

Université Abou Bekr Belkaid
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Aboubekr Belkaid– Tlemcen
Faculté de Technologie
Département De génie mécanique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master engénierie mécanique
Option : Maintenance industrielle

Thème

APPLICATION DE L'ANALYSE
THERMOGRAPHIQUE A LA MAINTENANCE
PREDICTIVE

Réalisé par :

- Mr. TEBBAL Mohammed El Amin

Encadré par :

- Mr. BOURDIM Abdelghafour Université de Tlemcen

Co- Encadré par :

- Mr. METALSI TANI Fethi Université de Tlemcen

Soutenu le 08 Octobre 2013 devant le jury :

- *Président* *Mr. GHARNAOUT Mohamed Amine*
- *Examineur* *Mr. SBAA Fethi*
- *Examineur* *Mr. OULD KADDOUR Abdelhafid*

Année universitaire: 2010-2011





DEDICACES



Je dédie ce modeste travail

*A ma très chère maman, a mon cher père
qui n'ont jamais cessé de me soutenir
et de m'encourager,
A mon oncle Miloud que Dieu me le garde,*

*Ainsi qu'à mon frère :
Abderrahmane,
A mes sœurs :
F.Zohra, Oumaima.*

*A toute ma famille.
A tous mes amis, sans exception.
A mon enseignant M^r A.BOURDIM*


.



MOHAMMED EL AMIN



REMERCIEMENTS




En premier lieu, je tiens à remercier notre DIEU, tout puissant qui m'a donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.



*Je tiens à remercier mon encadreur qui m'a aidé à bien diriger mon travail : Mr. BOURDIM Abdelghafour
Et Mr. METALSI-TANI Fethi que je le souhaite un prompt rétablissement.*

Nous tenons aussi à exprimer toute notre gratitude et nous remercions :

*Mrs : BOUTALBA.H, ZAOUI.A, N.KEBBAR
LARGUET.L, MOKDAD.R, AHMED, membres de services de thermovision et vibration de SONATRACH HRM, pour les orientations et les conseils ainsi que le support documentaire dont ils n'ont ménagé aucun effort pour nous les accorder.*



Nous remercions également tous les enseignants du département Génie mécanique, sans oublier de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'élaboration de ce travail.



ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو تطبيق التصوير عن طريق الإشعاعات تحت الحمراء في الصيانة التنبؤية من أجل تقليص فرضية وقوع إعطاب في النظام و تسهيل عملية مراقبة التجهيزات. وتستند المنهجية المقترحة على استعمال قواعد معلوماتية خاصة بالمحركات الكهربائية, من أجل معرفة حالة العمل للمحرك المراقب سواء كانت جيدة أو غير ذلك مع تحديد نوع العطب ودرجة خطورته بآلة التصوير الحراري.

RESUME

Ce mémoire est consacré à l'application de la thermographie infrarouge dans la maintenance prédictive pour réduire la probabilité de défaillance d'un système, et faciliter la surveillance des équipements.

La méthodologie proposée est basée sur l'extraction des bases de données propre aux moteurs électriques, pour connaître l'état de fonctionnement du moteur contrôlé quel que soit bonne ou mauvaise et spécifier le type de l'anomalie et le degré de défauts par la caméra thermique.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Introduction	01
--------------	----

CHAPITRE1 : PRESENTATION DE SONATRACH SITE HASSI R'MEL

I	Généralités	02
II	Présentation de SH HASSI R'MEL	02
II.1	Situation géographique	02
II.2	Historique	03
II.3	Développement	04
II.4	Répartitions des installations de SH Hassi R'mel	05
III	Description de module 1 (MPP1)	06

CHAPITRE 2 : LA MAINTENANCE

I	La maintenance	07
II	But & objectifs de la maintenance	07
III	Fonction de la maintenance	08
IV	Types de maintenance	09
IV.1	La maintenance corrective	10
IV.1.1	Maintenance curative	10
IV.1.2	Maintenance palliative	10
IV.2	La maintenance préventive	10
IV-2.1	La maintenance systématique	11
IV-2.1.1	Le remplacement	11
IV-2.1.2	Le réglage	11
IV-2.1.3	Le contrôle	11
IV-2.1.4	Inspection	11
IV.2.2	La maintenance de ronde	11
IV-2.3	La maintenance conditionnelle « prédictive »	11
IV-2.3.1	L'analyse vibratoire	12
IV-2.3.2	Analyse des températures	12
IV-2.3.3	Analyse des huiles	12
IV-2.3.4	L'ampérage	12
IV-2.3.a	Maintenance prédictive On Line	12
IV-2.3.b	Maintenance prédictive Off Line	13
V	Techniques de maintenance utilisées au niveau du MPP I	14
V-1	Suivi du paramètre vibratoire	14
V-1.1	Vibrations	14
V-1.2	Paramètres vibratoires	14
V-1.2.1	Variable $x(t)$	15
V-1.2.2	Amplitude (X)	15
V-1.2.3	Période	15
V-1.2.4	La fréquence	15
V-1.2.5	Pulsation	15
V-1.2.6	Résonance	15

V-1.2.7	Phase	15
V-1.3	Modes de détection	16
V-1.3.1	Valeur efficace	16
V-1.3.2	Valeur crête Xc	16
V-1.3.3	Valeur crête a crête	16
V-1.4	Grandeurs de mesure	17
V-1.4.1	Déplacement vibratoire x(t)	17
V-1.4.2	Vitesse vibratoire v(t)	17
V-1.4.3	Accélération a(t)	17
V-1.5	Méthodes de suivi des vibrations	18
V-1.5.1	Méthodes du niveau global	18
V-1.5.1.1	Vibration des paliers	19
V-1.5.1.2	Vibration de l'état des roulements	20
V-1.5.1.2.a	Méthodes des tendances	20
i.	Cycle de référence	20
ii.	Cycle de surveillance normale	21
iii.	Cycle de surveillance intensive	21
V-1.5.1.2.b	Méthode de comparaison	21
V-1.5.2	Méthode de l'analyse en fréquences	21
V-1.5.2.a	Surveillance permanente	22
V-1.5.2.b	Surveillance périodique	22
V.2	Suivi du paramètre température	23
V.2.1	Surveillance permanente	23
V.2.2	Surveillance périodique	23
V.3	L'analyse des huiles	24
VI	GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur)	24
VI.1	Module Base	24
VI.2	Module Asset	24
VI.3	Module stock	24
VI.4	Module work	24
VII	Conclusion	25

CHAPITRE 3 : THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

I	Introduction	26
II	Brefs rappels historiques	26
III	Notions de base en thermodynamique	27
III-1	Notions de température et chaleur	27
III-1-1	Chaleur	27
III-1-2	Température	28
III-1-2.1	Unités de mesure de la température	28
III-1-2.2	Les échelles de température	29
III-1-2.2.a	L'échelle de température absolue	29
III-1-2.2.b	L'échelle de température relative	29
III-1-2.2.c	Comparaison des échelles de température	29
III-1-3	Température et chaleur	30

III-2	Modes de transferts de chaleur	31
III-2-1	Conduction	32
III-2-1.1	Définition	32
III-2-1.2	Formule de transfert de chaleur par conduction	32
III-2-1.3	Conductivité thermique	33
III-2-2	Convection	34
III-2-3	Transfert de chaleur par rayonnement	36
III-2-3-1	Ondes	36
III-2-3-2	Spectre électromagnétique	37
III-3	Echange d'énergie par rayonnement	38
III-3-1	Rayonnement incident	38
III-3-2	Propriétés du rayonnement incident	38
III-3-3	Rayonnement résultant	39
III-3-4	Propriété du rayonnement résultant	40
III-3-4-1	Pouvoir émissif	40
III-3-4-2	Rayonnement émis	41
III-4	Corps noir	42
III-4-1	Loi de Planck	42
III-4-2	Loi de déplacement de Wien	43
III-4-3	Loi de Stefan-Boltzmann	44
III-5	Corps cible (corps réel)	46
III-5 -1	Loi de Stefan-Boltzmann pour un corps réel	46

CHAPITRE 4 : UTILISATION DE LA CAMERA INFRAROUGE

I	Utilisation de la camera infrarouge	49
I-1	Introduction à l'utilisation de la caméra infrarouge	49
I-2	Contrôler une image	49
I-2.1	Plage de température	50
I-2.2	Niveau et gain	50
I-3	Capturer une image	53
II	Technique d'analyse d'images thermiques	54
II-1	Gradient thermique	54
II-2	Les fonctions d'amélioration les images	55
II-2.1	Cadrage thermique	55
II-2.2	Isotherme	58
II-2.3	Palettes	60
II-2.4	Profil	61
II-3	Les Analyse d'image – échantillons faussés	62
II-4	Différences de température apparente	65
II-4.1	L'objet cible	66
II-4.2	Les réflexions de source diverses	66
II-4.3	Différentes sources de réflexion	68

CHAPITRE 5 : APPLICAION D'ANALYSE THERMIQUE

I	Introduction	70
II	Description de l'application	70
II-1	Organigramme	70
II-2	Description	71
III	Composants de l'application	72
III-1	Le logiciel DALI	72
III-2	L'application Analyseur de JAVA	74
III-2-1	Organigramme	74
III-3	Principe de fonctionnement	76
III-4	Exemples	76
III-5	Remarque	80
CONCLUSION		81

LISTE DES FIGURE

CHAPITRE 1

Figure 1.1 : Situation géographique de SH Hassi R'mel	3
Figure 1.2 : Répartition du champ gazier de HASSI R'MEL	5
Figure 1.3 : Module (MPP1)	6

CHAPITRE 2

Figure 2.1 : Différentes tâches contenues dans la fonction maintenance	8
Figure 2.2 : Différents types de maintenance	9
Figure 2.3 : Maintenance prédictive on line	13
Figure 2.4 : Maintenance prédictive off line	13
Figure 2.5 : Grandeurs vibratoires	14
Figure 2.6 : Modes de détection usuels	16
Figure 2.7 : Grandeurs de mesure	17
Figure 2.8 : Présentation des grandeurs de mesure	18
Figure 2.9 : détermination des seuils par la méthode du niveau global	18
Figure 2.10 : Tableau de seuils de jugement selon: AFNOR E90.300, ISO.2372	19
Figure 2.11 : Position de mesure	20
Figure 2.12 : Détermination des seuils en analyse spectrale	22

CHAPITRE 3

Figure 3.1 : Plus la température des molécules est élevée, plus celles -ci se déplacent vite	27
Figure 3.2 : Conversion de températures en Celsius et Kelvin	30
Figure 3.3 : La température est relative mais pas la chaleur	31
Figure 3.4 : Modes de transferts de chaleur	31
Figure 3.5 : Valeurs de conductivité pour différents matériaux	33
Figure 3.6 : Circulation d'un fluide. La couleur sombre indique un fluide froid	35
Figure 3.7 : bande de longueur d'onde	37
Figure 3.8 : Spectre électromagnétique	38
Figure 3.9 : Répartition du rayonnement incident en différentes composantes	39
Figure 3.10 : Le rayonnement émis et le rayonnement réfléchi par l'objet	41
Figure 3.11 : Emission du rayonnement thermique dans toutes les directions	41
Figure 3.12 : Emittance spectrale radiante d'un corps noir selon la loi de Planck pour différentes températures absolues	42
Figure 3.13 : Courbe définie la loi de Wien	44
Figure 3.14 : Puissance rayonnée d'un corps noir à des températures définies	45
Figure 3.15 : Courbes montrant la longueur d'onde en fonction de l'émissivité spectrale	46
Figure 3.16 : puissance rayonnée d'un corps réel à celui d'un corps noir	47
Figure 3.17 : Rayonnement résultant provenant d'un objet cible opaque, qui se compose des rayonnements émis et réfléchi	48

CHAPITRE 4

Figure 4.1 : Contrôle en sélectionnant la plage de température, le niveau et le gain	49
Figure 4.2 : Niveau et gain	51
Figure 4.3 : L'isotherme remplace certaines couleurs par des tons contrastés	51
Figure 4.4 : Le point de mesure est une fonction simple et pratique	52
Figure 4.5 : La fonction de zone est paramétrée pour afficher la température maximale au sein de la boîte	52
Figure 4.6 : Gradient thermique	54
Figure 4.7 : L'intégralité de l'image est cadrée thermiquement	56
Figure 4.8 : Image cadrée thermiquement	57
Figure 4.9 : Même image, réglée automatiquement (gauche) et cadrée thermiquement sur le composant (droite)	57
Figure 4.10 : L'isotherme remplace certaines couleurs par des tons opposés	58
Figure 4.11 : Tête de transformateur avec des isothermes à différents endroits	59
Figure 4.12 : Image thermique d'un contacteur avec des isothermes	60
Figure 4.13 : Différentes palettes	61
Figure 4.14 : gradient thermique vertical et horizontal de ce point chaud	61
Figure 4.15 : Utilisation de la fonction Profil dans la production de papier	62
Figure 4.16 : Réflexions de l'opérateur (présence des mains et du visage)	63
Figure 4.17 : Réflexion d'un point source, disparaît lorsque l'angle change	64
Figure 4.18 : Influence de l'angle à la réflexion	64
Figure 4.19 : Grande émissivité permet une lecture plus "réaliste"	64
Figure 4.20 : L'échauffement réel présente généralement un motif uniforme	65
Figure 4.21 : Températures apparentes différentes	65
Figure 4.22 : Différentes sources de réflexion et émissivités donnent des températures apparentes différentes	66
Figure 4.23 : Apparences différentes des parties peintes et non peintes de barres	67
Figure 4.24 : Changements abrupts dans l'image thermique causés par un changement d'émissivité	67
Figure 4.25 : Objet cible plus froid réfléchissant un environnement plus chaud	68
Figure 4.26 : Connexions de transformateur vues depuis différents emplacements	68

CHAPITRE 5

Figure 5.1 : Interface du l'analyseur.bat	71
Figure 5.2 : DALI avec différentes fonctions	72
Figure 5.3 : Température maximale	73
Figure 5.4 : Classe d'isolation thermique	74
Figure 5.5 : Classification de défaut	75
Figure 5.6 : Plaque signalétique du moteur	76
Figure 5.7 : Exemple 1	76
Figure 5.8 : Plaque signalétique du moteur	78
Figure 5.9 : Exemple 2	78
Figure 5.10 : Exemple 3	79

LISTE DES SYMBOLES

- **(X)** : Amplitude
- **f** : fréquence
- **ω** : pulsation
- **λ** : Longueur d'onde
- **φ** : phase
- **X_{eff}** : Valeur efficace d'une vibration
- **X_c** : Valeur crête
- **X_{cc}** : Valeur crête à crête
- **x(t)** : Déplacement vibratoire
- **v(t)** : Vitesse vibratoire
- **a(t)** : Accélération
- **Φ** : flux de chaleur transféré, [W]
- **K** : la conductivité thermique de la matière, [W/m.K]
- **A** : la surface d'échange concernée, [m²]
- **T1 - T2** : la différence de température, [K]
- **L** : la longueur du chemin de conduction, [m]
- **W_{INCID}** : Rayonnement incident en provenance d'un autre élément
- **R α** : Rayonnement absorbé par l'objet
- **R τ** : Rayonnement émis par l'objet
- **R ρ** : Rayonnement réfléchi par l'objet
- **ϵ** : Facteur d'émission (ou émissivité)
- **w_λ** : Flux de puissance émis par un corps noir à la longueur d'onde
- **c** : Vitesse de la lumière = 3.10¹⁰ 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
- **λ_{max}** : Longueur d'onde à laquelle se produit l'émission maximale
- **ϵ** : Emissivité du corps réel
- **σ** : Constante de Stefan-Boltzmann = 5,7.10⁻⁸ (Watts/m²/°K)

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction

Aussi loin que l'on remonte dans l'histoire pour protéger sa vie et ses biens, l'homme tente toujours d'opposer un moyen de protection et de détection des anomalies qui peuvent intervenir dans une installation, ou dans un procédé de fabrication, dans la plus part des cas, ces moyens sont aménagés de façon à détecter et éliminer l'anomalie d'une façon qu'elle n'arrive pas à détériorer son système, ou son équipement.

Il est à noter que les méthodes appliquées pour faire face à une anomalie, à détériorer une installation ne sont pas les mêmes qu'aujourd'hui surtout quand il s'agit d'objet ou de site exposé aux dangers (par exemple un champ gazier).

Notre projet consiste à étudier une nouvelle méthode de détection des anomalies dite la **Thermographie infrarouge**, et les éviter avant qu'elles interviennent ce qui la place dans le domaine de maintenance prédictive, et cette nouvelle technique est mise en œuvre pour protéger un site gazier, ce dernier est exposé aux risques des défauts qui peuvent causer des dangers (incendie, détérioration des instruments par des défauts thermique etc.).

Après un bref exposé sur l'historique de champs de Hassi R'mel (chapitre 1), on a décrit la nécessité de la maintenance dans l'industrie (chapitre 2), nous avons jugé nécessaire de décrire la thermographie infrarouge en générale (chapitre 3), et dans le chapitre 4, on a prescrit la méthode et les moyens d'analyse d'une image thermique, la technique de mesure thermographique, les défauts thermiques, et une petite application qui présente les résultats de notre travail pratique sous forme d'un rapport conçu à l'aide de logiciel de traitement d'images thermiques, enfin on a terminé notre modeste travail par une conclusion générale.

Chapitre I

*Présentation du SH
site HASSI R'MEL*

I - GENERALITES:

L'énergie occupe une place primordiale dans le développement économique mondial. Les sciences et les progrès techniques ont permis à l'homme de découvrir de nouvelles ressources énergétiques à savoir tous les produits à vocation énergétique dont nous citons : le pétrole et le gaz naturel ; seuls capables de répondre à l'accroissement des besoins en énergies.

L'industrie pétrolière et gazière, secteur clé peut être considérée comme le seul pilier pouvant supporter l'économie et le développement de notre pays qui possède d'importantes réserves de pétrole et gaz naturel.

Sonatrach est la plus importante compagnie d'hydrocarbures en Algérie et en Afrique. Elle intervient dans l'exploration, la production, le transport par canalisations, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés.

Adoptant une stratégie de diversification, Sonatrach se développe dans les activités de génération électrique, d'énergies nouvelles et renouvelables, de dessalement d'eau de mer, de recherche et d'exploitation minière. Poursuivant sa stratégie d'internationalisation, Sonatrach opère en Algérie et dans plusieurs régions du monde : en Afrique (Mali, Niger, Libye, Egypte), en Europe (Espagne, Italie, Portugal, Grande Bretagne), en Amérique Latine (Pérou) et aux USA.

Avec un chiffre d'affaires à l'exportation de près de 56,1 milliards de US\$ réalisé en 2010, Sonatrach est classée 1^{ère} compagnie en Afrique et 12^{ème} compagnie dans le monde. Elle est également 4^{ème} exportateur mondial de GNL, 3^{ème} exportateur mondial de GPL, et 5^{ème} exportateur de Gaz Naturel.

II - PRESENTATION DU SH HASSI R'MEL :

II.1 - Situation géographique :

Le champ gazier de Hassi R'MEL est le pôle économique le plus important au niveau national et international. Ses réserves sont estimées à 3000 milliards de standard m³ de gaz naturel (riche en condensât). Il est l'un des plus grands gisements de gaz à l'échelle mondiale, on le considère comme le poumon de l'Algérie.

HASSI R'MEL se trouve à 550 km au sud d'Alger, entre les wilayas de Ghardaïa et Laghouat. Dans cette région relativement plate du Sahara, l'altitude moyenne est d'environ de 750 m, le climat est caractérisé par une pluviométrie faible (140 mm/an) et une humidité moyenne de 19% en été et 34% en hiver. Les amplitudes thermiques sont importantes et les températures varient entre -5°C en hivers et $+45^{\circ}\text{C}$ en été.



Figure 1.1 : Situation géographique de SH Hassi R'mel.

II.2 - Historique :

L'aventure de l'exploration pétrolière en Algérie remonte au dernier quart du 19^{ème} siècle, avec les premières explorations dans le Nord, en 1877, dans la région d'Ain Zeft, près de Relizane, dans l'Ouest de l'Algérie.

Depuis, le potentiel en hydrocarbures de l'Algérie, n'a cessé de montrer ses richesses, à travers son développement dans le Sahara et aujourd'hui dans le Nord, avec les promesses offertes par l'exploration, qui trouve un nouvel élan dans cette région.

Cette histoire des hydrocarbures en Algérie est résumée comme suit :

- La première campagne géophysique intéressant la région était en 1951.
- Après une année (1952) le forage du premier puits d'exploitation à quelques Kilomètres de Berriane mit en évidence la présence d'un trias grasseux qui ressentait toutes les caractéristiques d'un excellent réservoir recouvert d'un trias salifère pouvant jouer le rôle de couverture.

- En 1956 sondage de HR1 à une dizaine de kilomètres à l'est du point d'eau de SH Hassi R'mel .La profondeur 2132 m fut atteinte et révéla la présence d'un réservoir du gaz humide sous une forte pression .Le puit HR1 venait d'être implanté sur le sommet de l'anticlinal, hypothèse vérifiée par la sismique de la même période.

Les forages qui suivirent confirmèrent l'existence d'un important anticlinal et permirent d'étudier avec plus de précision les niveaux géographiques ainsi que les caractéristiques de l'effluent.

1957-1960: Furent forés HR2, HR3, HR9 .Le gisement de HR a commencé à produire en 1961.

Le réservoir de HR présente une forme elliptique orienté sud ouest/ nord est. Il s'étend sur une superficie d'environ 3500 Km² (80 Km du nord au sud et 50 Km d'est en ouest). Les réserves trouvées en place sont évaluées à plus de 2800 milliards m³.

II.3 - Développement :

Le développement du champ HASSI R'MEL s'est trouvé étroitement lié au développement de l'industrie du gaz dans le monde et les importantes réserves recelées par ce gisement, plus de 2000 milliards de m³ ont constitué un atout important pour lancer une politique d'industrie gazière de grande envergure pour le pays.

Trois étapes importantes ont marqué le développement du champ HASSI R'MEL :

1^{ère} étape : 1961 réalisation d'une petite unité de traitement de gaz de 1,3 milliards de m³/an. Cette réalisation a coïncidé avec la construction de la première usine de liquéfaction de gaz, en 1964.

2^{ème} étape : La capacité de traitement du champ de HASSI R'MEL atteint, après les nationalisations des hydrocarbures en 1971, 14 milliards de m³/an.

3^{ème} étape : 1975-1980 : Cette période a permis de concrétiser un plan de développement qui concerne l'ensemble du champ de HASSI R'MEL.

II.4 - Répartitions des installations de SH Hassi R'mel :

Pour une exploitation rationnelle et pouvoir récupérer le maximum de liquide du gisement de gaz, les unités de traitement et de compression de la région de Hassi R'mel sont réparties en trois secteurs étalés sur toute la superficie:

Secteur Nord : regroupe :

- Module 3 : unité de traitement de gaz.
- SCN : station de compression nord.

Secteur Centre : regroupe :

- Module 0 : unité de traitement de gaz.
- Module 1 : unité de traitement de gaz.
- Module 4 : unité de traitement de gaz.
- CSTF : centre de stockage, de transfert et de facilité.

Secteur Sud : regroupe :

- Module 2
- CTG Djebel Bissa
- CTG Sud
- SCS : station de compression sud.

Les cinq modules de traitement de gaz (0, 1, 2, 3, et 4) sont disposés d'une manière alternée par rapport aux deux stations de compression tel que présenté sur la figure I.2 ci-dessous



Figure 1.2 : Répartition du champ gazier de HASSI R'MEL.

III - DESCRIPTION DE MODULE 1 (MPP1)

Le terme module est un diminutif de (module processing plan) il désigne une usine de traitement de gaz naturel à l'échelle industrielle.

Le MPP1 est un ensemble d'installations qui permettent de récupérer les hydrocarbures lourds (condensât et GPL) des gaz bruts recueillis à partir de nombreux puits, et de produire des gaz traités.

Le MPP1 se compose de trois lignes ou trains de capacité $20 \cdot 10^6$ m³ /j chacune. Chaque ligne comporte les mêmes équipements de process et sont de même capacité.

Ce process est caractérisé par l'utilisation du VANNE JOULE THOMSON qui a pour fonction de récupérer l'énergie qui se produit, lorsqu'un gaz à haute pression passe à travers la turbine de détente, ce fluide étant détendu d'une façon isentropique permet d'abaisser la température du gaz au-dessous de celle obtenue par une détente adiabatique dans la vanne Joule Thomson, ce qui permet de récupérer les hydrocarbures liquides en plus grande quantité.

Le process du traitement de gaz au module MPP1 se divise en trois parties :

- Le train
- Les auxiliaires
- Les utilitaires



Figure 1.3 : module 1 (MPP1)

Aujourd'hui, la gestion de la maintenance s'est considérablement développée. D'énormes efforts sont engagés dans la maintenance des installations imposant de nouvelles approches. Il a été aussi démontré que la durée de vie des équipements et leurs taux de disponibilité dépendent essentiellement des programmes de maintenance appliqués, dans ce chapitre nous allons parler des différents types de maintenance et les critères de choix.

I. LA MAINTENANCE:

D'après la norme **AFNOR X60-010**, 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".[7]

Donc maintenir c'est effectuer des opérations (réparations, inspections, révisions, etc.) permettant d'assurer la continuité de la qualité de production, en conservant le potentiel du matériel.

II. BUT ET OBJECTIFS DE LA MAINTENANCE:

La maintenance à pour but :

- assurer la continuité de marche de l'outil de production (diagnostic, réparation, révisions et prévention),
- faire les modifications demandées en accord avec la production pour améliorer la productivité ;
- mettre en place et vérifier les dispositifs de sécurité tant pour le personnel que pour les installations.

L'objectif principal est d'améliorer la disponibilité de l'équipement de production par :

- Une diminution des pannes et défaillances et augmenter ainsi la fiabilité des équipements;
- La mise en place d'un système de suivi des indicateurs de performances, notamment la disponibilité des équipements;
- Améliorer la qualité du service par la mise en place de relation de type Client/Fournisseur entre la production et la maintenance;
 - Diminuer les coûts de maintenance par un suivi rigoureux de tous les paramètres, qui y entrent (main d'œuvre, matières ...).

III. FONCTION DE LA MAINTENANCE :

La fonction maintenance peut être considérée comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles: les activités à dominante technique et les activités à dominante de gestion. [3]

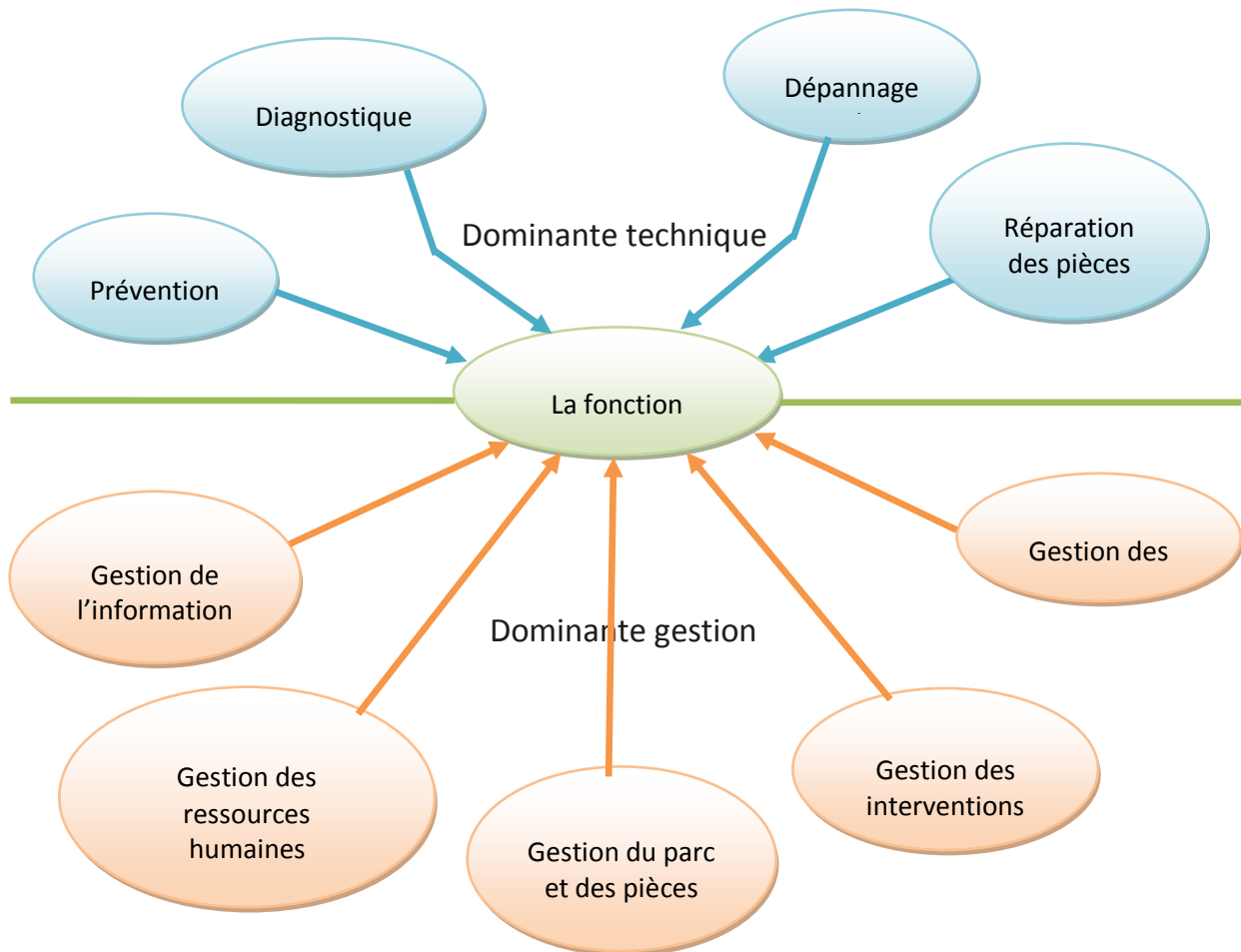


Figure 2.1 : les différentes tâches contenues dans la fonction maintenance

Chacune de ces composantes est constituée de tâches bien précises dont certaines sont assurées par plusieurs sous-fonctions. Pour simplifier nous désignerons les sous-fonctions par fonctions, c'est ainsi que nous pouvons distinguer les fonctions :

- La fonction Préparation.
- La fonction Ordonnancement.
- La fonction Réalisation.
- La fonction Gestion du Service Maintenance.

