



République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Labri ben M'hidi Oum el Bouaghi

Faculté des sciences Exactes et Sciences de la Nature et de La Vie



Département sciences de la matière

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de MASTER

Spécialité : physique appliquée

THEME :

Application de la thermographie infrarouge pour localiser les défauts dans les matériaux

Présenté par :

- Seklab ayoub
- Hamadou said

Sous la direction de :

- Dr Laib dit leksir yazid

Soutenu le : .../07/2023

Devant le jury de soutenance suivant :

Président Dr :	Ziar Toufik	PR	Université Oum El Bouaghi
Examineur Dr :	Borji Bachir	MCA	Université Oum El-Bouaghi
Encadreur Dr :	Laib dit leksir yazid	MCA	Université Oum El-Bouaghi

Année universitaire : 2022/2023

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon encadreur de mémoire Dr Laib Yazid, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université de Labri ben M'hidi et Mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements. et Mes amies et mes camarades pour me aider et me encourager pour continuer mes études

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail

A nos chers parents

Nous trouvons ici l'occasion de leur exprimer notre

gratitude la plus sincère

A nos familles

Nos frères

Nos sœurs

A notre encadreur

A l'ensemble des enseignant

A tous nos collègues

A tous ce qui nous sont cher

Table des matières

Introduction générale :	1
Chapitre I : Aperçu sur la méthode de thermographie infrarouge : principe et applications	2
1. Introduction	2
2. Notions élémentaire sur les transferts thermiques.....	2
2.1 Notion de température et de flux thermique.....	2
2.2 Les différents types de transfert thermique	3
3. Introduction sur la thermographie infrarouge	5
3.1 Origine et nature du rayonnement infrarouge	5
3.2 Spectre infrarouge	5
4. Principes physiques de la thermographie	7
4.1 Transfert d'énergie par rayonnement	7
5. Lois fondamentales du rayonnement thermique	10
5.1 Exitance.....	10
5.2 Luminance.....	10
5.3 Emittance.....	10
6. Propriétés du corps noir.....	10
6.1 Loi de Planck.....	10
6.2 La loi de Wien.....	12
6.3 Loi de Stefan-Boltzmann	13
6.4 Emissivité du matériau	14
7. Paramètres influençant la mesure.....	14
7.1 Influence de l'état chimique de la surface.....	14
7.2 Influence de la rugosité	15
7.3 L'influence de l'angle d'incidence.....	16
7.4 L'influence de la température	17
7.5 Influence de la longueur d'onde.....	18
8. Principe de la mesure par thermographie infrarouge	18
9. Thermographie	19
9.1 Thermographie passive	19
9. 2 Thermographie active.....	20
10. Détection et Diagnostic des défauts par thermographie infrarouge	20
10.1 La surveillance thermique	20
11. Les sources d'incertitude de mesure	21
11.1 Incertitudes liées à la situation d'étalonnage.....	21

Table des matières

11.2 Incertitudes liées à la situation de mesure	21
11.3 Incertitudes liées à l'opérateur	22
12. Conclusion.....	22
Chapitre II : Aspect théorique de la thermographie active.....	23
1. Introduction	23
2. Méthode des quadripôles thermiques pour un milieu homogène	25
3. Milieu de type résistif.....	29
4. Méthodes de caractérisation de défauts.....	29
5. Méthode PCT – Peak Contrast Time.....	30
6. Méthode PST – Peak Slop Time	31
7. Méthode LPSD - Logarithmic peak second-derivative method.....	31
8. Méthode APST – Absolute peak slope time	31
9. Conclusion :	32
Chapitre III : Aspect appliqué de la thermographie active.....	33
1. Introduction:	33
2. Descriptif du banc d'essais :.....	33
3. Dispositif « Flash caméra » :.....	33
4. Altair :	35
5. Expérience réalisée :.....	36
6. Résultats et discussion.....	36
7. Cas d'une plaque contenant plusieurs défauts.....	39
8. Conclusion.....	42
Bibliographie.....	44
Résumé :	46

