Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université DR Yahia FARES de Médéa
Faculté de Technologie
Département De génie mécanique

Mémoire de master

Thème :

Détection Des Défauts Electrique Par Technique De Thermographie Infrarouge

Sous la direction :

GUEMANA Mouloud

Présenté par :

SAKHRI Mahmoud

GHERIBI Rabah

Année universitaire

2021 / 2022


بسم الله الرحمن الرحيم



Remerciements

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

Je tiens a remercié mon encadreur qui m'a aidé a bien dirigé mon travail :

***GUEMANA Mouloud** que je le souhaite un prompt rétablissement.*

Nous remercions également tous les enseignants du département Génie Mécanique et Electrique, sans oublier de Remercier tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin pour l'élaboration de ce trav



ملـــــخـــــــــــــــــــص

هذه الرسالة مخصصة لتطبيق التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء في الصيانة التنبؤية لتقليل احتمالية فشل النظام ، ولتسهيل مراقبة المعدات.

تعتمد المنهجية المقترحة على استخراج قواعد البيانات الخاصة بخطوط الكهرباء ونقاط الاتصال الخاصة بها ، لمعرفة حالتها سواء كانت جيدة أو سيئة ، وتحديد نوع الشذوذ ودرجة العيوب بواسطة الكاميرا الحرارية

الكلمات المفتاحية :
التصوير الحراري ، التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء ، الصيانة ، الاختبار غير المدمر ، المصادر الحرارية ، درجة الحرارة ، الأعطال ، الكهرباء

ABSTRACT

This message is for an app Infrared thermal imaging in predictive maintenance to reduce the possibility of failure system, and to facilitate equipment monitoring

The proposed methodology is based extracting databases of power lines and their connection points, To know its condition, whether it is good or bad, and to determine the type of anomaly and the degree of defects by thermal camera

Key words :
Thermography, Infrared Thermography, Maintenance, Non Destructive Testing, thermal sources, temperature, fault, Electrical

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 lignes électriques et de leurs points de contact, pour connaître leur état, qu'il soit bon ou mauvais, et déterminer le type d'anomalies et le degré de défauts par la caméra thermique

Mots clés :
Thermographie, Thermographie Infrarouge, Maintenance, Contrôle Non Destructifs, sources thermique, température, défaut, Electrique

Sommaire

Pages

Introduction Générale…….……..1

Chapitre 01 Généralité Sur La Maintenance

1- Introduction ……4

2- Définition De La Maintenance……...4

3 Le Rôle De La Maintenance ……...4

4- Les Objectifs De La Maintenance ……4

4-1 Les Objectifs De Coût ……...4

4-2 Les Objectifs Opérationnels ……5

5- Situation De La Maintenance Par Rapport A La Production……..5

6- Maintenance Préventive ……...6

6 – 1 Les Objectifs Visés Par La Maintenance Préventive Sont Les Suivants……...6

6 – 2 Les Différents Types De Maintenance Préventive ……...7

a) Maintenance Préventive Systématique ……..7

b) Maintenance Préventive Conditionnelle ……7

c) Maintenance Préventive Prévisionnelle ……7

6 – 3 Buts De La Maintenance Préventive : ……8

7- Maintenance Corrective: …….……..8

7 – 1 Les Différents Types De Maintenance Corrective : ……..……9

7 – 2 Les Niveaux De Maintenance: ……9

Chapitre 02 Différentes Techniques De Contrôle Non Destructifs

1 - Définition…….…..……9

2 - Contrôle Non Destructif : Applications Et Tendances……..……..……9

2 .1- Champ D'application Actuel……9

2 .1.1- Le Contrôle En Cours De Fabrication…….……9

2.1.2- Le Contrôle De Réception……..……..9

2 .1.3- Le Contrôle En Service……..…… 9

2 .2- Tendances Et Evolution……..…….10

3- Principes De Détection Des Défauts-DifférentesTechniques Du Cnd……..…..…..11

3.1- Hétérogénéités Et Défauts…….……..…..……11

3.1.1- Les Défauts De Surface……..…..……11

3 .2- Procédure De Cnd…….……14

3 .3- Principe De La Détection D'un Défaut…….……...……14

4 - Techniques De Contrôle……..…..…16

4- 1 Le Contrôle Visuel. ……..…17

4-2 Le Contrôle Par Ressuage. ……...17

4-3 Le Contrôle Par Magnétoscopie. …… ...19

4-4 Le Contrôle Par Radiographie, Rx Et Γ…… 21

4- 5 Ultrasons …….……..…22

Chapitre 03 Technique de Thermographie Infrarouge

1- Généralités……..……24

2- Définition…….……24

3- Principe……...……24

4 - Lois Du Rayonnement Infrarouge…….……25

4- 1 Le Spectre Electromagnétique……...……25

4- 2 Loi De Plank……...……..26.

4- 3 Rayonnement Incident……..……...27

4-4 Rayonnement Résultant……..……27

4-5 Facteurs Perturbateurs…….…….……28

5- Techniques D'analyse D'images Thermiques……...…….……28

5- 1- Cadrage Thermique…….……28

5- 2- Isotherme……..……...29

5- 3- Palette……..……29

6- Matériel Utilise……30

7- Applications De La Thermographie Ir……..……30

Chapitre 04 Application De La Technique Thermographie Dans Le Domaine Electrique

1 - Utilisation De La Camera Infrarouge …….....33

1 - A Introduction A L'utilisation De La Caméra Infrarouge ……..... 33

1 – B Principes ……..…….33

1 – C Fonctionnement ……..34 2

- Comparaison Des Cameras……..……..36 2

– 1 Contrôler Une Image ……...37

2 – 2 Capturer Une Image ……... 39

3 - Technique D'analyse D'images Thermiques ……43

3-1 Gradient Thermique ……43

3-2 Les Fonctions D'amélioration Les Images ……...44

3-3 Les Analyse D'image – Echantillons Faussés ……..54

3 -3 -1 Différences De Température Apparente ……..58

3-3-2 L'objet Cible……58

3-3-3 Les Réflexions De Source Diverses……..……59

3-3.4 Différentes Sources De Réflexion……...59

Conclusion générale

Conclusion générale …… ……66

Bibliographie……67

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1.1 : Organigramme de politique de maintenance……..……..6

Figure 1 .2 : Les niveaux de maintenance…….……10

Chapitre 2

Figure 2 .1 : Champ d'application du CND……...15

Figure 2 .2 : principe de détection d'un défaut ……..……20

Figure 2 .3 : principe de contrôle non destructif ……..……20

Figure 2 .4 : Contrôle par ressuage……23

Figure 2 .5 : Les étapes du contrôle de magnétoscopie……..……25

Figure 2 .6 : Principe du contrôle par magnétoscopie……25

Figure 2 .7 :Impression de l'image du défaut sur le film radiographique.....…….……26

Figure 2 .8 : Principe de contrôle par ultrasons……27

Chapitre 3

Figure 3.1 : Exemple De Défaut Electrique De Connexion (Mauvais Serrage)…… ... 29

Figure 3.2 : Image Visible Et Thermographie Correspondant D'un Transformateur ……...31

Figure 3.3 : Exemple De Défaut Electrique De Connexion (Mauvais Serrage)……....31

Figure 3.4 : Rayonnements électromagnétiques……..32

Figure 3.5 : Rayonnement du corps noir pour différentes températures……32

Figure 3.6 : Répartition du rayonnement incidenten différentes composantes…….33

Figure 3.7 : Les trois sources derayonnement réfléchiissues de l'objet… …….34

Figure 3.8 : Image réglée Automatiquement ……..35

Figure 3.9 : Image cadrée thermiquement sur le composant…… 35

Figure 3.10 : Tête De Transformatrice Haute Tension Avec Une Isotherme….……..35

Figure 3.11 : Exemples De Différentes Palettes……...36

Figure 3.12 : Maintenance électrique……37

Figure 3.13 : Maintenance Mécanique……..…..37

Figure 3.14 : Maintenance Réseaux d'eau froide…….…..38

Chapitre 4

Figure 4.1 : Contrôle en sélectionnant la plage de température, leniveau et le gain……46

Figure 4.2 : Niveau et gain…….……..... 48

Figure 4.3 : L'isotherme remplace certaines couleurs dans l'échelle par des tons contrastés…….49

Figure 4.4 : Le point de mesure est une fonction simple et pratique……..……49

Figure 4.5 : La fonction de zone est paramétrée pour afficher la températuremaximale au sein de la boîte…….……...50

Figure 4.6 : Gradient thermique……..……53

Figure 4.7 : L'intégralité de l'image est cadrée thermiquement……...…….……...55

Figure 4.8 : Image cadrée thermiquement…….……..56

Figure 4.9 : Même image, réglée automatiquement (gauche) et cadréethermiquement sur le composant (droite)……..….57

Figure 4.10 : L'isotherme remplace certaines couleurs par des tons opposés…….…….58

Figure 4.11 : Tête de transformateur haute tension avec des isothermes à différentsendroits…….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…….……..…..……...62

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)……..64

Figure 4. 17 : Réflexion d'un point source, disparaît lorsque l'angle change……...65

Figure 4.18 : Influence de l'angle à la réflexion……..…….... 65

Figure 4.19 : grande émissivité permet une lecture plus "réaliste"……..66

Figure 4.20 :L'échauffement réel présente généralement un motif uniforme….……66

Figure 4.21 : Températures apparentes différentes…… 67

Figure 4.22 : Différentes sources de réflexion et émissivités donnent destempératures apparentes différentes……..……..68

Figure 4.23 : Apparences différentes des parties peintes et non peintes de barres……....69

Figure 4.24 : Changements abrupts dans l'image thermique causés par unchangement d'émissivité……69

Figure 4.25 : Objet cible plus froid réfléchissant un environnement plus chaud……71

Figure 4.26 : Connexions de transformateur vues depuis différents emplacements……..…....72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 : Donnée images et optiques ……43

Tableau 4 . 2 : Données métrologiques……..……..……..45

Tableau 4 .3 : Données ergonomiques……45

Introduction Générale

La technologie de détection par thermographie infrarouge est devenue un moyen irremplaçable de garantir la sécurité des conditions de production industrielle. Son utilisation est commune à des secteurs de l'industrie aussi divers que la métallurgie et la sidérurgie, l'énergie électrique, l'industrie pétrolière, l'automation, l'exploitation du gaz naturel, l'industrie des transports, et à d'autres professions engagées tel que dans la lutte contre le feu et la surveillance des frontières. A toutes ces activités caractérisées par des procédures de fonctionnement en flux tendu, des équipements de production sous haute-tension, des courants électriques puissants ou des vitesses d'opération élevées, l'imagerie thermique infrarouge offre une méthode d'inspection sans-contact et en temps réel.

Dans le domaine industriel cette méthode de détection ne nécessite aucune coupure de courant, n'exige ni arrêt des machines, ni interruption de la production. Elle permet de diagnostiquer à l'avance les disfonctionnements latents, et ainsi de prévenir l'occurrence des pannes, d'éviter les incidents de production. L'imagerie thermique est une technique innovante d'évaluation « sans-contact », à la fois sûre, fiable, et rapide.

Une caméra thermique ne mesure pas des températures mais des flux de rayonnement. Après le réglage de certains paramètres par l'opérateur en thermographie, la caméra calcule alors les températures de la cible. Elle fournit ensuite à l'utilisateur une cartographie des températures, appelée thermographie : à chaque température est associée une couleur.

But de ce travail est l'étude de la technique thermographie et leurs application dans le domaine électrique et se compose de 04 chapitres :

Le premier chapitre décrira la généralité sur la maintenance avec déférents types. Aussi une classification des défauts et comment les détecter en utilisant des techniques de contrôle non destructif (CND). Enfin, nous définissons ces méthodes et comment elles seront appliquées , Le deuxième chapitre est consacre de détailler les différentes techniques de contrôle non destructif , Le troisième chapitre est étude la technique la thermographie infrarouge dans un premier temps, nous définirons le principe d'une caméra infrarouge et quelques techniques d'application de l'imagerie thermique infrarouge, puis nous citerons quelques lois de rayonnement et notions d'ondes qui définissent des zones de vision soit avec une caméra, soit avec l'œil humain. Enfin, nous définirons quelques types de moteurs électriques, et dans

le quatrième chapitre nous étudions détection défauts électrique par technique de thermographie infrarouge et prendre quelque exemple pratique sur le terrain

Chapitre 01

Généralité sur la Maintenance

1- Introduction :

La fonction maintenance a pour but d'assurer la disponibilité optimale des installations de production et de leurs annexes, impliquant un minimum économique de temps d'arrêt.
Jugée pendant longtemps comme une fonction secondaire entraînant une perte d'argent inévitable, la fonction maintenance est en général, assimilée à la fonction dépannage etréparation d'équipements soumis à usage et vieillissement.
La véritable portée de la fonction de la maintenance mène beaucoup plus loin : elle doit être une recherche incessante de compromis entre la technique, et l'économique. Il reste alors, beaucoup à faire pour que sa fonction productive soit pleinement comprise. Une organisation, une planification et des mesures méthodiques sont nécessaires pour gérer lesactivités de maintenance.[1]

2- Définition de la maintenance:

Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise . [2]

3 Le rôle de la maintenance:

Est la maîtrise de la disponibilité opérationnelle de équipements a fin qui ils soient unis à la disposition de la production par ces action, la maintenance ammeistre le profit cumule durant la vie des équipements par :
-La réduction des coûts de maintenance
-L'accroissement de la durée rentable de vie des équipements.
-Réduction des accidents et des risques concernant la sécurité des hommes et de l'environnement.

4- Les objectifs de la maintenance:

4-1 Les objectifs de coût :

- Minimiser les dépenses de maintenance.
- Assurer la maintenance dans les limites d'un budget.
- Avoir des dépenses de maintenance portant sur le service exigé par l'installationen fonction de leur âge et de leur taux d'utilisation.

Tolérer à la discrétion du responsable de la maintenance une certaine quantité de dépense imprévue

4-2 Les objectifs opérationnels :

- Maintenir le bien durable:
    1. Dans un état acceptable
    2. Dans des meilleures conditions
- Assure la disponibilité maximale à un coût raisonnable.
- Eliminer les pannes à tout moment et au meilleur coût.
- Maximiser la durée de vie de bien.
- Remplacer le bien à des périodes prédéterminées.
- Assurer au bien des performances de haute qualité.
- Assurer au bien un fonctionnement sûr et efficace.
- Obtenir de l'investissement un rendement maximum.
- au bien une présentation suffisamment satisfaisante.
- Maintenir le bien dans un état de propreté absolue.

5- Situation de la maintenance par rapport à la production:

- **Le personnel de production:**

Ne s'intéresse qu'aux informations nécessaires à l'obtention du produit fini.

- **Le personnel d'entretien:**

Ne s'intéresse qui aux informations nécessaires à la réalisation de son intervention sur l'outil de production quel que soit sa fonctionnalité.

- **Le personnel de maintenance:**

Doit maîtriser toutes les contraintes posant la dégradation de l'outil de production pour limiter leur conséquences sur l'obtention de l'objectif de production quel que soit les contraintes au niveau de conception de fabrication et l'exploitation

Le système de maintenance semble se présenter comme sur système complémentaire au système de production.

ORGANIGRAMME DE POLITIQUE DE MAINTENANCE :

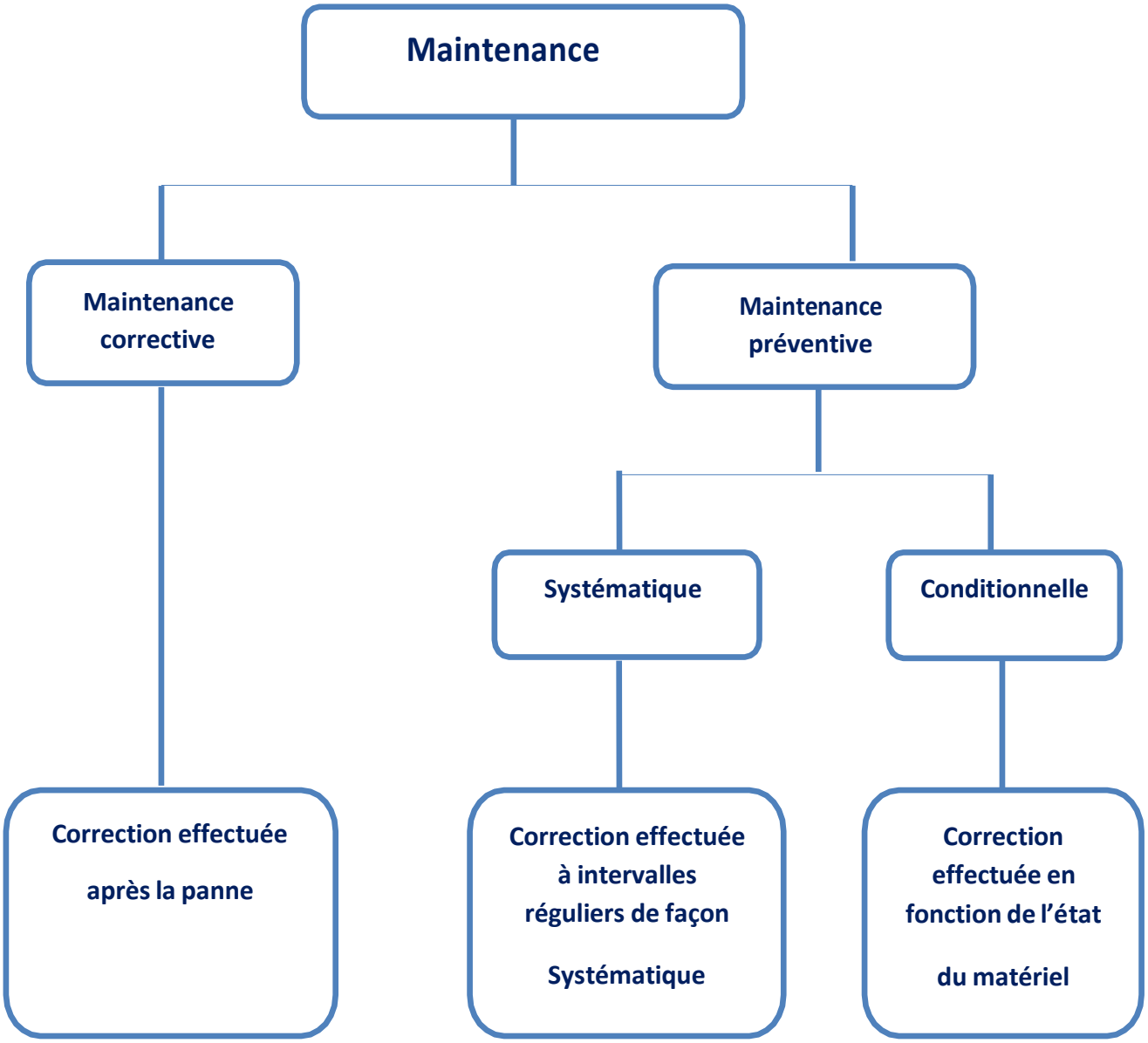


Figure 1.1 : Organigramme de politique de maintenance

6- MAINTENANCE PREVENTIVE :

Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique), et/ou des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle).