IV. TYPES DE MAINTENANCE :

D'après la norme AFNOR X60-011, il existe quatre types essentiels de la maintenance, Figure2.2.

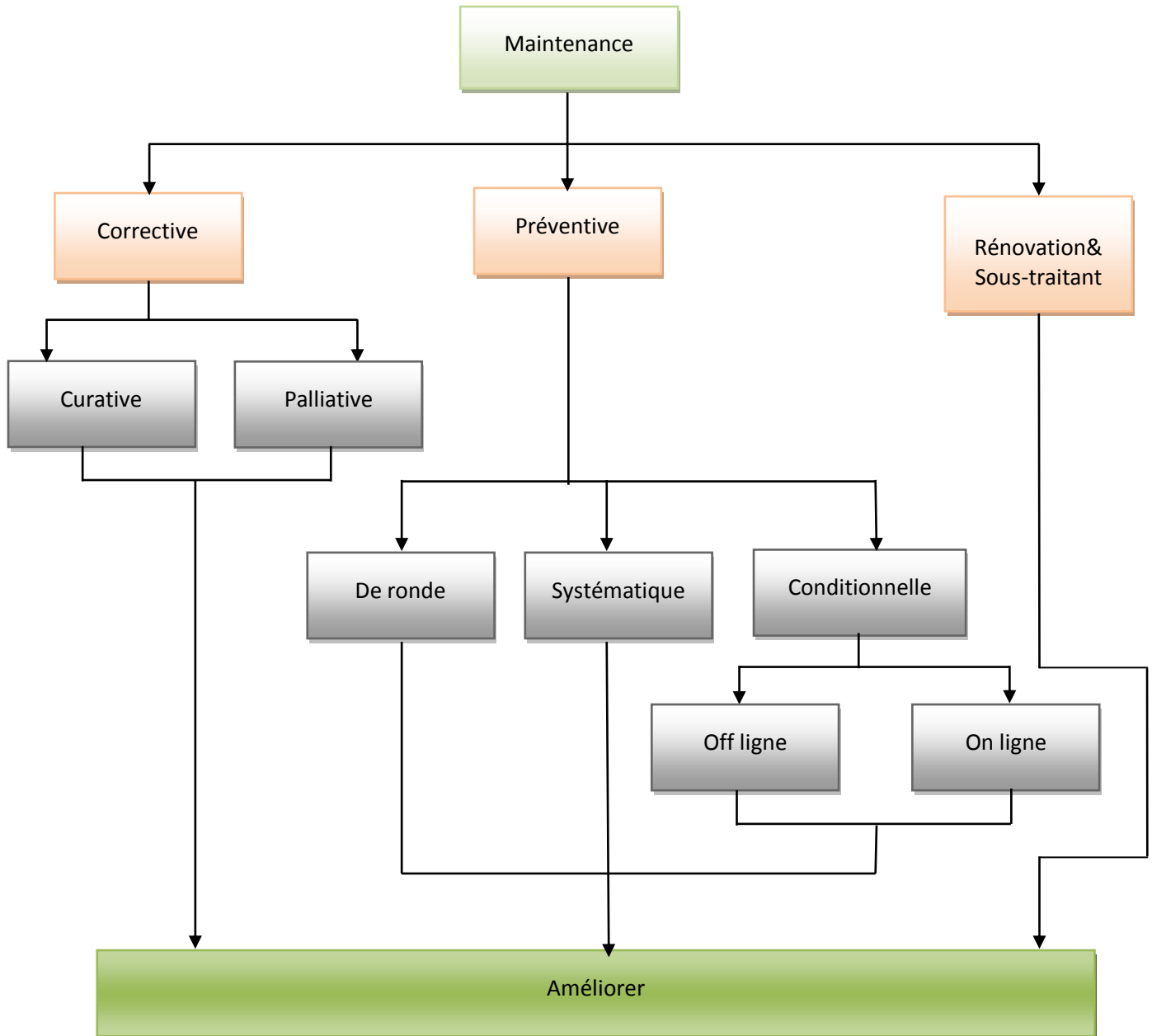


Figure 2.2 : Différents types de la maintenance

IV - 1 La maintenance corrective :

D'après la norme **AFNOR X60-010** la maintenance corrective est l'opération de maintenance effectuée après défaillance, ce type de maintenance vise à intervenir à la suite d'une défaillance, « curative » ou « palliative ». [7]

IV-1.1 Maintenance curative

Maintenance réalisée suite à un dysfonctionnement de l'équipement. Elle consiste à le remettre en état de fonctionnement en procédant à des réparations complètes.

Elle conduit à des actions de diagnostic permettant d'identifier les causes de la panne ou défaillance et de préciser les opérations de maintenance nécessaires pour la remise en état.

Ces opérations peuvent être: une rénovation ou une révision (dans certains cas).

IV-1.2 Maintenance palliative

C'est la maintenance qui permet de remettre en état de fonctionnement un équipement de façon provisoire. Elle est effectuée dans des conditions extrêmes et imposée par l'une des situations suivantes:

- Un manque de pièces de rechange pour effectuer les travaux de réparation nécessaires;
- Des contraintes de production à satisfaire, ne permettant pas d'avoir suffisamment de temps pour intervenir ;
- Un manque de compétences capables d'exécuter les travaux.

C'est une maintenance dans laquelle on tente seulement d'agir sur les effets sans se préoccuper des causes qui les produisent. Par conséquent elle ne permet pas d'éviter une répétition de certains types de pannes.

IV - 2 La maintenance préventive :

D'après la norme **AFNOR X60-010** c'est une maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un système, d'un bien ou d'un service rendu, c'est une maintenance prévue, préparer et programmer avant la date probable d'apparition d'une défaillance. [7]

Elle vise les principaux objectifs suivants:

- Augmenter la fiabilité d'un équipement, donc réduire les défaillances en service : réduction des coûts de défaillance, amélioration de la disponibilité
- Augmenter la durée de vie d'un équipement.
- Améliorer l'ordonnancement des travaux, donc les relations avec la production.
- Réduire et régulariser la charge de travail.
- Faciliter la gestion des stocks (consommations prévues à l'avance).
- Assurer la sécurité (moins d'improvisations dangereuses).
- Plus globalement, réduire la part du « fortuit », améliorer le climat des relations humaines (une panne imprévue est toujours génératrice de tensions).
-

IV-2.1 La maintenance systématique

C'est une maintenance effectuée selon un échéancier établi suivant le temps et le nombre d'unité d'usage.

Le but de cette maintenance est de maintenir le bon fonctionnement de l'équipement en procédant aux opérations suivantes :

IV-2.1.1 Le remplacement :

C'est le remplacement lors de la révision, des organes usées, des huiles, des filtres des joints d'étanchéité, des ressorts...

IV-2.1.2 Le réglage :

C'est le réglage des différents jeux de glissières, des tensions de courroies, des pressions et températures,...

IV-2.1.3 le contrôle :

Contrôler les divers blocages, les niveaux d'huile,...

IV-2.1.4 Inspection :

Vérification des côtes de pièce de l'équipement, si elles sont récupérables ou non.

IV.2.2 La maintenance de ronde

C'est une maintenance effectuée par la surveillance des équipements.

IV-2.3 La maintenance conditionnelle « prédictive »

D'après la norme **AFNOR X60-010** la maintenance conditionnelle se définit par 'l'autodiagnostic', l'information d'un capteur caractérisé par les mesures « vibration et bruit, huile, température ... », [7]

IV-2.3.1 L'analyse vibratoire :

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations, en surveillant le niveau de vibrations, il est par conséquent possible d'obtenir une information sur l'état de fonctionnement de la machine.

IV-2.3.2 Analyse des températures :

Une variation de température sur une machine est souvent signe d'une dégradation donc l'analyse de température des équipements peut permettre de prévenir une panne (on peut faire un bon diagnostic).

IV-2.3.3 Analyse des huiles :

Le renseignement le plus important provient de l'examen des particules en suspensions dans l'huile, et en faisant l'analyse de ces particules on peut savoir l'état de dégradation des pièces de la machine (usure).

IV-2.3.4 L'ampérage :

L'ampérage est un indicateur de surveillance très important. En effet, l'ampérage augmente quand la machine couplée développe un couple résistant supérieur au couple nominal, par exemple, frottement de roulement défectueux, courroie trop tendue...etc.

La maintenance prédictive permet de :

* Diminuer le temps de réparation par le diagnostic et la localisation des anomalies plus possible en phase de marche.

* Eliminer les arrêts et les démontages inutiles et nocifs.

* Augmenter la durée accumulée d'usage.

* Assurer une caractéristique de disponibilité.

Il existe deux types de maintenance prédictive.

IV-2.3.a -Maintenance prédictive On Line :

C'est un mode de maintenance prédictive ou il est conçu pour faire de la surveillance installée dans une salle de contrôle pour permettre l'arrêt automatique des machines. Cette méthode coûte cher, elle est utilisée que pour les équipements stratégiques, Figure 2.3.

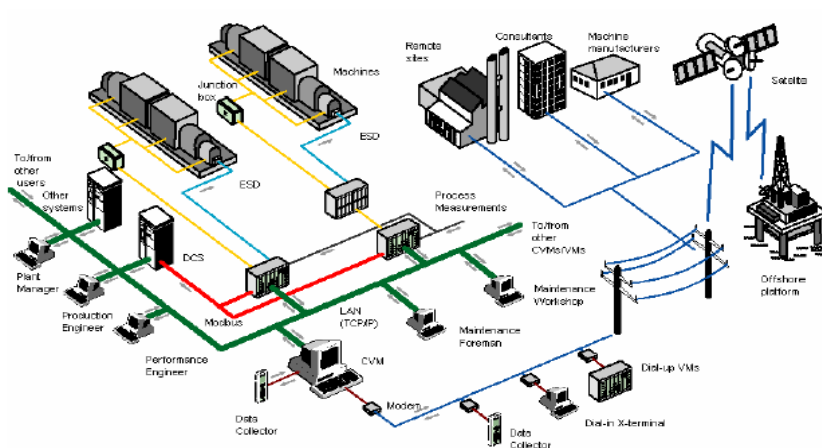


Figure 2.3 : Maintenance prédictive on line

IV-2.3.b - Maintenance prédictive Off Line :

C'est le deuxième mode de la maintenance prédictive, il est conçu pour faire des contrôles assistés par des appareils portables Figure 2.4.

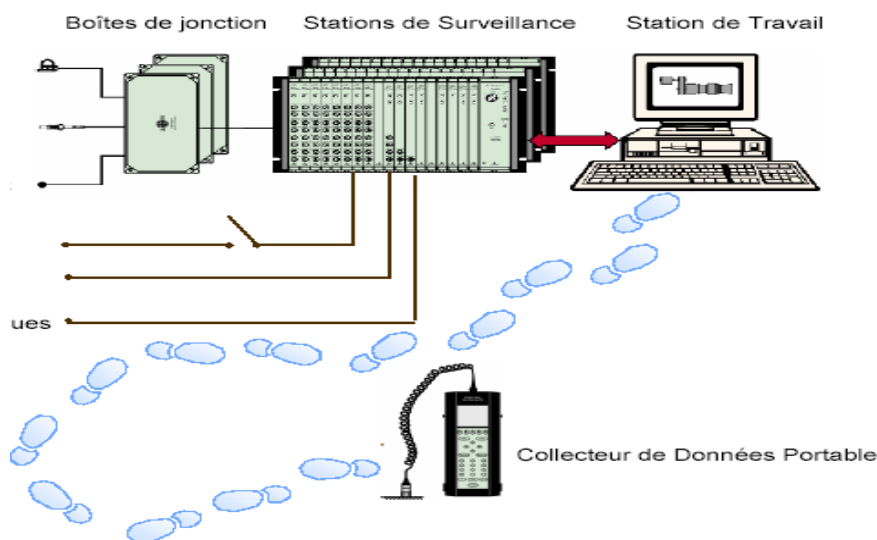


Figure 2.4 : Maintenance prédictive off line

V. TECHNIQUES DE MAINTENANCE UTILISEES AU NIVEAU DU MPP I:**V - 1 Suivi du paramètre vibratoire :****V-1.1 Vibrations**

On désigne par vibration la variation dans le temps d'une grandeur quelconque. Il existe de nombreux exemples, qu'ils soient artificiels ou naturels, pour lesquels on observe un tel phénomène de va-et-vient autour d'une position de repos.

En fait, un système mécanique est dit en vibrations lorsqu'il est animé d'un mouvement de va -et -vient autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre.

Le niveau vibratoire est un des paramètres essentiels de la maintenance conditionnelle, ce paramètre est le plus significatif de l'état de dégradation d'une machine tournante. L'augmentation de celui-ci est révélateur de la dégradation de l'état de cette machine.

L'étude vibratoire des machines se fait par le mesurage de l'intensité vibratoire, pour ce mesurage d'intensité vibratoire, il faut connaître les paramètres suivants:

V-1.2 Paramètres vibratoires

Ce chapitre fait appel à un vocabulaire qu'il convient de définir au préalable la Figure2.5

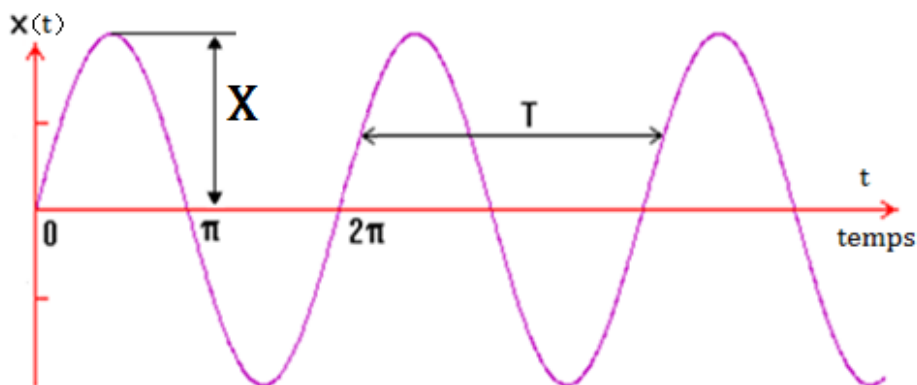


Figure 2.5 : Grandeurs vibratoires

V-1.2.1. Variable $x(t)$:

C'est la valeur instantanée de la grandeur considérée.

V-1.2.2. Amplitude (X) :

C'est la valeur de ces écarts par rapport au point d'équilibre d'une onde vibratoire. Elle est la plus grande valeur que la variable $x(t)$ puisse prendre.

V-1.2.3. Période :

C'est l'intervalle de temps au bout duquel la variable $x(t)$ reprend la même valeur dans la même direction.

V-1.2.4. La fréquence :

Est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en Hz.

Tout simplement c'est le nombre de période par unité de temps.

$$f = 1/T \quad [\text{Hz}]$$

1 Hz = 1 cycle/seconde

V-1.2.5. Pulsation :

Appelée aussi vitesse angulaire, et se représente par la formule suivante :

$$\omega = 2\pi f \quad [\text{Rd/s}]$$

V-1.2.6. Résonance :

On dit qu'il y a une résonance lorsque la fréquence propre d'un système (palier, capteur, etc..) entre en concordance avec la fréquence d'une force d'excitation et l'amplitude augment considérablement.

V-1.2.7. Phase φ :

La phase est représentative du temps qui s'écoule entre une référence que l'on se donne et l'instant que l'on considère.

La notion de phase n'a de signification que pour une vibration harmonique.

$$\left. \begin{array}{l} \text{à } t = 0 \\ \text{à } t = T \end{array} \right\} \begin{array}{l} \varphi = 0 \text{ rad} \\ \varphi = 2\pi \text{ rad} \quad (\text{ou } 360) \end{array}$$

V-1.3 Modes de détection

En mesure vibratoire, on utilise couramment trois modes de détection figure 2.6

- Valeur efficace
- Valeur crête
- Valeur crête à crête

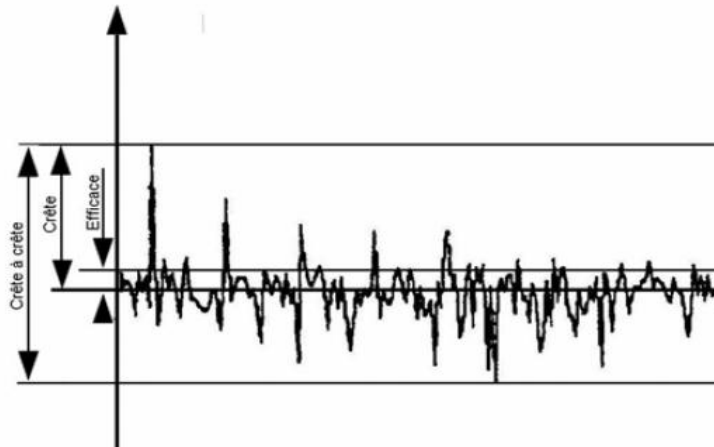


Figure 2.6 : Modes de détection usuels

V-1.3.1 Valeur efficace X_{eff} :

Pour une vibration périodique, la valeur efficace est la moyenne quadratique des valeurs efficaces de chacune des vibrations harmoniques :

$$X_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt}$$

On choisira de faire une mesure efficace lorsque l'on cherchera à apprécier l'énergie mise en jeu dans la machine (effet de la moyenne quadratique).

Dans la littérature, X_{eff} peut également être notée X_{rms} (rms=rootmeansquare)

V-1.3.2 Valeur crête X_c :

La valeur crête d'une vibration est la valeur maximale prise par la variable $x(t)$ dans l'un des sens positif ou négatif.

Dans la littérature, X_c peut également être notée X_p (peak).

V-1.3.3 Valeur crête à crête :

La valeur crête à crête d'une vibration est la somme des deux valeurs crête pour les sens positif et négatif.

On choisira de faire des mesures crête ou crête à crête lorsque l'on cherchera à apprécier les contraintes maximales subies par la machine.

Dans la littérature, X_{cc} peut également être notée X_{pp} (peak to peak).

V-1.4 Grandeurs de mesure

Une vibration mécanique peut être mesurée selon les trois grandeurs suivantes :

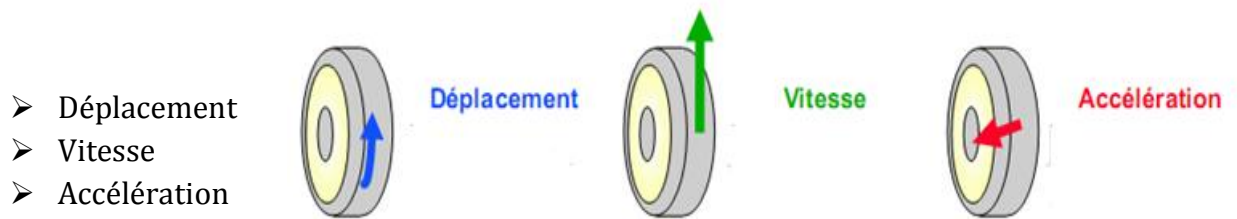


Figure 2.7 : Grandeurs de mesure

V-1.4.1 Déplacement vibratoire $x(t)$:

On décrit le déplacement $x(t)$ d'une vibration par l'équation suivante :

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

V-1.4.2 Vitesse vibratoire $v(t)$:

La vitesse $v(t)$ de cette vibration s'obtient par dérivation de l'équation suivante :

$$v(t) = \frac{d(x)}{dt} = X \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

$$v(t) = X \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \varphi + \pi/2)$$

$$v(t) = V \cdot \sin(\omega t + \varphi + \pi/2)$$

V-1.4.3 Accélération $a(t)$:

L'accélération $a(t)$ de cette vibration s'obtient par dérivation de l'équation suivante :

$$a(t) = \frac{d(v)}{dt} = V. \omega. \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$a(t) = A. \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$a(t) = -A. \sin(\omega t + \varphi)$$

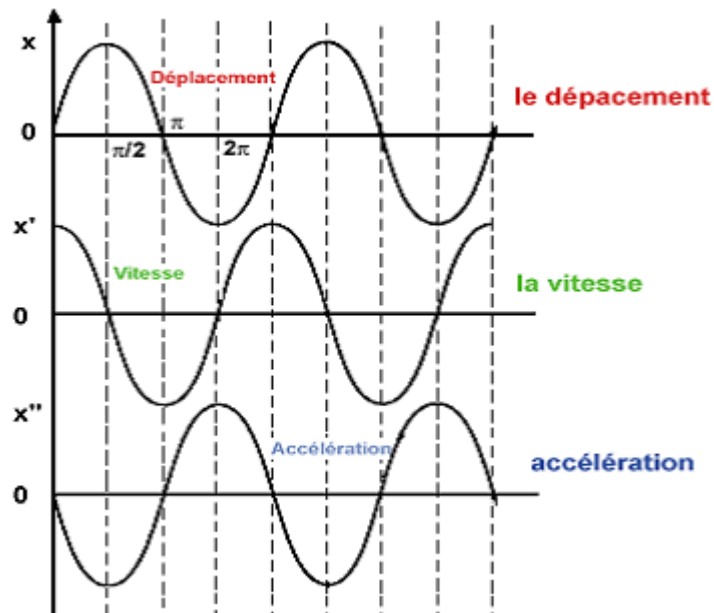


Figure 2.8 : Présentation des grandeurs de mesure

V-1.5 Méthodes de suivi des vibrations

Il existe deux méthodes pour le suivi vibratoire des machines tournantes :

V-1.5.1 Méthodes du niveau global :

Elle consiste à prendre des mesures périodiques de la valeur efficace de vibrations et de les comparer au seuil de jugement préconisé par les normes.

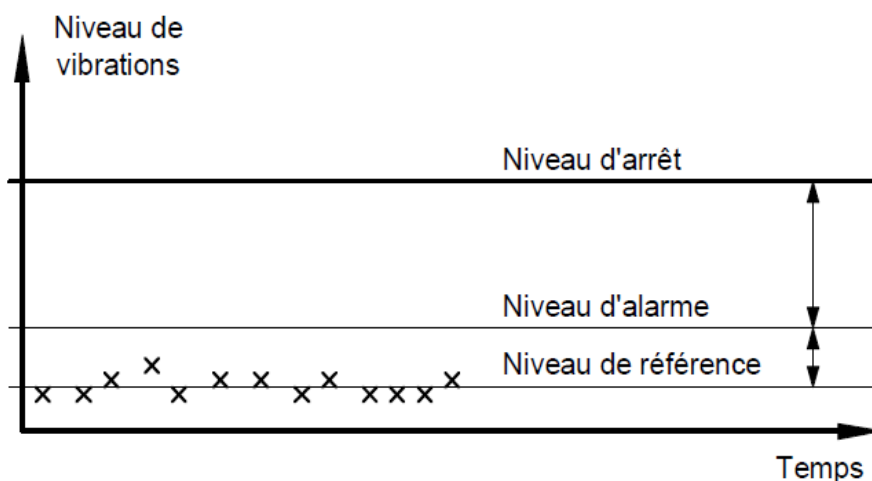


Figure 2.9 : détermination des seuils par la méthode du niveau global

V-1.5.1.1 vibration des paliers :

Cette méthode consiste à contrôler le niveau de vibrations des paliers, c'est à dire effectuer des mesures de vibrations, axiales et radiales (horizontale et verticale) de la valeur efficace de vitesse de vibration V_{eff} .

Une fois la vitesse efficace est déterminée, le jugement se fait par comparaison avec les valeurs limites indiquées par les normes **AFNOR E90.300, ISO.2372**.

GROUPE DE MACHINES	SEUILS DE JUGEMENT (V_{eff}) [mm/s]				
	Groupes ISO	Puissance [KW]	Bon	Admissible	Encore Admissible
I	< 15	< 0.7	0.7 à 1.8	1.8 à 4.5	> 4.5
II	15 à 75	< 1.1	1.1 à 2.8	2.8 à 7.1	>7.1
III	> 75	<1.8	1.8 à 4.5	4.5 à 11	> 11
IV	Turbo-générateur	<2.8	2.8 à 7.1	7.1 à 18	> 18

Figure 2.10 : Tableau de seuils de jugement selon: AFNORE90.300, ISO.2372

Le passage des billes, sur un défaut se traduit par des chocs, qui sont transmis à la coquille du roulement, donc il existe une vibration. Cette vibration est détectée par un capteur relié a un appareil dit "**vibroport**".

Les vibrations sont traduites dans le vibroport par des valeurs exprimées en BCU (**Bearing Condition Unit**). Il faut faire des mesures dans des points différents, pour permettre de bien diagnostiquer.

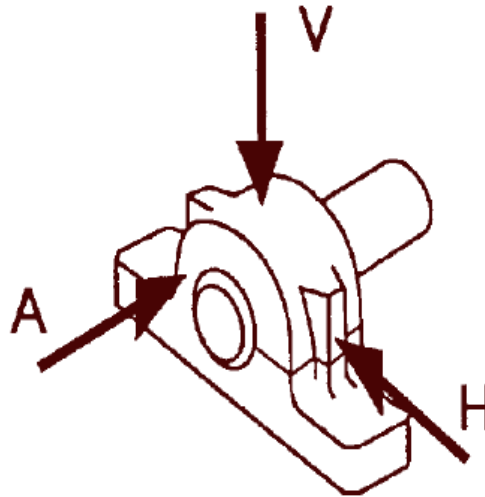


Figure 2.11 : Position de mesure

Il existe deux méthodes pour l'exploitation des mesures :

V-1.5.1.2.a. Méthodes des tendances :

C'est la comparaison dans le temps des mesures sur une seule machine, dans les mêmes conditions.

Des mesures à intervalles de temps réguliers sur une machine intact au début de la durée de vie de la machine, si possible, permettent de déterminer le niveau de référence d'un roulement. Dès que l'on mesure une variation significative du BEARCON, on peut s'attendre à une détérioration imminente du roulement.

Il est recommandé de suivre les cycles suivants :

i. Cycle de référence :

Durant ce cycle, on procède à de nombreuses mesures sur une durée de quelques jours. On détermine ainsi la limite tolérable de la valeur de référence.

ii. Cycle de surveillance normale :

A intervalles de temps réguliers, on mesure la valeur du BEARCON. Si on ne détecte pas des variations significatives, on peut en déduire que le roulement est en bon état.

iii. Cycle de surveillance intensive :

Si on observe une augmentation sensible du BEARCON. Il convient de raccourcir les intervalles de mesures.

V-1.5.1.2.b. Méthode de comparaison :

C'est la comparaison à un temps des mesures faites dans les mêmes conditions sur un groupe de machines identiques.

Pour la méthode de comparaison, on fait des mesures sur un groupe des machines identiques, si les mesures faites sur certaines machines divergent de la valeur moyenne, elles peuvent être significatives d'un défaut sur le roulement.

La méthode de comparaison permet, par opposition à la méthode des tendances, d'obtenir rapidement des valeurs de référence fiables. On peut ainsi rendre plus sûr la surveillance de la machine dès le début.

V-1.5.2.Méthode de l'analyse en fréquences:

La mesure de la valeur permet de savoir si le comportement vibratoire d'une machine dépasse les limites admissibles, mais il est difficile de détecter les causes et les excitateurs de vibrations. Ces informations sont obtenues par l'analyse fréquentielle.

Donc le rôle de l'analyse en fréquence est de déterminer par la mesure des amplitudes vibratoires unitaires et les fréquences angulaires associées, dont les résultats sont représentés dans un spectre.

Pour l'interprétation des résultats, le tableau qui suit, donne un aperçu sur les causes possibles de vibrations.

L'étape qui suit l'analyse est la neutralisation de la vibration, c'est à dire l'élimination ou la réduction de la composante vibratoire en cause. A ce stade, il faut d'abord s'intéresser aux excitateurs qui produisent les amplitudes vibratoires les plus élevées et qui influent donc de façon significative sur la stabilité de la machine.