Liste des Figure

Figure I 1: Transfert de chaleur par conduction [2]	3
Figure I 2 : Spectre des ondes électromagnétiques [5].....	7
Figure I 3 :Schéma de principe d'un corps noir de laboratoire [6]	8
Figure I 4 :Bilan radiatif.....	9
Figure I 5 :Luminance totale [9]	10
Figure I 6: Distribution spectrale du corps noir [4].....	12
Figure I 7: Courbe de Wien [11]	13
Figure I 8 :Variation de l'émissivité lors de l'oxydation du nickel [13]	15
Figure I 9 : : Influence de la rugosité sur l'émissivité ϵ [13]	16
Figure I 10 : Emissivité de l'eau en fonction de l'angle d'observation [13].....	16
Figure I 11 : Influence de l'angle d'incidence sur l'émissivité totale [13].....	17
Figure I 12 : Influence de l'état de surface sur l'émissivité [4].....	17
Figure I 13 : Emissivité spectrale des différents types de matériaux [11].....	18
Figure I 14 : Composition du rayonnement reçu par caméra infrarouge [11].....	19

Figure II 1 :Échantillon excité par une source externe.....	23
Figure II 2 : Modélisation d'un défaut résistif	29

Figure III 1: Dispositif pour la détection des défauts	34
Figure III 2 : Flir SC7000.....	35
Figure III 3 : échantillon testé	36
Figure III 4 :Résultats obtenus à $t=0,2,3,5,6,8,10,11,13,14,16$ et 18 s (de gauche à droite). De haut en bas : données non traitées, filtrages par interpolation, SVD et SVD des résultats obtenus par interpolation	38
Figure III 5 :Cartographie de diffusivité et échantillon utilisé.....	40
Figure III 6 : (a) histogramme de l'image, (b) thermogramme (Flir SC 7000).....	40
Figure III 7 :Cartographie de diffusivité (SC7000).....	40
Figure III 8 : Cartographie de diffusivité (Flir A35)	41
Figure III 9 : (c) Histogramme de l'image, (d) thermogramme (Flir A35)	41
Figure III 10 :Cartographie de diffusivité (A35).....	42

Liste des tableaux

Tableau II 1: les coefficients donnés	30
---	----

Tableau III 1: Fiche technique caméra Flir SC7000	35
Tableau III 2: Estimation expérimentale de la profondeur pour les trois défauts	39

Liste d'abréviations :

k : conductivité thermique (en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

P : énergie produite au sein même du matériau (en W.m^{-3})

ρ_v : masse volumique (en kg.m^{-3}),

c_m : chaleur massique (en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

λ : conductibilité thermique

R: résistance thermique

ρ_c :chaleur volumique

ϕ : Flux

p : variable de Laplace

ΔQ : quantité de chaleur échangée en joules (J).

Δt : durée d'échange en seconde (s).

K : coefficient de convection en $\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.

S : surface d'échange en mètres carrés (m^2).

$\Delta\theta$: différence de température entre le corps chaud et le fluide en (°C) ou en kelvins (K).

ΔQ : quantité de chaleur émise par rayonnement du corps en joules (J).

Δt : intervalle de temps pendant lequel le rayonnement est pris en compte en secondes (s).

a : coefficient d'émission du corps homogène. Celui-ci dépend de la nature de la couleur de l'état de surface du corps. En $\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{T}^4$.

S : surface rayonnante du corps homogène en mètre carrés (m^2).

T : température absolue en Kelvin (K).

h : constante de Planck (J.s ou W.s^2).

c : célérité de la lumière.

$\varphi_r / \varphi = \rho$: est le facteur de réflexion,.

Liste d'abréviations

$\varphi_a / \varphi = \alpha$: est le facteur d'absorption.

$\varphi_t / \varphi = \tau$: est le facteur de transmission.

