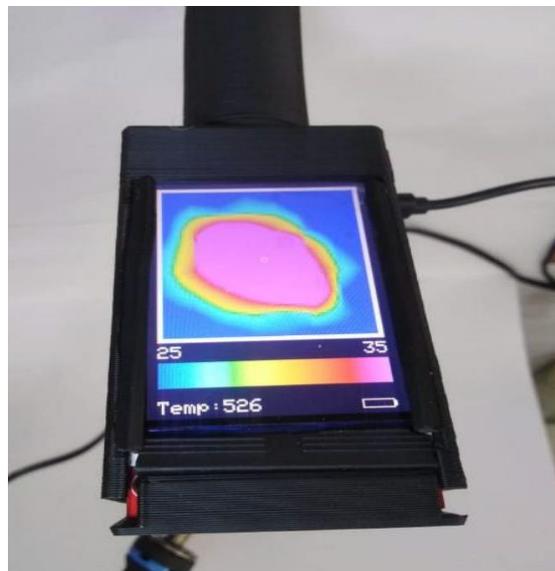


Figure III.14 : Test sur un fer à souder.

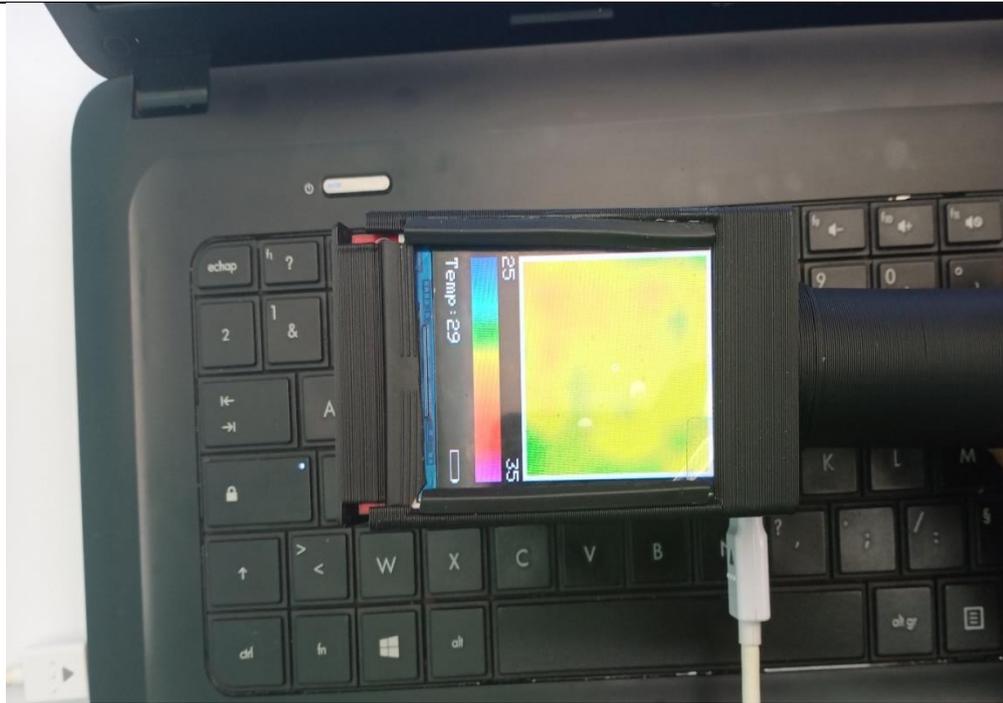


Figure III.15 : Teste sur le PC portable.

III.9 Analyse thermique

Pour enrichir notre travail, valider notre caméra et s'assurer de son bon fonctionnement, nous avons décidé d'effectuer une analyse thermique contenant une étude qualitative suivie d'une étude quantitative comme mentionné dans le chapitre précédent sur deux cartes Arduino Méga.

III.9.1 Système étudié : une carte électronique

Cette carte électronique programmable sert de microcontrôleur pour la conception et le pilotage de montages électroniques, mécaniques, domotiques ou robotiques.