Les composantes les plus petites peuvent souvent être négligées, d'autant qu'à l'expérience, il est prouvé que leur élimination engendre un surcoût important.

La réduction de la vibration est nécessaire jusqu'à ce que la sévérité vibratoire de la machine se situe dans les limites admissibles.

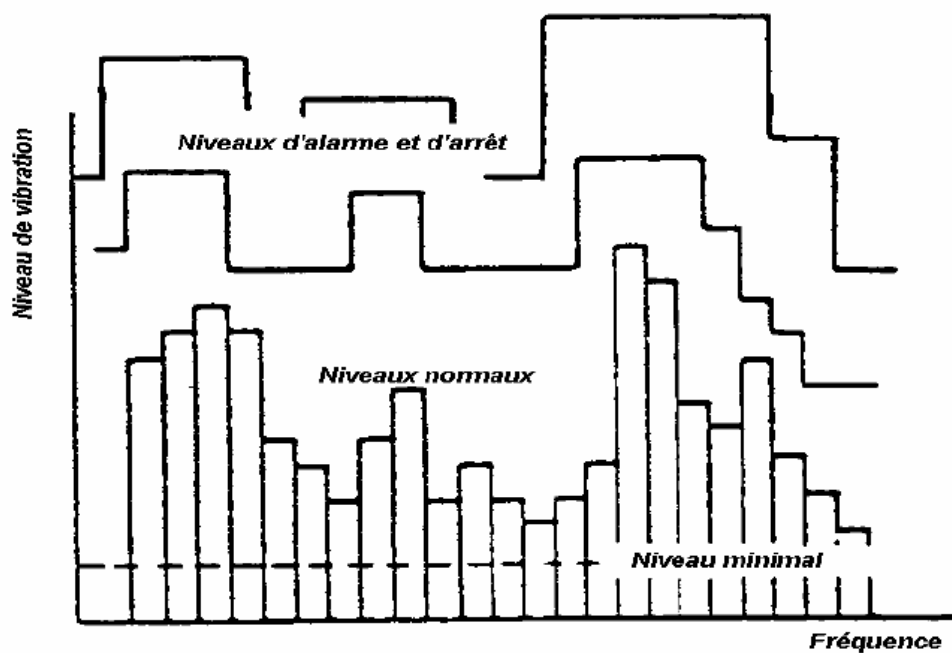


Figure 2.12 : détermination des seuils en analyse spectrale

Il existe deux méthodes de mesures requises pour la surveillance de l'état de la machine :

V-1.5.2.a Surveillance permanente :

Cette méthode consiste à installer sur des machines stratégiques des capteurs de vibrations. Ces capteurs sont reliés à un système asservi de sécurité, en cas de variation brusque, l'alimentation de la machine sera déclenchée automatiquement.

V-1.5.2.b Surveillance périodique (utilisation du portable "vibroport") :

La méthode de surveillance permanente est plus efficace, mais elle coûte très cher, donc pour les machines non stratégiques on utilise la surveillance périodique.

Cette surveillance consiste à réaliser des mesures dans des points différents, on utilise le vibroport. Cet appareil permet l'instauration d'un suivi économique et très efficace, et élaborer une banque de données des mesures de vibrations.

La transmission des vibrations des parties tournantes d'une machine s'effectue à travers les paliers (paliers lisses ou paliers à roulement), donc les meilleurs points de mesurage sont ces paliers.

V - 2 Suivi du paramètre température :

Il est très important de suivre les paramètres de température d'un équipement carce suivi permet de détecter certains problèmes.

Les principales applications de ce paramètre sont le suivi de :

- * la température de l'huile des paliers.
- * la température de la coquille des paliers.
- * la température des bobinages des machines électriques.

Il existe deux systèmes de mesures :

V-2.1 Surveillance permanente :

La plus applicable au module I, surtout pour les paliers des pompes horizontales.

V-2.2 Surveillance périodique :

Elle n'est pas appliquée au niveau du module I, elle consiste à faire systématiquement des relevées de température à l'aide d'un appareil muni d'un capteur.

+ Seuil de jugement :

Plusieurs facteurs influent sur les différentes températures d'une machine, on site :

- La charge appliquée.
- Les contraintes.
- La lubrification.
- Le site de la machine.
- La conception de la machine.

+ La thermographie :

L'analyse thermographique est une mesure thermique, permet de connaître la répartition spatiale et l'évolution temporelle des températures sur un équipement. Elle permet de détecter tout échauffement anormal et principal sur les parties actives(sous tension) des équipements électriques.

V - 3 L'analyse des huiles :

L'analyse des huiles est un des plus importants paramètres de la maintenance prédictive. Elle détecte les traces de matériaux dans l'huile, alors on peut prendre connaissance des parties usées de l'équipement.

L'analyse des huiles peut éviter 70% des pannes du système de lubrification qui, pour la plupart du temps sont dues à la pollution des lubrifiants.

VI. GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur) :

La gestion des équipements de production de Hassi R'mel est assisté par ordinateur. Le MMS (maintenance management system), gère depuis 1983 ces équipements. Depuis, la GMAO évolua et un nouveau progiciel de gestion de maintenance fut installé (1997). Ce produit appelé **RAPIER.5** couvre l'ensemble des fonctionnalités du MMS. Son architecture est basée essentiellement sur la distribution des traitements entre les postes dits (clients) et les machines dites (Serveurs). Les toutes repose sur des réseaux qui relient client et serveur. Le **RAPIER.5** est structuré en modules :

VI - 1 Module Base:

C'est un module réservé à l'administration de la base de données. Il permet de définir les différents profils d'utilisation, de fixer les paramètres système du **RAPIER.5**, d'introduire les classes équipements, les classes de pièces, les comptes analytiques,...etc.

VI- 2 Module Asset :

C'est un module qui est destiné à la gestion efficaces des entrées sur lesquelles on utilise une maintenance.

VI - 3 Module stock :

C'est un module destiné à la gestion et l'analyse des stocks, à l'établissement et au suivi des requêtes d'achat, réception des marchandises et inventaire.

VI - 4 Module Work :

C'est le module le plus utilisé par les services de maintenances. Il permet :

- L'élaboration des travaux au personnel.
- L'estimation du personnel nécessaire aux opérations de maintenance.
- La planification du préventif en vue de l'exploitation optimale des équipements.
- La préconisation de la pièce de rechange.

Pour effectuer les opérations préventives, chaque samedi on programme deséquipements, mais l'ordre de travail ne sera déclenché qu'après l'accord commun duchef de section et du technicien préparateur, ainsi que l'accord de la sécurité et l'exploitation.

Donc le **RAPIER.5** est une banque de données concernant toutes les informations relatives aux équipements, ces données sont regroupées dans un fichier qui représente : les caractéristiques techniques, l'historique des équipements, ordre de travail, norme de maintenance, planification, pièces de rechanges, etc.

VII. CONCLUSION

Un meilleur préventif implique moins d'intervention corrective, donc moins d'arrêt intempestif des lignes de production. Cependant, il suppose une organisation adéquate, une planification précise et la connaissance des défaillances possibles des installations. Chaque intervenant doit avoir comme préoccupation majeure.

Les opérateurs de production sont impliqués dans la maintenance tandis que les agents de maintenances, assurent de plus en plus de tâches de maintenance préventive tout en effectuant des réparations efficaces et fiables. Le travail des techniciens d'intervention et de méthode vise à l'amélioration constante de la maintenance par la mise en place de méthodes élaborées en petit comité. La formation a également un rôle à jouer.

L'outil informatique s'est imposé dans cette démarche d'amélioration. La sous-traitance implique de nombreuses contraintes et son coût économique exact doit être déterminé.

La maintenance n'est pas un processus mineur de l'entreprise, mais un processus essentiel. De nombreux dysfonctionnements observés dans d'autres fonctions prennent leur origine dans ce processus. Fort de cette certitude, la citation suivante prend alors tout son sens : " quand la maintenance tousse, c'est toute l'entreprise qui s'enrhume ! " .

Chapitre II

Maintenance

Chapitre III

Notions sur la Thermographie Infrarouge

Chapitre 3 Notions sur la Thermographie infrarouge

I- INTRODUCTION :

Aussi loin que l'on remonte dans l'histoire pour protéger sa vie et ses biens, l'homme tente toujours d'opposer un moyen de protection et de détection d'une anomalie qui peut intervenir dans une installation, ou d'un procédé de fabrication, dans la plus part des cas ces moyens sont aménagés de façon à détecter et éliminer l'anomalie puisque il n'a pas le pouvoir de détériorer son système, ou équipement.

Il est à noter que les méthodes appliquées pour faire face à une anomalie qui détériore une installation ne sont pas les mêmes aujourd'hui surtout quand il s'agit d'objets ou de sites exposés aux dangers (par exemple un champ gazier).

Notre projet consiste à étudier une nouvelle méthode de détection des anomalies dite la **thermographie infrarouge** et les éviter avant qu'elles interviennent ce qui la place dans le domaine de maintenance prédictive, et cette nouvelle technique est mise en œuvre pour protéger un site gazier, ce dernier est exposé aux risques des défauts qui peuvent causer des dangers (incendie, détérioration des instruments par des défauts thermique etc.).

II- BREFS RAPPELS HISTORIQUES :

L'utilisation de la thermographie infrarouge en mécanique est assez récente, en 1800, l'astronome William Herschel est le premier à découvrir que la lumière n'est pas toujours visible à l'œil nu. Au cours d'une expérience d'optique, Herschel fait passer de la lumière solaire blanche à travers un prisme de façon à la décomposer en rayons lumineux de différentes couleurs. À l'aide d'un thermomètre, il mesure ensuite la température de chacune des couleurs produites et constate que celle-ci augmente du bleu vers le rouge.

Poussant plus loin son expérience, l'astronome a alors l'idée de placer son thermomètre juste après les rayons de couleur rouge, là où aucune lumière n'est visible. À sa grande surprise, il mesure alors la température la plus élevée. Il vient ainsi de prouver qu'il existe de la lumière qui ne peut être vue par les yeux juste au-delà de la lumière rouge : c'est la lumière infrarouge.

En 1880, le chimiste William de Wiveleslie Abney est le premier à prendre une photographie infrarouge.

Sachant que l'atmosphère terrestre absorbe une partie de la lumière infrarouge provenant de l'espace, certains astronomes (amateurs et professionnels) commencent, dans les années 1930, à collecter des données en vol.

En 1942, la compagnie Eastman Kodak brevète la première pellicule sensible à l'infrarouge produisant des photos en « fausses couleurs ». La première caméra infrarouge pour usage industriel est, quant à elle, mise en marché en 1968 par la compagnie suédoise AGA; on l'utilise pour trouver des défauts dans les lignes électriques.

Aujourd'hui, les évolutions technologiques des caméras, permettent de réaliser des clichés infrarouges haute définition, grâce aux caméras infrarouge d'une extrême définition et sensibilité.

III- NOTIONS DE BASE EN THERMODYNAMIQUE :

Les notions de température et de chaleur restent souvent mal comprises et sont utilisées à tort comme des synonymes. Nous nous efforcerons de définir de manière précise et univoque ces deux termes afin d'éviter toute confusion. Ces définitions pourront également s'avérer utiles si vous envisagez une carrière de thermographe.

III-1 Notions de température, chaleur :

Afin de comprendre la température et la chaleur, nous devons regarder les molécules qui sont les blocs fondamentaux dont toute matière est constituée. Ces molécules d'une substance sont toujours plus ou moins en mouvement (aléatoire).

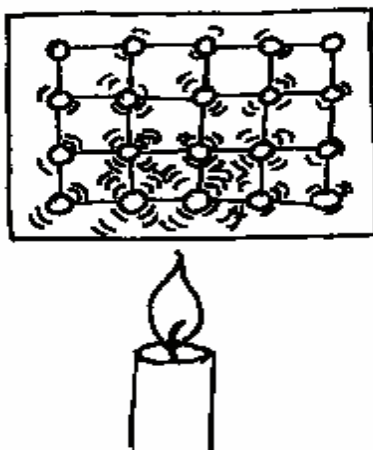


Figure 3.1 : Plus la température des molécules est élevée, plus celles-ci se déplacent vite

Les molécules chaudes se déplacent plus rapidement que les molécules froides. Pour une substance donnée, la vitesse aléatoire moyenne des molécules correspond au niveau de la température.

La substance contient également une certaine quantité de chaleur.

III-1-1 Chaleur :

La chaleur est l'énergie associée à la quantité de molécules et d'atomes qui constituent la matière, et qui sont affectés d'une certaine vitesse moyenne aléatoire.

Elle est créée par la conversion d'autres formes d'énergie, comme par exemple la combustion d'un carburant, le mouvement ou la friction.

Lorsqu'une bûche se consume, une réaction chimique se produit impliquant la matière combustible de la bûche et l'oxygène contenu dans l'air.

Chapitre 3 Notions sur la Thermographie infrarouge

Ce processus libère de la chaleur. En fait, la plupart des procédés de fabrication industriels et ceux de la vie courante impliquant une conversion énergétique produisent de la chaleur.

Un objet peut contenir de la chaleur ou de l'énergie thermique.

La chaleur et l'énergie sont par exemple mesurées en :

- joule (J)
- watt seconde (Ws) ou kilowatt heure (kWh)
- newton-mètre (Nm)

III-1-2 Température :

La température est associée à la vitesse moyenne aléatoire des molécules et des atomes d'une matière.

La température permet de définir le milieu de l'objet. Contrairement à l'énergie, qui elle est une valeur absolue, la température est une valeur relative. Elle nous indique comment un objet interagit sur un autre. Nous devons considérer la température comme un niveau sur une échelle, alors que la chaleur peut être quantifiée. Comparons deux piles de pommes et utilisons la température pour décrire la hauteur des piles et la chaleur pour décrire le nombre de pommes dans la pile. Le fait que la pile soit large ne veut pas forcément dire qu'elle est grande.

La température n'est pas une forme d'énergie. Si c'était le cas, pourquoi utiliserions-nous différentes unités de mesure ? La température et l'énergie sont liées, mais ne représentent pas la même chose. La température d'un objet variera selon que l'énergie thermique de cet objet augmente ou diminue ; elle est donc la conséquence de la variation de l'énergie. Mais la température n'indique pas combien d'énergie est contenue dans un objet, elle révèle uniquement comment elle est stockée !

Et plus la pile est haute, plus la probabilité qu'elle s'écroule est grande.

La température d'un objet nous renseigne uniquement sur sa propension à libérer de la chaleur vers d'autres objets, et non sur la quantité d'énergie qu'il contient. Une tasse d'eau bouillante contient moins d'énergie qu'une baignoire remplie d'eau tiède, mais si elle est versée dans cette baignoire, l'eau de la tasse fournira de l'énergie à la baignoire.
[9]

III-1-2.1 Unités de mesure de la température :

Il existe plusieurs unités de mesure de la température. Dans ce manuel, nous en utiliserons deux, une échelle absolue et une échelle relative.

Le zéro absolu

Existe-t-il une limite inférieure de température ? Oui ! Quelle est la température la plus basse que nous puissions imaginer ? Le zéro absolu !

Si nous partons du principe que la température est liée au mouvement des molécules, nous pouvons imaginer un arrêt total de leur mouvement, c'est-à-dire une immobilité. Nous sommes d'accord pour dire que lorsque cette phase est atteinte, le mouvement étant nul, il ne peut pas être encore diminué ?

Le zéro absolu est donc le point théorique auquel les molécules ne sont plus du tout en mouvement. Nous disons théorique car cette température n'apparaît pas naturellement, même pas dans les plus sombres recoins de l'espace interstellaire, où nous pouvons trouver les points naturels les plus froids de l'univers (2,7 K).

En partant du principe que la relation entre la température et la pression des gaz est linéaire, il a été prouvé, par extrapolation, qu'il existait un point auquel les molécules ne bougent plus. Ce point peut même être calculé, bien qu'il ne puisse être atteint.

III-1-2.2 Les échelles de température :

a- Les échelles de température absolue :

Le zéro absolu est le point logique de départ pour les échelles de température absolue, et c'est la manière dont elles sont définies : elles commencent au zéro absolu.

L'échelle de Kelvin est la norme légale mondiale, l'unité de mesure est le kelvin (K). Il existe d'autres échelles de température absolue, mais nous utiliserons celle de Kelvin.

b- Les échelles de température relative :

Strictement parlant, si nous créons une échelle de mesure, il ne serait pas judicieux de placer le point zéro autre part qu'à l'un des deux bouts.

Néanmoins, c'est exactement ce que nous faisons dans le cas des échelles de température relative.

Sur ces dernières, un autre point zéro que le zéro absolu est utilisé, par exemple le point de fusion de l'eau ou de l'eau salée. Le point de référence doit être choisi de manière à pouvoir être facilement reproductible et ne pas être affecté par des facteurs externes, tels que la pression atmosphérique ou l'altitude. La raison pour laquelle un point de référence particulier a été choisi peut être liée à la science exercée par l'inventeur de l'échelle.

La plus commune des échelles de température relative est l'échelle de Celsius. L'unité de mesure est le degré Celsius (°C).

Chapitre 3 Notions sur la Thermographie infrarouge

Remarque :

Dans le système de mesure anglo-saxon, l'échelle de température relative utilisée s'exprime en degrés Fahrenheit (°F) ; avec ($^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}^{\circ}\text{C} + 32$).

Les échelles de température relative sont adaptées à une utilisation quotidienne et acceptées par usage ; s'il fallait exprimer la température d'une pièce en kelvin, nous devrions dire 293 au lieu de 20, ce qui paraîtrait certainement un peu étrange.

c- Comparaison des échelles de température :

Les échelles Celsius et Kelvin ont différents points zéro, mais la même taille d'incrément, un degré Celsius est identique à un kelvin ($1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$).

(Par opposition à l'échelle de Fahrenheit où la taille des incréments est différente de celle de Celsius et Kelvin).

La conversion de température entre Kelvins et degrés Celsius, et inversement, est très simple. Il suffit d'ajouter ou de soustraire 273, conformément à l'illustration ci-après.

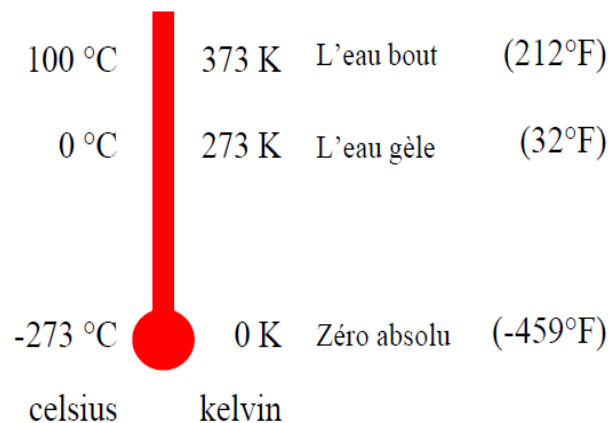


Figure 3.2 : Conversion de températures en Celsius et Kelvin

III-1-3 Température et chaleur :

Il est parfois difficile de différencier les notions de température et de chaleur. Nous considérons parfois que ces deux termes désignent la même chose, car ils sont très proches l'un de l'autre. Mais il existe une différence fondamentale, que nous allons essayer d'illustrer ici.

Prenons deux objets à 100 °C et contenant 100 joules ; mélangez-les, la température n'aura pas doublé. En revanche, le résultat contiendra deux fois plus d'énergie que s'ils étaient séparés.

La température est donc un type de mesure relative qui permet de comparer les objets les uns aux autres. La chaleur est une propriété quantifiable pouvant être mesurée en termes absolus. [9]

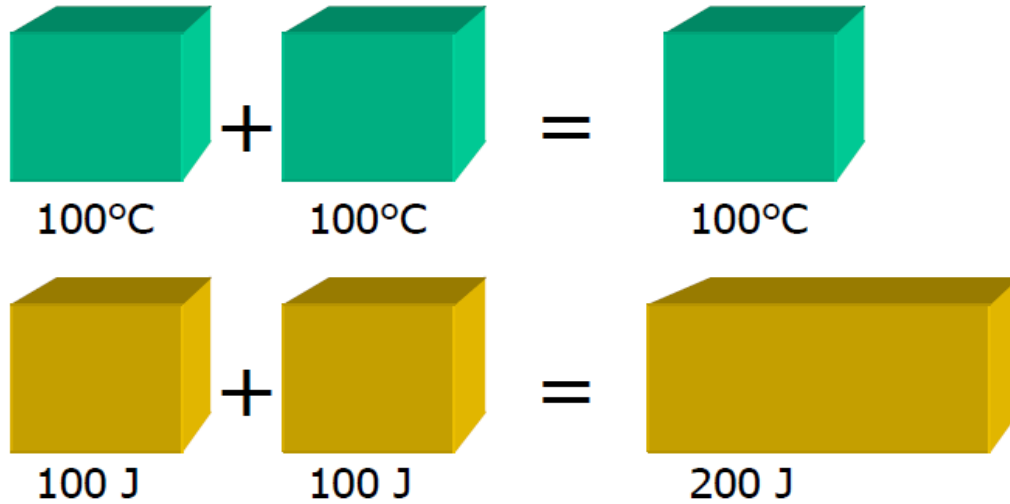


Figure 3.3 : La température est relative mais pas la chaleur

III-2 Modes de transferts de chaleur :

La chaleur peut être transférée de plusieurs façons et nous verrons ultérieurement les différents modes de transfert.

- Conduction
- Convection
- Rayonnement

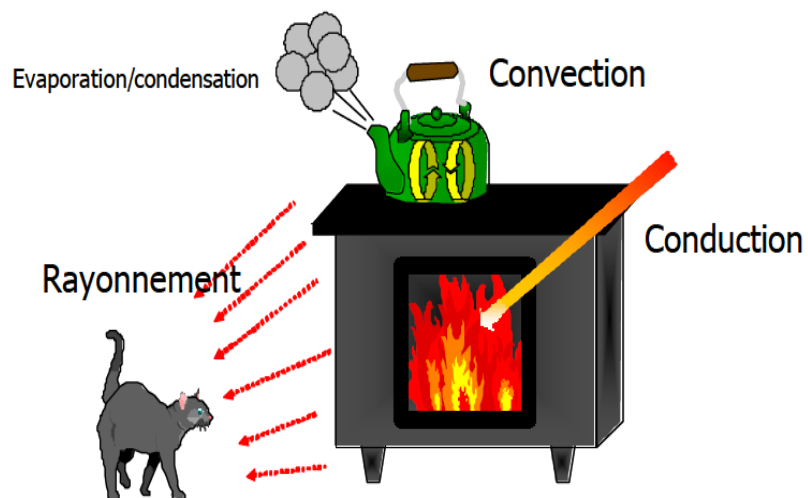


Figure 3.4 : Modes de transferts de chaleur

Chapitre 3 **Notions sur la Thermographie infrarouge**

III-2-1 Conduction :

III-2-1.1 Définition :

La conduction est le transfert thermique direct de molécule à molécule, par suite d'un contact.

La chaleur et la température sont liées au mouvement moléculaire. Lorsque deux molécules sont proches au point de se toucher, celle ayant la température la plus élevée aura un mouvement moléculaire plus important. C'est pourquoi, elle transférera une partie de son énergie à la molécule plus lente. Ce processus peut aboutir à une réaction en chaîne.

Les molécules qui sont très petites doivent se toucher pour qu'il y ait conduction. Par exemple, si vous utilisez une poêle sur une plaque de cuisson et que le fond de la poêle n'est pas entièrement plat, la plaque ne sera pas en contact direct. L'air entre la plaque et la poêle transférera néanmoins la chaleur, mais beaucoup moins efficacement que si les deux objets étaient en contact direct.

Le transfert peut avoir lieu tant entre différents objets qui se touchent qu'au sein d'un objet. La forme de l'objet ne joue aucun rôle. La conduction peut avoir lieu dans des solides, des liquides et des gaz.

Quelques exceptions mises à part, c'est le seul mode de transfert de chaleur dans un solide ! Il existe des solides qui transmettent le rayonnement thermique, mais ces matériaux sont rares et très chers ! La lentille de la caméra infrarouge, par exemple.

Le fait que les solides soient fortement affectés par les transferts de chaleur par conduction est un phénomène que les thermographistes doivent bien comprendre. La plupart des objets observés avec la caméra sont des solides ! Les formes typiques des répartitions de température en surface des objets ont souvent pour origine un transfert de chaleur par conduction. [1]

III-2-1.2 Formule de transfert de chaleur par conduction :

Si l'on devait exprimer cette relation avec une formule, nous obtiendrions ceci :

$$\Phi = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L} \quad \text{(III.1)}$$

Le résultat d'un calcul utilisant cette formule est Φ . Il est exprimé en watts (W) et mesure la puissance calorifique, ou les quatre facteurs intervenant dans le transfert sont :

- K : la conductivité thermique de la matière, [W/m.K]
- A : la surface d'échange concernée, [m²]

- $T_1 - T_2$: la différence de température, [K]
- L : la longueur du chemin de conduction, [m]

Φ n'exprime pas une énergie. La formule de conduction nous donne la puissance calorifique ou le flux thermique entre deux points ou surfaces présentant une différence de température. Pour obtenir de l'énergie ou un travail, vous devez multiplier la puissance par le temps. L'unité sera en joule (J) qui correspond à watt-seconde (Ws).


Pour que le flux thermique soit ininterrompu, l'apport d'énergie doit être constant. Sinon, la température commencera à baisser.

III-2-1.3 Conductivité thermique :

La conductivité thermique, k , dépend de la matière. Elle s'exprime en watt par mètre et par kelvin (W/m.K). Elle est différente d'une matière à l'autre. Plus la conductivité d'une matière est élevée, plus elle conduit l'énergie. On emploie parfois le terme de "résistance thermique". Il s'agit du contraire de la conductivité, ou $1/k$. Un bon matériau d'isolation aura une conductivité faible mais en revanche une haute résistance thermique.

Matériau	Conductivité (W / m* K)
Cuivre	401
Aluminium	237
Acier	52
Glace pure	2,04
Brique	1
Verre (vitre)	0,9
Eau	0,6
Bois	0,14
Fibre de verre	0,04
Air (immobile)	0,025
Argon	0,018
Xénon	0,0051

Meilleur conducteur



Meilleur isolant

Figure 3.5 : Valeurs de conductivité pour différents matériaux.

Chapitre 3 Notions sur la Thermographie infrarouge

D'après le tableau, on peut constater que la conductivité varie d'un matériau à l'autre.

Le cuivre est 80 000 fois plus conducteur que le xénon !

Même si tous les métaux ont une conductivité élevée, elle varie d'un métal à l'autre. Le cuivre est 8 fois plus conducteur que l'acier, par exemple.

L'eau a une faible conductivité, ce qui peut étonner, car on pense en général que l'eau possède la faculté de rafraîchir. Mais comme nous le verrons par la suite, d'autres facteurs interviennent.

Les gaz ont une faible conductivité. Ils constituent l'exception, car leur conductivité varie en fonction de la pression et de la pureté. C'est pourquoi, il est difficile de trouver des valeurs de comparaison pour les gaz.

III-2-2 Convection :

La convection est un mode de transfert thermique dans lequel la chaleur est véhiculée grâce à un milieu fluide annexe, lui-même mis en mouvement soit par la gravité soit par une autre force.

La convection se base sur le transport de masse d'un fluide, liquide ou gaz. Elle a lieu dans le fluide. Pour que le transfert de chaleur ait lieu entre un fluide et un solide ou entre deux fluides qui ne se mélangent pas, le mode de transfert est nécessairement la conduction. Directement au bord d'un solide, il y a toujours une fine couche de fluide stationnaire appelée la couche limite où le transfert par conduction s'effectue.

Un thermographe doit comprendre le transfert de chaleur par convection, car bien que nous analysions généralement des solides, les images que nous observons sont également influencées par la convection.

La plupart des gaz étant invisibles en infrarouge, les rares fois où vous pouvez voir le flux thermique de convection de manière directe, c'est lors de l'observation de surfaces liquides. Dans la plupart des cas, les images de convection seront visibles de manière indirecte sur des surfaces solides.

Une simple expérience pour illustrer la convection consiste à regarder un seau d'eau chaude.

Un fluide est affecté en son sein de différences de température. Là où il est plus chaud, les molécules sont plus éloignées les unes des autres. Cet état est dû à un mouvement moléculaire plus important, qui renvoie les autres molécules plus loin. En conséquence, si les molécules sont plus espacées, le volume chaud du fluide sera d'une densité inférieure. A l'inverse, les parties les plus froides seront d'une densité plus élevée. Les différences de densité au sein du fluide induisent une différence au niveau de l'intensité de la force de

gravité. Les parties les plus chaudes subissent une moindre influence, et remontent alors vers la surface. C'est l'inverse pour les zones froides.