6 – 1 Les objectifs visés par la maintenance préventive sont les suivants : [3]

- 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 efficace 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)
- Assurer la sécurité (moins d'improvisations dangereuses)
- Plus globalement, en réduisant la part « d'imprévu », améliorer le climat des relations humaines (une panne imprévue est toujours source de tension)

La mise en œuvre d'une politique de maintenance préventive implique le développement d'un service « méthodes de maintenance » efficace. En effet, on ne peut faire de préventif sans un service méthodes qui va alourdir à court terme les coûts directs de maintenance, mais qui va permettre :

La gestion de la documentation technique, des dossiers machines, des historiques.

- Les analyses techniques du comportement du matériel.
- La préparation des interventions préventives.
- La concertation avec la production.

6 – 2 Les différents types de maintenance préventive :

a) Maintenance préventive systématique:

Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien

Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité de produits fabriqués, la longueur de produits fabriqués, la distance parcourue, la masse de produits fabriqués, le nombre de cycles effectués, etc.

Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle.

b) Maintenance préventive conditionnelle:

Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon

Remarque : la maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendante de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel.

La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant le cas, il est souhaitable de les mettre sous surveillance et, à partir de là, de décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint. Mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs.

Tous les matériels sont concernés. Cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement. Les paramètres mesurés peuvent porter sur :

- Le niveau et la qualité de l'huile
- Les températures et les pressions
- La tension et l'intensité des matériels électriques
- Les vibrations et les jeux mécaniques

c) Maintenance préventive prévisionnelle:

C'est une maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée des paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et planifier les interventions quelques concepts fondamentaux liés à la maintenance.

6 – 3 Buts de la maintenance préventive :

- Augmenter la durée de vie des matériels;
- Diminuer la probabilité des défaillances en service;
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne;
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective;
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions;
- Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc.;
- améliorer les conditions de travail du personnel de production;
- Diminuer le budget de maintenance;
- Supprimer les causes d'accidents graves.

7- MAINTENANCE CORRECTIVE:

Ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien, ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement : ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, le remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon

fonctionnement.

7 – 1 Les différents types de maintenance corrective :

A- Maintenance palliative:

Activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelé couramment dépannage, cette maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives.

B- Maintenance curative:

Activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelé couramment dépannage, cette maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives.

La maintenance corrective débouche sur 2 types d'interventions :

- **Le dépannage:**

Remise en état de fonctionnement effectué « in situ », parfois sans interruption du fonctionnement de l'ensemble concerné. Le dépannage a un caractère provisoire. Les dépannages caractérisent la maintenance palliative. Le palliatif est caractéristique du 2ème niveau de maintenance.

- **La réparation:**

Faite « in situ » ou en atelier de maintenance, parfois après dépannage. Elle a un caractère définitif. La réparation caractérise la maintenance curative. Le curatif est caractéristique des 2èmes **et** 3ème niveaux de maintenance.

7 – 2 LES NIVEAUX DE MAINTENANCE:

Le dégréé du développement de la maintenance est classifié en 5 nivaux. Ces niveaux sont donnés par la norme à titre indicatif pour servir de guide et leur utilisation pratique n'est concevable qu'entre des parties qui sont convenues de leur définition précise selon le type de bien maintenir.

NIVEAU	ACTIVITES
NIVEAU 1	RONDE PETIT ENTREIEN, GRAISSAGE
NIVEAU 2	ECHANGE STANDARD, CONTROLES DU BON FONTIONNEMENTE
NIVEAU 3	DIAGNOSTIC, PETITES REPARATION,OPERATIONS MINEURES PREVENTIVES
NIVEAU 4	TRAVAUX DE MAINTENANCE PREVENTIVE ET CORRECTIVE, REGLAGE DES MOYENS DE MESURE
NIVEAU 5	RENOVATION, RECONTRUCTION ET REPARATIONS IMPORTES

Figure 1 .2 : Les niveaux de maintenance

Chapitre 02

Différentes Techniques De Contrôle Non Destructifs

1 - DEFINITION

L'appellation **Contrôle Non Destructif** fait naturellement penser au diagnostic que le médecin formule lors de l'examen de son patient : le même principe appliqué aux pièces mécaniques consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation permettant de juger « **sans destruction** » l'état de santé des pièces et de formulerun avis sur leur aptitude à remplir la fonction pour laquelle elles sont destinées.

Considérée sous cet aspect d'aptitude au bon fonctionnement, la définition suppose une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeu, en particulier de la nocivité des défauts, de leur évolution dans le temps et des lois générales de la mécanique de la rupture.

Dans la pratique, les spécialistes en contrôle non destructif chargés de l'inspection sont davantage confrontés à des problèmes d'interprétation des résultats de contrôle par rapport à des critères établis en liaison avec le concepteur de la pièce. Dans cet esprit, la définition suivante des **C**ontrôles **N**on **D**estructifs apparaît plus proche de la réalité industrielle *: il s'agit de « **qualifier, sans nécessairement quantifier, l'état d'un produit, sans altération de ses caractéristiques par rapportà des normes de recette** ».*

En ce sens, le contrôle non destructif **(CND)** apparaît comme un élément majeur du **contrôle de la qualité** des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est de **détecter des hétérogénéités et anomalies** plutôt que de **mesurer** des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce.

2 - CONTROLE NON DESTRUCTIF : APPLICATIONS ET TENDANCES

2 .1- Champ d'application actuel

Le contrôle non destructif est essentiel pour la bonne marche des industries qui fabriquent, mettent en œuvre ou utilisent les matériaux, les produits et les structures de toutes natures. A l'heure où la qualité est devenue un impératif difficilement contournable, le champ d'application des CND ne cesse de s'étendre au- delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique. Après le contrôle des biens d'équipements, vient celui des biens de consommation.

La nature des défauts que l'on cherche à détecter se diversifie du même coup ; on recherche les **défauts technologiques ponctuels graves**, comme ceux inhérents à la fabrication et à l'utilisation des métaux (fissure de fatigue), mais aussi des **défauts**

d’aspect (taches sur une surface propre) et des **corps étrangers nuisibles** (éclats de verre dans un emballage alimentaire).

On peut, par ailleurs, considérer que le contrôle non destructif d’un produit ou d’un objet peut être effectué à trois stades différents de sa vie, conduisant à trois types d’applications.

2 .1.1- Le contrôle en cours de fabrication

Le contrôle en cours de fabrication procède de la philosophie de l'instrumentation industrielle en tant qu'outil de contrôle d'un procédé souvent automatisé et impliquant alors un appareillage installé à demeure en ligne de fabrication présentant une grande robustesse, une réaction rapide, un coût d'exploitation faible et une bonne fiabilité. Les défauts recherchés sont ici généralement bien identifiés, le fonctionnement est automatique aboutissant à un **repérage** ou un **tri des produits défectueux**.

2.1.2- Le contrôle de réception

Le contrôle de réception d'un lot de pièces, d'une installation, d'un ouvrage au moment de la livraison procède d'une philosophie de respect de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant.

Si l'aspect coût et productivité peut avoir encore une certaine importance à ce stade de contrôle, c'est surtout l'aspect procédure de la démarche qui devient primordial, qu'il s'agisse du choix du procédé, du choix des paramètres de réglage, de l'étalonnage, de la présentation et de l'archivage des résultats obtenus. À ce stade, il s'agit de **détecter des défauts** mais aussi souvent d'**en définir la nature et les dimensions**.

2 .1.3- Le contrôle en service

Le contrôle en service s'effectue sur pièces ou structures lors d'opérations de maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement. On en attend une très grande fiabilité car les risques de non-détection d'un défaut sont graves. Pour ce type de contrôle, il convient de pouvoir estimer le mieux possible la **nature et les dimensions des défauts** pour pouvoir en apprécier la nocivité ; il faut disposer aussi d'une grande reproductibilité de l'examen non destructif, de façon à pouvoir **suivre l'évolution du dommage au cours du temps**.

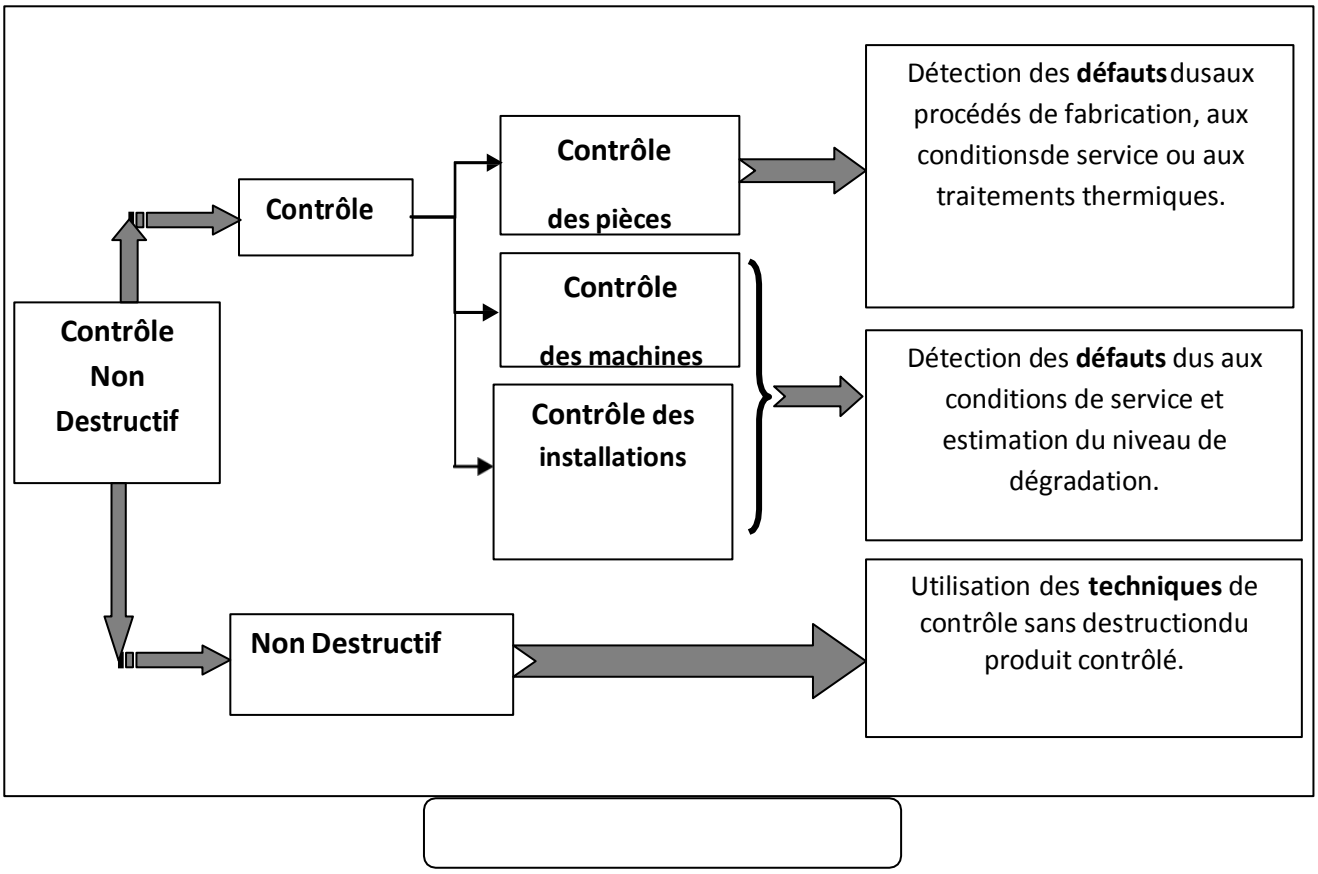


Figure 2 .1 : Champ d'application du CND

2 .2- Tendances et évolution

Globalement, en tant qu'outil majeur de la politique qualité d'une entreprise, les techniques de CND continueront à élargir leur champ d'application vers de nouveaux secteurs d'activité économique. On constate aussi que l'objectif du contrôle non destructif évolue en rapprochant ce domaine de celui de l'instrumentation ; il ne suffit plus aujourd'hui de détecter un défaut, il faut aussi le caractériser et le dimensionner. Il faut aussi imaginer des techniques et procédés non destructifs aptes à mettre en évidence des **hétérogénéités physiques complexes** ou des **irrégularités de propriétés** telles que des variations de microstructure dans un métal, des variations de texture ou de rugosité sur une surface et des variations de propriétés électromagnétiques sur une bande. Ces objectifs sont souvent difficiles à atteindre.

Il n'en va pas de même pour l'**automatisation des CND** qui bénéficie pleinement des progrès de l'informatique ; il en résulte l'arrivée sur le marché, d'année en année, d'appareillages plus performants, plus fiables et surtout plus faciles à utiliser dans le cadre du respect de procédures de contrôles très strictes.

3- PRINCIPES DE DETECTION DES DEFAUTS-DIFFERENTES TECNHIQUES DU CND

3.1- Hétérogénéités et défauts

Le terme *défaut* est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une **hétérogénéité de matière**, une **variation locale de propriété physique ou chimique** préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Cela dit, on a l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes.

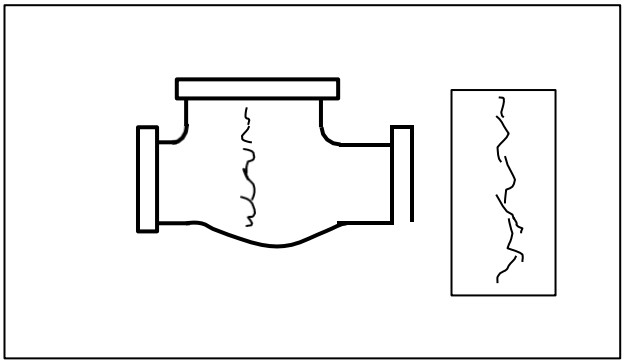
3.1.1- Les défauts de surface

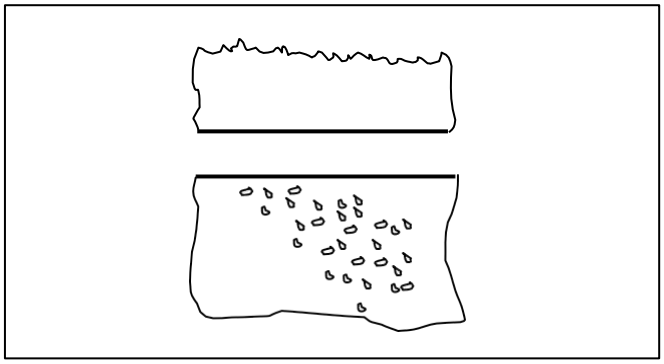
Les défauts de surface, accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect.

a- Les défauts ponctuels qui correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques □m) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour

leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons.

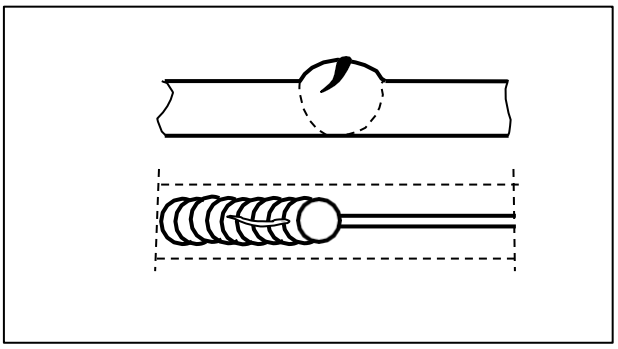
b- Les défauts d'aspect qui correspondent à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

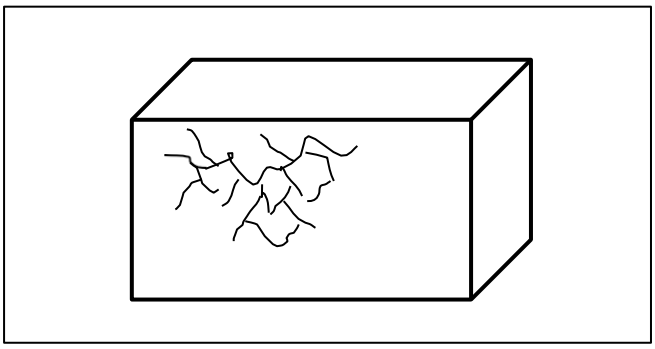




Criques : fissures intergranulaires, souvent d'aspect oxydé dans des zones de contraintesse solidifiant en dernier après moulage.

Piqûres : petites cavités ou microsoufflures à parois lisses quelquefois à parois : brillantes (hydrogène), bleutées (CO), air (oxydées). Apparition sur l'ensemble de la surface dumoulage.





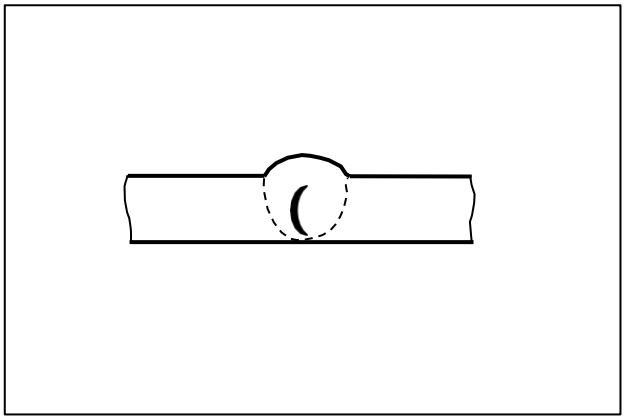
Fissures : défaut de surface d'un cordon desoudure par exemple.