K : constante de Boltzmann ($J.K^{-1}$).

c : vitesse de la lumière ($m.s^{-1}$)

q : flux de chaleur radiante émis par une surface idéale, dite noire (en W),

σ : constante universelle de Boltzmann ($W.m^{-2}.K^{-4}$),

A : l'aire de la surface (en m^2),

W : L'énergie libérée

e : épaisseur de la couche,

χ : indice d'extinction,

τ : transmittivité.

$\tau_{atm}\varepsilon_{obj}I_o$ = flux émis par l'objet,

$\tau_{atm}(1 - \varepsilon_{obj})I_{amb}$ = flux réfléchi par l'objet,

$(1 + \tau_{atm})I_{atm}$ = flux émis par l'atmosphère,

I_{cam} = luminance reçue par la caméra,

I_o = luminance propre de l'objet,

I_{amb} = luminance de l'environnement,

I_{atm} = luminance de l'atmosphère,

ε_{obj} = coefficient d'émissivité de l'objet,

τ_{atm} = coefficient de transmission de l'atmosphère.

a : diffusivité thermique du matériau (en m^2/s),

Introduction générale :

Les méthodes de Contrôle Non Destructif (CND) jouent un rôle croissant dans tous les aspects de la production de matériaux et de leurs applications. L'imagerie visible, les ultrasons, les rayons X ou les courants de Foucault sont parmi les plus connues de ces techniques. Plus récemment, la thermographie infrarouge, une technologie initialement orientée vers des applications militaires, a vu un développement rapide lié à celui des caméras thermiques.

La thermographie infrarouge est généralement divisée en deux méthodes : la thermographie infrarouge passive et la thermographie infrarouge active. Concernant la première, un champ de température anormal pourra indiquer la présence d'une anomalie. Cette technique, principalement utilisée à des fins d'inspections qualitatives et de localisation, est simple de mise en œuvre et peut se révéler efficace dans certains cas. Elle peut cependant être limitée par sa sensibilité aux variations des conditions environnantes, être coûteuse en temps d'expérience. Afin de s'affranchir de ces problèmes, la thermographie infrarouge active, qui consiste à analyser le flux de chaleur transitoire de la scène thermique suite à sa sollicitation, et utilisée dans de nombreuses thématiques industrielles (aéronautique, automobile, adhésifs, soudage, bâtiment, inspection de canalisations, etc. Du fait de son plus faible coût et de sa simplicité, on s'intéressera ici aux sollicitations optiques.

Le premier chapitre de ce mémoire s'attachera à décrire un état de l'art de la thermographie infrarouge. Le deuxième chapitre présente une modélisation de la thermographie infrarouge active. Le troisième chapitre présente une application concrète de cette méthode sur un essai réalisé avec un composite contenant des inclusions situées à différentes profondeurs. La section de conclusion permettra de souligner l'importance des résultats obtenus.

Chapitre I : Aperçu sur la méthode de thermographie infrarouge : principe et applications

1. Introduction

Ce premier chapitre énonce les bases nécessaires à la compréhension des phénomènes mesurés en thermographie infrarouge. Un aperçu de cette technique dans le domaine de la détection des défauts est également présenté.

A cet effet, nous rappellerons les notions fondamentales de rayonnement électromagnétique nécessaires pour comprendre l'étude d'une chaîne de mesure radiométrique. Dans un premier temps, nous aborderons les notions élémentaires de transferts thermiques et les liens entre mesure par thermographie infrarouge (IR) et température de surface d'un objet. Dans un second temps, nous nous intéresserons à la thermographie infrarouge en tant qu'outil du contrôle.

2. Notions élémentaire sur les transferts thermiques

2.1 Notion de température et de flux thermique

La température d'un corps est un paramètre caractéristique de son niveau énergétique. Elle correspond à l'énergie d'agitation des molécules. Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température.