Une circulation naturelle se crée au sein du fluide. Ce processus déplace de la chaleur d'un point à un autre ; on obtient alors un flux thermique. Si nous ouvrons la fenêtre d'une maison chauffée lors d'une journée froide, l'air chaud sort et l'air froid rentre. L'air chaud et l'air froid se mélangent, la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur s'atténue. Le flux thermique s'est produit. La chaleur circule du chaud vers le froid. Le terme de "réchauffement" est erroné. Les fluides chauds montent, mais la chaleur circule toujours du plus chaud au plus froid. [1]

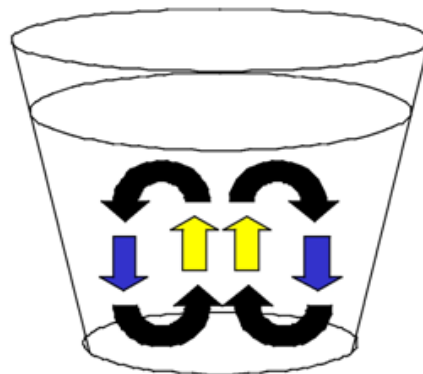


Figure 3.6 : Circulation d'un fluide. La couleur sombre indique un fluide froid.

Le processus décrit ci-dessus est nommé convection naturelle, car seule la force de gravité est impliquée dans la circulation. Dans le cas d'une convection forcée, le fluide est soumis à une autre force extérieure, par exemple, un mélangeur, une pompe, ou encore le vent.

Chapitre 3 Notions sur la Thermographie infrarouge

III-2 -3 Transfert de chaleur par rayonnement :

Le transfert de chaleur par émission et absorption de rayonnement électromagnétique est appelé transfert de chaleur par rayonnement.

La molécule jouait un rôle important. Lors d'un transfert de chaleur par conduction, les molécules entrent en collision et échangent leur énergie cinétique. Lors d'un transfert de chaleur par convection les molécules circulent librement en fonction de la force de gravité et de forces externes. Le transfert de chaleur par rayonnement thermique est complètement différent, car il ne nécessite aucun support matériel. En fait, le rayonnement thermique se propage mieux quand il n'y a pas de molécules, c'est-à-dire dans le vide.

Le rayonnement thermique est un rayonnement électromagnétique.

Les objets émettent un rayonnement thermique en fonction de leur température. Comme ils possèdent une température supérieure à zéro, ils émettent donc tous un rayonnement thermique. Plus la température est élevée, plus le rayonnement thermique émis est intense.

Certaines matières émettent plus que d'autres. Le rayonnement thermique émis dépend de la température de l'objet et des caractéristiques de la matière.

Le rayonnement thermique traversera facilement un gaz, mais difficilement, ou pas du tout, la plupart des liquides et des solides.

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu par le biais de l'émission et l'absorption de rayonnement thermique. Tous les objets émettent et absorbent simultanément. Le transfert net de chaleur est la différence entre ce qu'un objet absorbe et émet. Nous abordons dans ce titre le comportement des rayonnements et des phénomènes d'échange.[5]

Nous emploierons une certaine terminologie, et afin d'éviter toute confusion voici au préalable quelques définitions :

III-2 -3-1 Ondes

Est une déformation, ébranlement ou vibration dont l'élongation est une fonction périodique des variables de temps et d'espace.

Avant toute chose, précisons que si certaines ondes ont besoin d'un support matériel pour se propager dans l'espace (vibration, son, etc.), ce n'est pas le cas des ondes électromagnétiques.

Les différentes longueurs d'onde visibles sont perçues par l'œil humain comme couleurs différentes. Les limites de notre bande spectrale de sensibilité sont approximativement 0.4 μm (violet) et 0.7 μm (rouge). Les autres couleurs se trouvent entre les deux, réparties selon ce qui est appelé l'arc en ciel. [9]

Les bandes de longueur d'onde que nous utilisons couramment possèdent les dénominations suivantes :

Chapitre 3 Notions sur la Thermographie infrarouge

- Rayons Gamma
- Rayons X
- Rayons ultraviolets
- Visible
- Infrarouge
- Micro-onde
- Onde radio

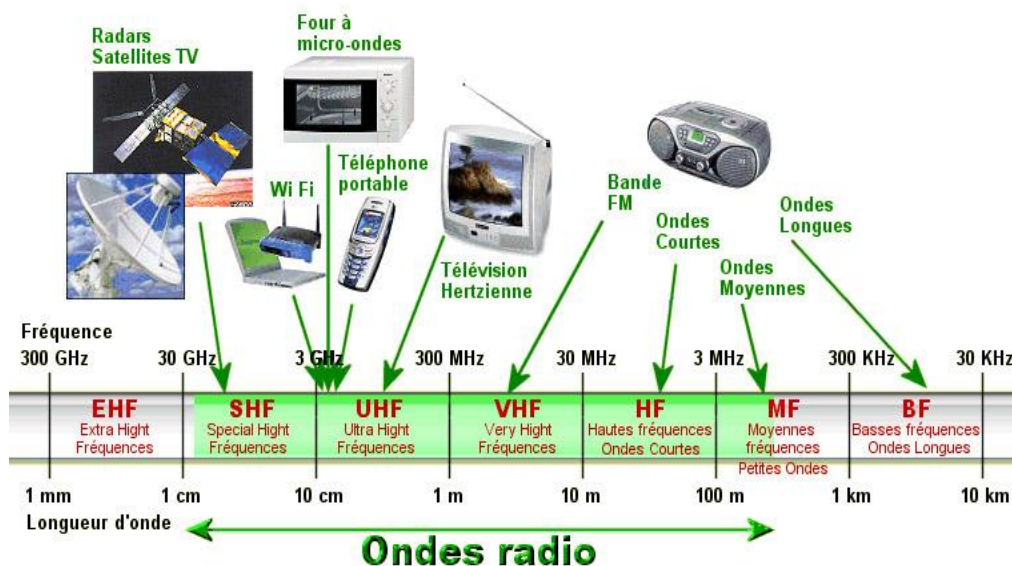


Figure 3.7 : bande de longueur d'onde.

III-2-3-2 Spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est arbitrairement divisé en un certain nombre de longueurs d'ondes, baptisés « bandes », distinguées par les méthodes employées pour produire et détecter le rayonnement. Il n'y a pas de différence fondamentale entre le rayonnement dans les différentes bandes du spectre électromagnétique. Elles sont toutes régies par les mêmes lois et les seules différences proviennent des différences entre les longueurs d'ondes.

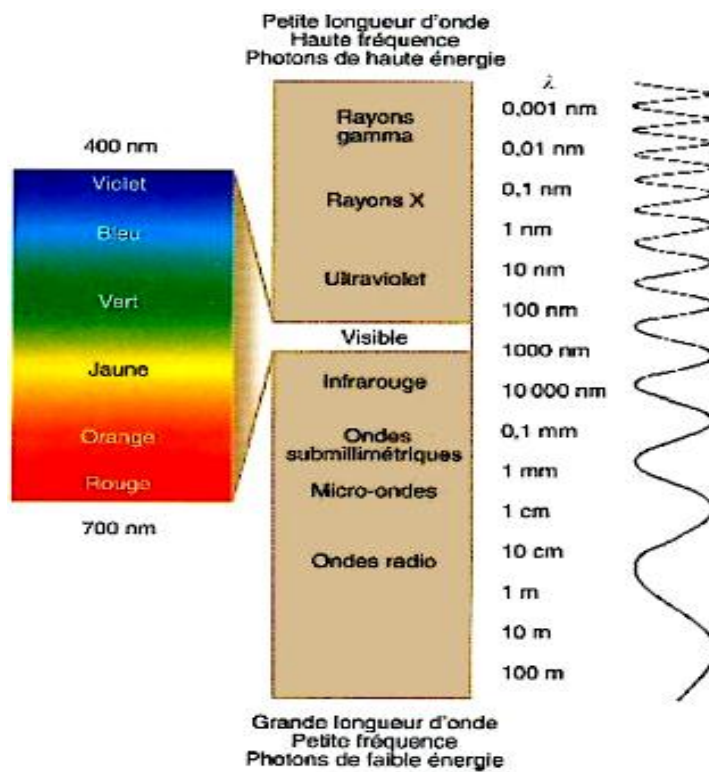


Figure 3.8 : Spectre électromagnétique

III-3 Echange d'énergie par rayonnement

- Emission ; dégager un rayonnement
- Absorption ; capter et retenir un rayonnement
- Réflexion ; renvoyer un rayonnement
- Transmission ; laisser passer un rayonnement.

III-3-1 Rayonnement incident

On appelle incident l'ensemble des rayonnements extérieurs à un objet qui viennent le frapper.

Dans le diagramme ci-dessous, le rayonnement incident est noté W_{INCID} . C'est l'ensemble des rayonnements qui heurtent l'objet cible provient d'une ou plusieurs sources (cas plus fréquent).

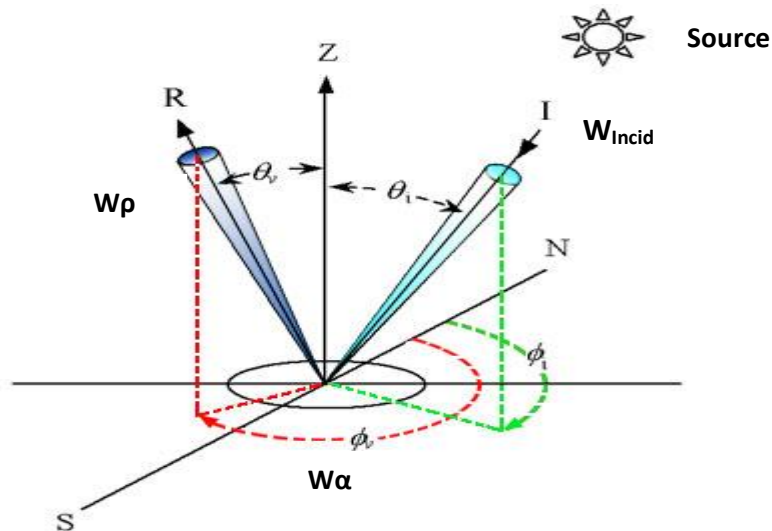


Figure 3.9 : Répartition du rayonnement incident en différentes composantes

Lorsque le rayonnement W_{INCID} frappe sur la surface de l'objet cible, trois cas se figure peuvent se produire. Une certaine partie du rayonnement sera toujours absorbée, et l'objet cible en retiendra alors l'énergie. Dans la figure, cette partie est notée W_α . Une certaine quantité, notée W_p , sera réfléchie. Il est enfin possible qu'une certaine proportion de rayonnement, notée W_τ , traverse l'objet cible. Comme la quantité réfléchie, elle n'affecte pas l'objet.

Notre conclusion est la suivante : la totalité du rayonnement incident se décompose en trois portions :

1. Portion absorbée
2. Portion réfléchie
3. Portion transmise

Si nous écrivons cela sous forme d'une équation mathématique, nous obtenons :

$$W_\alpha + W_\tau + W_p = W_{INCID} = 100\%$$

Vous pouvez constater que cela concorde parfaitement avec ce que nous avons vu précédemment, à savoir que l'énergie ne peut être ni créée ni détruite. Ici précisément, toute l'énergie a été comptabilisée.

III-3-2 Propriétés du rayonnement incident

La question suivante : qu'est ce qui détermine ce comportement.

Autrement dit, comment savoir quelle est la proportion de rayonnement ayant été absorbée, réfléchie et transmise ? Tout dépend des propriétés de l'objet !

Dans le paragraphe précédent nous avons parlé de rayonnement et des répercussions sur l'objet cible. Ce qui se produit avec le rayonnement est la conséquence des propriétés de rayonnement de l'objet cible.

Chapitre 3 Notions sur la Thermographie infrarouge

Un objet possède une certaine capacité ou aptitude à :

- Absorber ; ce l'on appelle l'absorptivité, α
- Réfléchir ; ce que l'on appelle la réflectivité, τ
- Transmettre ; ce que l'on appelle la transmittivité, ρ

La somme des trois est égale à 1.

Si nous exprimons cela sous forme de formule, nous obtenons :

Formule n°2: $\alpha + \rho + \tau = 1.$

Ceci est une formule essentielle et il est primordial d'en comprendre les conséquences.

Pour les matériaux opaques $\tau = 0$, et la relation se réduit à :

Formule n° 3: $\alpha + \rho = 1$

III-3-3 Rayonnement résultant

Le rayonnement résultant est constitué de la somme de tous les rayonnements qui quittent la surface d'un objet, quelles qu'en soient les sources d'origine.

Un aspect fondamental différencie les rayonnements incidents et résultants. Lorsque nous avons abordé le rayonnement incident, nous n'avons pas particulièrement prêté attention à l'origine de ce rayonnement. La seule certitude est qu'il provient d'une ou plusieurs sources différentes de l'objet lui-même. Pour le rayonnement résultant en revanche, nous verrons qu'il provient de trois types de sources.

Intéressons nous tout d'abord à la partie du rayonnement résultant en provenance directe de l'objet source.

III-3-4 Propriété du rayonnement résultant

III-3-4-1 Pouvoir émissif :

En thermographie infrarouge, la plus importante du rayonnement résultant est généralement constituée par la partie émise. Nous allons donc d'abord nous y intéresser avant de débattre de son imbrication avec les autres composantes. Un objet dispose d'une certaine capacité ou aptitude à : Emettre ; que l'on appelle l'émissivité, ε

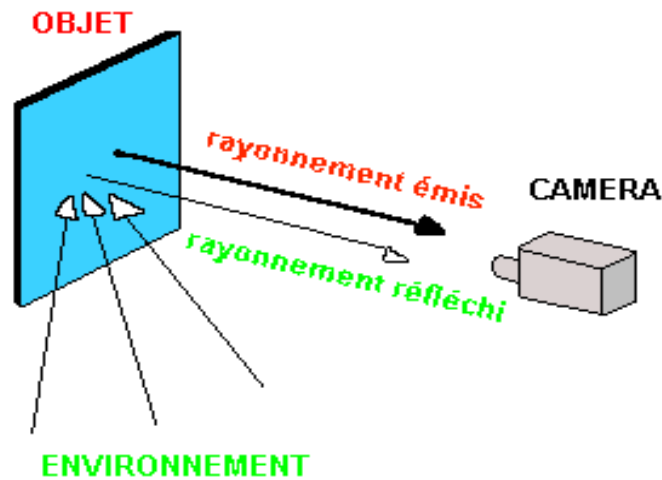


Figure 3.10 : Le rayonnement émis et le rayonnement réfléchi par l'objet.

III-3-4-2 Rayonnement émis :

Le rayonnement ($W\epsilon$) est émis dans toutes les directions. L'intensité émise dépend de la température de l'objet et de son émissivité. Puisque tout objet dispose d'une certaine température et d'une émissivité il émet un rayonnement infrarouge.

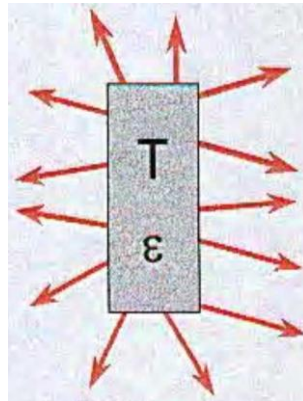


Figure 3.11 : Emission du rayonnement thermique dans toutes les directions.

Chapitre 3 Notions sur la Thermographie infrarouge

III-4 Corps noir :

On définit également l'émetteur parfait appelé corps noir. C'est un objet idéal (n'existant pas physiquement) qui absorbe la totalité des rayonnements incidents quelles que soient leur longueur d'onde et leur direction et qui émet conformément à la loi de Planck.

III-4-1 Loi de Planck

Max Planck a su décrire la répartition spectrale d'un rayonnement émis par un corps noir à l'aide de la formule suivante :

Formule n° 4:
$$w_{\lambda_b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} \times 10^{-6} \text{ [Watts/m}^2\mu\text{m]}$$

W_{λ_b} = l'émittance spectrale du cops radiante du cops noir à longueur d'onde λ .

C = la vitesse de la lumière = 3×10^8 m/sec.

h = la constante de Planck = 6.62×10^{-34} joule sec. Watt.s²

k = la constante de Boltzmann = 1.4×10^{-23} joule/K. Watt.s²/K

T = la température absolue (K) d'un corps noir.

λ = la longueur d'onde (m).

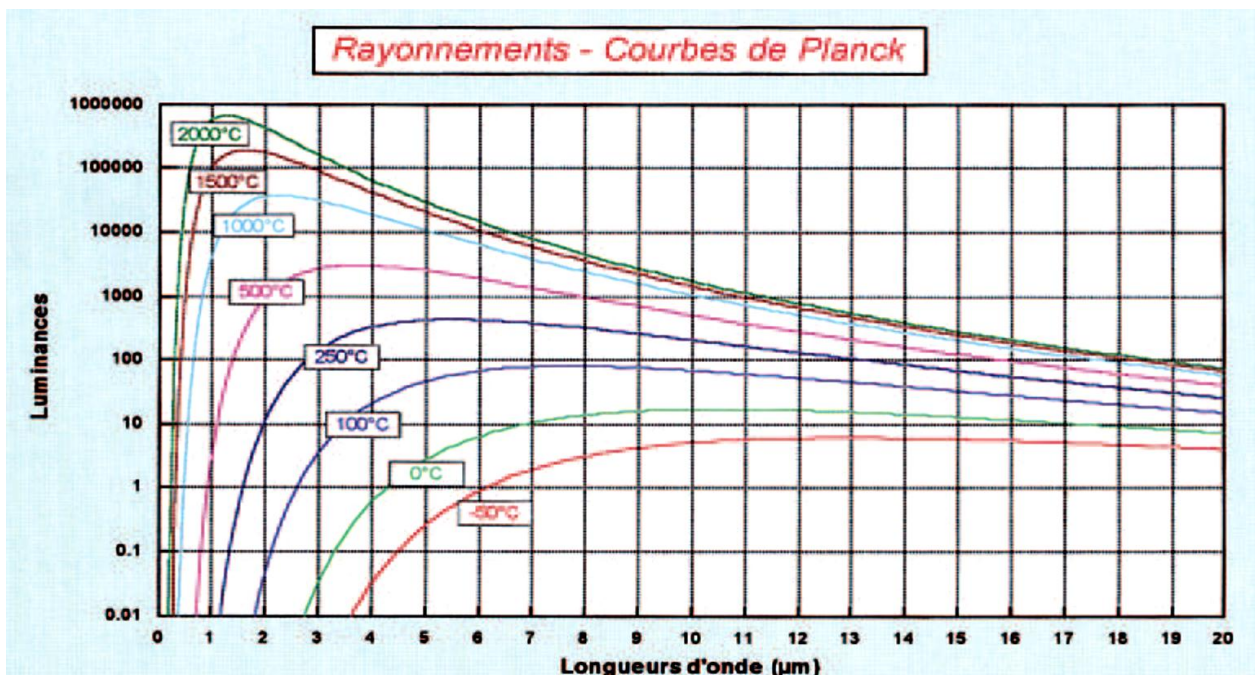


Figure 3.12 : Emittance spectrale radiante d'un corps noir selon la loi de Planck pour différentes températures absolues.

Chapitre 3 Notions sur la Thermographie infrarouge

Par ce graphe, nous constatons que :

- Le spectre d'émission du corps noir est continu.
- La puissance électromagnétique émise croît avec la température du corps noir.
- L'émission de rayonnement passe par un maxima : ce maxima se produit à des longueurs d'onde de plus en plus faibles lorsque la température du corps noir croît.
- A partir d'une température de l'ordre de 520°C, l'émission du rayonnement infrarouge apparaît dans le domaine spectral visible (0,4-0,8µm) : les objets chauffés au moins à cette température deviennent donc visibles par l'oeil humain de par la couleur rouge sombre. En dessous de cette température, nous ne "voyons" pas les températures car l'émission de rayonnement se fait au-delà de la bande spectrale sur laquelle sont calibrés nos yeux. Dès lors, pour visualiser des corps dont la T° est inférieure à 520°C, il faut utiliser des appareils dont le seuil de détection est inférieur à celui de l'œil humain.

III-4-2 Loi de déplacement de Wien

Par dérivation de la loi de Planck on obtient la loi de Wien :

Formule n° 5:
$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} [\mu m]$$

Avec :

- λ_{\max} Longueur d'onde à laquelle se produit l'émission maximale;
- **T** Température absolue du corps en Kelvin.

La courbe définie par cette équation est représentée en pointillé sur la figure ci-dessous. Celle-ci est modélisée par les maxima des courbes de Planck. Elle indique que lorsque la température croît, le maximum d'énergie émis se déplace vers les faibles longueurs d'onde.

Plus simplement, cette loi exprime le fait que la couleur d'un objet chauffé à haute température varie du rouge sombre au blanc.

Chapitre 3 Notions sur la Thermographie infrarouge

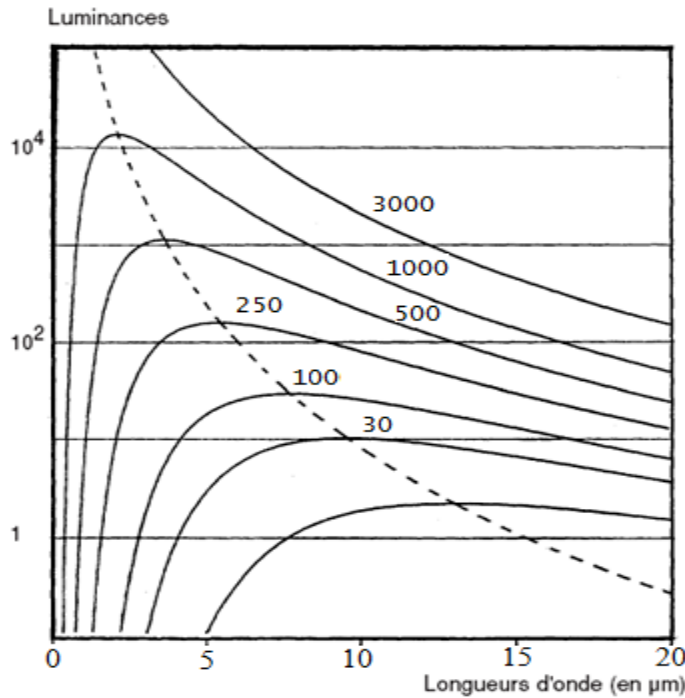


Figure 3.13 : Courbe définie la loi de Wien.

III-4-3 la loi de stefan-boltzmann

La loi de stefan-boltzmann établit la relation entre la température et la puissance rayonnée, pour un corps noir.

En intégrant la formule de Planck de $\lambda = 0$ à $\lambda = x$, on obtient l'émittance radiante totale (W_b) d'un corps noir :

Formule n° 6:
$$W_b = \sigma T^4 [\text{Watts} / \text{m}^2]$$

Où

$\sigma = 5.7 \times 10^{-8}$ Watts/m² est la constante de Stefan-boltzmann

Nous constatons que la température absolue T est élevée à la puissance quatre. Ce n'est donc absolument pas linéaire. La température absolue indique que l'unité doit être le Kelvin (°K). Le résultat est ensuite donné en W/m². Un autre facteur, σ , apparaît dans la formule. Il s'agit de la constante de Stefan-Boltzmann. Nous pouvons considérer cette constante comme un simple facteur de correction qu'il n'est pas nécessaire de retenir. A l'aide de cette formule nous pouvons calculer par exemple la puissance de rayonnement de la pièce ou nous nous trouvons. Nous ignorons volontairement qu'il ne s'agit pas d'un corps noir parfait.

Chapitre 3 Notions sur la Thermographie infrarouge

Si les murs présentent une température de 20°C, celle-ci sera équivalente à une température absolue de 293 °K. Lorsque cette température absolue est élevée à la puissance quatre, puis multipliée par la constante σ on obtient 419 W/m². par conséquent, chaque mètre carré des murs qui nous entourent rayonnent 419 W. si nous augmentons légèrement la température jusqu'à 50°C, que se passe-t-il ?

Sur une échelle absolue, cette légère augmentation entraîne une élévation de température de 293°K à 323°K ! Le résultat de notre calcul est 618 W/m². Une augmentation non négligeable, puisque la valeur initiale était de 419 ! La raison en est bien sûr que la température est élevée à la puissance quatre. Un petit changement de température entraîne par conséquent un grand changement dans la puissance rayonnée. Effectuant ce calcul pour différentes températures et représentons les résultats sur un diagramme, nous obtenons la représentation graphique suivante :

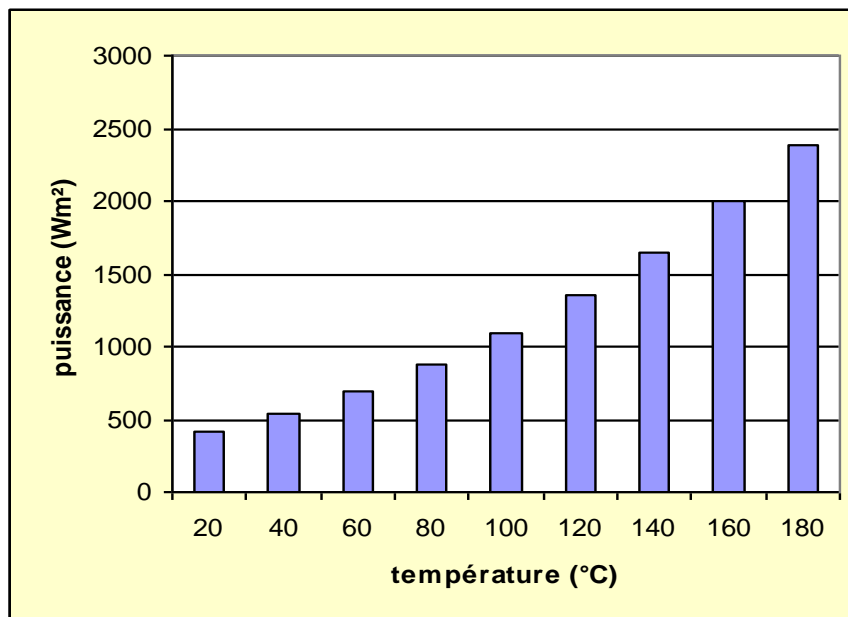


Figure 3.14 : Puissance rayonnée d'un corps noir à des températures définies

Lorsque la température passe de 90°C (363°K) à 130 °C (403°K), par exemple, la densité de puissance rayonnée augmente de 1000 à 1500 W/m². L'augmentation de température (40 °K) correspond à 11% seulement !

III-5 Corps cible (corps réel) :

En fait, les objets réels émettent un flux toujours inférieur à celui du corps noir idéal, quelles que soient la longueur d'onde et la température. On définit ainsi l'émissivité spectrale directionnelle $\varepsilon(\lambda, \delta, T)$ de l'objet comme étant le rapport de la luminance énergétique spectrique directionnelle de l'objet à celle du corps noir, placés dans des conditions identiques de mesure. C'est une grandeur sans dimension comprise entre 0 et 1 dont la valeur est influencée par l'état de surface, la longueur d'onde, la direction d'émission et la température du matériau. Lorsque $\varepsilon(\lambda, \delta, T)$ ne dépend pas de la longueur d'onde, on dit qu'il s'agit d'un corps gris. La connaissance de $\varepsilon(\lambda, \delta, T)$ et une mesure de température relative permettent de remonter à la température de surface vraie de l'objet. La détermination de cette valeur est donc fondamentale en thermographie infrarouge quantitative.

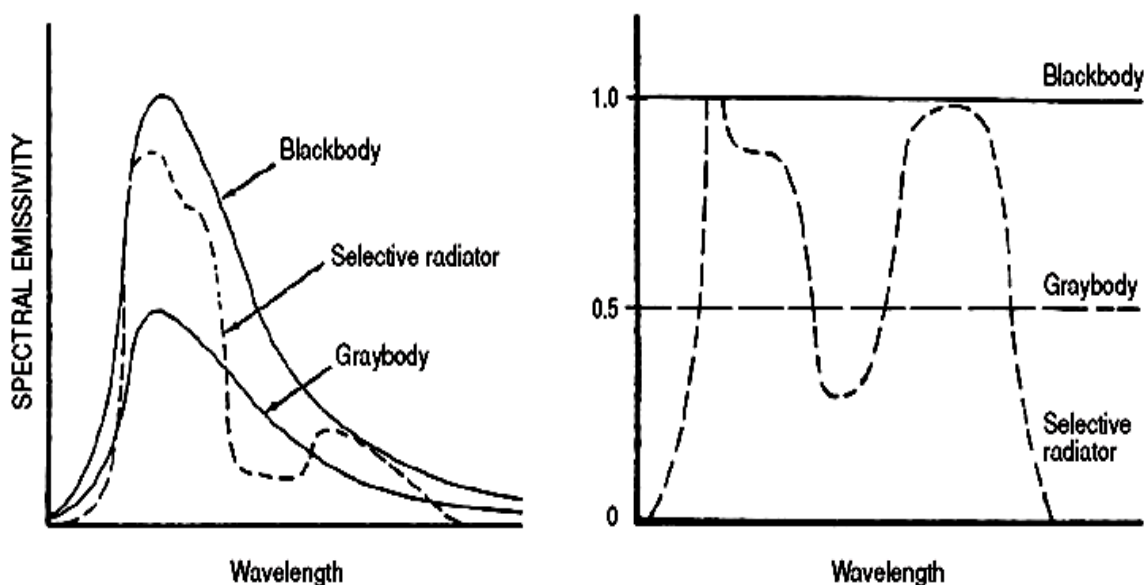


Figure 3.15 : Courbes montrant la longueur d'onde en fonction de l'émissivité spectrale.