Craquelure: excroissances isolées ou en réseauen surface de la pièce.

3 .1.2- Les défauts internes

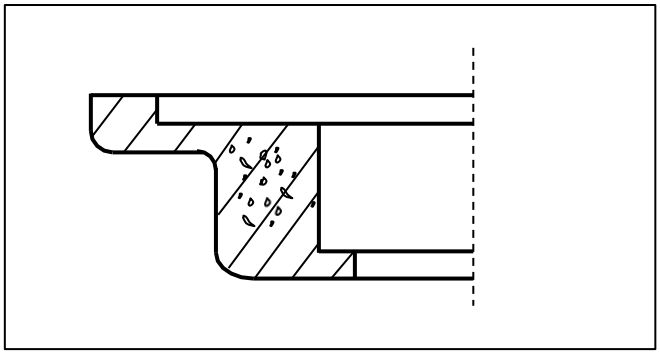
Ils sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle.

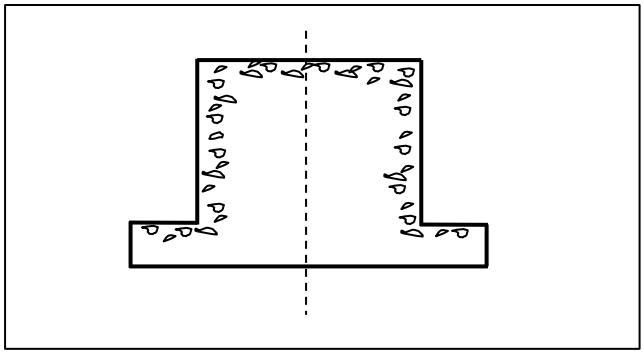
Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présenced'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé.



Criques internes : des fissures se forment dans le métal déposé, lors du refroidissement, donc sous l'effet des retraits.

Certaines des causes: % C élevé, épaisseur et retraits importants, manque de pénétration ou section de soudure insuffisante…





Porosités : microporosités spongieuses localisées dans les zones de fin de solidification (massives) souvent avec concentrations d'inclusions et des précipitations de gaz.

Soufflures : petites cavités dispersées situées en points hauts de la pièce à parois lisses, originegazeuse.

3 .2- Procédure de CND

L'opération de contrôle non destructif d'un objet ne se borne généralement pas à la **détection** d'éventuels défauts. En effet, même si le choix du procédé, de la méthode et du matériel a été effectué au préalable, il faut envisager toute une **procédure** ayant les objectifs suivants : fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, identification, caractérisation de ceux-ci, en particulier par leur taille, classement, présentation visuelle, décision concernant l'affectation de l'objet, enfin archivage des résultats et des conditions d'examen.

3 .3- Principe de la détection d'un défaut

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée :

❖ Mise en œuvre d'un processus physique énergétique (**excitation**);

- ❖ Modulation ou altération de ce processus par les défauts (**perturbation**);
- ❖ Détection de ces modifications par un capteur approprié (**révélation**);
- ❖ Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

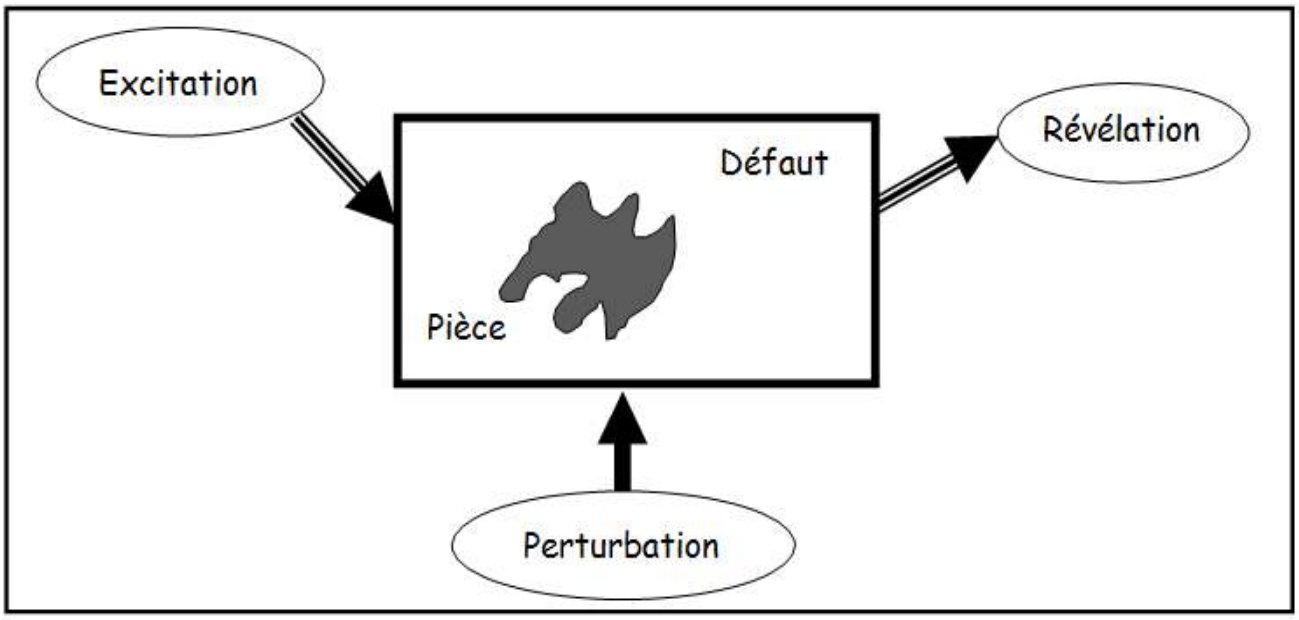


Figure 2 .2 : principe de détection d'un défaut

Différents types d'énergie sont employés en pratique : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...). On peut schématiquement distinguer deux groupes de méthodes de détection :

a- Les méthodes de flux, avec une excitation et une détection **de même nature** et pour lesquelles le défaut introduit une perturbation de flux qui peut être relevée soit directement dans le flux transmis (radiographie) ou le flux rediffusé (ultrasons), soit par un effet de proximité (bobine de sonde à courants de Foucault, flux de fuite magnétique) : figure ci-dessous ; la grande majorité des procédés du contrôle non destructif se réfère à ce groupe de méthodes ;

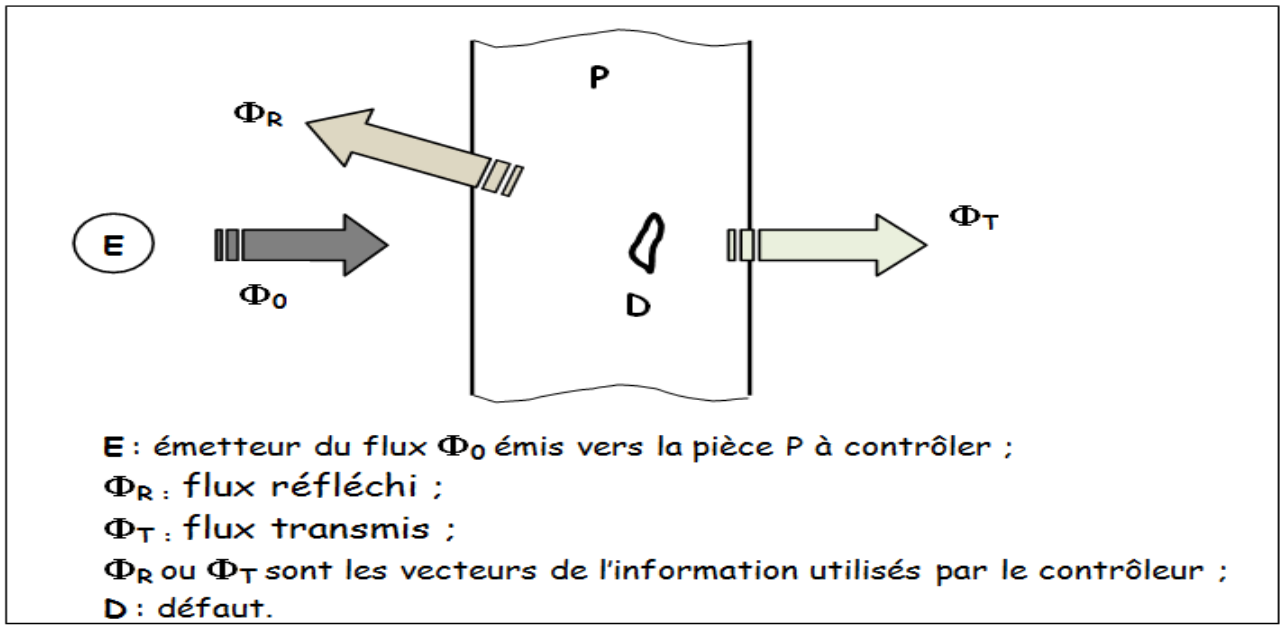


Figure 2 .3 : principe de contrôle non destructif

b- Les méthodes pour lesquelles l'excitation et la détection sont **de natures différentes**, chacune mettant en jeu un processus original et spécifique ; l'excitation la plus employée est la sollicitation mécanique ; elle conduit aux techniques d'analyse de vibrations mécaniques ou de microdéformations (interférométrie holographique)ou encore à une technique d'émission provoquée dont la plus connue est l'émission acoustique.

4 - TECHNIQUES DE CONTROLE

L'objectif des méthodes d'examen et de contrôle est de faire la distinction entre les méthodes d'essais destructifs et non destructifs et de décrire différentes méthodes d'essais non destructifs pour identifiés les défauts.

Les méthodes d'examens non destructifs incluent les méthodes d'examen ainsi que les méthodes de contrôle. Le contrôle non destructif (CND) permet de vérifier la qualité du matériau (repérer les discontinuités dans une pièce) sans l'endommager, soit au cours de la production, soitau cours de la maintenance.

Toutes les soudures présentent des défauts. Les défauts ou les discontinuités dont la taille esttrop importante sont appelés défauts inacceptables. En pratique, les défauts de petites tailles sont peu nombreux et n'affectent pas les performances de l'assemblage soudé.

Les méthodes utilisées pour les essais non destructifs (END) sont :

- Le contrôle visuel.
- Le contrôle par ressuage
- Le contrôle par magnétoscopie

- Le contrôle par radiographie : rayons X (RX) et gammagraphie (γ)
- Le contrôle par courant de Foucault
- Le contrôle par ultrasons (US)
- La détection par spectromètre de masse
- Les essais d'étanchéité à l'air ou au gaz
- La tomographie et neutrographie

Certains classent la thermographie et l'holographie parmi les techniques CND. Dans ce qui suit on traitera les premiers contrôles et on insistera sur le contrôle ultrasons.

4-1 Le contrôle visuel.

Le contrôle visuel est une technique essentielle qui donne un aperçu de l'état extérieur d'une pièce. Il est destiné à déceler les défauts tels que les fissures, les inclusions, et le manque de pénétration dans la soudure. Il implique l'utilisation de gabarits et de calibres. Pour le cas de la soudure on utilise des loupes, des caméras vidéo, des calibres et des règles graduées.

4-2 Le contrôle par ressuage.

La technique est très ancienne et réside dans la simplicité de sa mise en œuvre. C'est une méthode globale qui autorise un examen de la totalité de la surface de la pièce. Elle permet de bien apprécier la longueur des défauts indépendamment de leur orientation. On peut mettre en évidence des discontinuités débouchantes de quelques dizaines de micromètres. Le contrôle par ressuage comporte trois étapes. La phase initiale consiste à nettoyer la surface de la pièce et d'appliquer un liquide pénétrant, soit par immersion, soit par pulvérisation. La durée d'application est variable selon le type de pénétrant, mais se situe en général entre 15 et 30 minutes. Le choix du liquide dépend essentiellement de la rugosité de la surface à contrôler. Le pénétrant peut être un produit coloré (faible sensibilité), un produit pré-émulsionné (sensibilité moyenne) ou un produit fluorescent (sensibilité élevée). Le pénétrant appliqué s'infiltre dans les petits interstices débouchant en surface, un certain temps est nécessaire pour laisser « poser » le pénétrant. La deuxième étape consiste à rincer la surface de la pièce pour enlever l'excès de pénétrant. Cette opération est délicate parce qu'un rinçage excessif ou insuffisant permet de fausser le résultat final.

Dans la troisième étape on applique un révélateur, liquide ou sous forme de poudre, sur la surface rincée, puis séchée. Le liquide (pénétrant) qui s'est introduit dans les fissures « ressort » à la surface dans le révélateur et s'élargit au niveau du défaut. Il devient nettement visible par un éclairage approprié qui dépend du pénétrant utilisé. La méthode ne donne aucune indication sur le volume et donc de l'importance des défauts.

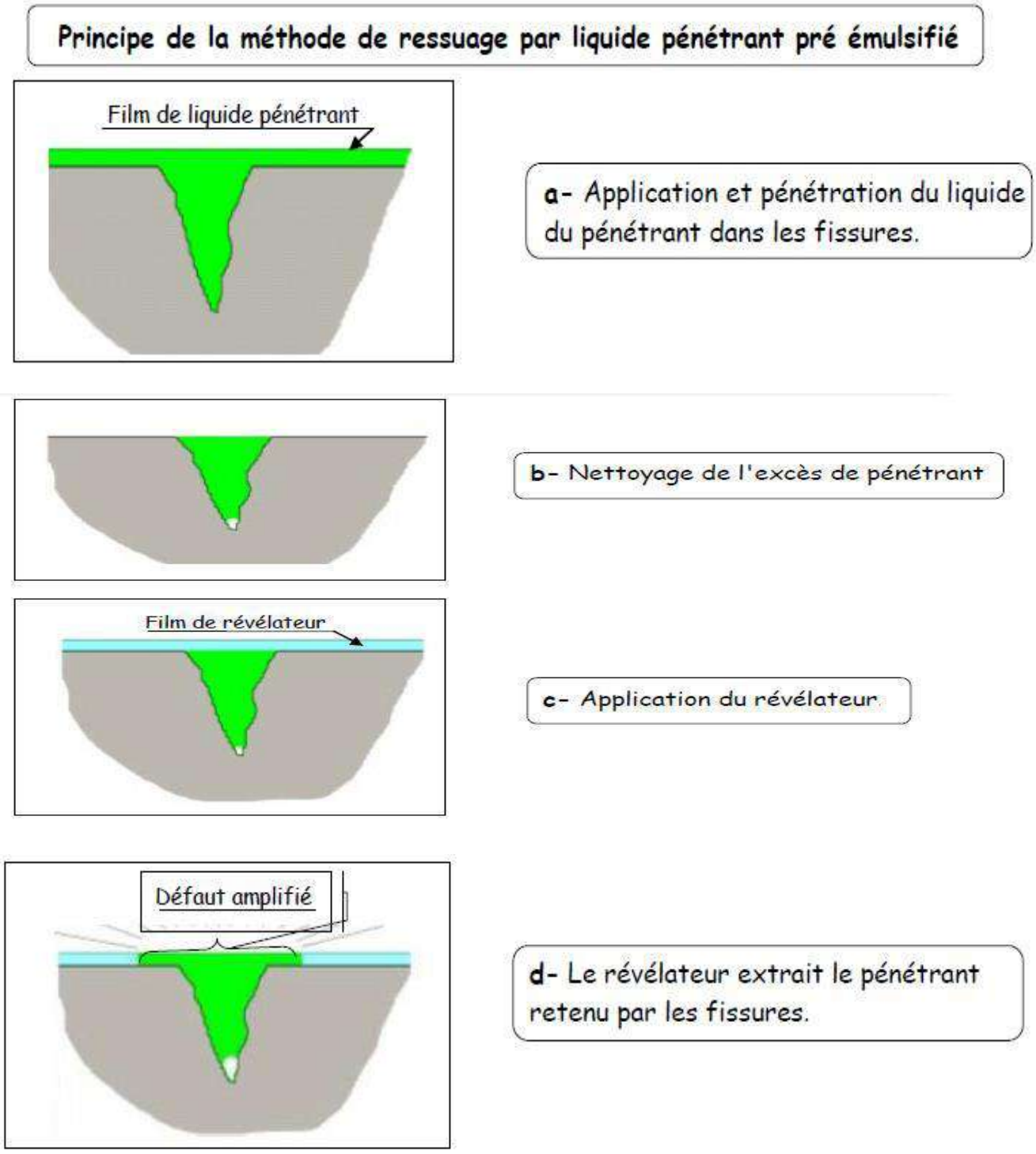


Figure 2 .4 : Contrôle par ressuage

4- 3 Le contrôle par magnétoscopie.

C’est une méthode applicable seulement aux matériaux magnétiques pour la détection des défauts débouchant en surface ou proche à la surface. À l’instar du ressuage, la magnétoscopie complète l’examen visuel. On a recours à la magnétoscopie lorsque le ressuage est insuffisant (les imperfections de surface restent peu visibles malgré tout le soin apporté). La pièce est aimantée localement ou totalement à une valeur proche de la saturation magnétique. En l'absence de défaut, les fuites dans l'air sont insignifiantes (la perméabilité du matériau étant beaucoup plus grande que celle de l'air). Toute discontinuité du matériau provoquera une diminution de la section de passage et donc une augmentation du champ d'induction magnétique (conservation du flux). Cette augmentation provoquera une fuite magnétique à la surface de la pièce. Des particules ferromagnétiques contenues dans un révélateur s'accumulent au droit du défaut. On observe le spectre résultant sous un éclairage adapté.

L’avantage réside dans la simplicité de sa mise en œuvre. On peut apprécier la longueur des défauts de surface et ceux légèrement sous-jacents ; il est possible d’automatiser le contrôle. Dans la pratique, on procède à l’aimantation des pièces suivant deux techniques principales : magnétisation par courant d’injection et par électro-aimant mobile. Les particules du produit révélateur doivent être suffisamment fines et légères pour circuler dans toute la pièce. Ainsi elles sont facilement attirées par les fuites magnétiques. Des poudres à base de produits fluorescents sont utilisées pour améliorer le contraste. Après examen le magnétisme résiduel peut causer des problèmes ultérieurs (soudage, usinage) ; il est recommander de procéder à la démagnétisation de la pièce en la soumettant à un champ magnétique dont on diminue progressivement l’intensité et inversant à chaque fois son sens.