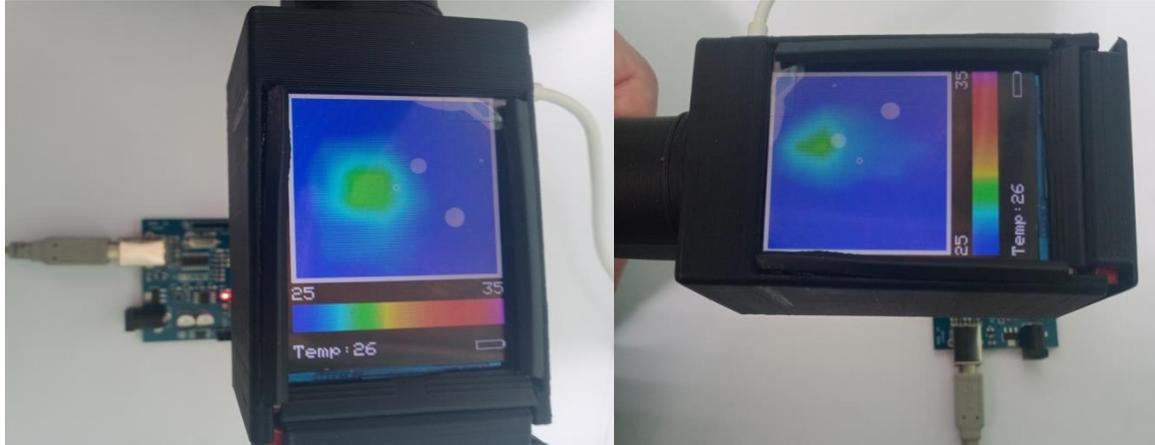
Pour valider le fonctionnement de notre caméra, nous avons utilisé deux carte type méga, l'une est défectueuse et nous connaissons son défaut et l'autre fonctionne dans l'état normal. Deux études qualitative et quantitative seront établies, en comparant les thermogrammes obtenus pour chaque carte et on essaye de chercher le problème à travers ces études.



Figure III.16 : Carte Arduino Méga Méga.

III.9.2 Etude qualitative

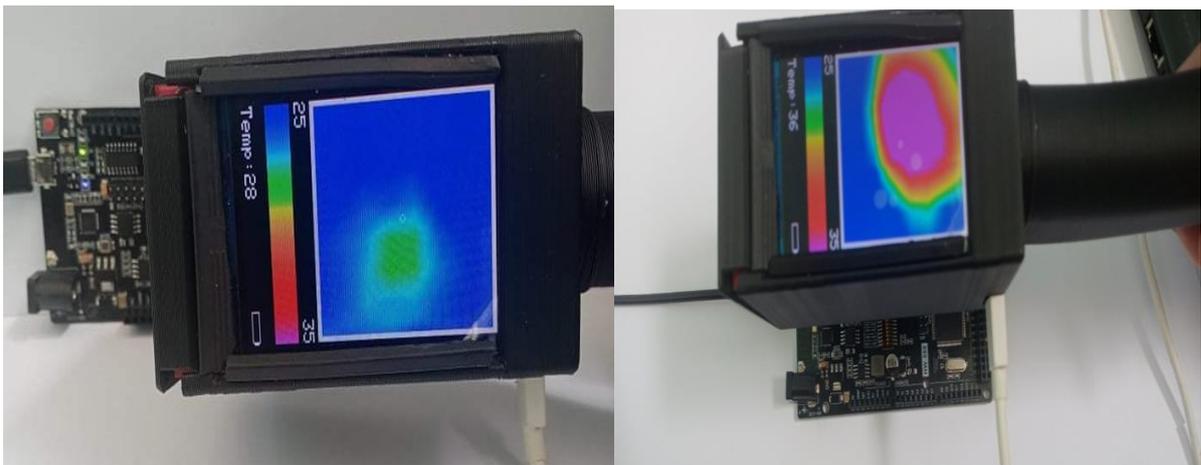
Les figures ci-dessus représentent les thermogrammes obtenus d'après les tests sur deux cartes Arduino Méga.



(a) Coté pic

(b) Coté CH341

Figure III.17 : Thermogramme de la carte Arduino méga en état normale.



(a) Coté pic

(b) Coté CH341

Figure III.18 : Thermogramme de la carte Arduino méga en état défectueuse

La **Figure III.17** et la **figure III.18** illustrent les images de la thermographie donnée par la caméra thermique de deux cartes Arduino Méga.

On constate que le rayonnement thermique émis au niveau de deux microcontrôleurs ATMEGA2560 capter par la caméra thermique réalisée (**Figure III.17a** et **Figure III.18a**) et d'après les échelles, la température correspond la couleur affichée sur ces deux derniers est environ 27°C. Cette température signifie que les deux microcontrôleurs sont à l'état de bon fonctionnement.