III-5 -1 Loi de Stefan-Boltzmann pour un corps réel

Nous avons abordé plus haut la loi de Stefan-Boltzmann et la relation qu'elle établit entre l'intensité de rayonnement d'un corps noir et la température absolue élevée à la puissance quatre. Que se passe-t-il si l'objet cible n'est pas un corps noir, mais un corps réel ?

En situation de mesure réelle, nous ne rencontrons jamais des corps noirs. Nos objets ne seront pas des corps noirs, mais des « corps dits réels » les corps réels peuvent avoir toutes les caractéristiques mentionnées dans ce chapitre, à savoir, la capacité d'émettre, d'absorber, de réfléchir et de transmettre. Toutefois, la plupart des objets cibles ne sont pas transmissifs mais opaques, donc : $\tau = 0$

Chapitre 3 Notions sur la Thermographie infrarouge

Quelque soit la température, le rayonnement émis est inférieur à celui du corps noir ! Nous devons simplement introduire le facteur d'émissivité pour pouvoir appliquer.

Lorsque ces deux conditions seront remplies, notre formule de rayonnement devient :

Formule n° 7:
$$W_{cr} = \varepsilon \sigma T^4 [W / m^2]$$

Si nous reprenons le diagramme à barres déjà vu et si nous y représentons les valeurs obtenues pour un corps d'émissivité $\varepsilon = 0.6$, nous obtenons :

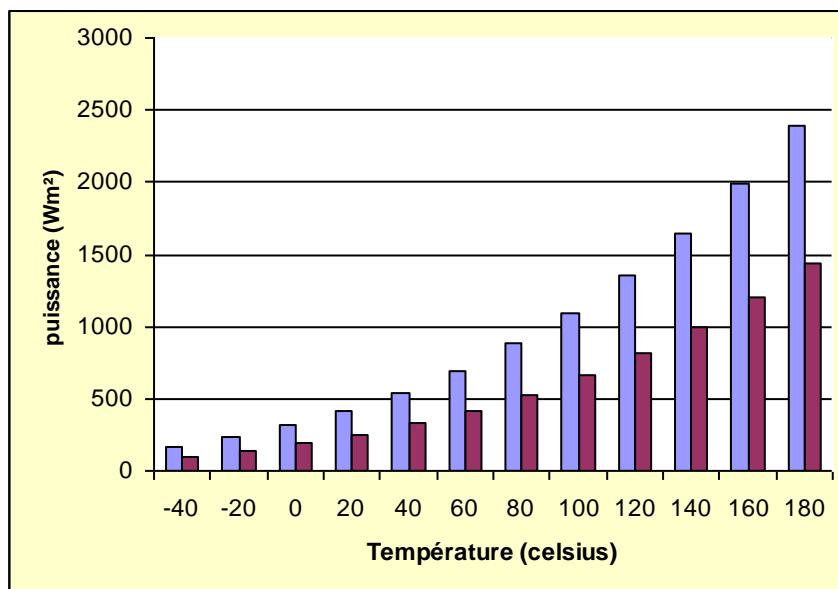


Figure 3.16 : puissance rayonnée d'un corps réel à celui d'un corps noir

Un corps noir à 90°C est un corps réel (avec une émissivité de 0.6) à 140°C rayonnent tous les deux environ 1000W/m². Pour la caméra, ils sont vus comme identiques. Si nous entrons une émissivité de 1.0 dans la caméra et concéderions un corps réel (d'émissivité 0.6) à 140°C, la caméra nous indiquerait seulement 90°C. Le corps réel n'a pas l'intensité de rayonnement du corps noir à la même température, sans compenser le rayonnement « manquant », nous obtenons un résultat trop faible.

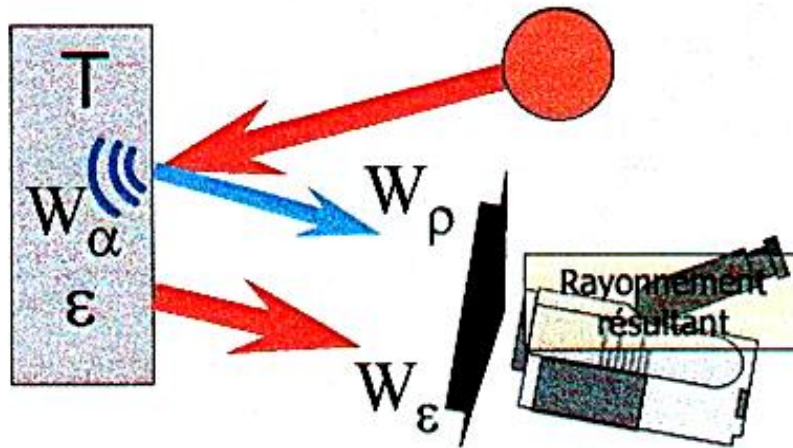


Figure 3.17 : Rayonnement résultant provenant d'un objet cible opaque, qui se compose des rayonnements émis et réfléchi.

Cela vaut pour les objets cibles opaques de corps autre que noirs, tels que les corps réels non transmissifs. Pour ce genre de cible, nous partons systématiquement du principe que le rayonnement des deux sources émanent de l'objet – le rayonnement réfléchi et celui émis. Il est important de s'en souvenir et de bien comprendre : il ne suffit pas seulement de savoir mesurer des températures, il faut également pouvoir interpréter correctement l'image infrarouge.

Chapitre IV

Utilisation de la Caméra Infrarouge

I. UTILISATION DE LA CAMERA INFRAROUGE :

I-1 Introduction à l'utilisation de la caméra infrarouge :

Bien savoir utiliser une caméra infrarouge requiert un certain temps, comme tout ce qui est nouveau. Ce chapitre traite de l'utilisation générale. Il comprend des conseils qui nous permettront de familiariser avec la caméra et d'éviter les fausses manipulations dont les conséquences pourraient être désastreuses.

L'évolution technologique rapide et la grande diversité des systèmes infrarouges, ne nous permettent pas de détailler les boutons et commandes spécifiques aux caméras. Nous nous sommes par conséquent concentrés sur les caractéristiques communes des appareillages. En complément des manuels de cours, vous recevrez un manuel d'utilisation traitant des caractéristiques spécifiques de la caméra. Les objectifs spécifiques (décrits ci-dessous) comportent des travaux pratiques axés sur l'utilisation de la caméra. [2]

- Insérer la batterie et la carte mémoire
- Allumer et éteindre la caméra
- Procéder à la mise au point du viseur
- Procéder au réglage de la focalisation optique
- Régler automatiquement la mise au point de l'image vidéo
- Utiliser le système de menus en général
- Régler manuellement (niveau/gain) la mise au point de l'image vidéo
- Contrôler les fonctions de mesure
- Geler et sauvegarder l'image

I-2 Contrôler une image :

Les noms des différentes commandes et la façon dont elles doivent être utilisées peuvent varier d'un appareil à l'autre, mais les principes d'utilisation restent identiques. Cet ouvrage reprend la terminologie la plus récente.

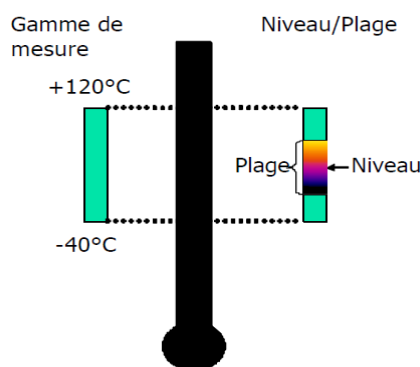


Figure 4.1 : Contrôle en sélectionnant la plage de température, le niveau et le gain.

I-2.1 Plage de température

La plage de température est le paramètre de base.. Plus les plages sont étendues et en nombre restreint, plus l'appareil est facile à utiliser. La plage de température courante peut être définie de différentes manières, parfois même en combinant plusieurs méthodes entre elles. Elle peut être comparée à l'ouverture du diaphragme des caméras classiques. Il est en effet nécessaire de limiter le rayonnement atteignant le capteur pour éviter qu'il soit saturé ou surchargé d'énergie. Les ouvertures sont utilisées dans bon nombre de systèmes plus anciens et sont généralement actionnées par un bouton ou une molette mécanique. Une deuxième méthode consiste à placer un filtre sur le chemin de mesure pour limiter la quantité de rayonnement atteignant le capteur ; c'est un peu le principe des lunettes de soleil. La troisième méthode consiste à limiter électroniquement la sensibilité du capteur. [9]

Si nous décidons d'afficher la palette de couleurs de notre image sur l'ensemble de la plage de température, seules quelques couleurs correspondront effectivement aux températures de l'image. Ce qui, dans la majorité des cas, nous donnera une image très sombre. Vous pouvez tenter l'expérience avec votre propre caméra. Définissez un gain très large et modifiez le niveau jusqu'à ce qu'une image apparaisse ; appréciez le résultat.

I-2.2 Niveau et gain

Le gain est la partie de la plage de température que nous utilisons effectivement. Le gain peut être considéré comme le "contraste thermique". Nous pouvons l'élargir ou le réduire. La plupart des systèmes l'affichent sur 256 couleurs ; en partie pour des raisons techniques et en partie pour des raisons pratiques. L'œil humain n'est guère en mesure de déceler plus de 256 couleurs dans une même image et la plupart des dispositifs ne sont pas en mesure d'en afficher davantage !

Si nous réglons par exemple le gain sur 50 degrés, les couleurs seront distribuées uniquement sur cet intervalle de température. Mais sera-t-il de 0à50, de 25à75 ou de 50à100 ? Si l'intervalle de température est 50à100 et que nous observons une scène à température ambiante, rien n'apparaîtra dans l'image. La couleur de base de l'image sera noire ce qui correspond à la température "en dessous de 50 °C" dans notre échelle. [9]

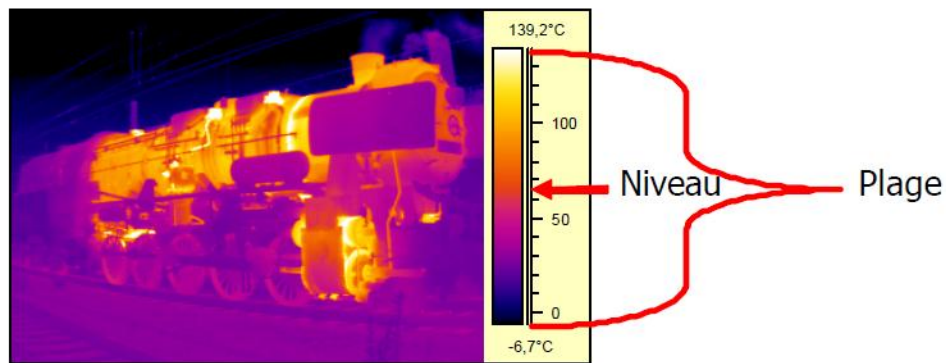


Figure 4.2 : Niveau et gain

Le niveau est le point central du gain. Le niveau peut être considéré comme la "luminosité thermique". La solution au problème présenté ci-avant consiste à déplacer notre gain de 50 °C vers le bas sur l'échelle, de telle sorte que les couleurs couvrent la scène que nous observons à température ambiante. Même après avoir effectué cette opération, il est possible que vous ayez tout de même l'impression de ne pas utiliser toutes les couleurs de l'échelle. Il est dès lors nécessaire de faire un réglage plus fin. Voilà désormais dix ans que les appareils disposent d'une fonction automatique permettant d'effectuer un paramétrage succinct de l'image sans avoir à effectuer de fastidieuses manipulations. Ces fonctions sont malheureusement insuffisantes si vous souhaitez analyser correctement une image. Il est donc nécessaire de savoir aussi ajuster manuellement les commandes de niveau et de gain. L'utilisation des fonctions d'analyse d'image et d'autres méthodes seront décrites plus loin dans ce chapitre. Mais consacrons-nous d'abord à l'utilisation et aux fonctions des commandes.

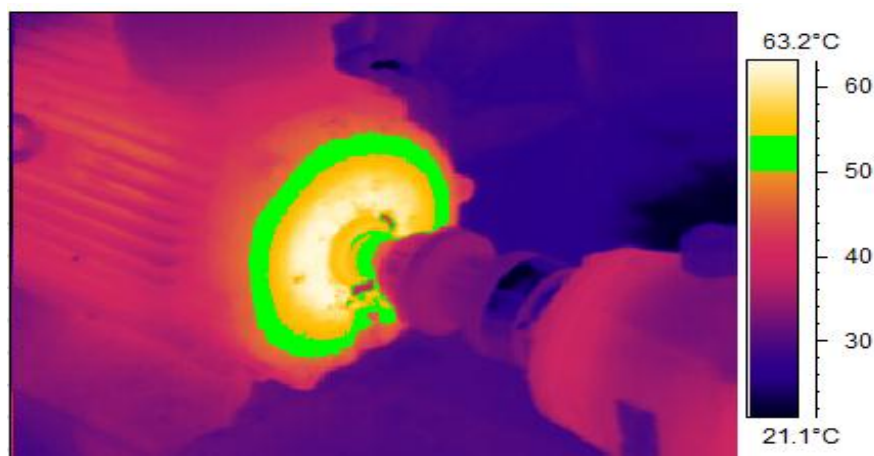


Figure 4.3 : L'isotherme remplace certaines couleurs dans l'échelle par des tons contrastés

Les caméras modernes disposent de nombreuses fonctions de mesure de la température. La plus ancienne est l'isotherme. Sa longévité d'utilisation est une preuve de qualité. Comme vous le verrez plus tard, l'isotherme constitue toujours une fonction utile et polyvalente.

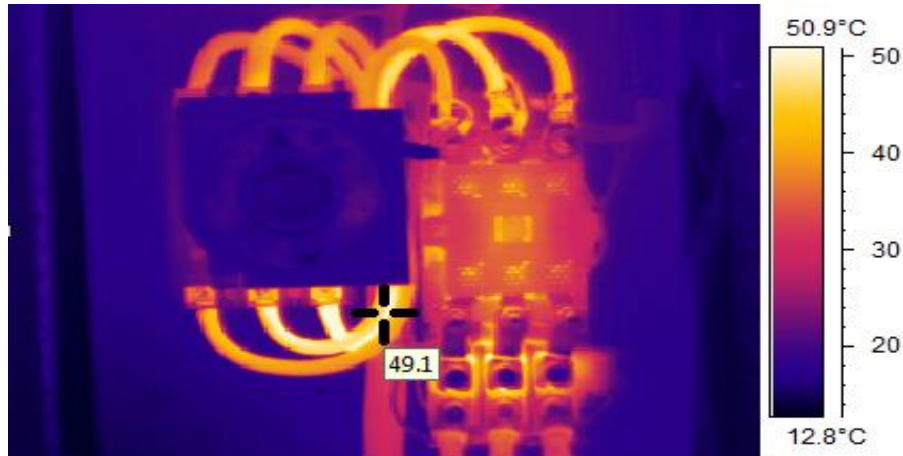


Figure 4.4 : Le point de mesure est une fonction simple et pratique

D'un point de vue historique, le point de mesure (ou spot) est probablement l'outil créé juste après l'isotherme. Il est très populaire à cause de sa simplicité d'utilisation. Enfin, citons les fonctions de zone, qui permettent d'afficher la température la plus chaude, la plus froide ou la température moyenne au sein d'une région rectangulaire ou circulaire.

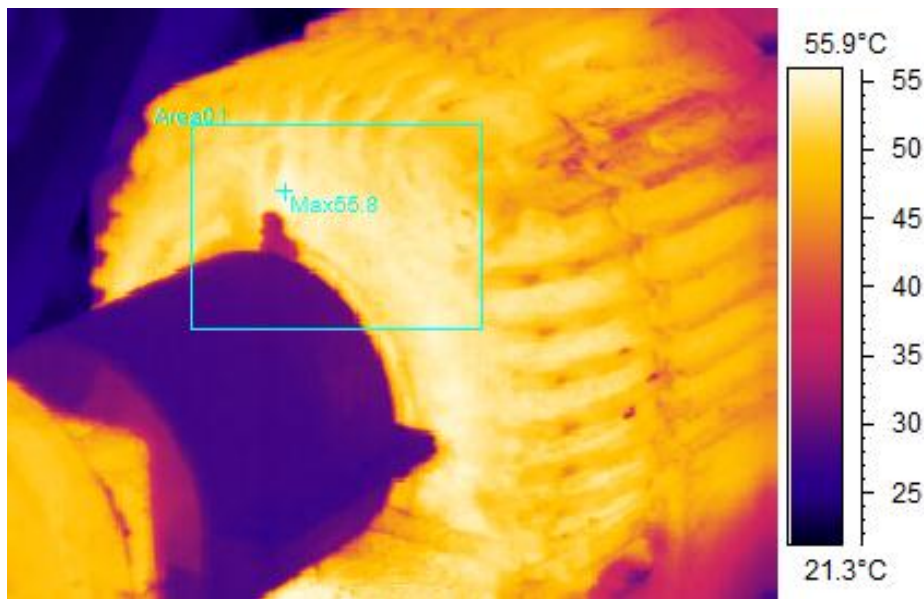


Figure 4.5 : La fonction de zone est paramétrée pour afficher la température maximale au sein de la boîte.

I-3 Capturer une image :

Vous pouvez capturer une image en la gelant puis en la stockant, ou en effectuant consécutivement ces deux opérations. Pour pouvoir créer un fichier de rapport imprimable, il faut bien sûr que les images soient préalablement stockées dans la caméra, puis transférées sur l'ordinateur. [9]

Les trois règles fondamentales

Il vous faudra respecter quelques règles fondamentales, après avoir gelé ou stocké une image, trois choses ne pourront plus être modifiées :

- I. La plage de température de mesure
- II. La mise au point optique (focalisation)
- III. La composition d'image

(Sur certains anciens modèles de caméras, il existe également une limitation empêchant le réglage après coup du niveau et du gain)

- **Plage de température de mesure**

Nous avons expliqué précédemment ce que signifiait le terme plage de température, et comme pour tout appareillage de mesure il est nécessaire de définir une plage vous permettant de mesurer ce que vous souhaitez. N'oubliez pas que, sur la plupart des appareils, si vous définissez une plage de température plus large que nécessaire, la précision de vos mesures en souffrira. En d'autres termes, vous ne pouvez pas espérer relever des millivolts si votre gamme est réglée pour des kilovolts.

- **La mise au point (focalisation)**

La mise au point (focalisation) est importante : une image mal mise au point témoigne d'abord du peu de professionnalisme du thermographe. En effet, le public ne peut se faire une opinion sur votre travail qu'à l'aide de vos rapports qui constituent généralement la seule partie évaluable de votre travail. Mais ce n'est pas tout, car la précision de vos mesures dépend entièrement de votre mise au point. Les images mal mises au point vous donneront des valeurs de température erronées !

- **La composition d'image**

On entend par composition le placement relatif correct de la zone d'intérêt dans l'image. Vous ne souhaitez certainement pas la placer trop excentrée dans un coin de l'image. L'objet cible ne doit pas non plus être pris de trop près car

des informations latérales importantes peuvent alors être occultées. L'erreur faite couramment par les débutants est de se positionner trop loin. Notre conseil : rapprochez-vous ! Mais sans oubliez de respecter une distance de sécurité ! Il est cependant fréquent de voir des images où le champ de vision est totalement sous-exploité. Comme pour la mise au point, la composition d'image n'est pas seulement une question de visualisation de l'objet cible. Vous l'avez deviné ! Si vous êtes trop loin de l'objet cible (par ex. lorsque l'objet cible est trop petit sur l'image) vous ne pouvez pas mesurer la température correctement ! Nous développerons ultérieurement sur ce point particulier.

II. TECHNIQUE D'ANALYSE D'IMAGES THERMIQUES :

Une caméra est généralement utilisée pour créer une belle image servant à argumenter un document.

Les images thermiques sont totalement différentes des images visibles donc il faut assimiler de nouvelles techniques d'analyse. En premier lieu, de solides connaissances théoriques, puis une expérience de terrain vous seront indispensables avant d'être considéré comme un professionnel aguerri.

II-1 Gradient thermique :

Un gradient thermique est une variation progressive de la température sur un profil (ou une zone) déterminé. Un gradient thermique trahit souvent la présence d'un transfert de chaleur par conduction. C'est la raison pour laquelle il est d'une importance capitale d'apprendre à les analyser. Un gradient thermique indique l'orientation du flux de chaleur et nous dirige donc vers la source de chaleur.

La présence ou l'absence de gradient thermique nous donne des indices importants lors de l'analyse d'images thermiques.

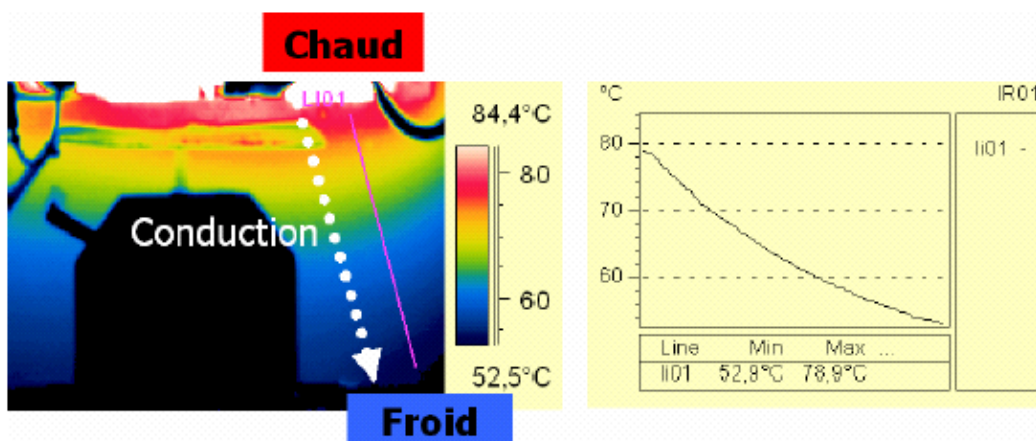


Figure 4.6 : Gradient thermique

Cette pièce est réchauffée par un rayonnement émis depuis le haut par un moule chaud. Il est possible de voir comment la chaleur est conduite depuis l'endroit où elle est absorbée. Dans ce cas de figure, le chauffage du cadre de la machine a engendré une expansion thermique inégale induisant une fuite le moule. Le gradient thermique doit être réduit pour que la différence d'expansion puisse être corrigée.

II-2 Les fonctions d'amélioration les images :

L'analyse d'images thermiques se traduit souvent par la recherche de zones singulières dont le comportement diffère du reste de l'image. C'est la raison pour laquelle les appareils disposent de nombreuses fonctions permettant d'augmenter artificiellement les contrastes locaux. Le maniement de ces fonctionnalités vous permettra de trouver plus facilement ce que vous cherchez à mettre en évidence dans une image. Les trois fonctions les plus importantes pour l'amélioration des images thermiques sont :

- Le cadrage thermique
- L'isotherme
- Les palettes

Une autre fonction d'analyse peut aussi s'avérer utile :

- Le profil

II-2.1 Cadrage thermique

Le cadrage thermique est l'ajustement de l'échelle de l'image permettant d'optimiser le contraste pour les besoins de l'analyse. Le cadrage thermique suppose l'utilisation des contrôles de niveau et de gain de la caméra. Lorsque la zone d'intérêt de l'image est choisie, il faut ajuster ces deux paramètres de telle sorte que les couleurs de la palette couvrent au plus juste cette partie de l'image. Les zones moins intéressantes de l'image peuvent, quant à elles, se situer en dehors de l'échelle. Elles seront alors généralement représentées en noir ou blanc.

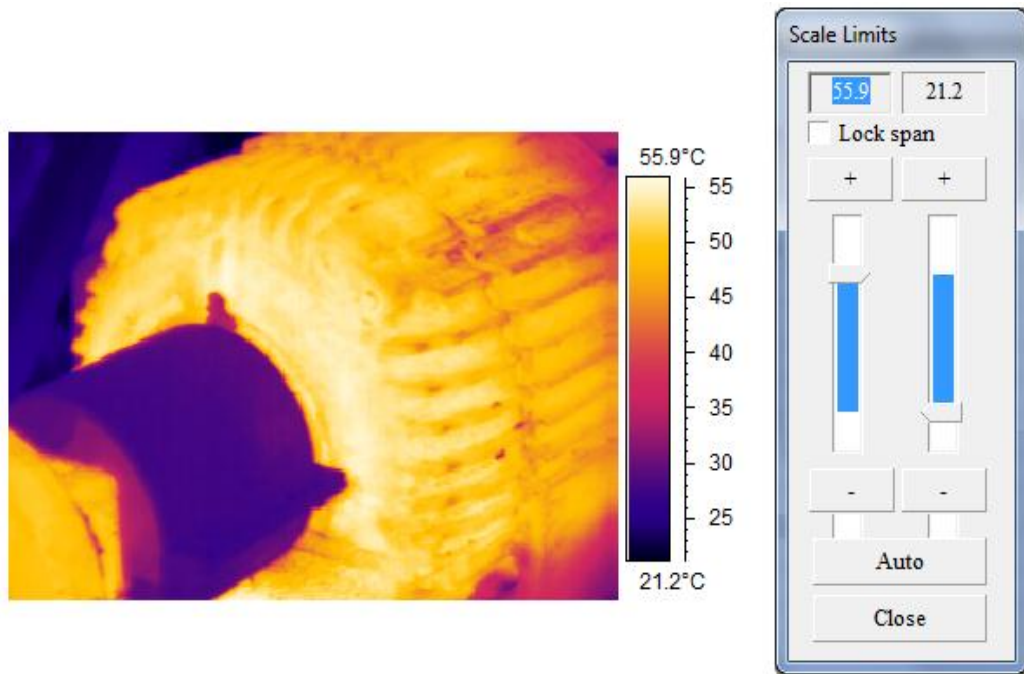


Figure 4.7 : L'intégralité de l'image est cadrée thermiquement

En utilisant la fonction réglage automatique présente sur la plupart des caméras, quasiment toutes les zones de l'image seront couvertes par l'échelle de couleur. Les extrémités de l'image peuvent parfois se situer légèrement en dehors de l'échelle. Si l'on se reporte à l'image ci-dessus, la connexion chaude dans le coin supérieur droit est représentée avec des couleurs plus claires alors que l'arrière-plan est noir. Nous obtenons ainsi une vue d'ensemble de l'objet cible nous permettant de discriminer correctement la zone d'intérêt. L'intégralité de l'image est dite « cadrée thermiquement ». En observant l'image, nous avons toutefois une légère suspicion concernant le câble gauche. Celui-ci semble plus chaud que le câble central. Une charge plus élevée peut en être la cause.

Regardons de plus près et ajustons la palette de couleurs sur cette zone de l'image. Le résultat doit ressembler à l'image ci-dessous.

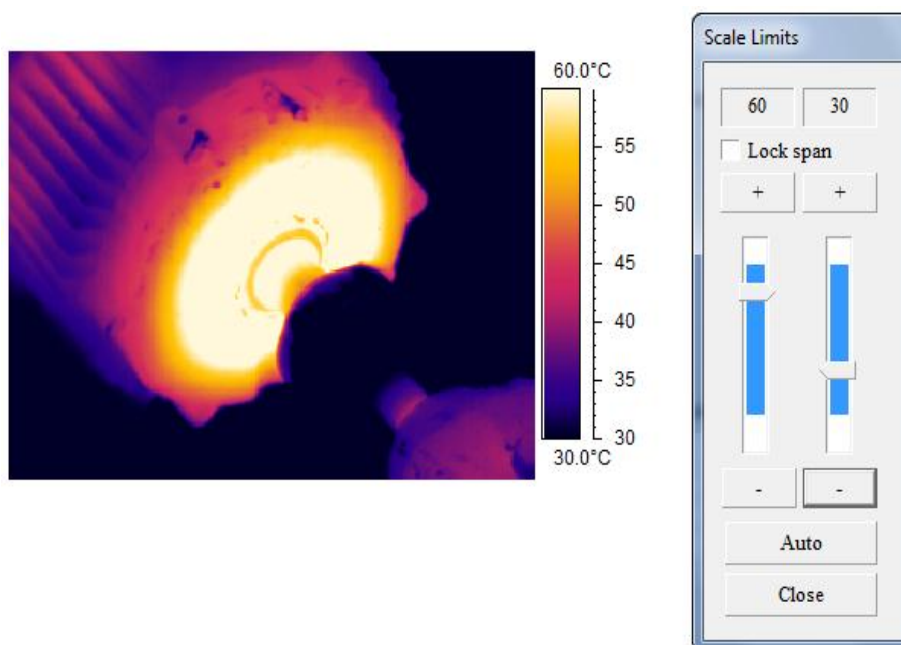


Figure 4.8 : Image cadrée thermiquement

L'échelle de couleur est désormais compressée. L'arrière-plan est totalement noir et le point chaud précédent est représenté en blanc saturé. Le contraste sur le câble gauche est désormais beaucoup plus grand et il apparaît un échauffement sur le câble lui-même. Cela nous suggère alors un second problème : une augmentation de résistance causée, par exemple, par la rupture d'un fil du toron.