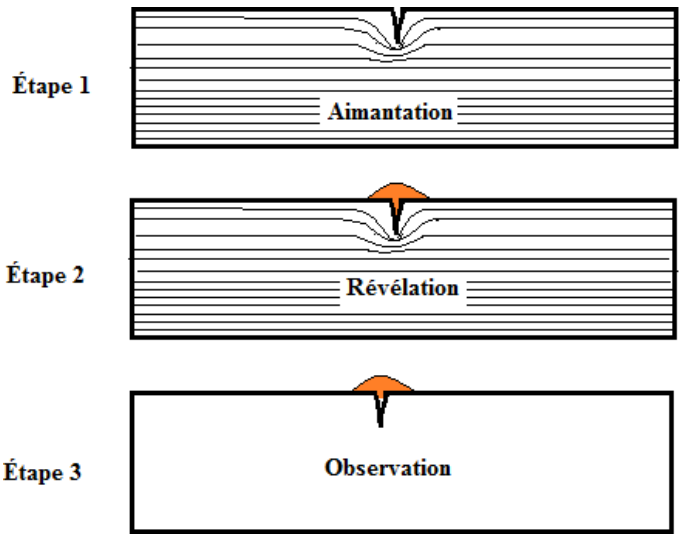


Figure 2 .5 : Les étapes du contrôle de magnétoscopie

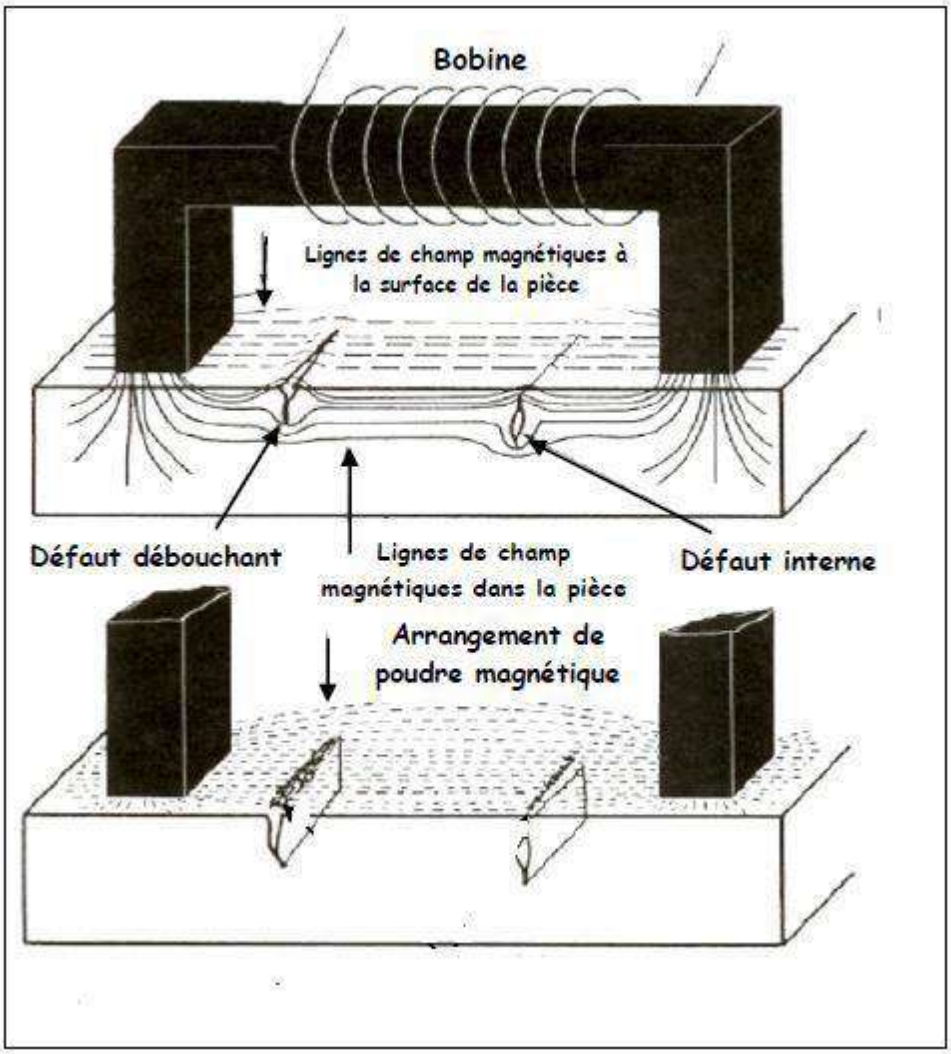
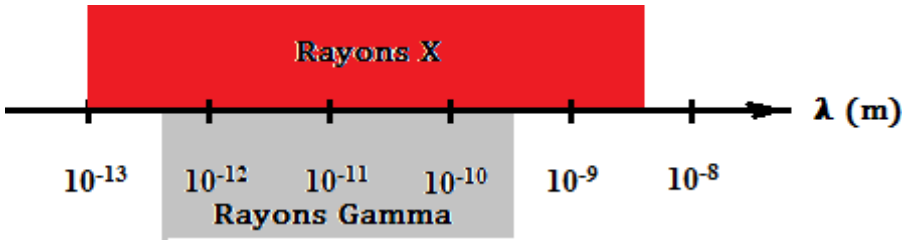


Figure 2 .6 : Principe du contrôle par magnétoscopie

4- 4 Le contrôle par radiographie, RX et γ.

La radiographie industrielle permet l'examen interne des défauts d'un objet en lui faisant traverser un rayonnement électromagnétique de courte longueur d'onde (rayons X et γ) et recueillir les variations d'intensité du faisceau sous forme d'image, pour la plus part, sur un film. La quasi- totalité des matériaux peuvent être examinés en radiographie et les épaisseurs peuvent être importantes.



Longueurs d'ondes des RX et γ

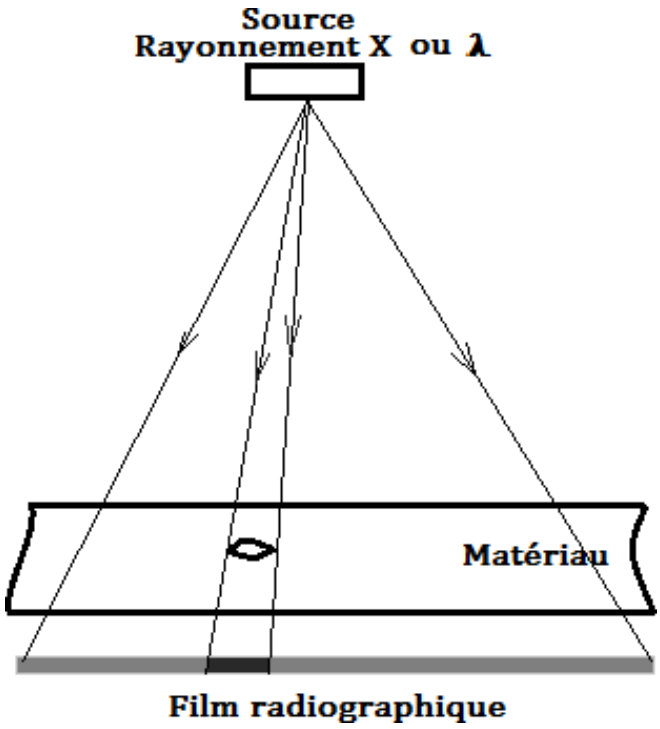


Figure 2 .7 :Impression de l'image du défaut sur le film radiographique

4 - 5 ULTRASONS

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques dont la fréquence est supérieure au domaine audible d'une oreille humaine normale (16 Hz à 16 KHz). Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et du type d'onde.

Dans les matériaux métalliques, les fréquences d'utilisation courante vont de quelques centaines de kilohertz à quelques dizaines de mégahertz.

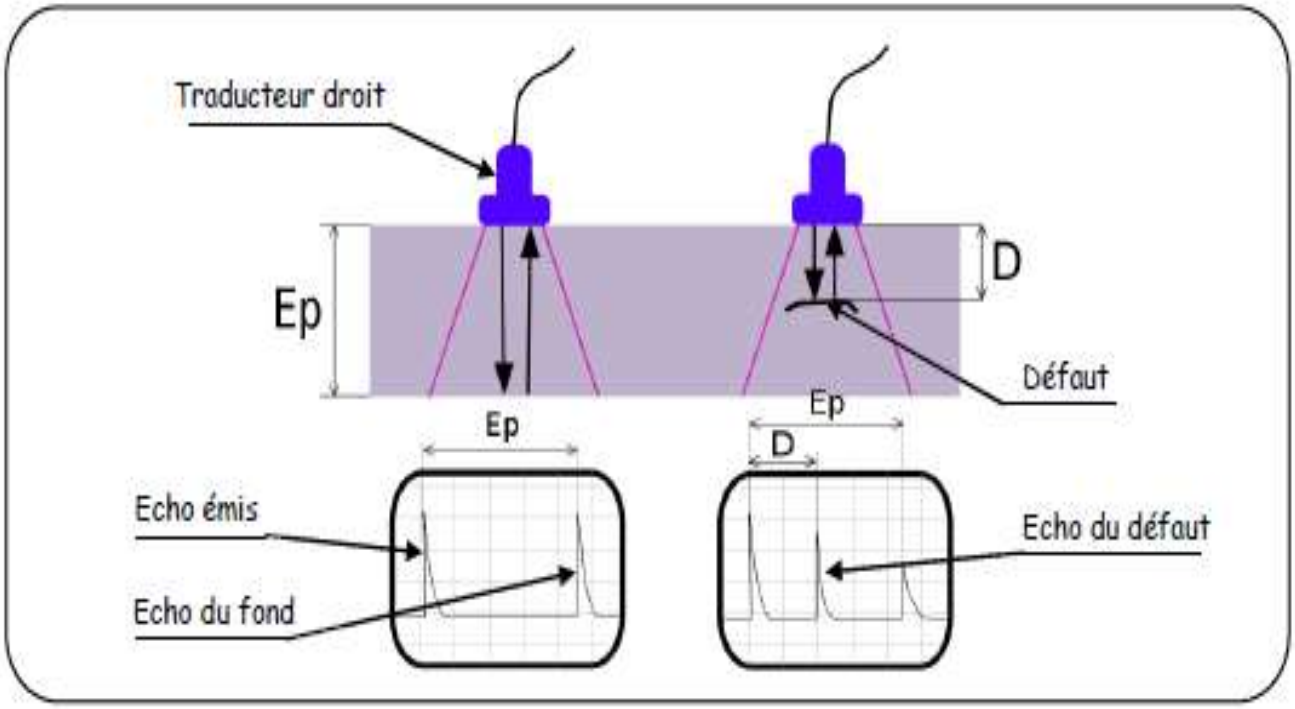


Figure 2 .8 : Principe de contrôle par ultrasons

Chapitre 03

Technique de Thermographie Infrarouge

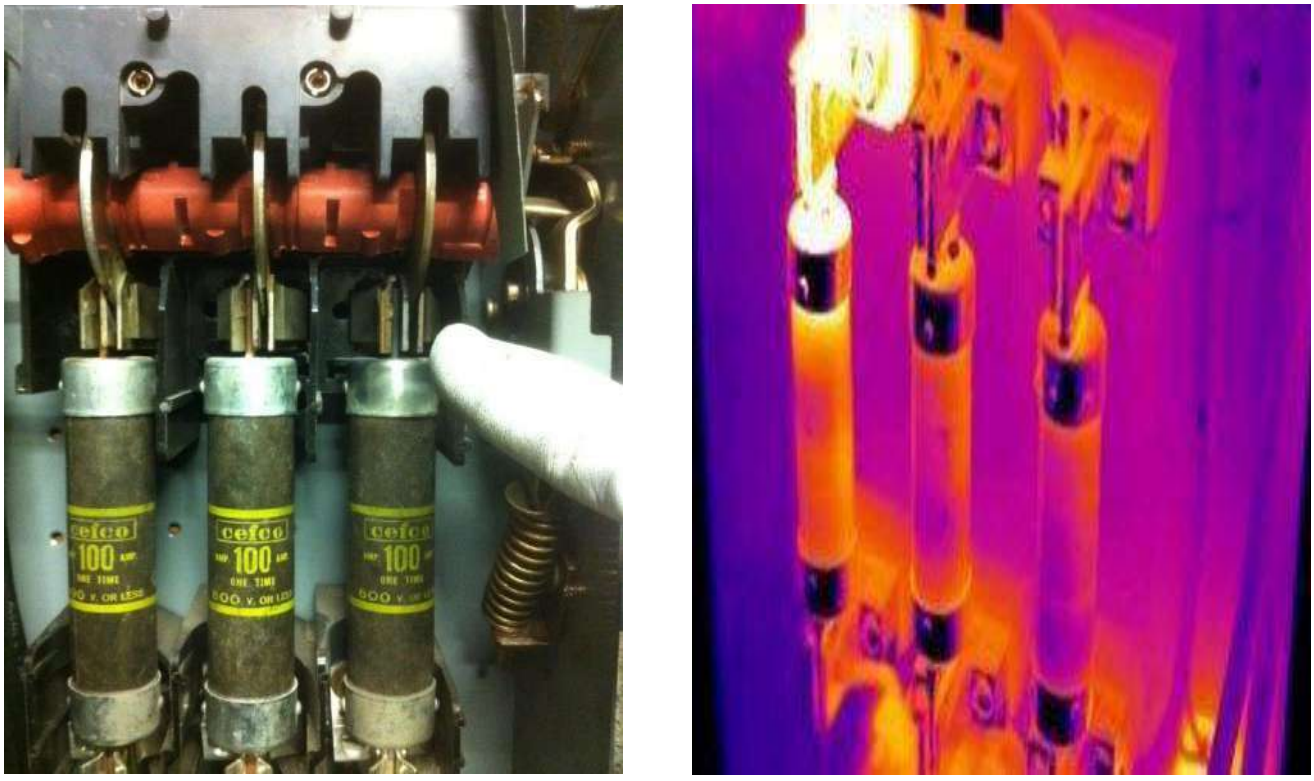


Figure 3.1 : Exemple De Défaut Electrique De Connexion
(Mauvais Serrage)

1- GENERALITES

La thermographie infrarouge est une technique permettant à distance et sans contact, d'observer des scènes thermiques et d'en mesurer des températures avec une précision variable en fonction des critères recherchés.

A partir du zéro absolu (-273°C), tous les corps rayonnent de l'énergie. Cette énergie émise est dépendante de deux facteurs principaux qui sont:

La température du corps ;

Le type de matériau et son état de surface.

En résumé, plus un corps est chaud, plus il émet de rayonnements. Le mesurage de cette énergie est possible grâce à un système de mesure appelé « **camera infrarouge** », ou plus techniquement « **radiomètre infrarouge** ». Le domaine militaire et le secteur médical ont contribué au développement de cette technologie.

2- DEFINITION

La thermographie infrarouge «**TIR**» est la science de l'acquisition et de l'analyse d'informations thermiques à l'aide de dispositifs d'imagerie thermique à distance.

La norme française A 09-400 définis la thermographie infrarouge comme «***Technique permettant d'obtenir au moyen d'un appareillage approprié l'image thermique d'une scène thermique dans un domaine spectral de l'infrarouge*** ».

La thermographie infrarouge est utilisée dans le domaine de la surveillance conditionnelle de fonctionnement pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le flux de production et réduire au maximum les coûts d'entretien.

3 -PRINCIPE

La caméra infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques : ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points lumineux sur un écran. L'image ainsi obtenue s'appelle « **thermographie** ».

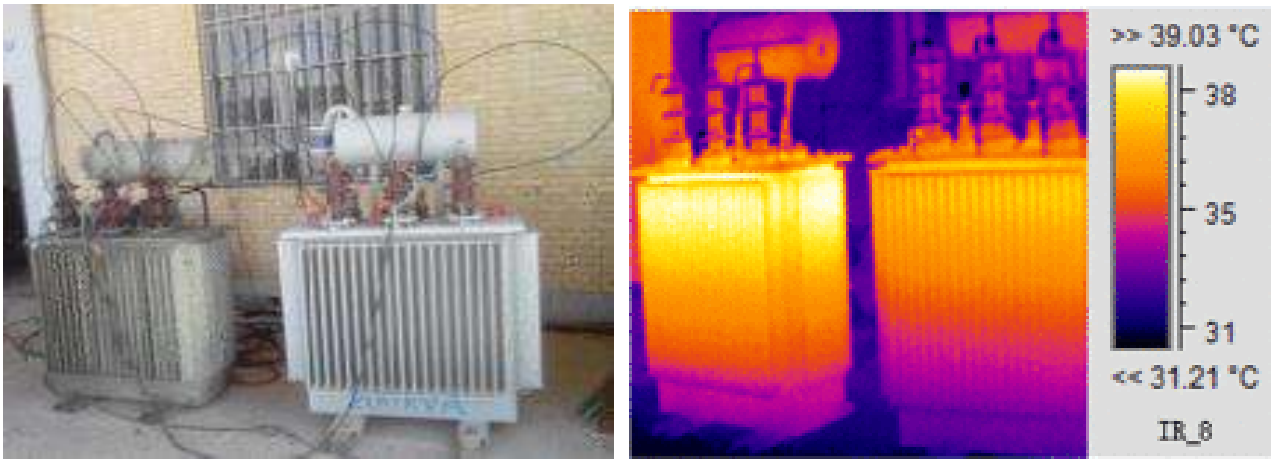


Figure 3.2 : Image Visible Et Thermographie Correspondant D'un Transformateur

La figure suivante montre un exemple courant de défaut dans une armoire électrique. La caméra infrarouge mesure tous les rayonnements émis et les restitue sous forme de thermographie : cette image thermique est composée par des niveaux de couleurs, qui sont en corrélation avec les niveaux de températures mesurés (échelle des températures). Dans ce cas, par comparaison des températures des trois connexions, le thermograthie nous indique un mauvais serrage au niveau du câble droit.