Par contre il semble évident une zone excessivement chaude au niveau du circuit intégré CH431 montré par la **figure III.18b** contrairement au thermogramme obtenu dans le cas de fonctionnement normal **figure III.17b** ou la température située dans la plage de bon fonctionnement.

D'après cette étude qualitative, on peut voir clairement que le problème est le circuit intégré CH341, la solution donc à adopter un changement du circuit CH341 de la carte Arduino Méga défaillant. Ce défaut est identifié déjà avant l'utilisation de la caméra où nous sommes sûrs que le problème est le CH341 (diagnostic fait par le technicien de laboratoire).

III.9.3 Analyse quantitative

L'exploitation des températures selon l'échelle précisée sur la caméra nous a permis de mener une étude quantitative sur les deux cartes Arduino Méga.

Comme nous pouvons le voir, l'échelle de notre caméra est limitée entre 25°C et 35°C. De plus elle nous fournit également une température moyenne de la cible détectée par le capteur, c'est pourquoi dans les prochaines exploitations de température nous allons estimer la température maximale à atteindre par les différents composants constituant la carte.

III.9.3.1 Etude quantitative sur le microcontrôleur ATMEGA2560

Le tableau III.4 ci-dessous montre l'exploitation des températures de microcontrôleur ATMEGA2560.

Le tableau III.4 : Exploitation de températures de microcontrôleur ATMEGA2560.

T°C	Pic carte normale	Pic carte défaillante
T _{min}	25	25
T _{moy}	26	28
T _{max}	35	35

Grâce aux résultats obtenus dans le tableau III.4, nous avons pu tracer la courbe suivante :

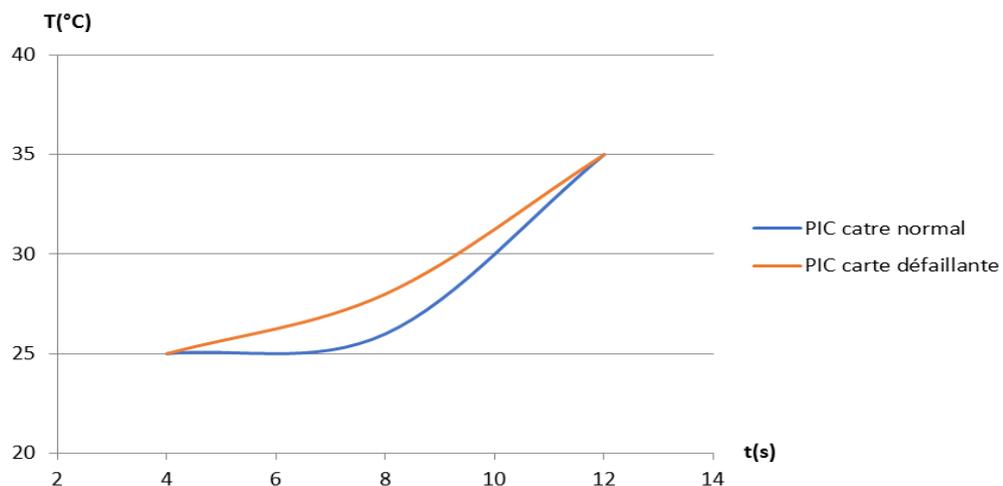


Figure III.19 : Courbes de répartition de chaleur au niveau de deux microcontrôleur ATMEGA2560 à temps réel.

Il semble à travers les courbes de répartition de chaleur **figure III.19** au niveau de deux microcontrôleurs ATMEGA2560 que nous avons presque la même température les courbes sont convergentes cette dernière est aux normes de bon fonctionnement selon la datasheet des pics.

III.9.3.2 Etude sur le circuit intégré CH341

Le tableau III.5 ci-dessous montre l'exploitation des températures de circuit CH341.

Tableau III.5: Exploitation de températures de circuit CH341.

T°C	CH341 défailante	CH341 Normal
T _{min}	25	25
T _{moy}	36	26
T _{max}	45	35

La courbe de la figure III.20 ci-dessous représente l'évolution de température au niveau du circuit CH341 dans les deux cartes Arduino Méga.