- **Cadrage thermique – exemple :**

Les deux images suivantes représentent un sectionneur haute tension avec une anomalie. L'image de gauche est réglée automatiquement par le logiciel de la caméra, qui a déterminé que la température la plus basse était de $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$, puis a ajusté le gain en conséquence.

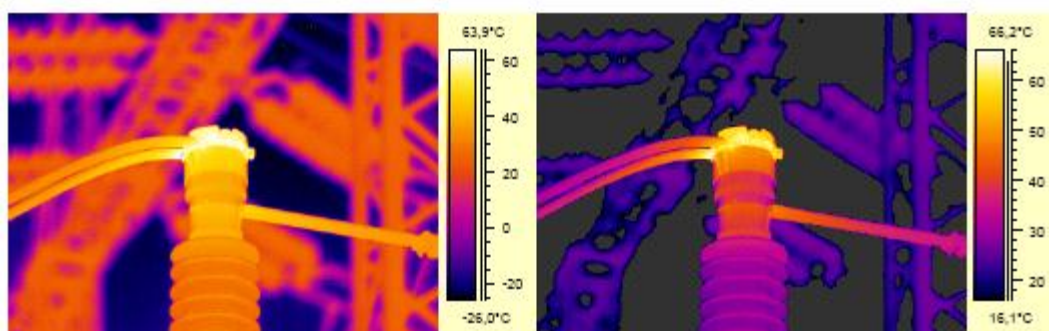


Figure 4.9 : Même image, réglée automatiquement (gauche) et cadrée thermiquement sur le composant (droite).

Une image réglée automatiquement avec un ciel froid à l'arrière-plan donne un gain trop large Ce qui a pour effet d'appauvrir le contraste dans la zone d'intérêt pour l'analyse. Dans l'image de droite, le gain est plus réduit et le niveau est sensiblement plus élevé. Il en résulte un meilleur contraste. Cette image est plus facile à analyser car la zone thermique est mieux mise en évidence. Il est important d'apprendre le cadrage thermique manuel car les images réglées automatiquement ne représentent pas toujours ce que nous devons voir, et nous pouvons passer à côté de problèmes cachés. Le cadrage thermique est la partie de l'analyse que le thermo graphiste réalise sur le terrain avant de stocker l'image pour la génération du rapport. Il peut cependant s'avérer nécessaire d'utiliser un contraste différent dans le rapport. Au terme de l'analyse, un cadrage thermique adapté au rapport devrait être défini avant de stocker l'image.

II-2.2 Isotherme :

L'isotherme remplace certaines couleurs dans l'échelle par des tons opposés. Il marque un

intervalle de température apparente égale. Il faut s'attarder sur le côté trompeur du terme "isotherme". Le terme en lui-même semble indiquer qu'il marque une température égale. Il n'en est rien ! Il marque un intervalle de température apparente égale. Nous savons déjà que les couleurs au sein d'une image ne représentent pas la température réelle. L'isotherme remplace uniquement ces couleurs par une autre contrastant plus avec les couleurs utilisées dans l'image. L'isotherme peut être déplacé de haut en bas sur l'échelle et élargi ou réduit selon vos besoins.



Figure 4.10 : L'isotherme remplace certaines couleurs par des tons opposés

Le contraste est encore une fois l'élément clé. Lorsque nous observons des images thermiques faibles, il est nécessaire d'apporter une assistance à notre vue. Il est possible d'utiliser l'isotherme pour suivre le flux de chaleur, ou repérer la présence d'un éventuel flux de chaleur. Si l'isotherme est placé à plat sur une surface ou un objet cible, cela signifie qu'il n'y a pas de flux de chaleur traversant cette surface ou cet objet (ce qui ne veut pas dire pour autant qu'il existe un flux de chaleur qui en émane dont la température serait supérieure à son environnement, mais c'est là un autre sujet). Si un conducteur électrique est chaud et présente une image thermique uniforme, cela signifie qu'il est chargé. S'il est trop chaud, ce n'est pas la connexion qui est en cause, mais la charge qui est trop élevée. Il est possible de localiser précisément le point le plus chaud à l'aide de l'isotherme. Il indiquera l'emplacement possible d'une source de chaleur sous la surface de l'objet cible observé, ou bien déterminera la zone la plus fragile d'une cuve isolée. L'isotherme est une fonction à but double. Dans ce chapitre nous l'utilisons pour analyser les images. Sur la plupart des caméras, l'isotherme a une fonction de mesure de la température que nous aborderons par la suite. L'isotherme d'intervalle est le type le plus courant. Votre caméra peut disposer, en plus, d'autres types d'isothermes. Reportez-vous au manuel de votre caméra pour obtenir de plus amples détails à ce sujet, ou testez vous-même leurs capacités ! Voici quelques exemples d'utilisation de l'isotherme.

- **Analyse avec isotherme - exemple 1**

Voici l'image thermique d'une tête d'un transformateur haute tension. Au premier coup d'œil, avec le cadrage thermique automatique, l'image ne nous apprend pas grande chose. Utilisons donc l'isotherme et voyons s'il est possible de discerner quelque chose.

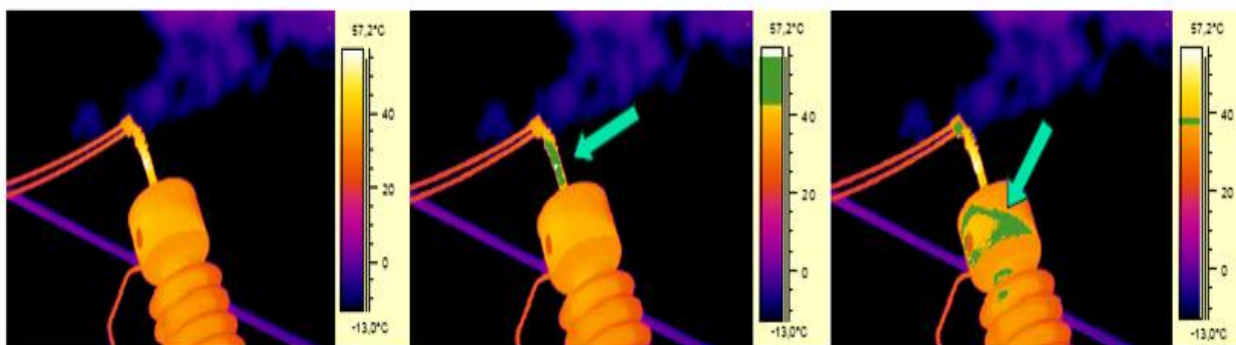


Figure 4.11 : Tête de transformateur haute tension avec des isothermes à différents endroits

Dans l'image au milieu, l'isotherme se concentre sur un point au niveau du raccord. Ce point génère de la chaleur, et peut de ce fait représenter un problème. Dans la deuxième image, l'isotherme fait apparaître le niveau d'huile dans la tête.

- Analyse avec isotherme – exemple 2

Voici l'image d'un contacteur contrôlant un compresseur d'air. Analysons-le avec l'isotherme

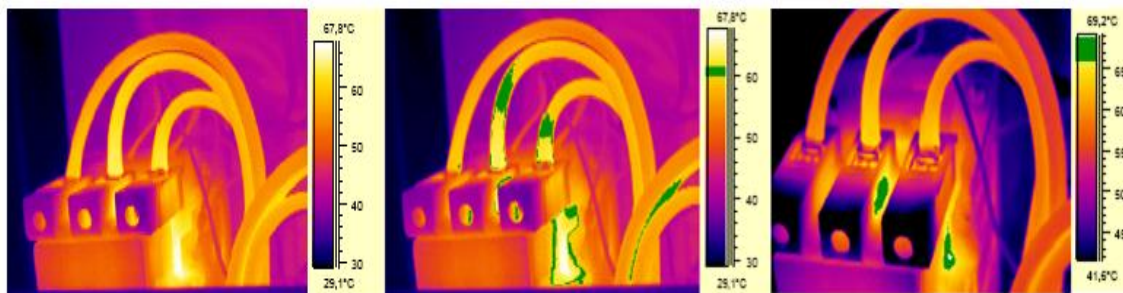


Figure 4.12 : Image thermique d'un contacteur avec des isothermes

L'image de milieu indique la présence d'un gradient thermique le long du câble. Celui-ci est plus chaud au niveau du contacteur. Est-ce le signe d'une mauvaise connexion ? Si nous regardons l'image de droite, il ne semble pas que ce soit le cas. La zone la plus chaude se situe sur le boîtier du contacteur, et on peut également observer une zone chaude entre les pinces de raccordement. Il faut donc conclure que la source d'échauffement se trouve à l'intérieur du contacteur. Cela peut être causé par de nombreux phénomènes, par exemple une mauvaise connexion interne ou des surfaces de contact brûlées. Il faut suggérer que le contacteur soit remplacé ou retiré pour effectuer des vérifications/réparations.

II-2.3 Palettes

Une palette assigne différentes couleurs pour marquer des niveaux de température apparente définis. Elle peut être plus ou moins contrastée selon les couleurs utilisées. Une image thermique peut être généralement affichée avec un maximum de 256 nuances de couleur ou de gris simultanément. Sur une échelle de gris, la couleur noire se trouve à l'une des extrémités et elle s'éclaircit progressivement à chacun des 256 pas jusqu'à devenir blanc. Ce qui signifie en fait qu'il n'y aura que très peu de contraste entre, par exemple, la 93ème et la 94ème nuance de gris. L'image couleur permet, quant à elle, d'utiliser une large gamme de couleurs pour obtenir un meilleur contraste. Les couleurs doivent être judicieusement assorties les unes aux autres, pour donner un semblant de lissage à l'image, et pour qu'elle ne soit pas pénible à observer. Ne choisissez pas simplement une palette parce que vous la trouvez jolie, et n'utilisez pas la même palette pour toutes nos opérations. Changeons de palette au cours de l'analyse pour voir apparaître d'éventuelles modifications. Nous obtiendrons parfois des résultats surprenants. En définitive, si une seule palette suffisait, notre appareil ne serait équipé que de celle-ci. L'utilisation des palettes dans les rapports semble devenir quelque peu conventionnel au sein des différents pays et secteurs d'activités.

Un utilisateur commence à se servir d'une palette particulière et les autres suivent. Ainsi, en peu de temps, l'utilisation de cette palette devient une "tradition". Les utilisateurs sont habitués à s'en servir et se sentent à l'aise dans son utilisation. Il n'y a rien de mal à cela. Seulement c'est à nous de voir si nous souhaitons suivre éternellement la masse, ou nous démarquons par notre différence. Avant tout à ce que le lecteur de notre rapport soit à l'aise avec la palette utilisée. Mais ne nous laissons pas perturber par cette considération lors de nos travaux sur le terrain. Les palettes utilisées lors de l'analyse et celles présentées en définitive dans le rapport peuvent être totalement différentes.

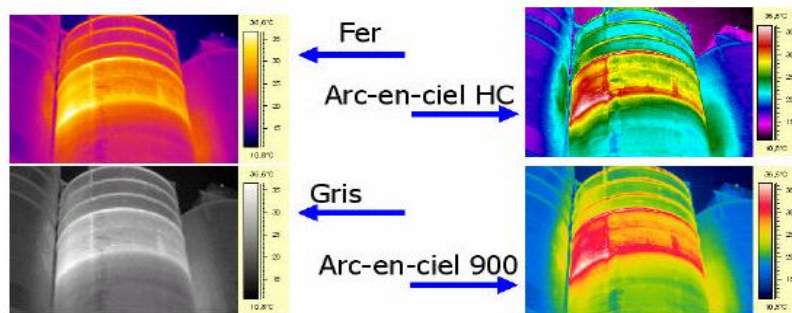


Figure 4.13 : différentes palettes

Voici quelques exemples de palettes. La plupart des caméras sont équipées au minimum d'une demi-douzaine de palettes supplémentaires, sans compter celles disponibles avec les progiciels. Les apparences et les noms de ces palettes peuvent varier d'un appareil à l'autre. L'objectif principal étant de créer des effets de contraste différents au sein de l'image.

II-2.4 Profil

Le profil fait apparaître les températures le long d'une ligne au sein de l'image, la fonction Profil n'est pas très compliquée à comprendre. C'est simplement un diagramme avec la température sur l'axe vertical et la distance sur l'axe horizontal. C'est une fonction très utile dans certaines circonstances.

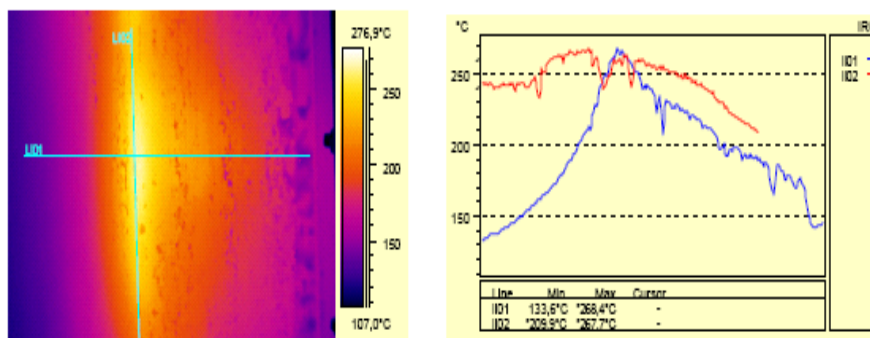


Figure 4.14 : gradient thermique vertical et horizontal de ce point chaud

La fonction Profil s'avère être un choix judicieux dans certains cas ou le gradient thermique est réparti sur toute la longueur d'un objet cible, comme sur des rouleaux dans une machine à papier.

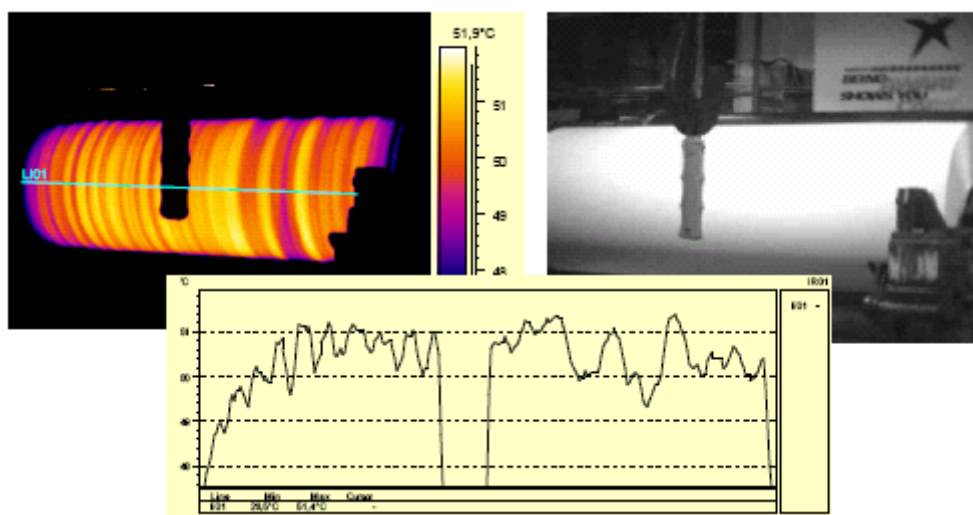


Figure 4.15 : Utilisation de la fonction Profil dans la production de papier

Dans cette image nous pouvons voir les irrégularités du rouleau à sa sortie de la machine à papier. Ces irrégularités ne sont pas souhaitées à ce stade, et l'image thermique peut servir aux opérateurs pour ajuster le procédé de fabrication et obtenir une courbe plus lisse.

II-3 Les Analyse d'image – échantillons faussés :

En thermographie de nombreux facteurs peuvent entraîner des erreurs d'analyse. Dans cette partie nous allons aborder les deux causes d'erreurs les plus fréquentes :

- Les réflexions de points source
- Les différences d'émissivité

Attardons-nous un peu sur le terme "réflexion". Si nous nous plaçons face à un miroir nous verrons notre propre image réfléchi. Cela signifie-t-il pour autant que si je ne suis plus en face du miroir aucune image n'est réfléchi ? Certainement pas ! Le miroir réfléchira le mur (ou n'importe quoi d'autre) situé derrière la place où nous nous trouvons. Il en va de même avec les images thermiques et les réflexions. Si nous plaçons un objet chaud devant la surface réfléchissante, nous verrons une réflexion de l'objet sur notre image thermique. Si nous retirons la source chaude, la surface réfléchira autre chose. Il y aura toujours quelque chose qui se réfléchira sur notre objet cible.

Pour obtenir une image uniforme et facile à analyser, il est préférable qu'une surface avec un rayonnement réfléchi régulier se réfléchisse sur l'objet cible. Si ce n'est pas le cas, il risque de se produire une réflexion localisée d'une source. Ce que nous appelons couramment "réflexion" est plus justement un point avec un rayonnement réfléchi différent de la zone qui l'entoure ; on parle alors de réflexion ponctuelle.

Une réflexion ponctuelle peut être plus chaude ou plus froide que la zone alentour.

Les réflexions sont très ennuyeuses car elles peuvent passer pour des anomalies. Par exemple lorsqu'il s'agit de trouver des connexions chaudes dans un système électrique.

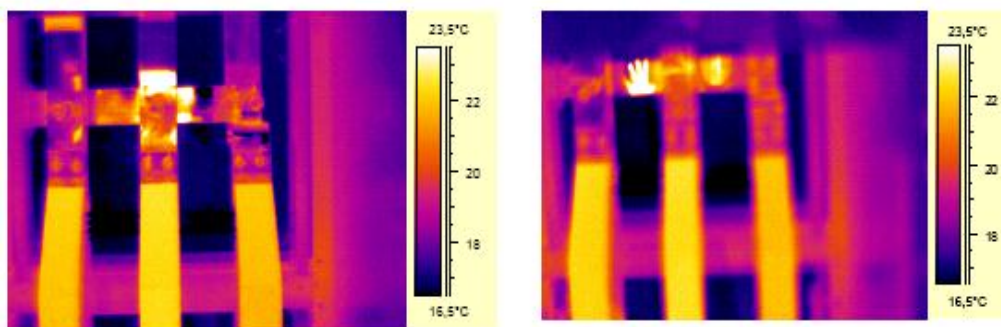


Figure 4.16 : Réflexions de l'opérateur (présence des mains et du visage).

L'image de droite est mise au point deux fois plus loin de l'objet cible et sous un angle différent. Dans l'image de gauche un "point chaud" apparaît sur la barre du milieu, qu'un utilisateur inexpérimenté peut prendre pour une connexion chaude. Dans l'image de droite nous pouvons voir qu'il s'agit en fait d'une réflexion de l'opérateur. Cette dernière image a été prise avec un angle différent et avec L'origine des réflexions ponctuelles peut être multiple. Et ce n'est forcément le soleil. L'opérateur lui-même est la cause la plus fréquente. Ne nous plaçons pas directement en face de l'objet cible. Comme pour un miroir, les angles de réflexion incidents et réfléchis sont toujours les mêmes sur un matériau spéculaire. Grâce à cela nous

Pourrons localiser et éviter les points de réflexion, si la surface diffuse, la réflexion sortante sera de même et éclatera dans toutes sortes de directions. Dans ce cas, une réflexion en un point donné sera de plus faible intensité.

La plupart des surfaces réfléchissantes sont plus spéculaires en infrarouge que dans le visible. Ainsi une surface diffusante dans le spectre visible peut très bien agir comme un miroir dans le spectre infrarouge.

- Réflexions ponctuelles

Si la source se déplace avec vous il s'agit d'une réflexion.

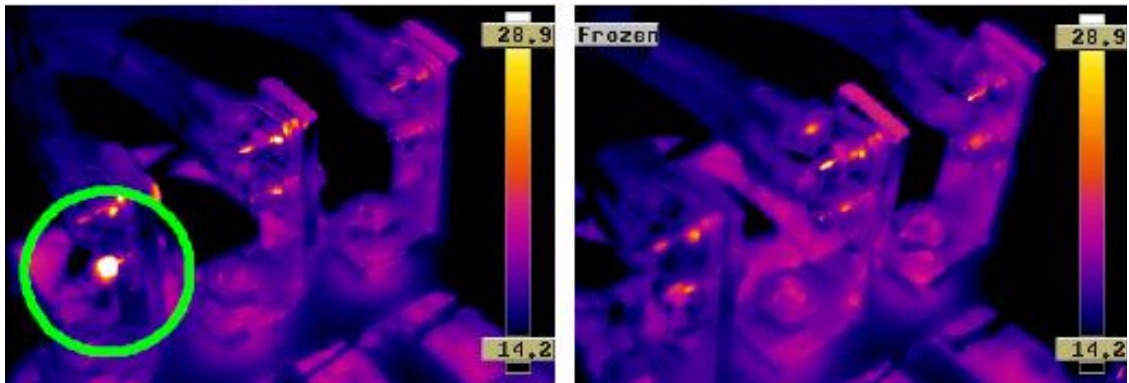


Figure 4.17 : Réflexion d'un point source, disparaît lorsque l'angle change

On parle de réflexion ponctuelle lorsqu'en changeant l'angle de vision sur l'objet cible le "point chaud" disparaît.

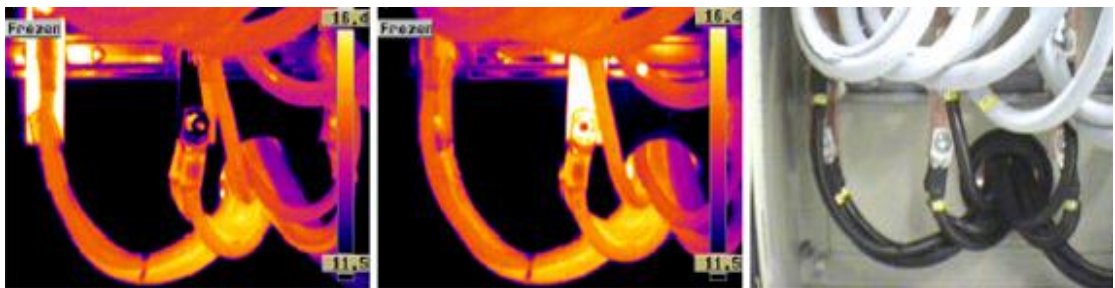


Figure 4.18 : Influence de l'angle à la réflexion

Dans ces deux images la réflexion s'est déplacée de la gauche vers la droite quand l'angle de la caméra a été modifié.

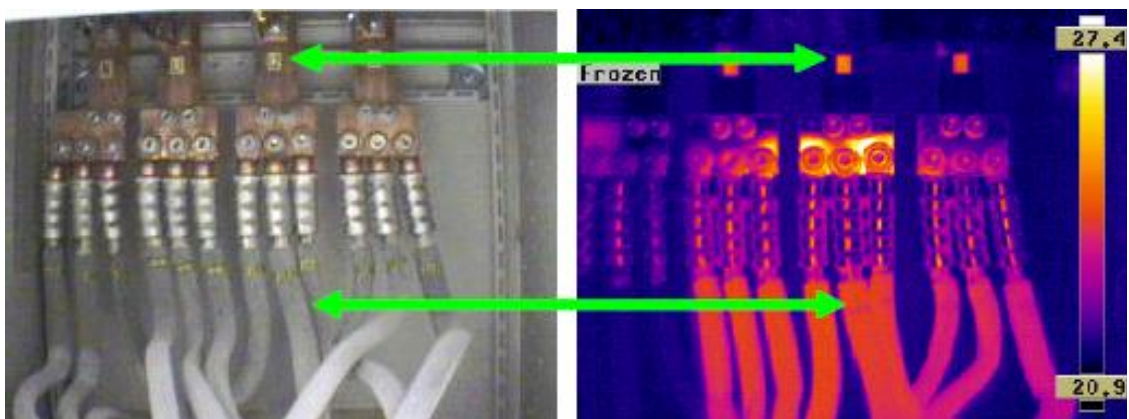


Figure 4.19 : grande émissivité permet une lecture plus "réaliste"

Il n'est pas étonnant de constater que les surfaces à faible émissivité sont plus réfléchissantes. Nous avons appris précédemment qu'une surface à faible émissivité cherchait à camoufler sa véritable température en réfléchissant ce qui est autour. En observant visuellement un objet cible et en cherchant à déterminer où se situent les émissivités élevées et faibles, il est possible de savoir quelles températures apparentes se rapprochent le plus des températures réelles. Dans le cas de la figure 9.18, le câble et le petit morceau de bande adhésive sur la barre présentent chacun une émissivité forte et donnent des températures apparentes similaires. Les surfaces avec une émissivité forte sont dignes de confiance, les autres doivent être ignorées.

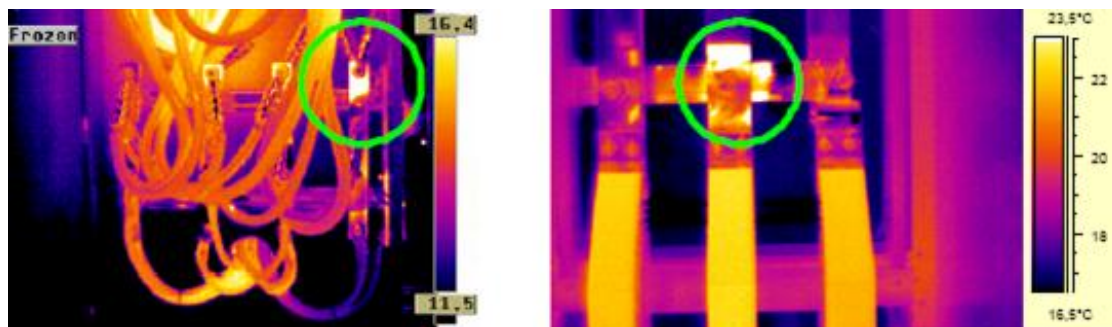


Figure 4.20 :L'échauffement réel présente généralement un motif uniforme

Ici c'est l'absence de gradient thermique qui révèle la présence d'une réflexion. Un véritable point chaud donnera un gradient thermique régulier et uniforme, alors qu'une réflexion présente généralement un motif plus accidenté.

II-4 Différences de température apparente :

Voici une image thermique présentant plusieurs différences de température apparente.

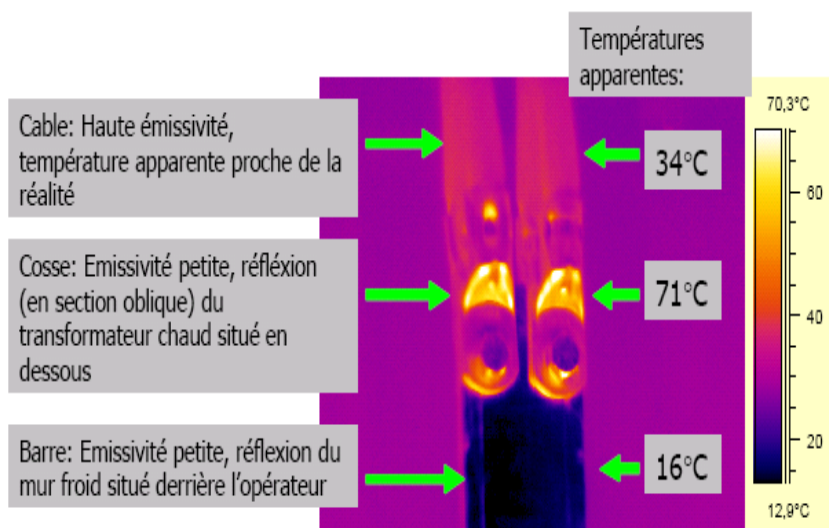


Figure 4.21 : Températures apparentes différentes

Les questions sont les suivantes :

- Pourquoi l'image a-t-elle cette allure ?
- Pourquoi avons-nous ces températures apparentes ?
- Lesquelles sont fiables ?

II-4.1 L'objet cible

Voici un schéma représentant l'objet cible. Cette fois nous évitons la réflexion de l'opérateur : nous ne sommes pas directement en face de l'objet cible. Des câbles sont connectés à une barre. Celle-ci est reliée à un transformateur isolé présentant généralement une température de surface élevée. Derrière l'opérateur se trouve un mur en béton froid.

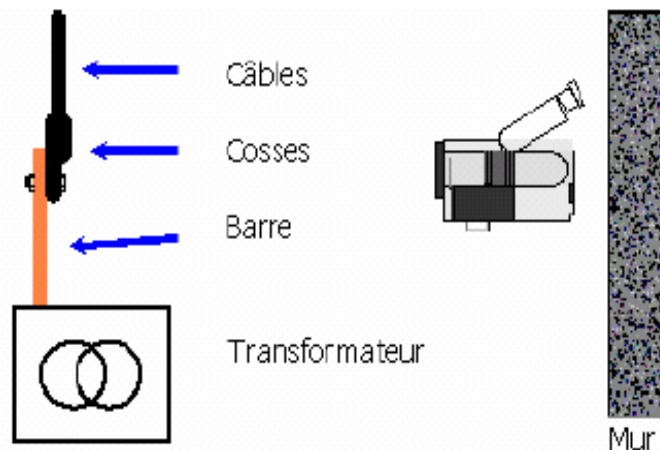


Figure 4.22 : Différentes sources de réflexion et émissivités donnent des températures apparentes différentes.