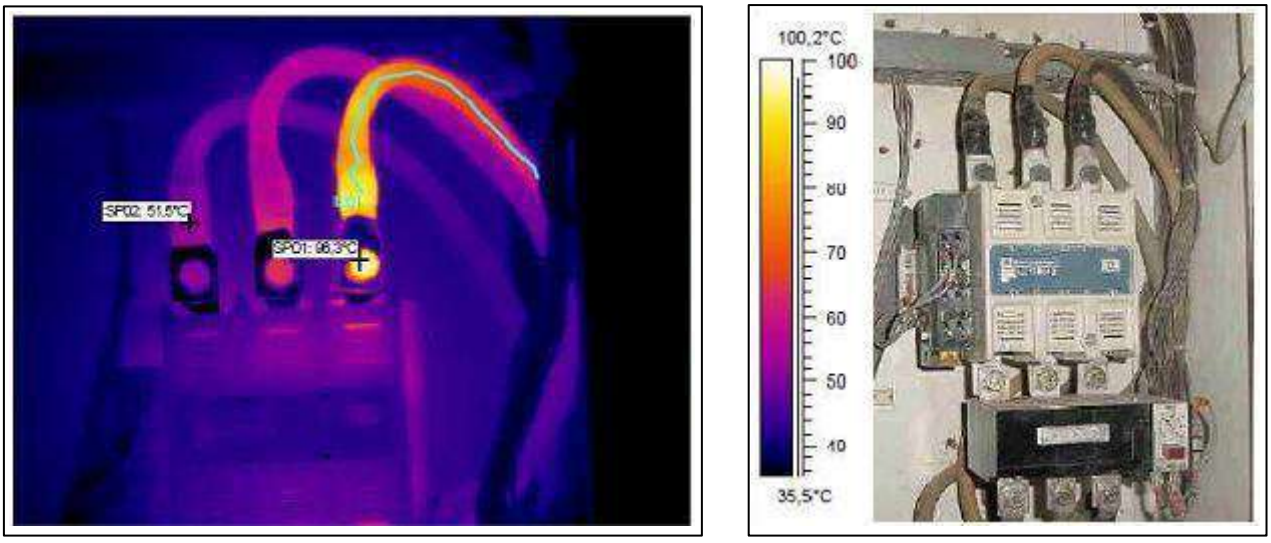


Figure 3.3 : Exemple De Défaut Electrique De Connexion (Mauvais Serrage)

4 - LOIS DU RAYONNEMENT INFRAROUGE

4- 1 Le spectre électromagnétique

La lumière visible, les ondes radio et TV, les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques. Le domaine visible s'étend des longueurs d'onde allant de 0,4 à 0,8 µm. La bande infrarouge s'étend de 0,8 à 1000 µm. En thermographie infrarouge on travaille généralement dans une bande spectrale qui s'étend de 2 à 15 µm et plus particulièrement dans les fenêtres 2-5 µm et 7-15 µm.

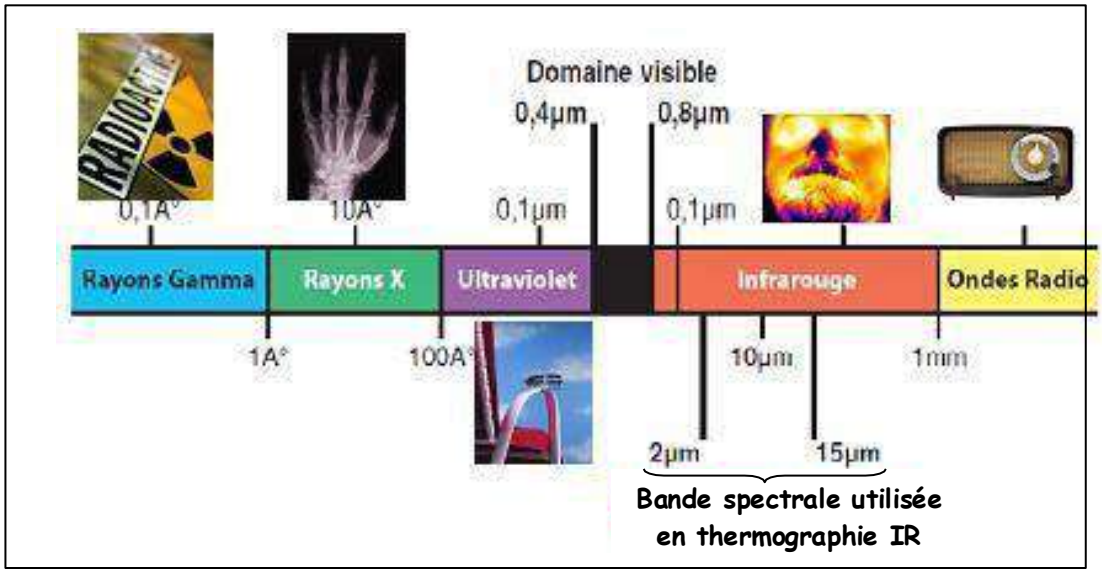


Figure 3.4 : Rayonnements électromagnétiques

4- 2 Loi de Plank

Max Plank a calculé les flux de puissances électromagnétiques émis par un corps noir.

$$W_\lambda = \frac{2.\pi.h.c^2}{\lambda^5.(e^{(h.c/\lambda.k.T)}-1)} \quad (Watts/cm^2\mu)$$

- □ : Longueur d'onde ;
- **W**□ : Flux de puissance émis par un corps noir à la longueur d'onde □ ;
- **c** : Vitesse de la lumière = 3.10^{10} cm/s ;
- **h** : Constante de Plank = $6{,}6.10^{-34}$ Watt.s^2 ;
- **k** : Constante de Boltzman = $1{,}4.10^{-23}$ Watt.s^2/°K;
- **T** : Température absolue du corps noir en Kelvin.

Ces formulations mathématiques complexes sont représentées par des courbes.

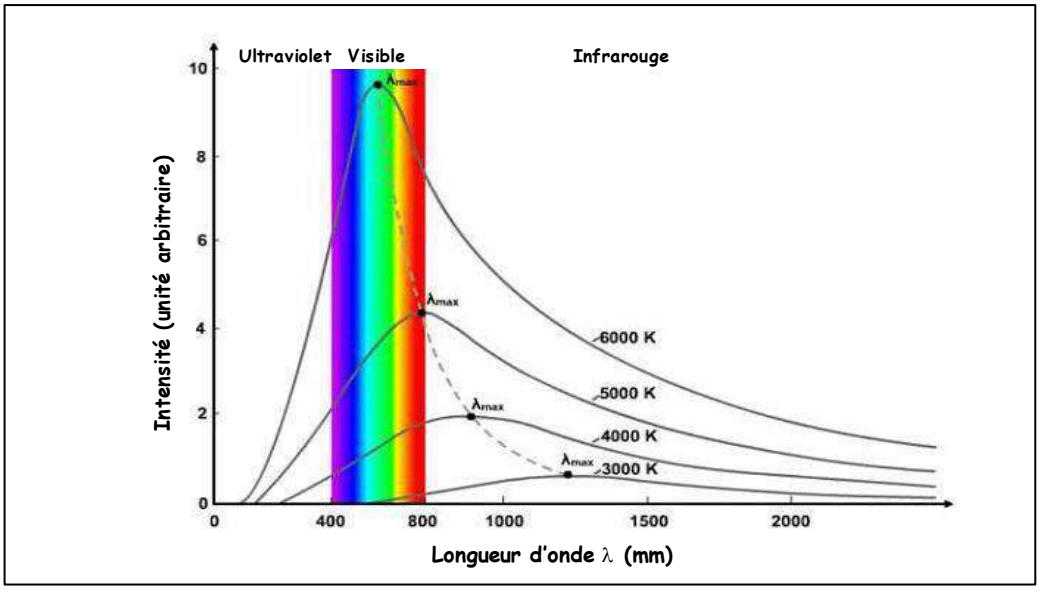


Figure 3.5 : Rayonnement du corps noir pour différentes températures

A partir de ces courbes, on constate que :

 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 (0,4-0,8 μm) : les objets chauffés au moins à cette température deviennent donc visibles par l'œil humain de par la couleur rouge sombre.

 En dessous de cette température, on ne voie pas les températures car l'émission de rayonnement se fait au delà de la bande spectrale sur laquelle sont calibrés nos yeux. Alors, pour visualiser des corps dont la température est inférieure à 520°C, il faut utiliser des appareils dont le seuil de détection est inférieur à celui de l'œil humain.

4-3 Rayonnement incident

On appelle incident l'ensemble des rayonnements extérieurs à un objet qui viennent le frapper. Dans la figure suivante, le rayonnement incident, noté W_{INCID}, est l'ensemble des rayonnements qui heurtent l'objet cible provenant d'une ou plusieurs sources. Une certaine partie du rayonnement, notée W_{α}, sera toujours absorbée, et l'objet cible en retiendra alors l'énergie. Une certaine quantité, notée W_{ρ}, sera réfléchie. Cette dernière n'affectera aucunement l'objet cible. 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. Si on écrit cela sous forme d'une équation mathématique on obtient:

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

Un objet possède une certaine capacité ou aptitude à :

- **Absorber** : ce que l'on appelle **l'absorptivité ;**
- **Réfléchir** : ce que l'on appelle **la réflectivité ρ** ;
- **Transmettre** : ce que l'on appelle **la transmissivité .**

La somme des trois est toujours égale à 1 : + + **ρ = 1**

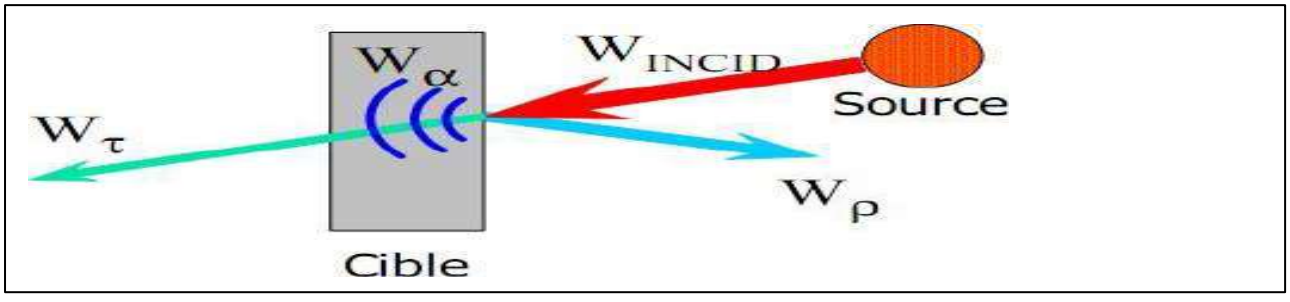


Figure 3.6 : Répartition du rayonnement incidenten différentes composantes

4-4 Rayonnement résultant

Le rayonnement résultant, capté par une caméra infrarouge, est constitué de la somme de tous les rayonnements qui quittent la surface d'un objet, quelles que soient

les sources d'origine. Il provient de trois types de sources.

Sur la figure suivante, on est en présence de trois sources de rayonnement : l'objet cible lui-même, une source devant et une source derrière. Si nous observons l'objet cible depuis la droite, le rayonnement résultant est une combinaison du rayonnement de l'objet cible lui-même, du rayonnement provenant de la réflexion sur l'objet de la source de chaleur avant (située sur la droite) et du rayonnement issu dela source de chaleur arrière (située sur la gauche) traversant l'objet cible.

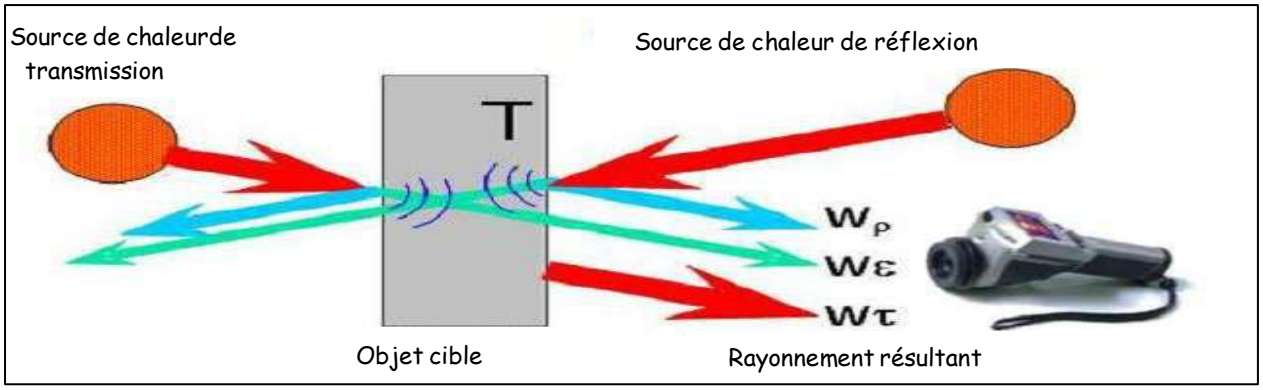


Figure 3.7 : Les trois sources derayonnement réfléchiissues de l'objet

4-5 Facteurs perturbateurs

- **Le vent :** En extérieur, il perturbe et refroidit les objets visualisés.
- **L'hygrométrie :** La vapeur d'eau contenue dans l'air influe sur le rayonnementélectromagnétique reçu.
- **La dimension du point** : Le rayonnement électromagnétique reçu par le capteur sera proportionnel, à température égale, à la dimension du point mesuré au rapport de la taille du capteur permettant la mesure de la distance émetteur-récepteur.
- **Distance :** Il y a atténuation logique du flux reçu par le capteur en fonction de la distance. Le flux reçu est inversement proportionnel au carré de la distance.
- **Environnement** : En fonction du fond de la scène thermique observée, il y a une source d'erreur dans la mesure si le point observé est intégré dans le fond radiatifde la scène.

5- TECHNIQUES D'ANALYSE D'IMAGES THERMIQUES

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 permet de trouver plus facilement ce qu'on cherche à mettre en évidence dans une image. Les trois fonctions les plus importantes pour l'amélioration des images réfléchit sur une vitre thermiques sont le cadrage thermique, l'isotherme et les palettes.

5- 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 être en dehors de l'échelle. Elles seront alors généralement représentées en noir ou blanc.

Sur l'exemple de la figure suivante, 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.

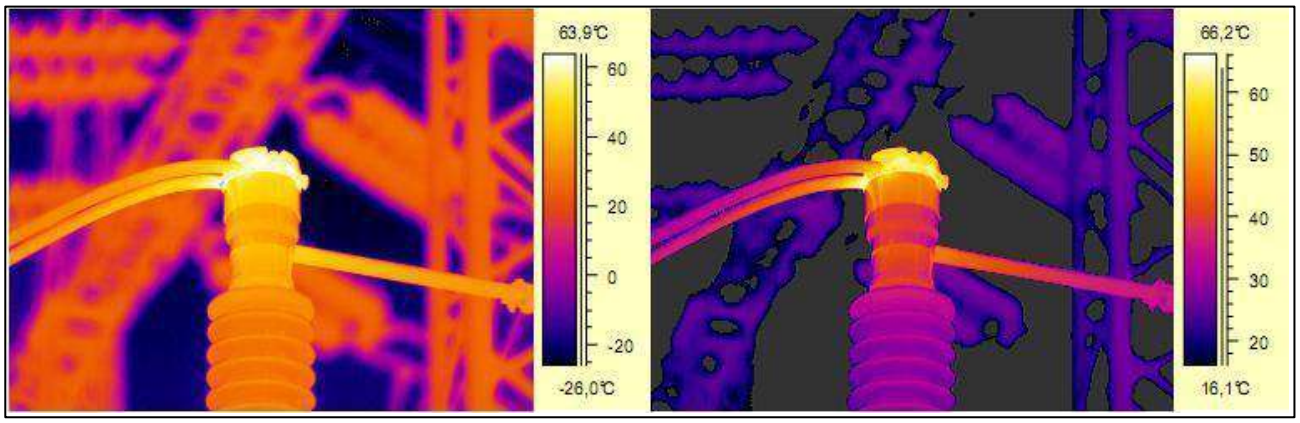


Figure 3.8 : Image réglée Automatiquement

Figure 3.9 : Image cadrée thermiquement sur le composant

5- 2- Isotherme

L'isotherme remplace certaines couleurs dans l'échelle par des tons opposés. Il marque un intervalle de température apparente égale. L'isotherme remplace uniquement une plage de 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 élargit ou réduit selon vos besoins. Un exemple est illustré sur la figure suivante.

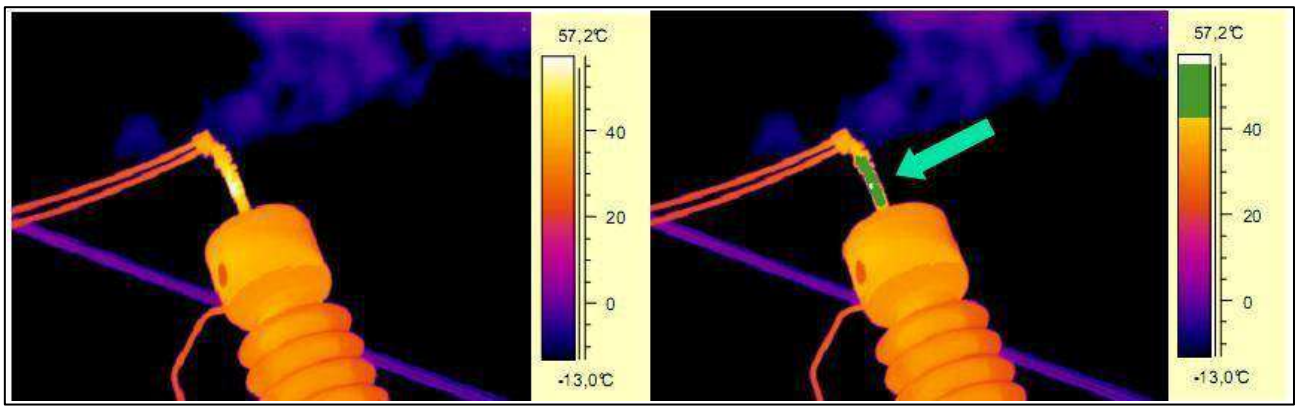


Figure 3.10 : Tête De Transformatrice Haute Tension Avec Une Isotherme

5- 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 blanche. 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 lissé à l'image, et pour qu'elle ne soit pas pénible à observer. Un exemple de thermographie d'une cuve de stockage pris aves différentes palettes est illustré sur la figure suivante.