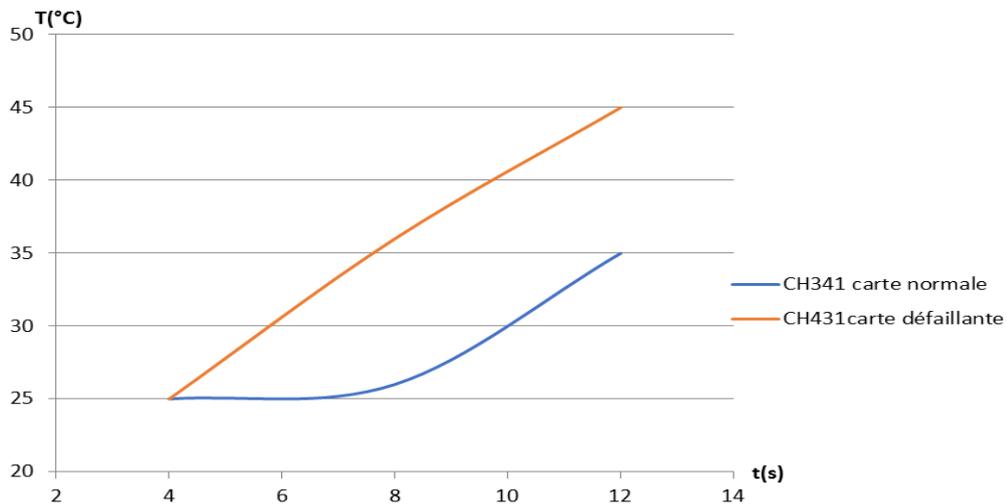


Figure III.20 : Courbes de répartition de chaleur au niveau de circuit CH341 à temps réel.

On peut voir sur la **figure III.18** que la température entre les deux circuits est loin l'un de l'autre, nous avons remarqué que la température du circuit défectueux dépassait la plage requise [25°C, 35°C].

Il semble à travers les courbes de répartition de chaleur **figure III.20** au niveau du circuit intégré CH341 de la carte en état normale que la température est aux normes de bon fonctionnement. Les courbes représentant les températures des circuits intégré CH341 sont divergentes ce qui signifie que l'une des deux subi une surchauffe qui entraîne une dégradation de composant ainsi qu'une défaillance de carte.

Cette étude quantitative confirme la déduction obtenue par l'étude qualitative et montre clairement que le défaut est le CH341 et nécessite un changement.

III.10 Conclusion

Après avoir rappelé l'effort de nos collègues de l'année passée à réaliser la caméra par le travail effectué, les résultats obtenus et les lacunes trouvés, nous avons donc dans ce chapitre montré les étapes de réalisation où nous complètement changé la plateforme de réalisation et modifie le schéma de montage pour améliorer la qualité de la caméra et faciliter sa réalisation.

Une étude thermographique qualitative et quantitative pour tester l'efficacité de la caméra à trouver les points chauds dans un système électrique défaillant est établie et les résultats obtenus confirment l'efficacité de la caméra.

Conclusion générale

Conclusion générale

A la fin de ce projet, nous avons donc développées avec succès un outil important utilisé dans la maintenance prédictive qu'est la caméra thermique pour contrôler et collecter des données à partir des images thermographies ou des thermogrammes. Cette caméra peut être considérée comme un prototype et l'étendre pour servir diverses applications telles que la surveillance de la température, la détection des fuites, la détection des points chauds, etc.

L'idée d'utiliser la plateforme ESP8662 lui-même est incroyable. C'est moins cher et simple a programmé contrairement à la plateforme Raspberry où tout autre plateforme où le prix minimum d'une carte Raspberry de base peut être d'environ 6000DA à 8000DA alors que le prix de l'ESP8662 n'est que de 2200DA.

Il est également respectueux de l'environnement car la consommation d'énergie est très faible. Il peut être déployé à l'extérieur à long terme. Tous les logiciels et outils de programmation utilisés sont également open source ce qui limite le coût du développement au prix du matériel.

Ce projet nous 'a donné une opportunité unique de travailler avec les plateformes de développement en électronique sans besoin de comprendre les choses en détails, ainsi d'employer ces derniers au service de la maintenance.

L'impression 3D offre un avantage énorme à la réalisation des carcasses et par la suite donne un aspect esthétique à la caméra réalisée.

Malgré ça, la caméra nécessite plus de tests en termes de fiabilité avant le déploiement réel.

Deux points négatifs ont été enregistrés qui sont :

- Absence de l'étalonnage de la caméra réalisé à cause de l'absence d'une caméra professionnelle.
- La résolution des thermogrammes est très mauvaise à cause de la qualité du capteur AMG8833 qu'est du type 8X8.