II-4.2 Les réflexions de source diverses

Nous pouvons tirer les conclusions suivantes de notre relevé de températures apparentes. La partie isolée du câble a une émissivité forte, ce qui donne une température proche de la réalité. La cosse du câble a une émissivité faible, et réfléchit le transformateur à l'angle. Elle semble

donc chaude. La barre réfléchit le mur situé derrière l'opérateur et semble froide. En fait tous ces composants ont une température réelle identique, qui se rapproche de la température apparente relevée sur le câble. Il y a toujours quelque chose de réfléchi !

- **Différence d'émissivité - exemple 1 :**

Un changement abrupt d'émissivité engendre également un changement abrupt dans l'image thermique, même si la température réelle reste identique.

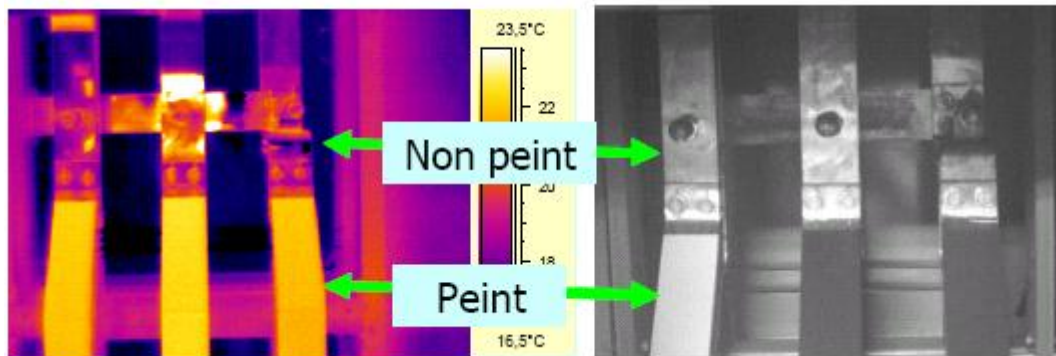


Figure 4.23 : Apparences différentes des parties peintes et non peintes de barres

Cette image peut à nouveau nous servir d'exemple : les parties peintes et non peintes ont une apparence différente dans le visible. En infrarouge, la partie peinte présentera bien évidemment une température plus proche de la réalité car son émissivité sera grande. Il n'y a pas de gradient thermique dans cette image ; nous pouvons donc en conclure qu'il n'y a pas d'anomalie.

- **Différence d'émissivité - exemple 2**

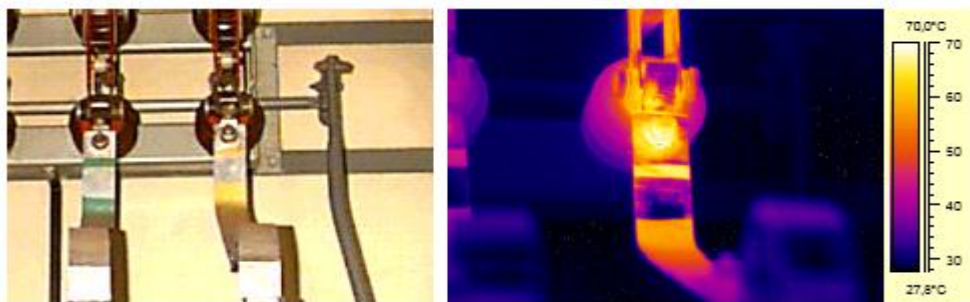


Figure 4.24 : Changements abrupts dans l'image thermique causés par un changement d'émissivité

Dans cette image thermique il y a une connexion chaude. Celle-ci est matérialisée par la présence d'un gradient thermique dirigé de la connexion vers la barre. Le gradient thermique est entrecoupé par des changements d'émissivité sur les parties non peintes de la barre.

- Différence d'émissivité - exemple 3 :



Figure 4.25 : Objet cible plus froid réfléchissant un environnement plus chaud

Si l'on ignore dans quelles conditions a été prise cette image thermique, elle peut paraître bizarre. Il n'y a pas de charge électrique sur les câbles. Ils se trouvent simplement dans une pièce à l'intérieur de laquelle des groupes électrogènes diesel de secours passent un test de fonctionnement. La procédure d'essai a réchauffé la pièce ainsi que la boîte de connexion

que nous apercevons sur les images. Mais les câbles sont restés froids grâce à leur capacité calorifique plus élevée. Les éléments à faible émissivité réfléchissent désormais les alentours plus chauds.

II-4.3 Différentes sources de réflexion

Jusqu'à présent nous avons parlé des points de réflexion. Comme nous l'avons appris ceux-ci génèrent des images thermiques faussés. Cependant même les grandes surfaces planes avec différents niveaux de rayonnement thermique peuvent fausser les échantillons L'une de ces "surfaces" est le ciel. Un ciel dégagé présentera une température apparente très basse. Un ciel nuageux présentera une température apparente plus proche de celle au sol, mais elle sera quand même plus froide.

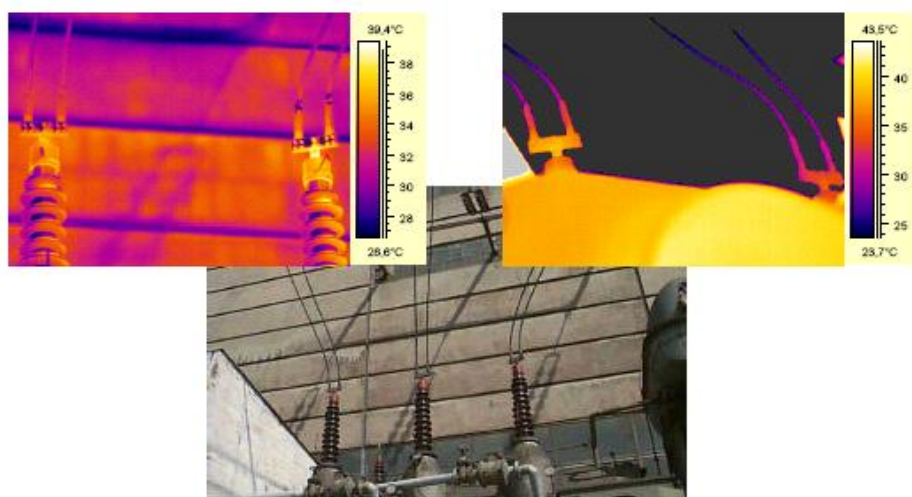


Figure 4.26 : Connexions de transformateur vues depuis différents emplacements

Nous pouvons déduire qu'il s'agit d'une belle journée ensoleillée. Nous pouvons effectivement apercevoir les ombres des composants sur les parois du bâtiment. Le thermogramme de gauche a été pris du même endroit que la photo. Les membrures transversales qui relient les deux doubles lignes électriques à la traversée du milieu semblent plutôt froides. Ceci est dû au ciel froid se réfléchissant sur elles. L'image n'est pas facile à analyser. Le thermogramme de droite a été pris cette fois depuis un endroit situé entre le transformateur et le bâtiment. Dans cette image ce n'est plus le ciel qui est réfléchi mais les murs du bâtiment. Il est beaucoup plus facile d'analyser l'image car les zones thermiques semblent bien plus uniformes. On ne relève qu'une très faible anomalie thermique sur la connexion gauche (à droite sur les deux autres clichés).

- **Conseils pour éviter les points de réflexion :**

Voici quelques règles permettant de localiser et d'éviter les points de réflexion :

- Ne doit pas restons directement devant l'objet cible pour éviter de réfléchir notre propre image.
- On se déplace. Si le point chaud se déplace également, il s'agit d'une réflexion
- On doit Utilise angle incident = angle réfléchi pour déterminer la source et l'éviter.
- On doit Utilise un morceau de carton ou toute autre matériau opaque et léger pouvant faire écran à la réflexion
- Recherchons les gradients thermiques. Seuls les véritables échauffements en présentent
- Recherchons les parties de l'objet cible avec une émissivité forte.

Celles-ci présentent une réflexion plus faible et une température apparente plus proche de la température réelle.

Chapitre V

*Application d'analyse
thermique*

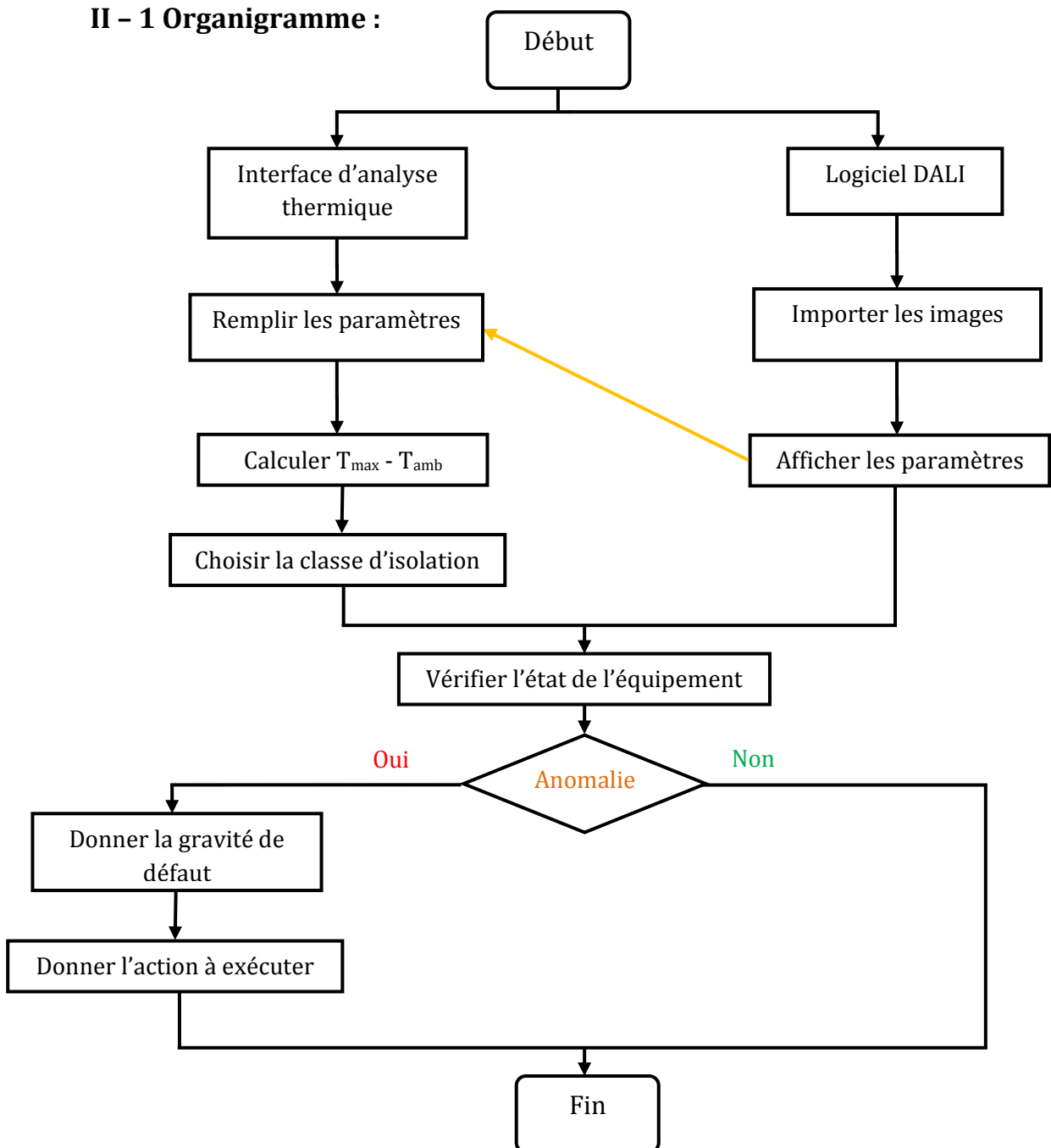
I. INTRODUCTION :

Les études effectuées ont été centrés sur la thermographie infrarouge. A ce titre et pour que notre travail à son objectif, nous essayons de réaliser une application pour l'analyse des images thermique. A l'aide de cette application on peut savoir l'état de l'équipement contrôlé par la caméra thermique.

Dans ce chapitre et avec une brève présentation on va offrir l'idée générale de notre application et une explication de quelques étapes.

II. DESCRIPTION DE L'APPLICATION :

II - 1 Organigramme :



II - 2 Description :

L'application proposée est conçue autour d'analyse des images thermique développée par le logiciel JAVA.

L'objectif de ce logiciel est d'identifier la température maximale dans l'image thermique pour connaître l'état de santé de l'équipement.

Durant la réalisation de l'application, nous avons trouvé des difficultés qui consistent un manque des informations suivantes :

- Le programme JAVA ne peut pas lire l'extension de l'image (.dli), pour cela, on pense de réaliser une astuce qui fonctionne l'application JAVA avec le logiciel de traitement des images thermiques DALI, qui sera le fichier « analyseur ».
- Pas de références de température de fonctionnement normal pour les équipements ; soit statiques ou machines tournantes, c'est pour cela le travail effectué est applicable que pour les moteurs électriques.

Ce fichier du format d'extension (.bat) sert à exécuter 2 ou plusieurs programmes en même temps, selon l'ordre de classement des programmes, sa forme est de :

- start %SystemRoot%\explorer.exe C:\Program Files\DALI\Dali Infrared Reporter\DI_Reporter.exe
- start % SystemRoot%\explorer.exe C:\Users\Sony\Desktop\Analyser.exe

C'est-à-dire : un simple clique sur le fichier 'Analyseur.bat', lancer le programme DALI 'DI_Reporter.exe' puis lancement de l'application réalisée 'Analyser.exe'

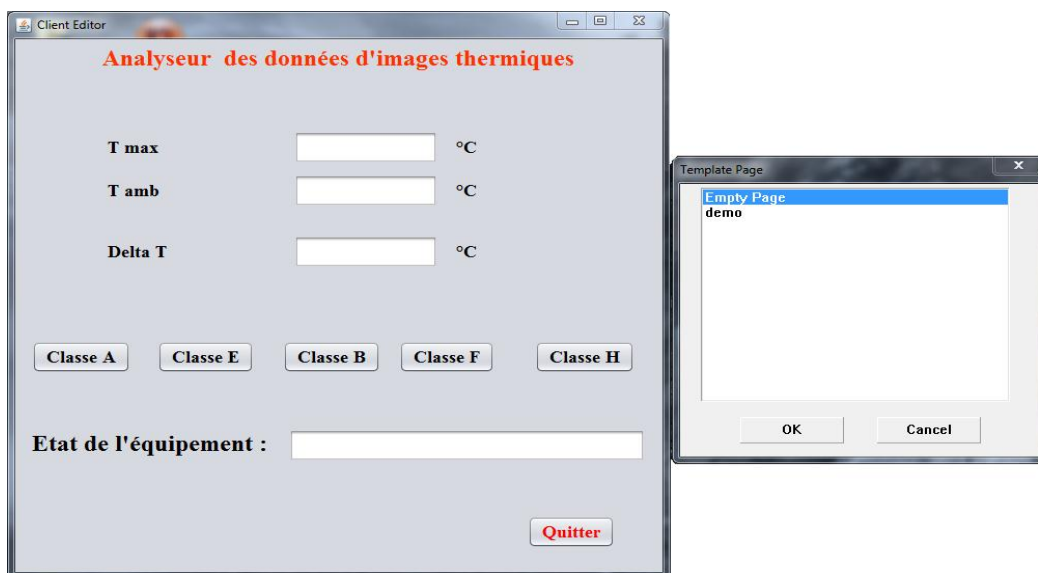


Figure 5.1 : Interface du l'analyseur.bat

III. DESCRIPTION DE L'APPLICATION :

Comme on a dit précédemment, l'application est constituée de 2 programmes :

III-1 Le logiciel DALI :

Les fonctions principales de logiciel (figure 5.2) sont multiples et efficaces comme nous les citons au précédent chapitre 4 l'utilisation de la caméra infrarouge, et les fonctions nécessaires que nous avons besoin de lui sont :

1. La température ambiante de fonctionnement, pour trouver cette valeur un clique droit sur l'image thermique puis « settings », nous affiche tous données comme : la température ambiante, le taux d'humidité, l'émissivité, la distance entre la camera et l'objet capté

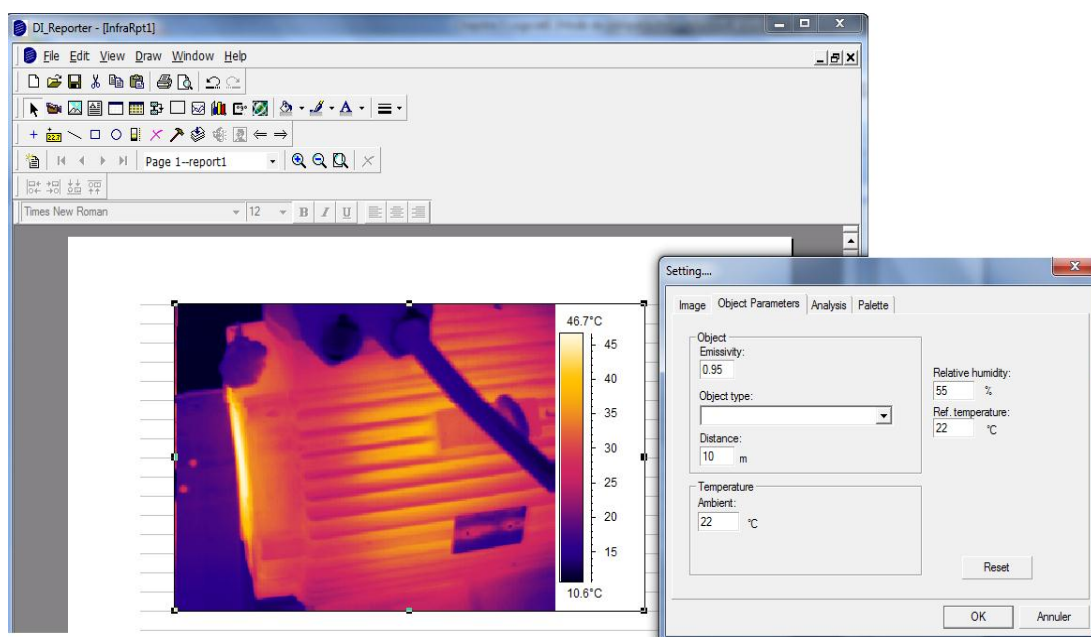


Figure 5.2 : DALI avec différentes fonctions

2. la température maximale qui sera affichée au sommet de l'échelle thermique.

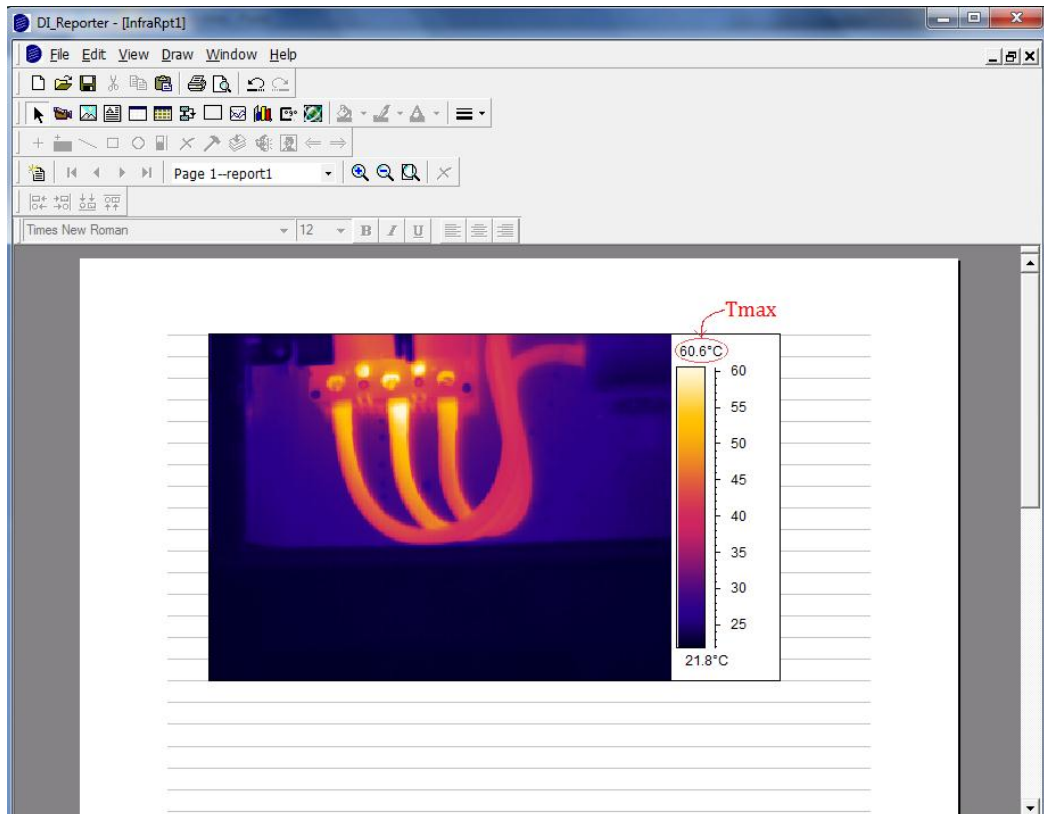
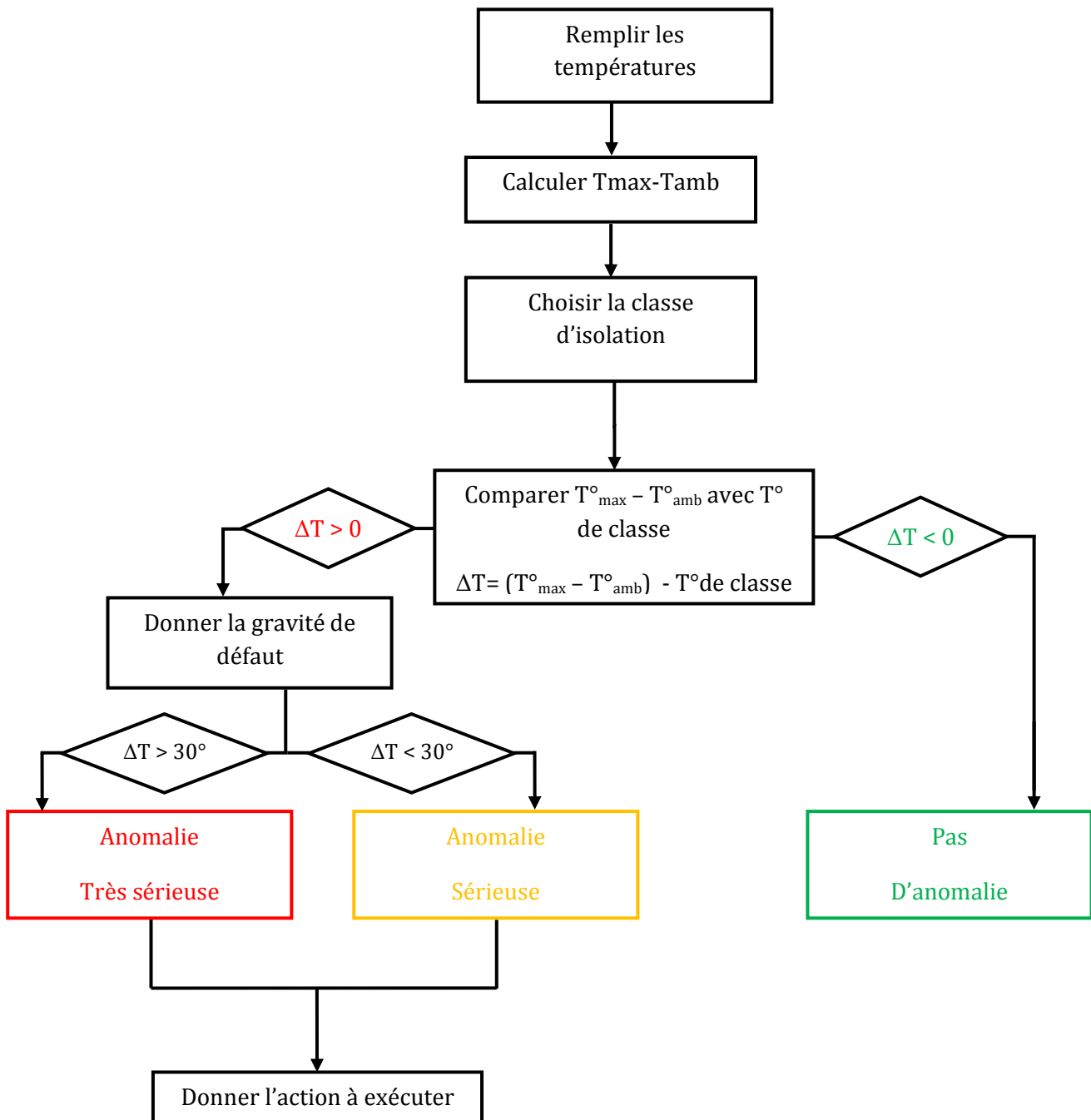


Figure 5.3 : Température maximale

III-2 L'application Analyseur de JAVA :

III-2-1 organigramme :



C'est une interface que nous avons créé par le langage JAVA, après un convertissement vers format '.exe' sert à calculer la différence entre la température maximale et la température ambiante de fonctionnement obtenu du logiciel DALI, cette différence de température est comparée par rapport aux classes d'isolation thermiques pour les moteurs électriques.

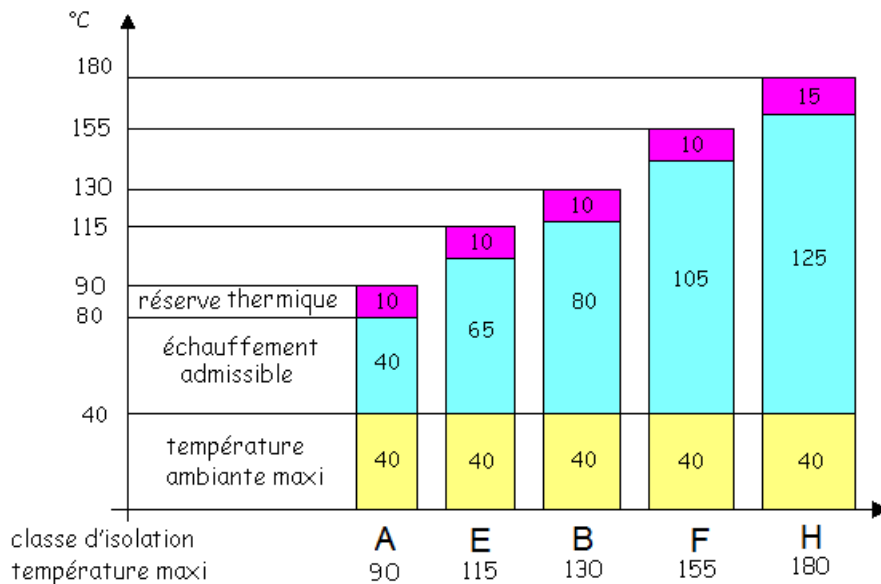


Figure 5.4 : Classe d'isolation thermique

Le rôle principal de l'analyseur JAVA est de donner s'il y a une anomalie et son degré de dégât ou pas d'anomalie, le tableau suivant montre les critères de classification :

Exemple de classification de défaut selon leur importance. Cela décidera de la priorité de réparation.

- Classe "A" – Une anomalie très sérieuse qui demande une action immédiate**
Exemple: Temp. Absolue supérieure à 80°C, ou deltaT supérieur à 30K
- Classe "B" – Une anomalie sérieuse qui demande une action rapide**
Exemple: DeltaT entre 5-30K
- Classe "C" – Une anomalie qui demande à être suivie dans le temps (cela peut même ne pas être un défaut)**
Exemple: DeltaT jusque 5K

Figure 5.5 : Classification de défaut

III-3 Principe de fonctionnement :

- Remplir la case de la température maximale
- Remplir la température ambiante
- Cliquer sur la classe d'isolation thermique pour le moteur électrique choisi.

III-4 Exemples :

- 1- un moteur électrique de classe B est capté à une température de 20 °C, fonctionne à 180 °C.