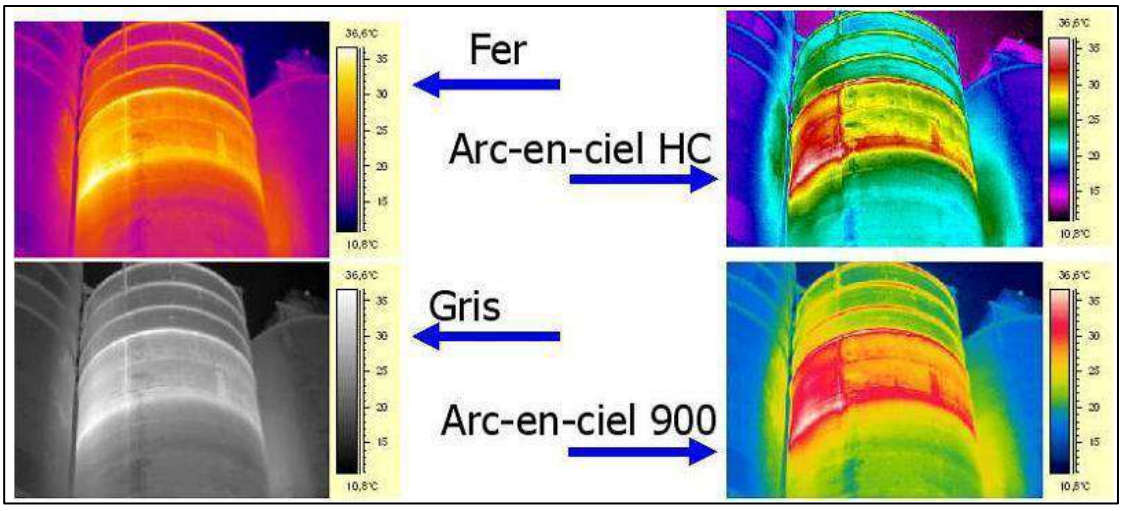


Figure 3.11 : Exemples De Différentes Palettes

Une règle est à appliquer pour le choix de palettes :

- Utilisez des palettes très contrastées sur des objets cible peu contrastés ;
- Utilisez des palettes peu contrastées sur des objets cible très contrastés.

6- MATERIEL UTILISE

♦ Une caméra infrarouge 3-5, 8-12 □ avec une résolution thermique de 0,1 °C à 20 °C,(caractéristiques données par les constructeurs).

♦ Une unité de traitement d'images.

♦ Un magnétoscope pour enregistrement sur site, et/ou un stockage numérique des données sur disquette, carte PCMCIA...

♦ Un calculateur associé pour analyse des résultats en direct.

♦ Un ensemble portatif de mesures (température ambiante, vitesse du vent,. ...).

♦ Un logiciel d'analyse laboratoire : Thermagram , Thermonitor , TIC8000.

Cet équipement est mobile, portable ou sur chariot et ne nécessite pas d'alimentation électrique externe.

L'ensemble du matériel infrarouge est obligatoirement étalonné annuellement dans le respect des normes.

7- APPLICATIONS DE LA THERMOGRAPHIE IR

7- 1- Maintenance électrique

Basé sur le principe **U = RI** où toute résistance de passage au courant entraîne un échauffement (effet Joule) on détermine : les écrous mal serrés, les oxydations, les

déséquilibres de phase etc.

Une multitude d'autres secteurs sont utilisateurs de la thermographie infrarouge (carte électronique, transformateur, batterie, cellule blindée (H.VIR.)

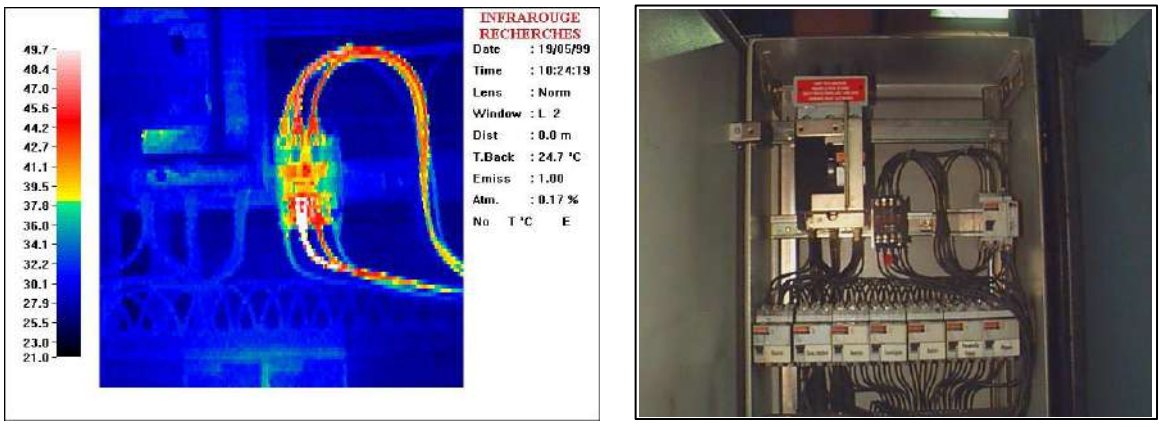


Figure 3.12 : Maintenance électrique

7- 2- Thermique industrielle

- Visualisation des calorifugeages, fours réfractaires...
- Séchoirs, étuves....

7- 3- Mécanique

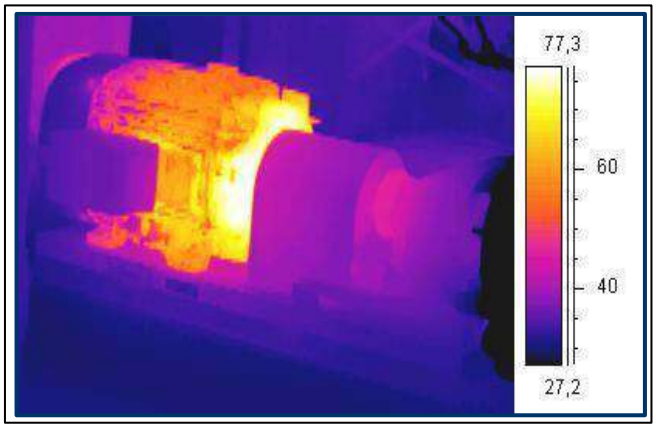


Figure 3.13 : Maintenance Mécanique

7- 4- Pétrochimie, chimie

La pétrochimie et la chimie sont les premiers secteurs à avoir utilisé la thermographie, notamment en procès, décochages de fours et sécurité (vérification des soupapes) sur des : réfractaire, pipeway, tubes de four (activité très pointue).

7- 5- Réseaux d'eau froide

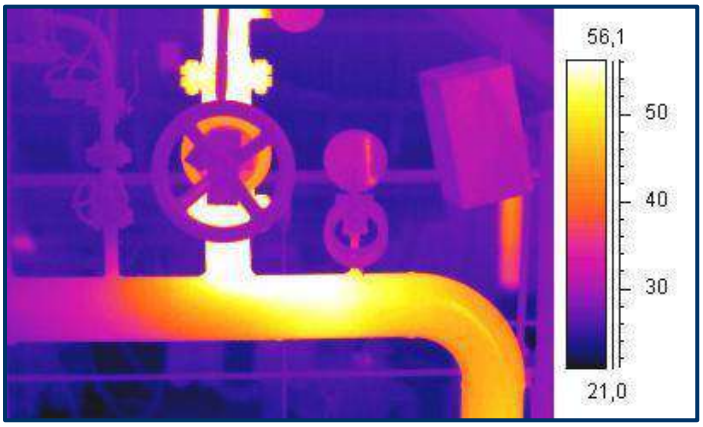


Figure 3.14 : Maintenance Réseaux d'eau froide

Cette technique est appliquée en Europe uniquement l'été, associée s'il y a lieu aux hautes fréquences et système neutronique. Certaines conditions doivent être respectées (la sécheresse, absence de pluiedepuis 8 jours...)

7- 6- Réseaux d'eau chaude

La technique de recherche de fuites d'eau chaude s'applique sur les réseaux dechauffage urbain afin de déterminer : les fuites thermiques, les fuites hydrauliques…

7- 7- Autres

- ❖ Armement ;
- ❖ Chirurgie esthétique ;
- ❖ Alimentaire ;
- ❖ Etc.

Chapitre 04

Application De La Technique Thermographie Dans Le Domaine Electrique

1 - UTILISATION DE LA CAMERA INFRAROUGE :

1- a -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.

- 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

Notion de système à balayage spatial.

La camera thermique est munie d'un dispositif optico-mécanique qui par le biais de miroirs permet le balayage d'une scène suivant des axes verticaux et horizontaux. Dans ce cas, le même détecteur analyse chaque zone de la scène thermique avec un très léger décalage temporel.

Notion de système à plan focal.

Celui-ci est constitué par une multitude de radiomètre appelé "matrice de détecteurs". Dans ce cas, chaque détecteur est destiné à l'analyse continue d'une

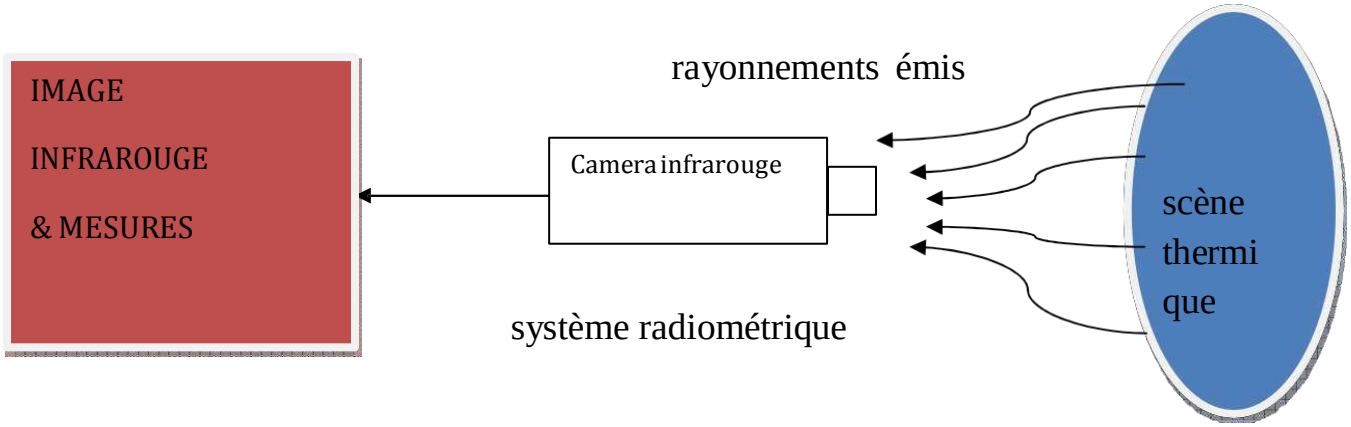
zone unique dans le champ scanné défini par l'optique de la caméra

Depuis 1989, les imageurs thermique à matrice de grand nombre de détecteurs sont disponibles pour des applications civiles, militaires et industrielles. En 1995, les matrices ont été adoptées pour les caméras thermiques d'entrée de gamme. Une meilleure qualité d'image risque de faire conclure à de meilleures qualités de mesure ; il est donc désormais nécessaire d'observer les implications de l'emploi des matrices sur les caractéristiques et performances instrumentales des caméras thermiques.

1 – b Principes :

Milieu transparent ou semi transparent

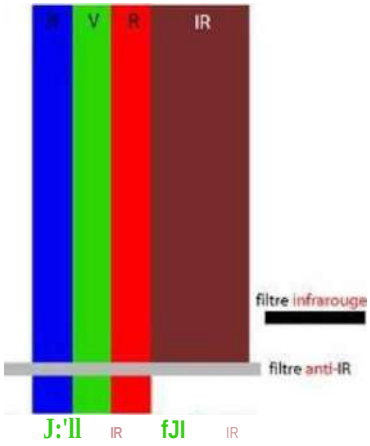
Thermographie



La caméra infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur (ex : l'atmosphère) les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques : ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points lumineux sur un écran. L'image ainsi obtenue s'appelle "Thermographie".

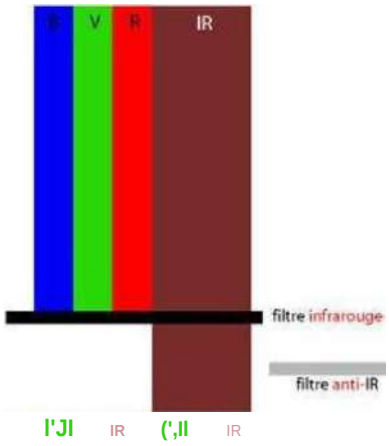
1 – c Fonctionnement :

Pour comprendre le fonctionnement, il est intéressant de savoir ce qui se passe lorsque la caméra passe en mode « infrarouge ». Tous les capteurs CCD et tri-CCD ont une couche photosensible au rayonnement infrarouge. Toutes les caméras professionnelles et grand public possèdent un filtre qui coupe l'infrarouge et restreint donc l'impact des rayonnements sur le capteur à la seule lumière visible. La grande innovation est d'avoir rendu ce filtre amovible, qui est alors remplacé par un autre filtre, qui lui, inversement, supprime en majeure partie la lumière visible arrivant au capteur.



capteurCCD

MODE HABITUEL



copteurCCD

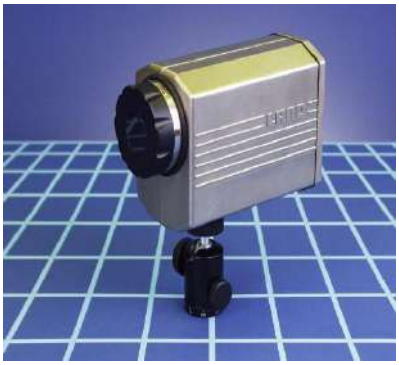
MODE "Nightshot"

2 - Comparaison des cameras

Aujourd'hui toutes les caméras thermographiques sont des caméras matricielles et elles utilisent toutes un détecteur micro bolomètre au même titre que tous les PC utilisent un processeur Pentium. Néanmoins, sur le marché de la thermographie infrarouge, toutes les caméras n'utilisent pas le même détecteur et certains constructeurs vont même jusqu'à demander une fabrication spécifique de détecteurs micro bolomètres selon leur propre cahier des charges. Le détecteur est le principal responsable des caractéristiques techniques de la caméra en terme de sensibilité thermique et de qualité d'image. Chaque fabricant de caméra thermographique propose par ailleurs des logiciels spécifiques pour l'édition de rapports.



Caméra AR-40



Caméra FTI Mini LAND



Caméra IR-032

Tableau 4.1 : Donnée images et optiques

Fabricant /modèle	Flir système A320	Devitech IR-032	FTI Mini LAND
Champ de vision	25° x 19°		17 x 12,8° (variantes d'objectif disponibles sur demande)
Distance focale	18 mm		450 mm
Résolution spatiale	1.36		1,85
Sensibilité thermique (NETD)	70 mK @ +30 °C	NETD <50mK	<0,12°C
Fréquence des images	30 Hz	50 Hz	30 Hz
Focalisation	Automatique ou manuelle (moteur intégré)	Réglage manuel ou autofocus	Réglage manuel ou autofocus

Tableau 4 . 2 : Données métrologiques

	Flir système A320	Devitech IR-032	FTI Mini LAND
Type de détecteur	Matrice à plan focal (FPA), microbolomètre non refroidi	microbolomètre non refroidi	Matrice plan focal à microbolomètres non refroidie
Gamme spectrale	7.5-13 µm	8-14 µm	7 à 14µm
Résolution	320 x 240 pixels	640x480 pixels	160 x 120 pixels
Pas du détecteur	25 µm	25 um	25um
Gamme de température de l'objet	de –20 °C à +120 °C	-30 à 90 °C	-20 à 500°C
Précision	±2 °C ou ±2 % de la valeur affichée	±2% ou +-2°C	

Tableau 4 .3 : **Données ergonomiques**

Fabricant /modèle	Flir système A320	Devitech IR-032	FTI Mini LAND
Masse	0.7 kg	0,550 kg	2 kg
Dimensions (L x P x H)	170 x 70 x 70 mm	65 x 65 x 89 mm	

Il s'agit ici d'attirer l'attention sur quelques critères de sélection (notamment : gamme de température, résolution, gamme spectrale, type de détecteurs, sensibilité thermique, résolution spatial et champ de vision). Cependant, le choix d'une caméra dépend nécessairement de l'utilisation qui en sera faite, de la qualité d'image attendue et du budget dont on dispose. Nous ne pouvons donc pas prétendre aiguiller précisément les choix vers la caméra qui répondra à coup sûr aux besoins de chacun.

2 – 1 - 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.

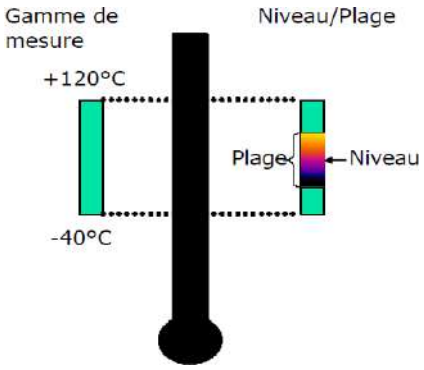


Figure 4.1 : Contrôle en sélectionnant la plage de température, leniveau et le gain.

2 .1. a - 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 différente s manières , parfais même en c o m bi na nt p l u s i eu r s méthodes entre elles. Elle peut être comparée
{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 b o n n o m b r e d es y s t è m e s p l u s a nc i ens et s o nt g é n é r a l e m e nt actionnées par un bouton ouune 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.

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.