Pour cela, nous proposons de continuer ce travail dans les années prochaines pour rattraper ces deux points et finaliser la caméra pour une utilisation non seulement pédagogique mais professionnelle.

Références bibliographiques
Et webographies

Références bibliographiques

- [1] CHAFAI Mahfoud, « management de la maintenance industrielle », *Organisation Gestion Méthode et technique application et étude de cas*, office des publications universitaires, 2015.
- [2] SAAD Mohamed, « Méthodes et organisation de la maintenance », *Support de cours en Méthodes et organisation de la maintenance*, université Ibn Khaldoun, Tiaret, Algérie, 2019/2020.
- [3] AUBERVILLE Jean-Marie, « Maintenance Industrielle », *De l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté*, Ellipses, 2004.
- [4] BELHOMME A, « stratégies de maintenance », *Support de cours en stratégies de maintenance*, BTS Maintenance Industrielle, 2010/2011
- [5] DEBBAH Younes, « La maintenance industrielle », *Support de cours Gestion de la maintenance*, Institut des Sciences et Techniques Appliquées « ISTA », Université des Frères Mentouri Constantine 1, Algérie, 2012.
- [6] HENG Jean, « Pratique de la maintenance préventive », *Mécanique - Pneumatique - Hydraulique - Electricité – Froid*, 2ème Edition, Dunod, 2012.
- [7] RENIEL A et CASTELLANOS G, « Determinación del tipo mantenimiento a aplicar en el equipamiento de la fábrica de Cigarros “Juan de Mata Reyes” de Trinidad », *Trabajo de Diploma*, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara Cuba, 2014.
- [8] LLAURENS Jérémy, « mise en place 'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique », *thèse doctorat en pharmacie*, Université Joseph Fourier, GRENOBLE, France, 2011.
- [9] KRIKA Wafa, « Etude de l'influence de la qualité du lubrifiant sur la vibration des machines tournantes lubrifiées », *Mémoire de Magister en Génie Mécanique*, Université Mohamed Chérif Messaâdia, Souk-Ahras Algérie, 2015.
- [10] SBITTI Amine, « Propagation des fissures 2D et 3D planes sous chargement thermomécanique à amplitudes variables », *thèse doctorat en Sciences Mécaniques*, acoustique et électronique, L'université Pierre Et Marie Curie, Paris, 2009.
- [11] BENDJAMA Hocine, « Contribution à la détection et au diagnostic des défauts. Application aux système dynamique et aux matériaux », *thèse doctorat en automatique*, Ecole nationale Polytechnique, Algérie, 2012
- [12] GATTAL Boulaares, « Méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'Energie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension », *Mémoire Magister en Electrotechnique*, Université El hadj Lakhdar de Batna, Algérie, 2012.

- [13] RABEH Maamouri, « Diagnostic et commande Tolérante aux Défauts Appliqués à un Système de Conversion Electromécanique à Base d'une Machine Asynchrone Triphasée », *thèse doctorat en automatique*, Ecole doctorale ED 184, Université de Sousse, Tunisie, 2017.
- [14] MOHAMADI Massaoud, « Schémas et Automates Programmables », *Support de cours première année Master Commande électrique*, Université Mohamed Khider, Alger, Biskra, 2011/2012.
- [15] VENU Prasad et ANUDEEP Kumar, « Non-Destructive Testing », *support de cours Mechanical engineering institute of aeronautical engineering*, 2013.
- [16] BERNARD Baroux, « La corrosion des métaux » passivité et corrosion localisée, Dunod, 2014.
- [17] M. NEZAR, « Evaluation et Contrôle non destructif », *Brochure du TP en Mécatronique*, Université de Batna 2, Algérie, 2017.
- [18] CARCREFF Ewen, « Déconvolution adaptative pour le contrôle non destructif par ultrasons », *Thèse de Doctorat en Acoustique*, Université de Nantes Angers Le Mans, France, 2014.
- [19] L. Bourgain, R. Dart et J. Bourgain, « Machines tournantes et circuits pulsés », *application industrielles et médicales de l'analyse spectrale*, Dunod, 1988.
- [20] DOMINIQUE François, « Endommagements et rupture de matériaux », *métallurgie matériaux*, EDP sciences, 2004.
- [21] PATRICK Lyonnet, MARC Thomas et ROSAROI Toscano, « fiabilité, diagnostic et maintenance prédictive des systèmes », *Tec&Doc*, 2012.
- [22] NACIB Leila, « Diagnostic des défauts dans les machines tournantes par l'analyse vibratoire », *thèse doctorat en Electromécanique*, Université Badji Mokhtar- Annaba, Algérie, 2015.
- [23] Guemmour Mohamed Boutkhil, « Surveillance vibratoire des machines » *support de cours en technique de détection de défaillance*, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Algérie, 2021.
- [24] HAMEL Meziane, « Etude et caractérisation des fissures fines en évaluation non destructive », *Thèse doctorat en électromécanique*, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzoun, Algérie, 2018.
- [25] GUEMMOUR Mohamed Boutkhil, « Analyse thermographique par infra-rouge », *Support pédagogique*, université Ibn Khaldoun, Tiaret, Algérie, 2020.
- [26] BRELAZ Marie, « Intérêts et limites de la thermographie infrarouge en tant qu'outil diagnostique en aviculture », *thèse doctorat vétérinaire*, l'Université Paul-Sabatier de Toulouse. France, 2011.
- [27] DENIS, Pascal « Guide de la maintenance industrielle », *les guides industrielles*, Delavrage, 2008.