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à cette surface isotherme. On caractérise cette variation par le gradient de température. Sous l'influence de ce gradient, la chaleur s'écoule des régions chaudes vers les régions froides. La quantité de chaleur alors transmise par unité de temps sur la surface est appelée le flux de chaleur [1]. Dans un système défini par ses limites dans l'espace, le flux de chaleur peut être stocké, généré, entrant ou sortant dans le système. Le bilan d'énergie du système est alors régi par la première loi de la thermodynamique :

$$\text{flux}_{\text{entrant}} + \text{flux}_{\text{généré}} = \text{flux}_{\text{sortant}} + \text{flux}_{\text{stocké}} \quad (1.1)$$

L'établissement de l'expression de ces différents flux de chaleur permet d'obtenir une équation différentielle (l'équation générale de conduction de la chaleur) dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température en chaque point du système :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + P = \rho_v c_m \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.2)$$

Avec :

k : conductivité thermique (en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

P : énergie produite au sein même du matériau (en W.m^{-3})

ρ_v : masse volumique (en kg.m^{-3}),

c_m : chaleur massique (en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

2.2 Les différents types de transfert thermique

Le transfert de la chaleur des corps chauds vers les corps froids se fait de trois façons:

- conduction,
- convection,
- rayonnement.

2.2.1 Conduction

Dans un matériau, la chaleur peut se transmettre de proche en proche; cette transmission s'effectue toujours du point dont la température est la plus élevée vers le point où la température est la plus basse. C'est un phénomène continu. Les matériaux sont plus ou moins propices à ce genre d'échange, on dit qu'ils ont une plus ou moins bonne conductivité thermique λ [2].

Considérons une paroi plane d'épaisseur l ; soit S la surface de paroi à travers laquelle on considère l'échange. Cette paroi divise le milieu extérieur en deux parties 1 et 2 dont les températures sont différentes $\theta_1 > \theta_2$ (voir fig. I.2).

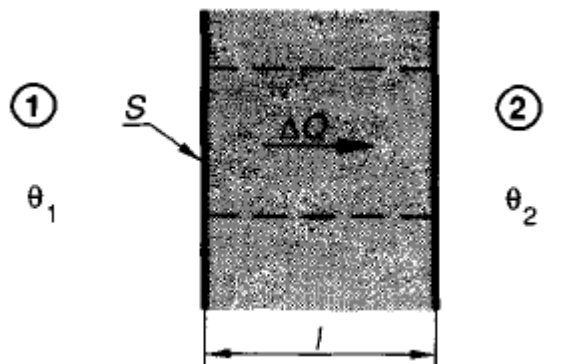


Figure I 1: Transfert de chaleur par conduction [2]

Notons :

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2. \quad (1.3)$$

On pourrait écrire aussi l'équation précédente en températures absolues.

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (1.4)$$

Avec :

$$\theta_1 - \theta_2 = T_1 - T_2 \quad (1.5)$$

2.2.2 Convection

Lorsqu'un corps chaud est placé dans un fluide (liquide ou gaz), les particules de ce fluide situées à proximité du corps chaud s'échauffent. Dans un fluide dont la température n'est pas uniforme, la Masse volumique est variable, il s'ensuit des mouvements internes au fluide appelés courants de convection [2]. La quantité de chaleur ΔQ échangée par convection durant un intervalle de temps donné Δt est proportionnelle à la surface d'échange S et sensiblement proportionnelle à la différence des températures $\Delta\theta$ des deux corps:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = KS\Delta\theta \quad (1.6)$$

Où :

ΔQ : quantité de chaleur échangée en joules (J).

Δt : durée d'échange en seconde (s).

K : coefficient de convection en $J.m^{-2}.s^{-1}.^{\circ}C^{-1}$.

S : surface d'échange en mètres carrés (m^2).

$\Delta\theta$: différence de température entre le corps chaud et le fluide en ($^{\circ}C$) ou en kelvins (K).

2.2.3 Rayonnement

Le rayonnement est un échange de chaleur par émission de radiations. Soit S la surface du corps homogène qui émet la chaleur et soit T sa température absolue en K [2]. Soit ΔQ la quantité de chaleur émise par le corps pendant le temps Δt :

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = a ST^4 \quad (1.7)$$

Où :

ΔQ : quantité de chaleur émise par rayonnement du corps en joules (J).