2.1. b 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

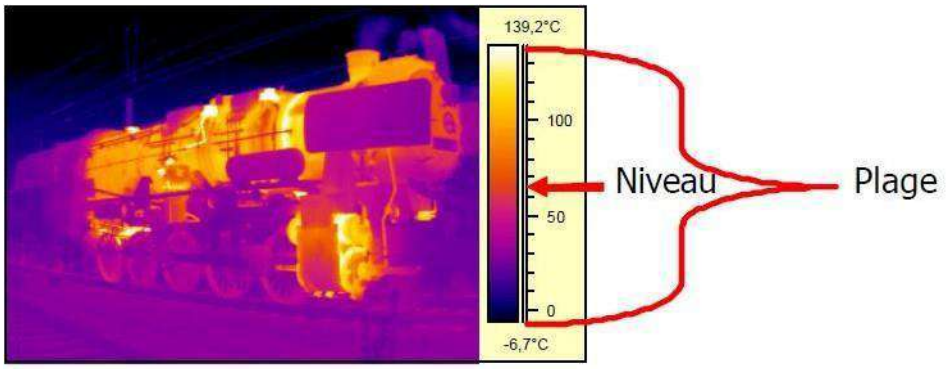


Figure 4.2 : Niveau et gain

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.

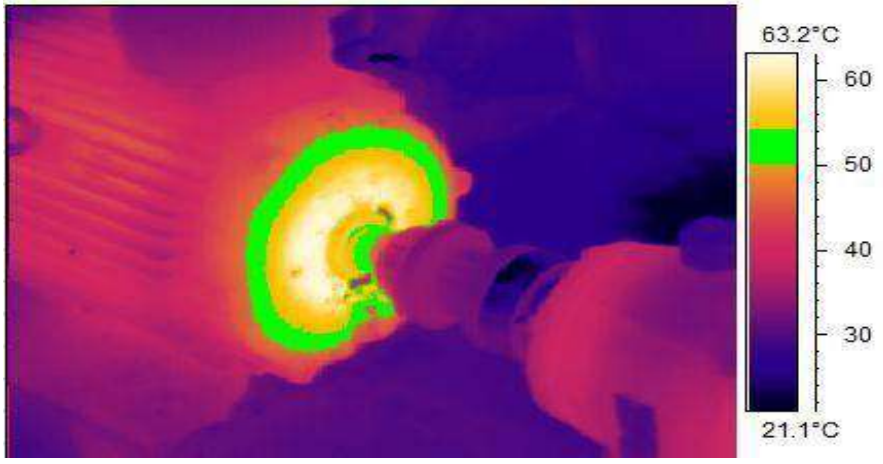


Figure 4.3 : L'isotherme remplace certaines couleurs dans l'échelle par des tonscontrastés

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.

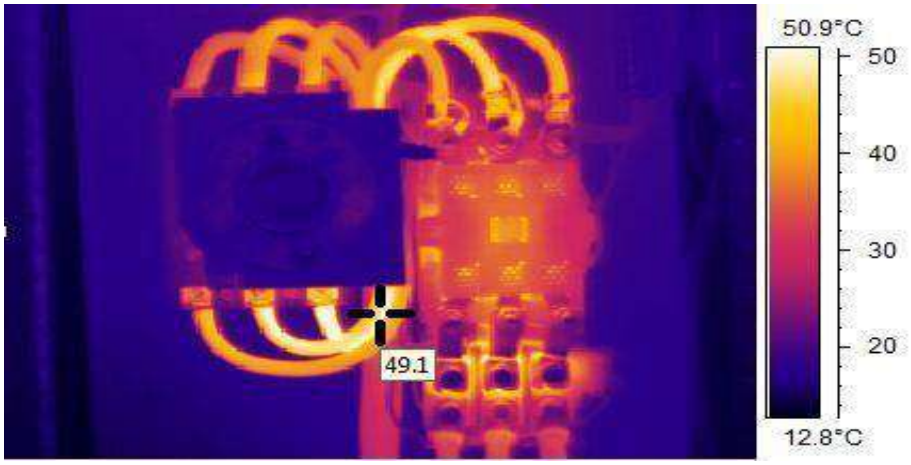


Figure 4.4 : Le point de mesure est une fonction simple et pratique

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.

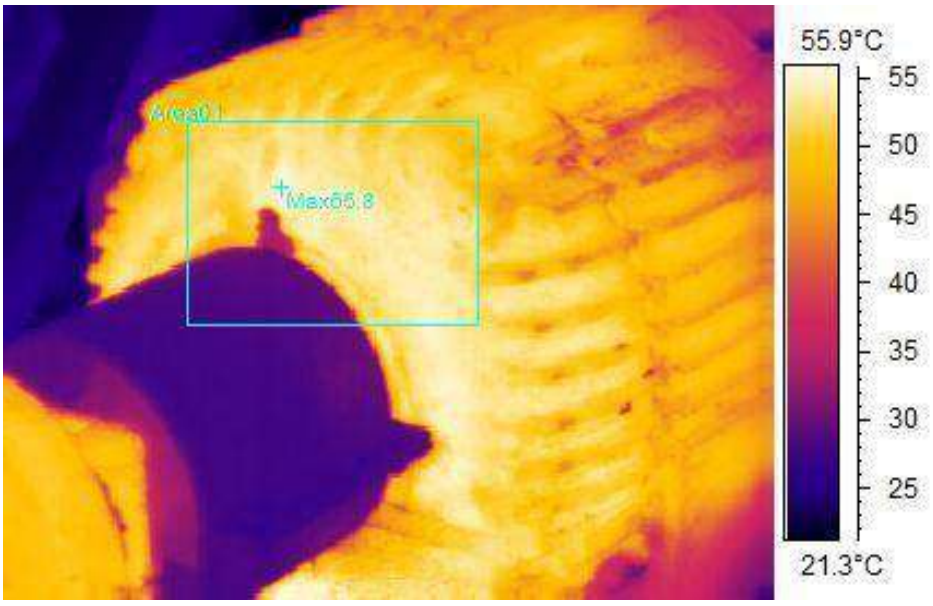


Figure 4.5 : La fonction de zone est paramétrée pour afficher la température maximale au sein de la boîte.

2-2 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 .

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 thermographiste. 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 cardes 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.

3- TECHNIQUE D'ANALYSE D'IMAGES THERMIQUES :

Une caméra est généralement utilisée pour créer une belle image servantà 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.

3-1 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.

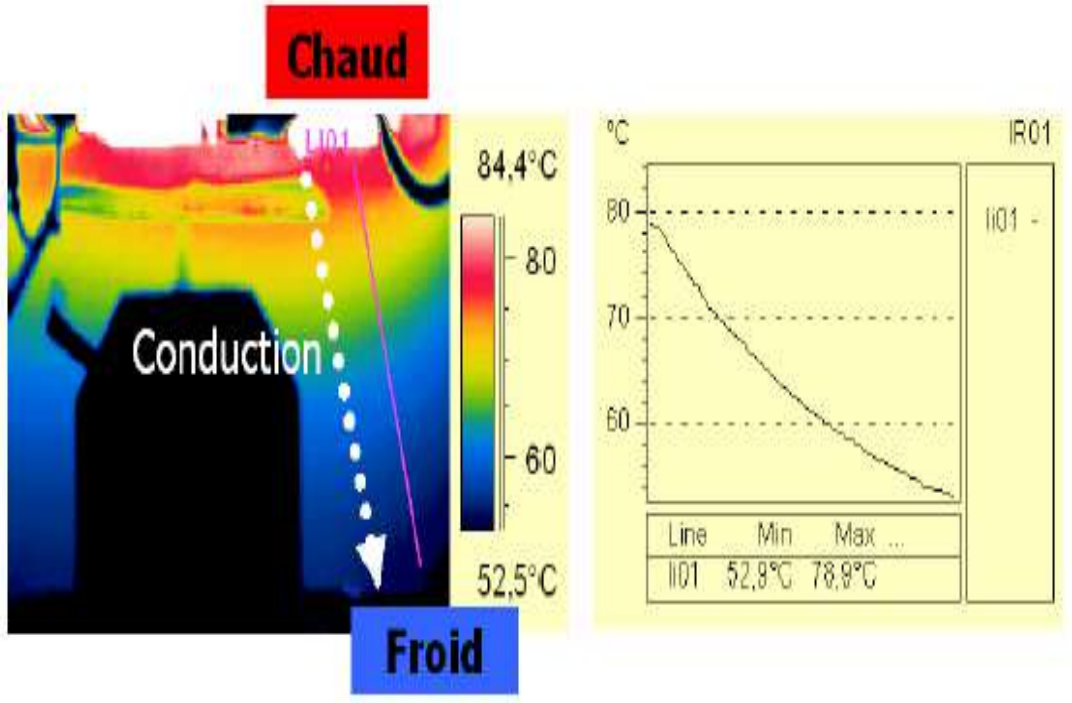


Figure 4.6 : Gradient thermique

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.

3-2 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 chercher 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

3-2.1 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.

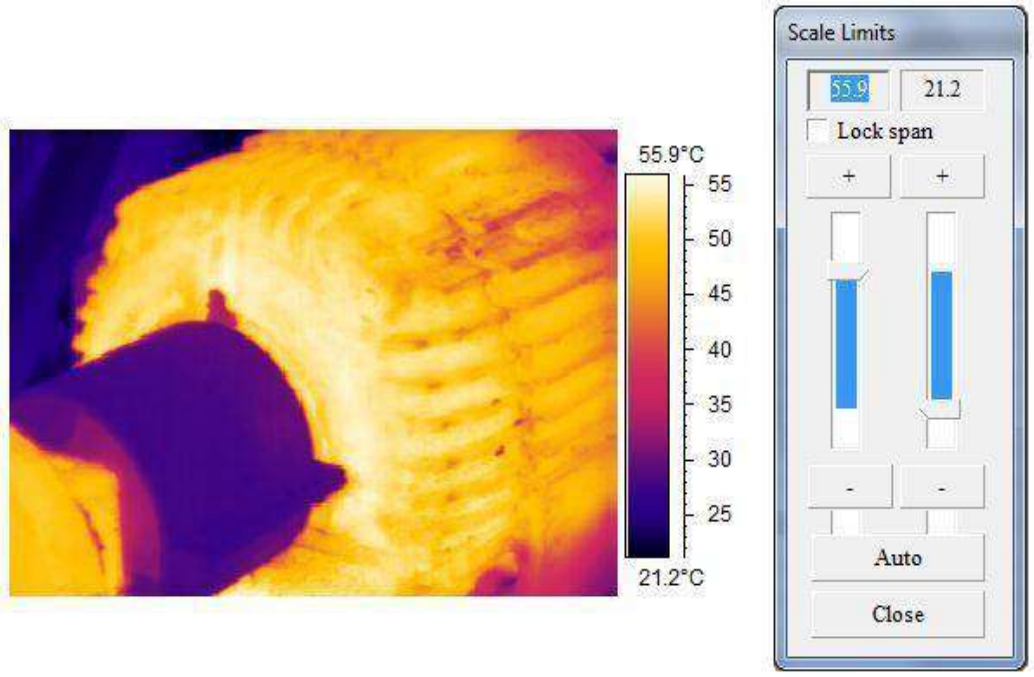


Figure 4.7 : L'intégralité de l'image est cadrée thermiquement

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.

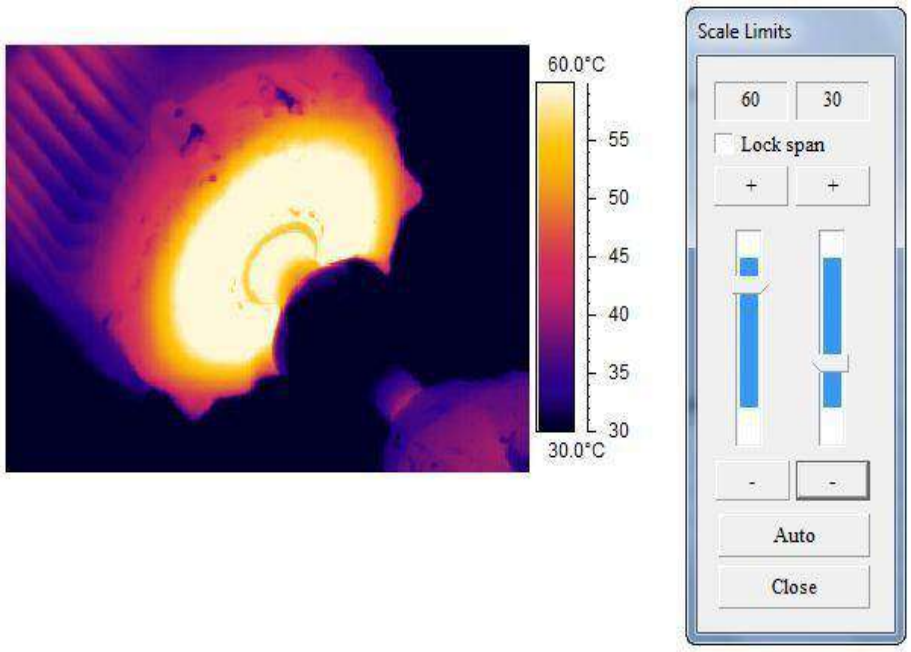


Figure 4.8 : Image cadrée thermiquement

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 °C, puis a ajusté le gain en conséquence.

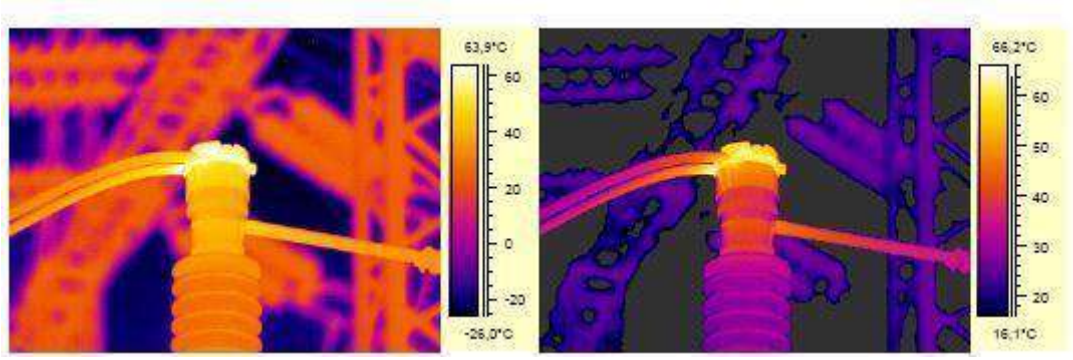


Figure 4.9 : Même image, réglée automatiquement (gauche) et cadrée thermiquement sur le composant (droite).

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 lazone 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 stockerl'image.

3 -2.2 <u>Isotherme :</u>

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.

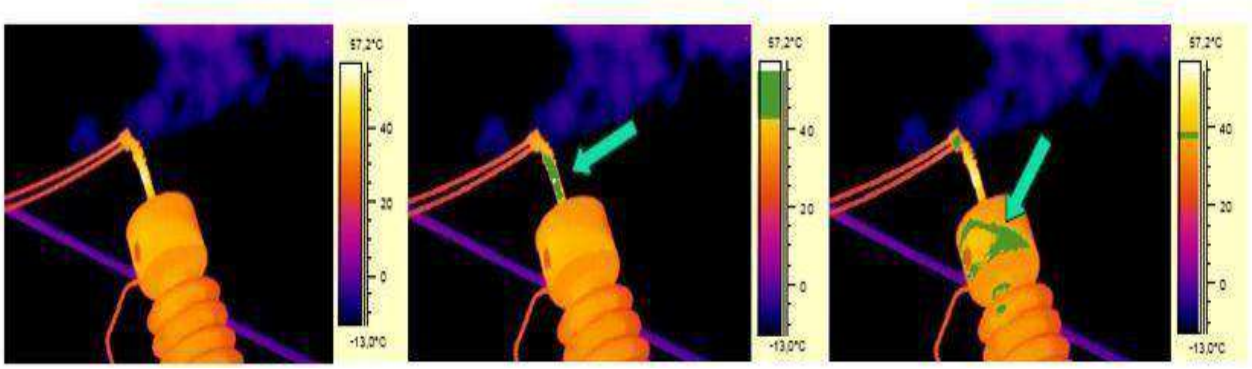


Figure 4.11 : Tête de transformateur haute tension avec des isothermes à différentsendroits

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 ladeuxième 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

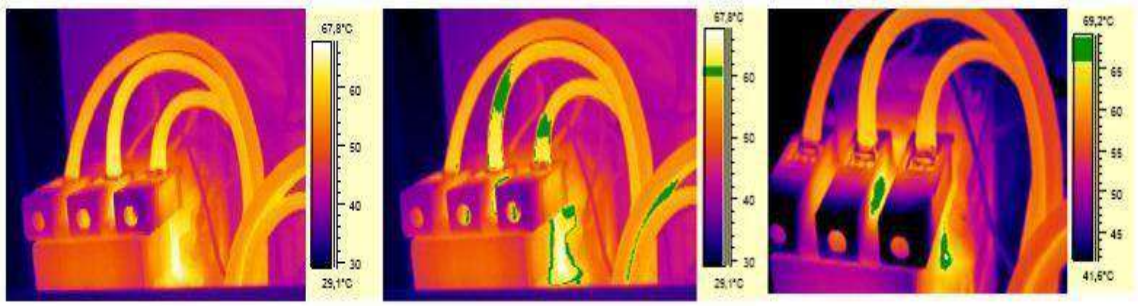


Figure 4.12 : Image thermique d'un contacteur avec des isothermes

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.

3-2.3 <u>Palettes</u>

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 lisser { 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.

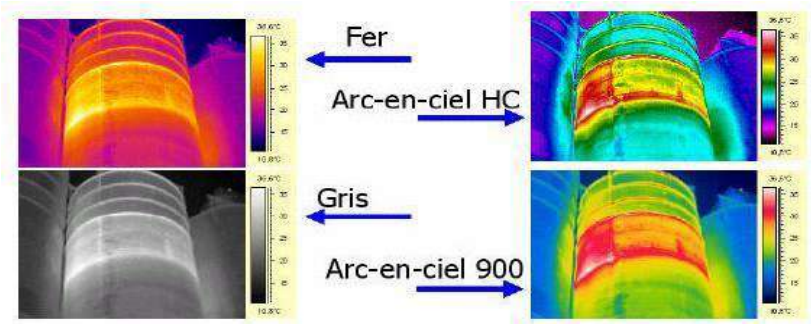


Figure 4.13 : différentes palettes

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.

3-2.4 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.