- [28] PABL Venegas et EUGENI Ivorra, «Towards the Automation of Infrared Thermography Inspections for Industrial Maintenance Applications», *article web sensors*, 2014.
- [29] Do Tao, « Thermographie infrarouge active par induction électromagnétique application à l'auscultation d'éléments en béton renforcé », *thèse doctorat, en Sciences pour l'ingénieur*, Université Lille, France, 2010.
- [30] PHILIPPE Demy, « Résonance locale et caractérisation de défauts de délaminage par vibrothermographie », *thèse doctorat en ingénieur civil Electro-Mécanicien (Aérospatiale)*, Université de Liège, Belgique, 2014
- [31] CHAFFAR Khaled, « Thermographie active appliquée à la caractérisation in situ de parois de bâtiment », *thèse Doctorat en Génie Civil*, Lille, France, 2012.
- [32] FILLIT Chrystelle, « Développement d'un banc de thermographie infrarouge pour l'analyse de la fiabilité des microsystemes », *thèse Doctorat en Science des Matériaux*, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France, 2011.
- [33] THIAM Abdoulahad, « Contribution à l'étude et à l'optimisation du procédé de thermographie active appliquée à la détection de défauts surfaciques », *thèse Doctorat en Mécanique et Energétique*, Université de Bourgogne, France, 2017.
- [34] Yann Rotrou, « Thermographie courtes longueurs d'onde avec des caméras silicium : contribution à la modélisation radiométrique », *thèse Doctorat en Optoélectronique*, école nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace, France, 2006.
- [35] Institut wallon asbl, « La thermographie infrarouge en maintenance prédictive », *Document étude de cas*, SAINT Joseph Espérance, 2016.
- [36] EMILIAN Koller, « Machines thermiques », *Dunod*, Paris, 2008
- [37] HABBOUL Zidane, « Contribution à l'étude de la thermographie infrarouge et ses applications », *mémoire de magister en optique et mécanique de précision*, Université Farhet Abbas, Setif, Algérie, 2017.
- [40] FLIR « Guide d'utilisation » FLIR Bxxx series FLIR Txxx series, Document technique.
- [41] FLIR « Manuel de l'utilisateur » FLIR Bxxx series FLIR Txxx series, Document technique.
- [42] Flir « Imagerie thermique pour les diagnostics électriques / mécaniques », Document technique.
- [43] RU EN et PABLO V, « Infrared thermography for temperature Measurement and non-Destructive Testing », *article web sensors*, 2014.
- [44] FRANK Billy Djupkep Dizeu, « Quantification et visualisation des conditions ambiantes intérieures par thermographie infrarouge », *Thèse Doctorat en génie électrique*, université Laval, Québec, Canada, 2015.