Figure 5.6 : Plaque signalétique du moteur

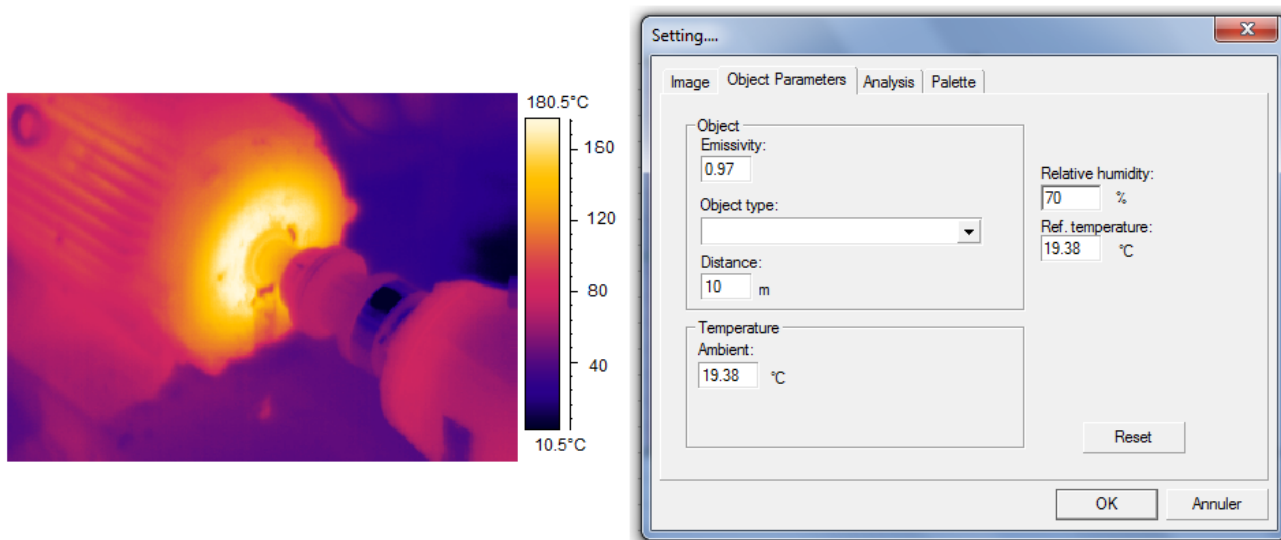


Figure 5.7 : Exemple1

Client Editor

Analyseur des données d'images thermiques

T max 180 °C

T amb 20 °C

Delta T 160 °C

Classe A Classe E Classe B Classe F Classe H

Etat de l'équipement : Anomalie tres sérieuse

Quitter

L'affichage obtenu montre l'existence d'une anomalie très sérieuse qui demande une action immédiate.

- Echauffement important du palier droit

Remèdes :

- Prévoir alignement et surveillance
- Vérifier l'état des roulements

2- Le second moteur de classe F est capté à une température de 20 °C, fonctionne à 150 °C.



Figure 5.8 : Plaque signalétique du moteur

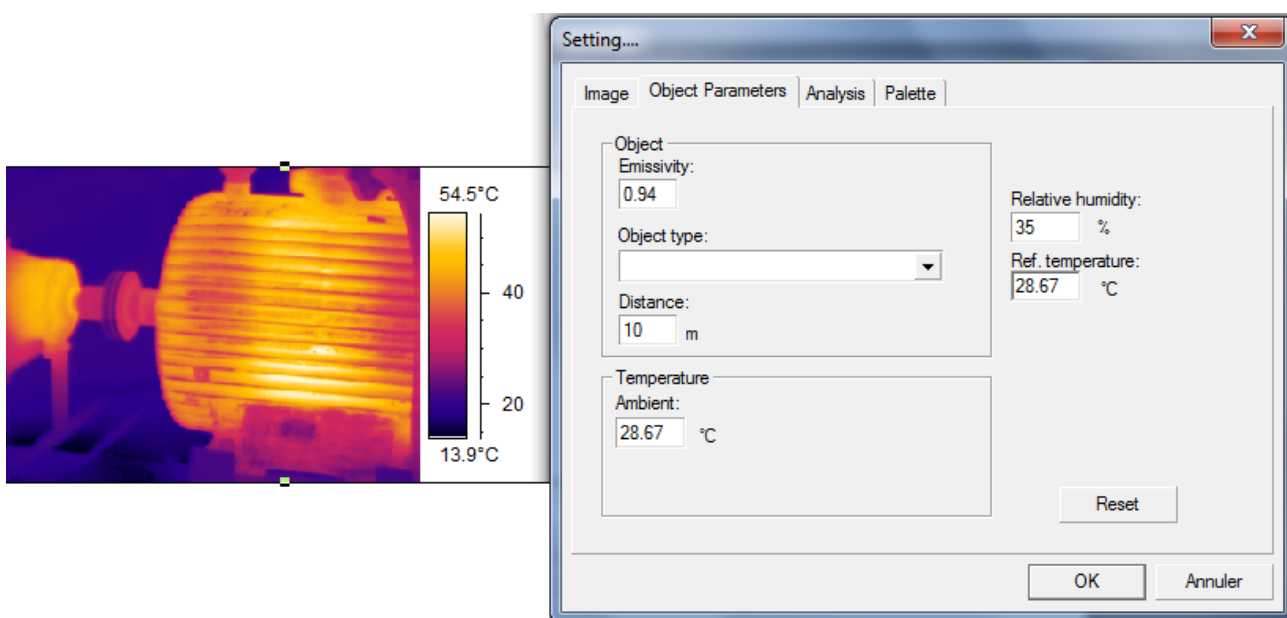
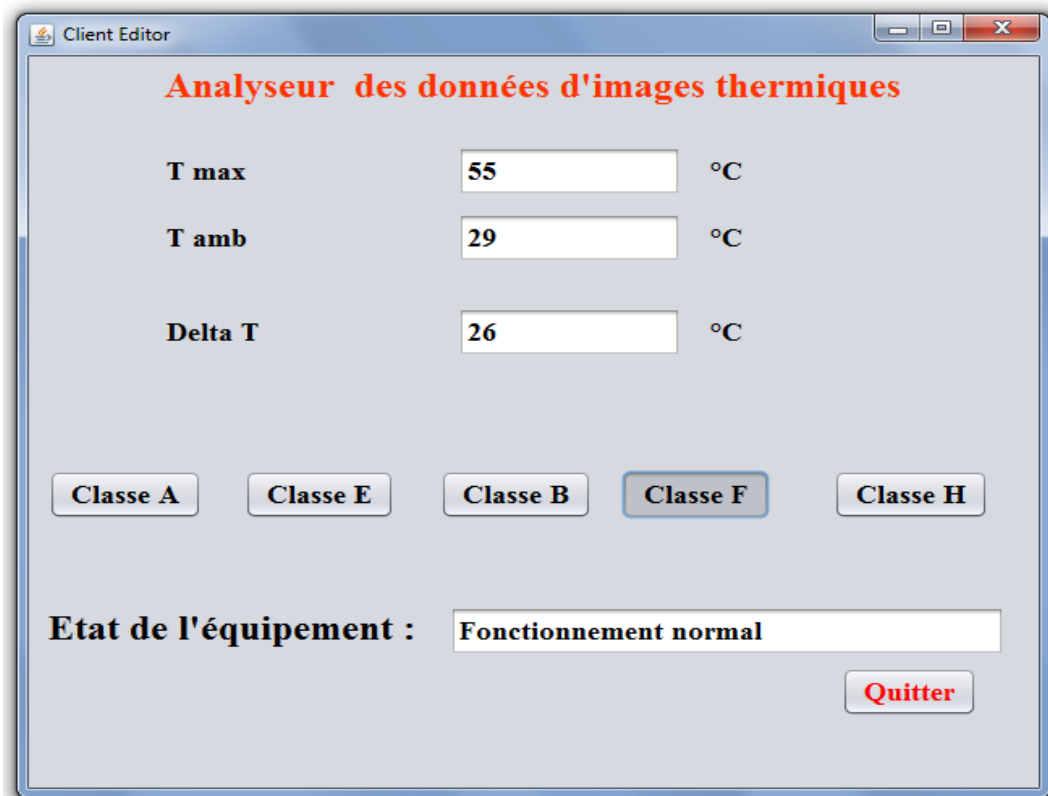


Figure 5.9 : Exemple 2



L'exécution obtenue montre qu'il n'existe pas d'une anomalie.

- 3- Un contacteur est capté à une température de 40°C, fonctionne à 95 °C.

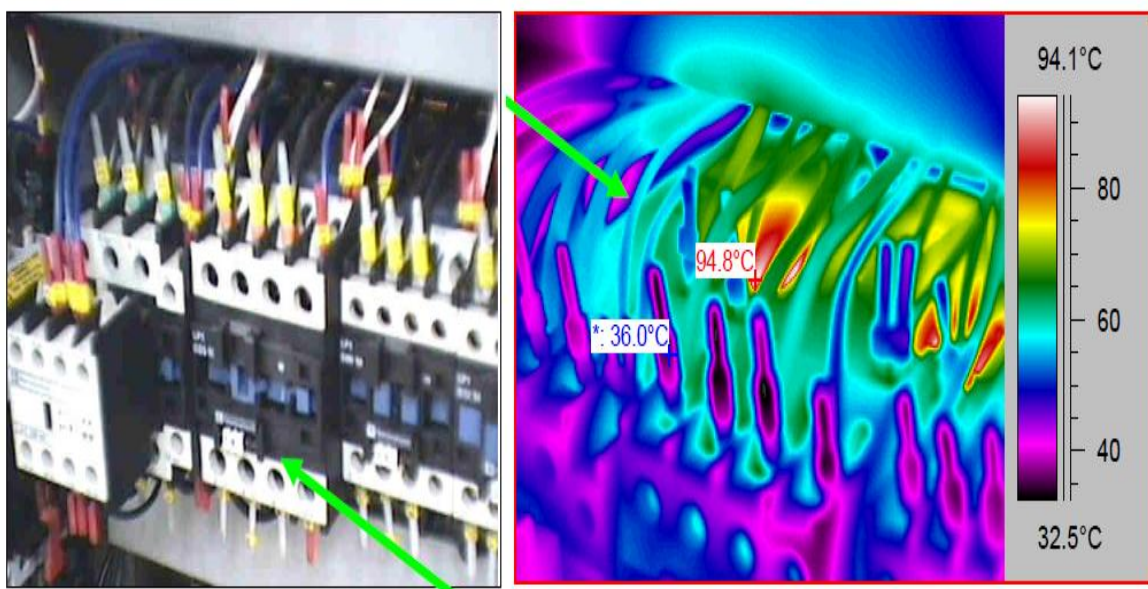


Figure 5.10 : Exemple 3

Echauffement au niveau de la bobine et éventuellement des contacts

Remèdes :

- A surveiller et éventuellement prévoir le remplacement.
- Un équilibrage des phases est à faire également.
- Revoir la cosse et le serrage sur le disjoncteur. Il est possible également que le contact soit fatigué sur cette phase.
- Revoir le serrage et le sertissage.

III-5 Remarque :

J'ai essayé d'implanter les actions qu'il faut exécuter après une anomalie ; mais j'ai trouvé des difficultés car les agents font ces opérations par expériences

Conclusion

Conclusion générale

CONCLUSION :

Le stage pratique effectué au niveau des unités de traitement de gaz (module 1) de Hassi R'mel traite un sujet d'une grande importance, il nous a permis d'acquérir et d'approfondir nos connaissances théoriques à l'effet de les mettre en pratique. Par ailleurs, ce stage nous a également permis de visiter les différents équipements industriels du process.

L'étude concernant l'application de la thermographie infrarouge, nous a permis d'éclairer le phénomène indésirable qui est l'échauffement des machines tournantes.

L'accent a été mis sur l'importance d'instaurer une politique de maintenance appropriée, se basant sur le préventif et non pas seulement sur le correctif. Elle permettrait d'évaluer de prolonger la durée de vie de l'équipement.

Notre travail permet de faire une analyse directe sur une scène thermique, et de donner l'état de santé de l'équipement, donc d'assurer cette analyse quand l'état de santé est corrélé avec les températures.

Et pour que la thermographie soit une technique puissante elle doit confier sur des thermographes "habilités", formés et expérimentés, professionnels des installations qu'ils contrôlent a pour objet de déceler et d'anticiper les échauffements anormaux, et/ou les variations excessives de températures qui pourraient entraîner.

D'après notre étude et l'application de la thermographie pour contrôler des équipements, en maintenance prédictive la thermographie est un outil nécessaire de contrôle des équipements électriques, et on peut dire que c'est un outil principal pour contrôler d'autres équipements tels chaudière, et canalisation...etc.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Gilbert Gaussorgues « La thermographie infrarouge »
4ème édition Paris Tec&Doc 1999

[2]-S. Delecroix & M. Skifati « Les Caméras Infrarouges » Editeur : IUTA
USTL. Lille

[3] D. Pajani « Mesure par thermographie infrarouge » ADD Editeur. 1989

[4] P. Maurie & D. Francis « Technique de l'ingénieur »
Imprimerie Strasbourgeoise SCHILTIGHEIM

[5] J. Crabol « Transfert de chaleur » tome 1-les principes.
Edition MASSON-Paris 1989

[6] Institut wallon ASBL « La thermographie infrarouge en maintenance
prédictive »
Éditeur : Ministère de la Région wallonne DGTRE – Service de l'Énergie

[7] J. Auberville « Maintenance industrielle » -Edition ellipses-Paris
2004.

[8] AGEMA570 « Manuel d'utilisation » Ed B FLIR Systems AB, septembre
1998

[9] SONATRACH Manuel de cours Niveau I – Publ.
No 1 560 093_C - Rev. 0.9 E –

<http://energie.wallonie.be/servlet/Repository/thermographie.pdf?ID=429&saveFile=true>

http://www.thermographie-services.com/r_d_ir.html

<http://www.mmc-controle.fr/?l=fr&p=thermography>

<http://ebookbrowse.com/search/thermographie-infrarouge-pdf>

<http://www.mmc-controle.fr/?l=fr&p=thermography>

Annexe

Le code source suivant démontre la procédure de création de l'application à l'aide du logiciel JAVA qui fait l'analyse thermique des images thermiques prises par la caméra infrarouge DALI

```
/*
 * Copyright (c) 2010, Oracle.
 * All rights reserved.
 *
 * Redistribution and use in source and binary forms, with or without
 * modification, are permitted provided that the following conditions
are met:
 *
 * * Redistributions of source code must retain the above copyright
notice,
 * this list of conditions and the following disclaimer.
 * * Redistributions in binary form must reproduce the above copyright
 * notice, this list of conditions and the following disclaimer in
 * the documentation and/or other materials provided with the
distribution.
 * * Neither the name of Oracle nor the names of its
 * contributors may be used to endorse or promote products derived
 * from this software without specific prior written permission.
 *
 * THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY THE COPYRIGHT HOLDERS AND CONTRIBUTORS
 * "AS IS" AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT NOT
 * LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS
FOR
 * A PARTICULAR PURPOSE ARE DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL THE COPYRIGHT
 * OWNER OR CONTRIBUTORS BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT,
INCIDENTAL,
 * SPECIAL, EXEMPLARY, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT
LIMITED
 * TO, PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES; LOSS OF USE, DATA,
OR
 * PROFITS; OR BUSINESS INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON ANY THEORY
OF
 * LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT (INCLUDING
 * NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY WAY OUT OF THE USE OF THIS
 * SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.
 */

package clienteditor;

/**
 * Form that allows editing of information about one client.
 *
 * @author Jiri Vagner, Jan Stola
 */
public class ClientEditor extends javax.swing.JPanel {
    private Client client = Client.createTestClient();

    public ClientEditor() {
        initComponents();
    }
}
```

Annexe

```
        bindingGroup.addBindingListener(new
LoggingBindingListener(validationMsgLabel));
    }

    /**
     * Returns <code>Client</code> being edited.
     *
     * @return <code>Client</code> being edited.
     */
    public Client getClient() {
        return client;
    }

    /**
     * Sets client to edit.
     *
     * @param client client to edit.
     */
    public void setClient(Client client) {
        Client oldClient = this.client;
        this.client = client;
        firePropertyChange("client", oldClient, client);
    }

    /** This method is called from within the constructor to
     * initialize the form.
     * WARNING: Do NOT modify this code. The content of this method is
     * always regenerated by the Form Editor.
     */
    // <editor-fold defaultstate="collapsed" desc="Generated Code">
    private void initComponents() {
        bindingGroup = new org.jdesktop.beansbinding.BindingGroup();

        sexButtonGroup = new javax.swing.ButtonGroup();
        ageConverter = new clienteditor.AgeConverter();
        ageValidator = new clienteditor.AgeValidator();
        maritalStatusConverter = new
clienteditor.MaritalStatusConverter();
        requiredStringValidator = new
clienteditor.RequiredStringValidator();
        emailValidator = new clienteditor.EmailValidator();
        jLabel1 = new javax.swing.JLabel();
        usernameLabel = new javax.swing.JLabel();
        clientInfoLabel = new javax.swing.JLabel();
        validationMsgLabel = new javax.swing.JLabel();
        jLabel3 = new javax.swing.JLabel();
        jLabel4 = new javax.swing.JLabel();
        jLabel5 = new javax.swing.JLabel();
        jLabel6 = new javax.swing.JLabel();
        jLabel7 = new javax.swing.JLabel();
        jLabel8 = new javax.swing.JLabel();
        jButton1 = new javax.swing.JButton();
    }
}
</editor-fold>

```


Annexe

```
jButton2 = new javax.swing.JButton();
jButton3 = new javax.swing.JButton();
jButton4 = new javax.swing.JButton();
jButton5 = new javax.swing.JButton();
clientInfoLabel1 = new javax.swing.JLabel();
jButton6 = new javax.swing.JButton();
jScrollPane4 = new javax.swing.JScrollPane();
jEditorPane1 = new javax.swing.JEditorPane();
jScrollPane5 = new javax.swing.JScrollPane();
jEditorPane2 = new javax.swing.JEditorPane();
jScrollPane6 = new javax.swing.JScrollPane();
jEditorPane3 = new javax.swing.JEditorPane();
jScrollPane7 = new javax.swing.JScrollPane();
jEditorPane4 = new javax.swing.JEditorPane();

jLabel1.setText("jLabel1");

usernameLabel.setFont(new java.awt.Font("Dialog", 1, 24)); //
NOI18N

    org.jdesktop.beansbinding.Binding binding =
org.jdesktop.beansbinding.Bindings.createAutoBinding(org.jdesktop.beans
binding.AutoBinding.UpdateStrategy.READ_WRITE, this,
org.jdesktop.beansbinding.ELProperty.create("${client.firstName}
${client.surname}"), usernameLabel,
org.jdesktop.beansbinding.BeanProperty.create("text"),
"displayNameTitle");
    bindingGroup.addBinding(binding);

clientInfoLabel.setFont(new java.awt.Font("Dialog", 0, 24)); //
NOI18N
clientInfoLabel.setText("Analyseur de données"); // NOI18N

validationMsgLabel.setFont(new java.awt.Font("Dialog", 1, 11));
// NOI18N
validationMsgLabel.setForeground(new java.awt.Color(255, 0,
0));

jLabel3.setText("° C");

jLabel4.setText("° C");

jLabel5.setText("T max");

jLabel6.setText("delta T ");

jLabel7.setText("° C");

jLabel8.setText("T amb");

jButton1.setText("Classe A");
```

Annexe

```
        jButton2.setText("Classe E");

        jButton3.setText("Classe B");

        jButton4.setText("Classe F");

        jButton5.setText("Classe H");

        clientInfoLabel1.setFont(new java.awt.Font("Dialog", 0, 24));
// NOI18N
        clientInfoLabel1.setText("Etat de l'équipement :"); // NOI18N

        jButton6.setForeground(new java.awt.Color(204, 0, 0));
        jButton6.setText("Quitter");
        jButton6.setCursor(new
java.awt.Cursor(java.awt.Cursor.DEFAULT_CURSOR));

        jScrollPane4.setViewportViewView(jEditorPanel);

        jScrollPane5.setViewportViewView(jEditorPane2);

        jScrollPane6.setViewportViewView(jEditorPane3);

        jScrollPane7.setViewportViewView(jEditorPane4);

        org.jdesktop.layout.GroupLayout layout = new
org.jdesktop.layout.GroupLayout(this);
        this.setLayout(layout);
        layout.setHorizontalGroup(

layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING)
            .add(org.jdesktop.layout.GroupLayout.TRAILING,
layout.createSequentialGroup()
                .addContainerGap()

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING)
)
                .add(validationMsgLabel,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE, Short.MAX_VALUE)
                .add(layout.createSequentialGroup()

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING)
)
                    .add(layout.createSequentialGroup()
                        .add(138, 138, 138)
                        .add(clientInfoLabel,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 296,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE))
                    .add(layout.createSequentialGroup()
                        .add(10, 10, 10)
```

Annexe

```
.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING
)
    .add(layout.createSequentialGroup()
        .add(jButton1)
        .add(32, 32, 32)
        .add(jButton2))
    .add(layout.createSequentialGroup()
        .add(clientInfoLabel1,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 296,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)

.addPreferredGap(org.jdesktop.layout.LayoutStyle.RELATED)
    .add(jScrollPane7,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 236,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)))
    .add(layout.createSequentialGroup()
        .add(37, 37, 37)

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING
)
    .add(jLabel8,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 51,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
    .add(jLabel5,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 64,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
    .add(jLabel6,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 64,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE))

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING
)
    .add(layout.createSequentialGroup()
        .add(128, 128, 128)
        .add(jButton3)
        .add(39, 39, 39)
        .add(jButton4)

.addPreferredGap(org.jdesktop.layout.LayoutStyle.RELATED, 55,
Short.MAX_VALUE)
    .add(jButton5)
    .add(13, 13, 13))
    .add(layout.createSequentialGroup()

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING
)

.add(layout.createSequentialGroup()
    .add(25, 25, 25)
    .add(jScrollPane4,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE,
```

Annexe

```
org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE))

.add(org.jdesktop.layout.GroupLayout.TRAILING,
layout.createSequentialGroup())

.addPreferredGap(org.jdesktop.layout.LayoutStyle.RELATED)

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING
)

.add(org.jdesktop.layout.GroupLayout.TRAILING, jScrollPane5,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)

.add(org.jdesktop.layout.GroupLayout.TRAILING, jScrollPane6,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)))

.addPreferredGap(org.jdesktop.layout.LayoutStyle.RELATED)

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING
)

.add(layout.createSequentialGroup()

.add(jLabel3,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 48,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)

.add(31, 269,
Short.MAX_VALUE))

.add(org.jdesktop.layout.GroupLayout.TRAILING, jLabel7,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE, Short.MAX_VALUE)

.add(jLabel4,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE, Short.MAX_VALUE))))))

.add(18, 18, 18)

.add(usernameLabel,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE, 206, Short.MAX_VALUE))

.addContainerGap()

.add(org.jdesktop.layout.GroupLayout.TRAILING,
layout.createSequentialGroup()

.addContainerGap(org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,
Short.MAX_VALUE)

.add(jButton6)

.add(251, 251, 251))

);
layout.setVerticalGroup(
```

Annexe

```
layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING)
    .add(layout.createSequentialGroup()
        .add(20, 20, 20)

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING)
)
    .add(clientInfoLabel,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 27,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
    .add(usernameLabel,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 27,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
    .add(18, 18, 18)

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.TRAILING)
)
    .add(layout.createSequentialGroup()

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING)
)
    .add(layout.createSequentialGroup()

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.BASELINE)
)
    .add(jLabel5,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 33,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
    .add(jLabel3,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE, Short.MAX_VALUE))
    .add(23, 23, 23)
    .add(layout.createSequentialGroup()
    .add(13, 13, 13)
    .add(jScrollPane6,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 38,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)

.addPreferredGap(org.jdesktop.layout.LayoutStyle.RELATED,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.DEFAULT_SIZE, Short.MAX_VALUE))

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING)
)
    .add(jLabel4,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 29,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
    .add(jLabel8,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 33,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
    .add(jScrollPane4,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 38,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE))
```

Annexe

```
.add(25, 25, 25)

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.TRAILING)
    .add(jLabel7,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 29,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
    .add(jScrollPane5,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 38,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE))
    .add(jLabel6,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 29,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
    .add(35, 35, 35)

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.BASELINE)
    .add(jButton1)
    .add(jButton2)
    .add(jButton3)
    .add(jButton4)
    .add(jButton5))
    .add(31, 31, 31)

.add(layout.createParallelGroup(org.jdesktop.layout.GroupLayout.LEADING)
    .add(clientInfoLabel1,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 27,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
    .add(jScrollPane7,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 38,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE))

.addPreferredGap(org.jdesktop.layout.LayoutStyle.UNRELATED)
    .add(jButton6)

.addPreferredGap(org.jdesktop.layout.LayoutStyle.RELATED, 309,
Short.MAX_VALUE)
    .add(validationMsgLabel,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE, 18,
org.jdesktop.layout.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
    .addContainerGap())
);

bindingGroup.bind();
} // </editor-fold>
add your handling code here:
int a,b,resultat;
String Chain1, Chain2, Chain3,Chain4;
Chain1 = jTextField1.getText();
Chain2 = jTextField2.getText();
a = Integer.parseInt(Chain1);
```

Annexe

```
b = Integer.parseInt(Chaine2);
resultat = a - b ;
Integer rr = new Integer (resultat);
Chaine3 = rr.toString();
jTextField3.setText(Chaine3);

if (resultat >= 180){
    jTextField4.setText("classe H");
}
else if (resultat >= 155 && resultat <= 180){
    jTextField4.setText("classe F");
}
else if (resultat >= 130 && resultat <= 155){
    jTextField4.setText("B");
}
else if (resultat >= 105 && resultat <= 130){
    jTextField4.setText("E");
}
else (resultat >= 90 && resultat <= 105){
    jTextField4.setText("classe A");
}
Chaine4 = resultat.toString();
jTextField4.setText(Chaine4);

    = a - b ;
Integer rr = new Integer (resultat);

if (resultat >= 180){
    jTextField4.setText("classe H");
}
else if (resultat >= 155 && resultat <= 180){
    jTextField4.setText("classe F");
}
else if (resultat >= 130 && resultat <= 155){
    jTextField4.setText("B");
}

/**
 * @param args the command line arguments
 */
public static void main(String args[]) {
    /* Set the Nimbus look and feel */
    //<editor-fold defaultstate="collapsed" desc=" Look and feel
setting code (optional) ">
    /* If Nimbus (introduced in Java SE 6) is not available, stay
with the default look and feel.
    * For details see
http://download.oracle.com/javase/tutorial/uiswing/lookandfeel/plaf.htm
1
    */
    try {
        javax.swing.UIManager.LookAndFeelInfo[]
installedLookAndFeels=javax.swing.UIManager.getInstalledLookAndFeels();
```

Annexe

```
        for (int idx=0; idx<installedLookAndFeels.length; idx++)
            if
("Nimbus".equals(installedLookAndFeels[idx].getName())) {

javax.swing.UIManager.setLookAndFeel(installedLookAndFeels[idx].getClas
sName());

                break;
            }
        } catch (ClassNotFoundException ex) {

java.util.logging.Logger.getLogger(ClientEditor.class.getName()).log(ja
va.util.logging.Level.SEVERE, null, ex);
            } catch (InstantiationException ex) {

java.util.logging.Logger.getLogger(ClientEditor.class.getName()).log(ja
va.util.logging.Level.SEVERE, null, ex);
            } catch (IllegalAccessException ex) {

java.util.logging.Logger.getLogger(ClientEditor.class.getName()).log(ja
va.util.logging.Level.SEVERE, null, ex);
            } catch (javax.swing.UnsupportedLookAndFeelException ex) {

java.util.logging.Logger.getLogger(ClientEditor.class.getName()).log(ja
va.util.logging.Level.SEVERE, null, ex);
        }
        //</editor-fold>

        /* Create and display the form */
        java.awt.EventQueue.invokeLater(new Runnable() {
            public void run() {
                javax.swing.JFrame frame = new
javax.swing.JFrame("Client Editor");

frame.setDefaultCloseOperation(javax.swing.WindowConstants.EXIT_ON_CLOS
E);

                frame.getContentPane().add(new ClientEditor());
                frame.pack();
                frame.setVisible(true);
            }
        });
    }

// Variables declaration - do not modify
private clienteditor.AgeConverter ageConverter;
private clienteditor.AgeValidator ageValidator;
private javax.swing.JLabel clientInfoLabel;
private javax.swing.JLabel clientInfoLabel1;
private clienteditor.EmailValidator emailValidator;
private javax.swing.JButton jButton1;
private javax.swing.JButton jButton2;
private javax.swing.JButton jButton3;
private javax.swing.JButton jButton4;
```


Annexe

```
private javax.swing.JButton jButton5;
private javax.swing.JButton jButton6;
private javax.swing.JEditorPane jEditorPanel1;
private javax.swing.JEditorPane jEditorPane2;
private javax.swing.JEditorPane jEditorPane3;
private javax.swing.JEditorPane jEditorPane4;
private javax.swing.JLabel jLabel1;
private javax.swing.JLabel jLabel3;
private javax.swing.JLabel jLabel4;
private javax.swing.JLabel jLabel5;
private javax.swing.JLabel jLabel6;
private javax.swing.JLabel jLabel7;
private javax.swing.JLabel jLabel8;
private javax.swing.JScrollPane jScrollPane4;
private javax.swing.JScrollPane jScrollPane5;
private javax.swing.JScrollPane jScrollPane6;
private javax.swing.JScrollPane jScrollPane7;
private clienteditor.MaritalStatusConverter maritalStatusConverter;
private clienteditor.RequiredStringValidator
requiredStringValidator;
private javax.swing.ButtonGroup sexButtonGroup;
private javax.swing.JLabel usernameLabel;
private javax.swing.JLabel validationMsgLabel;
private org.jdesktop.beansbinding.BindingGroup bindingGroup;
// End of variables declaration

}
```