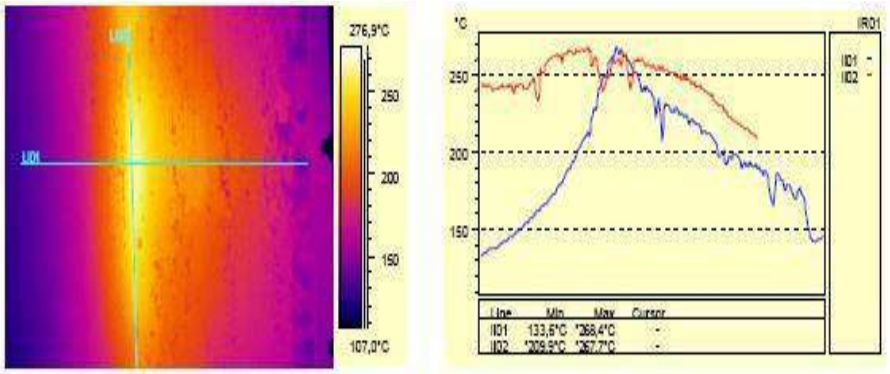


Figure 4.14 : gradient thermique vertical et horizontal de ce point chaud

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.

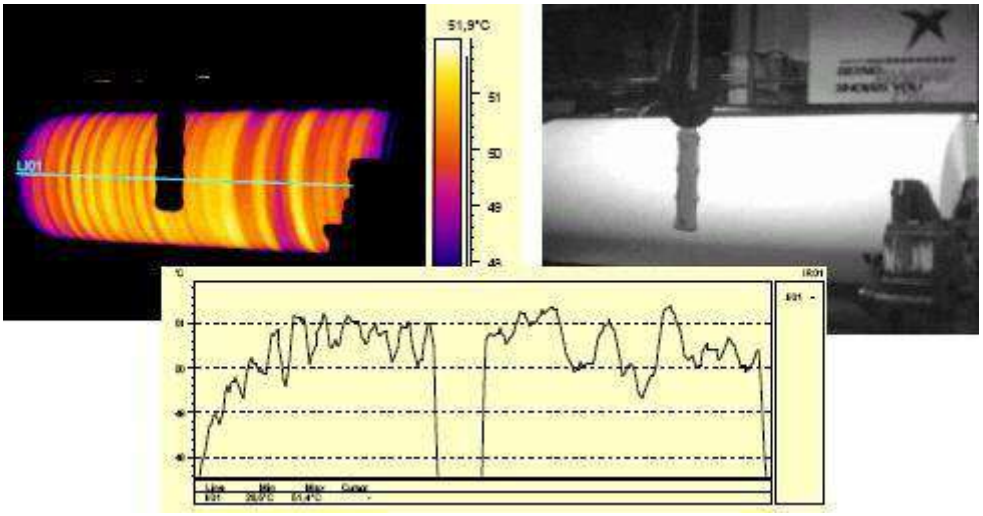


Figure 4.15 : Utilisation de la fonction Profil dans la production de papier

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.

3-3 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 réfléchie. Cela signifie-t-il pour autant que si je ne suis plus en face du miroir aucune image n'est réfléchie ? Certainement pas ! Le miroir réfléchira le mur (ou n'importe quoi d'autre) situé derrière la place où nous nous trouvions. 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.

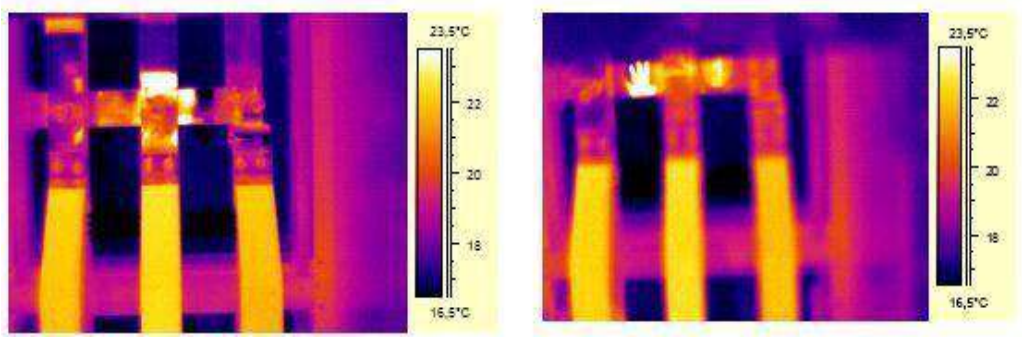


Figure 4.16 : Réflexions de l'opérateur (présence des mains et du visage).

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 droit nous pouvons voir qu'il s'agit en fait d'une réflexion de l'opérateur. Cette dernière image a été prise avec un angle diffèrent 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 a 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 visuel 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.

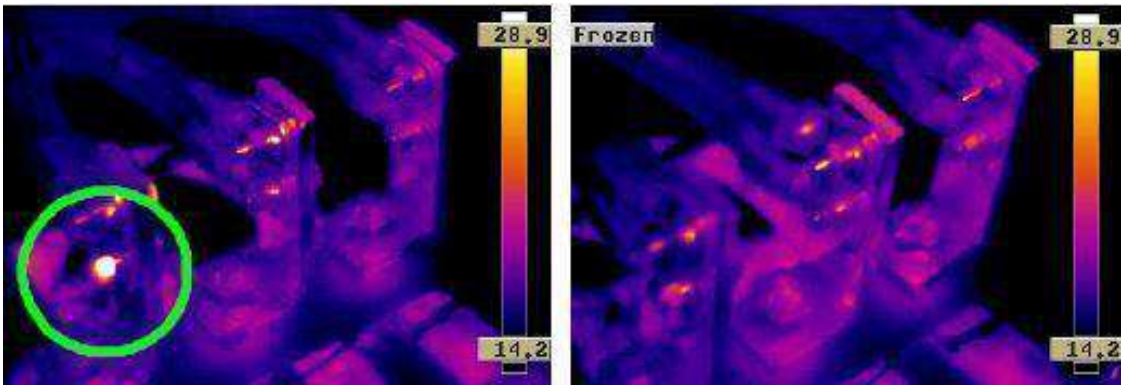


Figure 4. 17 : Réflexion d'un point source, disparaît lorsque l'angle change

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

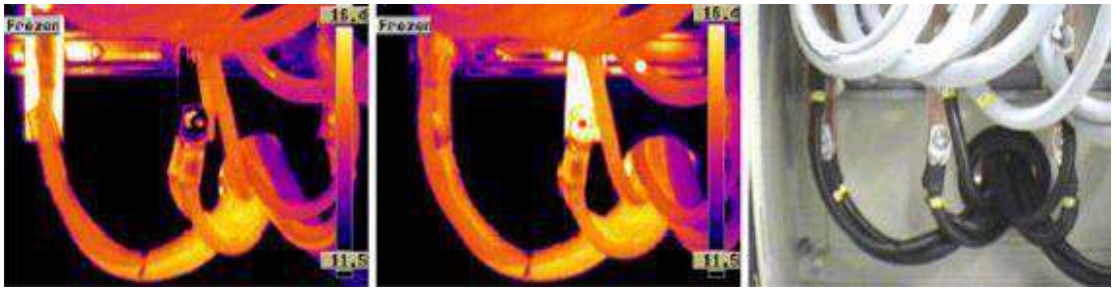


Figure 4.18 : Influence de l'angle à la réflexion

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

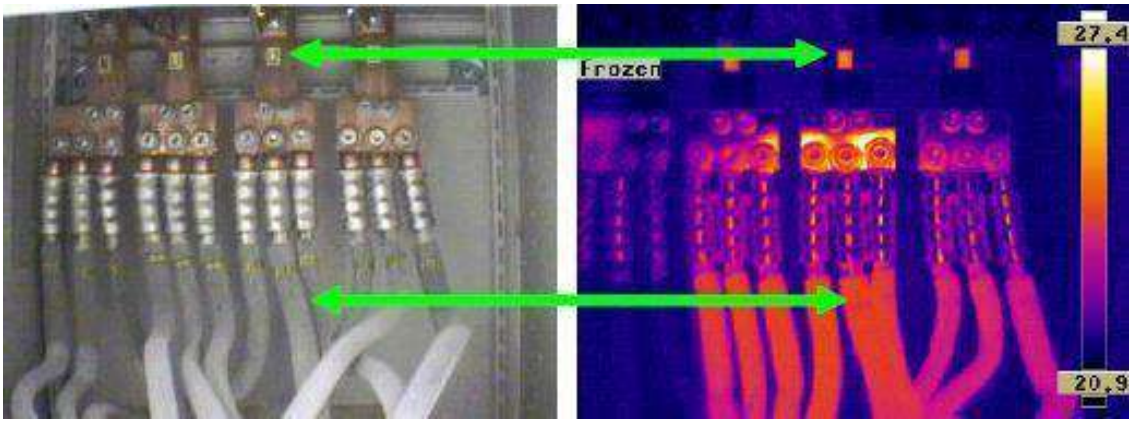


Figure 4.19 : grande émissivité permet une lecture plus "réaliste"

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.

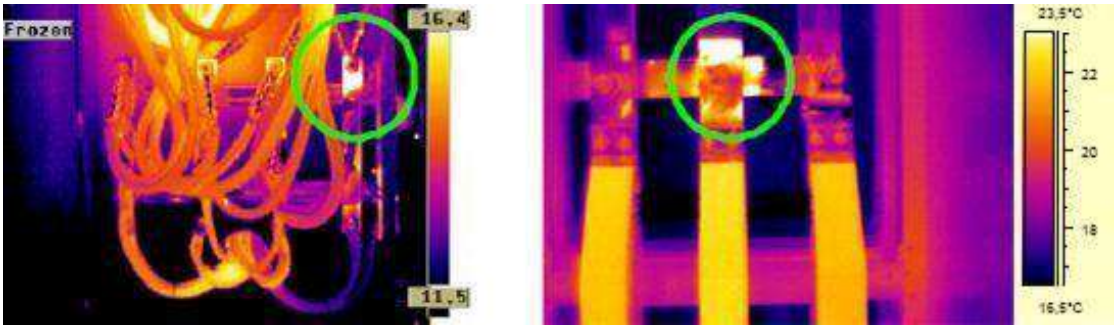


Figure 4.20 :L'échauffement réel présente généralement un motif uniforme

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.

3 -3 -1 Différences de température apparente :

Voici une image thermique présentant plusieurs différences de température apparente.

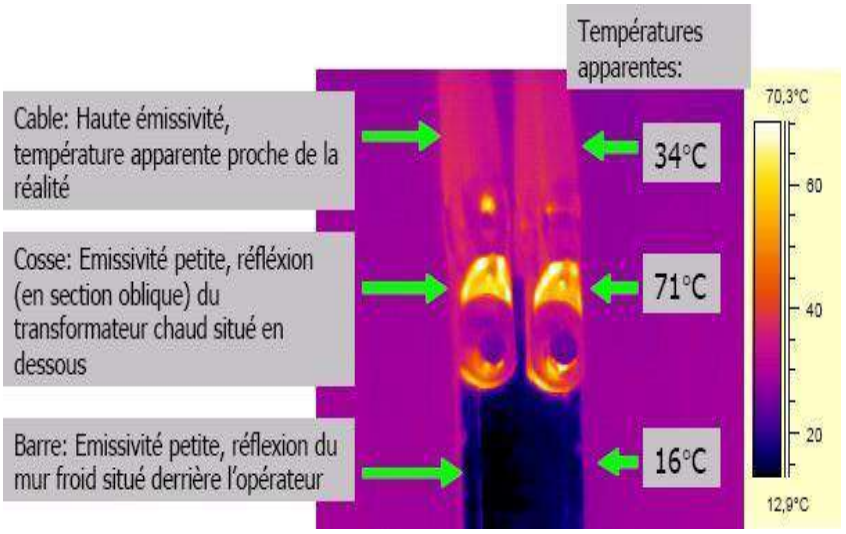


Figure 4.21 : Températures apparentes différentes

Les questions sont les suivantes :

· Pourquoi l'image a-t-elle cette allure ?

· Pourquoi avons-nous ces températures apparentes ?

· Lesquelles sont fiables ?

3-3-2 <u>L'objet cible</u>

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.

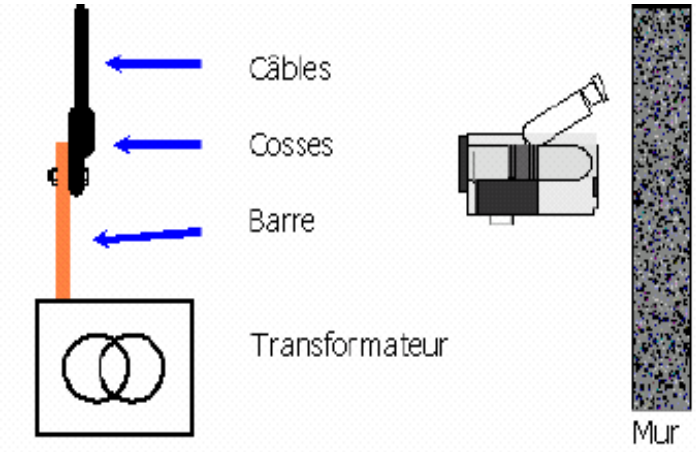


Figure 4.22 : Différentes sources de réflexion et émissivités donnent destempératures apparentes différentes.

3-3-3 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 abruptdans l'image thermique, même si la température réelle reste identique.

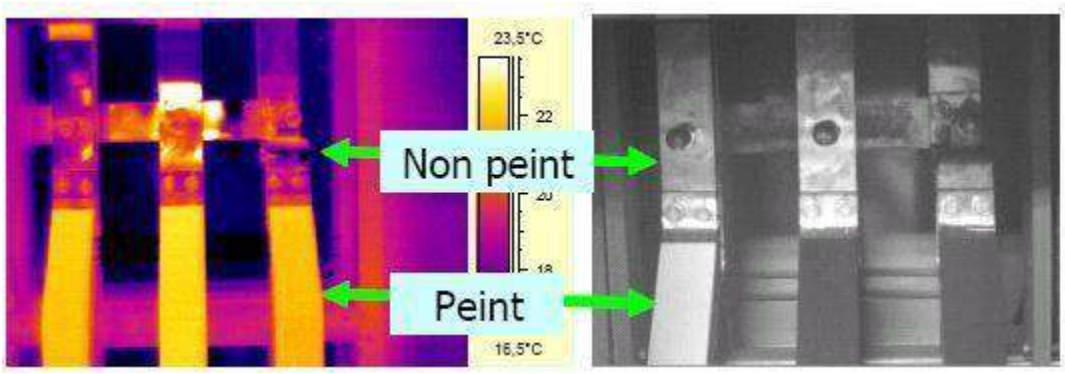


Figure 4.23 : Apparences différentes des parties peintes et non peintes de barres

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**

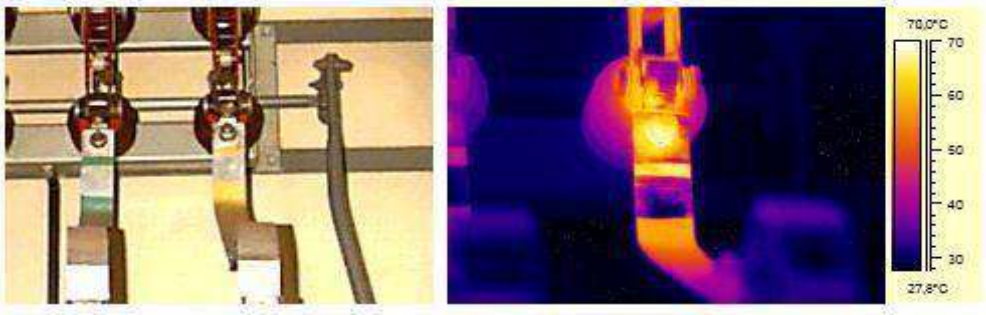


Figure 4.24 : Changements abrupts dans l'image thermique causés par unchangement d'émissivité

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

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

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 :**



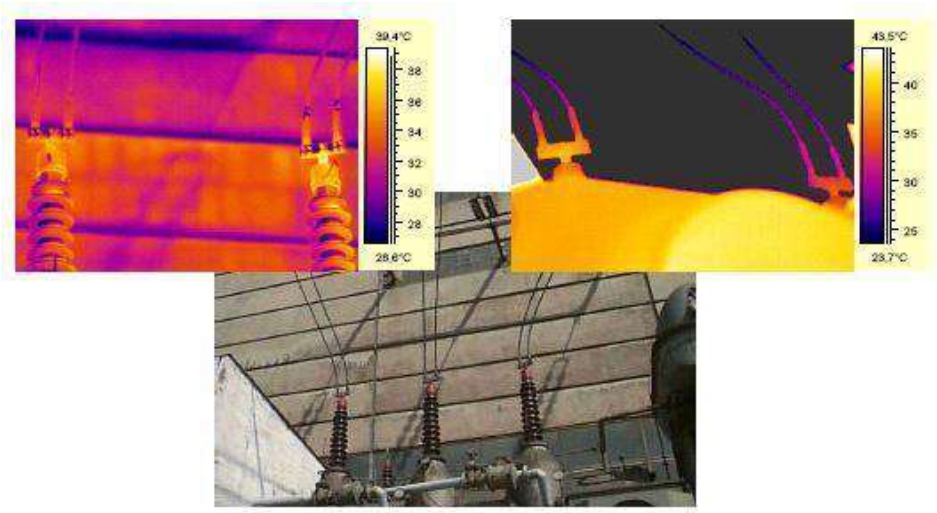
Figure 4.25 : Objet cible plus froid réfléchissant un environnement plus chaud

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 { 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.

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 thermographie 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 thermographie 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 notrepropre 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 enprésentent

· Recherchons les parties de l'objet cible avec une émissivité forte.

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

Conclusion

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

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.

Outre 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] : J. Tissot. IR détection with uncooled sensors. Infrared Physics & Technologie. 46(1-2), pp.147-153, 2004.

[2] : Mohamed SOUSSAN & Tarik DIB, mémoire de MASTER : « Etude critique et propositions d'amélioration de la gestion de la maintenance », Année 2012.

[3] : Abdoulahad THIAM. THÈSE Présentée pour obtenir le titre de Docteur: «Contribution à l'étude et à l'optimisation du procédé de thermographie active appliquée à la détection de défauts surfaciques», Année 2017.

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