Références Webographies

- [38] FLIR « Guide d'utilisation des caméras thermiques dans l'industrie » Infrared Training Center, Disponible : <https://www.flir.fr/discover/instruments/thermal-imaging-guidebook-for-industrial-applications/>, consulté le 20/04/2022.
- [39] <https://www.pce-france.fr/fiches-mesureurs/camera-infrarouge-pce-tc4.htm>, consulté le 10/03/2022.
- [45] <http://www.vaucanson.org/php5/Accueil/index.php/comment-minimiser-les-pertes-denergie/707-limitation-des-pertes-par-rayonnement>, consulté le 08/02/2022.
- [46] <https://www.actutem.com/comment-lemissivite-impacte-t-elle-les-images-thermiques-prises-par-une-camera-infrarouge>, consulté le 10/04/2022.
- [47] <https://projetvert.fr/les-3-points-cles-du-fonctionnement-dune-camera-thermique/>, consulté le 10/03/2022.
- [48] <https://www.lynred.com/fr/blog/visible-vs-thermique-avantages-et-inconvenients>, consulté le 10/03/2022.

Annexe "Première partie du code téléversé"

```
#include <Adafruit_ILI9341.h>
#include <Adafruit_AMG88xx.h>
#define PIN_INT D0
#include <TFT_eSPI.h>
#define TFT_CS D8
#define TFT_RST D3
#define TFT_DC D4
Adafruit_ILI9341 tft = Adafruit_ILI9341(TFT_CS, TFT_DC, TFT_RST);
#define C_BLUE tft.color565(0,0,255)
#define C_RED tft.color565(255,0,0)
#define C_GREEN tft.color565(0,255,0)
#define C_WHITE tft.color565(255,255,255)
#define C_BLACK tft.color565(0,0,0)
#define C_LTGREY tft.color565(200,200,200)
#define C_DKGREY tft.color565(80,80,80)
#define C_GREY tft.color565(127,127,127)
boolean measure = true;
uint16_t centerTemp;
unsigned long tempTime = millis();
unsigned long batteryTime = 1;
#define METRIC;
uint16_t KeyPadBtnColor[12] = {C_BLUE, C_BLUE, C_BLUE, C_BLUE, C_BLUE, C_BLUE,
C_BLUE, C_BLUE, C_BLUE, C_GREEN, C_BLUE, C_RED };
uint16_t MinTemp = 25;
uint16_t MaxTemp = 35;
byte red, green, blue;
byte i, j, k, row, col, incr;
float intPoint, val, a, b, c, d, ii;
byte aLow, aHigh;
byte BoxWidth = 3;
byte BoxHeight = 3;
int x, y;
char buf[20];
int ShowGrid = -1;
```

المخلص:

بناء على ما تم تصميمه في السنة السابقة، لاجد مشاريع التخرج والمتمثل في تصميم كاميرا حرارية نظرا لأهميتها البالغة في الصيانة الصناعية التوقعية التي تعتمد على دراسة الخريطة الحرارية للألة، نقوم في هذا المشروع بمواصلة انجاز الكاميرا الحرارية، ولأجل تجسيده قمنا اولاً بالتدقيق في المشروع السابق واعتمدنا على نقاط قوته وإيجابيات لحافظ عليها ثم درسنا سلبياته والنقائص التي كان يحتاجها المشروع لإتمامه. لنوفق الى حد بعيد في انجاز كاميرا حرارية يمكن استعمالها في الاعمال التطبيقية كنموذج لدراسة فعالية الكاميرات الحرارية في الصيانة الصناعية التوقعية.

الكلمات المفتاحية: كاميرا حرارية، صيانة صناعية توقعية, خرائط حرارية.

Summary

Based on what was designed in the previous year, for one of the graduation projects, which is the design of a thermal camera due to its great importance in the predictive industrial maintenance that depends on the study of the heat map of the machine. We relied on its strengths and advantages to maintain them, and then studied its negatives and shortcomings that the project needed to complete. Let us succeed to a large extent in achieving a thermal camera that can be used in practical work as a model to study the effectiveness of thermal cameras in industrial predictive maintenance.

Keywords: thermal camera, predictive industrial maintenance, heat maps.

Résumé :

Sur la base de ce qui avait été conçu l'année précédente, pour l'un des projets de fin d'études, qui est la conception d'une caméra thermique en raison de sa grande importance dans la maintenance industrielle prédictive qui dépend de l'étude de la carte thermique de la machine. Sur ces points forts et ces avantages pour les maintenir, puis a étudié ses points négatifs et ses lacunes que le projet devait compléter. Réussissons en grande partie à réaliser une caméra thermique pouvant être utilisée en travaux pratiques comme modèle pour étudier l'efficacité des caméras thermiques en maintenance prédictive industrielle.

Mots clés : caméra thermique, maintenance industrielle prédictive, cartes thermiques, thermogrammes.