Δt : intervalle de temps pendant lequel le rayonnement est pris en compte en secondes (s).

a : coefficient d'émission du corps homogène. Celui-ci dépend de la nature de la couleur de l'état de surface du corps. En $J.m^{-2}.s^{-1}.T^4$.

S : surface rayonnante du corps homogène en mètre carrés (m^2).

T : température absolue en Kelvin (K).

3. Introduction sur la thermographie infrarouge

3.1 Origine et nature du rayonnement infrarouge

En 1666, Newton connaissait l'existence d'un rayonnement au-delà du spectre visible du côté du rouge. L'existence de ce rayonnement est découverte en 1800 par l'astronome Frederick William Herschel. Voulant savoir si la lumière produit des températures différentes selon sa couleur, il utilise un prisme pour diviser un rayon de soleil. Il mesure la température de chaque couleur du spectre, et constate que les températures augmentent du violet au rouge. Herschel décide alors de mesurer la température juste après la portion rouge du spectre, dans une zone où aucune lumière n'est visible. À sa surprise, il y trouve une température plus élevée encore. Dans le spectre électromagnétique, l'infrarouge se situe entre le visible et les micro-ondes. La source principale de rayonnement infrarouge est la chaleur, ou rayonnement thermique. Tout objet dont la température est supérieure au zéro absolu (- 273,15 °C ou 0 kelvin) émet un rayonnement dans la plage infrarouge. Même les objets que nous percevons comme très froids [3].

3.2 Spectre infrarouge

La matière émet et absorbe en permanence du rayonnement électromagnétique. Le processus d'émission est lié à l'agitation moléculaire interne de la matière, génératrice de transitions radiatives pour les particules élémentaires porteuses de charges électriques.

Les lois fondamentales de la théorie électromagnétique classique montrent que le champ électrique E créé par une charge q animée d'un mouvement de translation uniforme est très peu différent du champ statique :

$$E = \frac{q}{r^2}, \quad (1.8)$$

Lorsque la distance d'observation r est grande devant le déplacement de la charge. Par contre, si la charge électrique subit une accélération, la relation de MAXWELL :

$$\text{rot}H = \varepsilon \frac{\delta E}{\delta t} \quad (1.9)$$

Chapitre I : Aperçu sur la méthode de thermographie infrarouge : principe et applications

Indique qu'il y a apparition d'une énergie libérée sous la forme de rayonnement électromagnétique. Une élévation de température accroît l'agitation moléculaire au sein de la matière et favorise l'accélération des particules porteuses de charges électriques, génératrice de rayonnement. L'énergie ainsi libérée W , sous forme radiative est donnée en fonction de la longueur d'onde d'émission λ :

$$W = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.10)$$

Avec :

h : constante de Planck,

c : célérité de la lumière.

La longueur d'onde du rayonnement émis croît en raison inverse de l'énergie mise en cause dans la transition. Il est important de noter à ce sujet que dans le domaine infrarouge, les longueurs d'onde sont grandes, et l'énergie radiative correspondante faible [4].

Tout ceci laisse prévoir les difficultés rencontrées dans la détection de tels rayonnements. Si la matière permet toutes les transitions possibles (agitation thermique moléculaire). Chaque atome fournit une certaine énergie radiative dont les niveaux statistiques prennent toutes les valeurs possibles ; la distribution en longueurs d'onde sera alors uniforme, le rayonnement est dit à spectre continu.

Certains milieux autorisent seulement quelques transitions bien définies (sauts quantiques d'un électron à l'intérieur d'un atome), l'émission se fait alors sous forme de longueurs d'onde discrètes, il s'agit d'un spectre de raies.

Le phénomène d'absorption du rayonnement par la matière résulte du processus inverse ; l'absorption étant plus ou moins sélective en longueurs d'ondes suivant le milieu mis en cause.

Le spectre de rayonnement ainsi défini est divisé en un certain nombre de régions arbitraires, correspondant à des domaines de fonctionnement des générateurs ou des récepteurs appropriés.

La figure I .2 [5] représente le spectre électromagnétique :

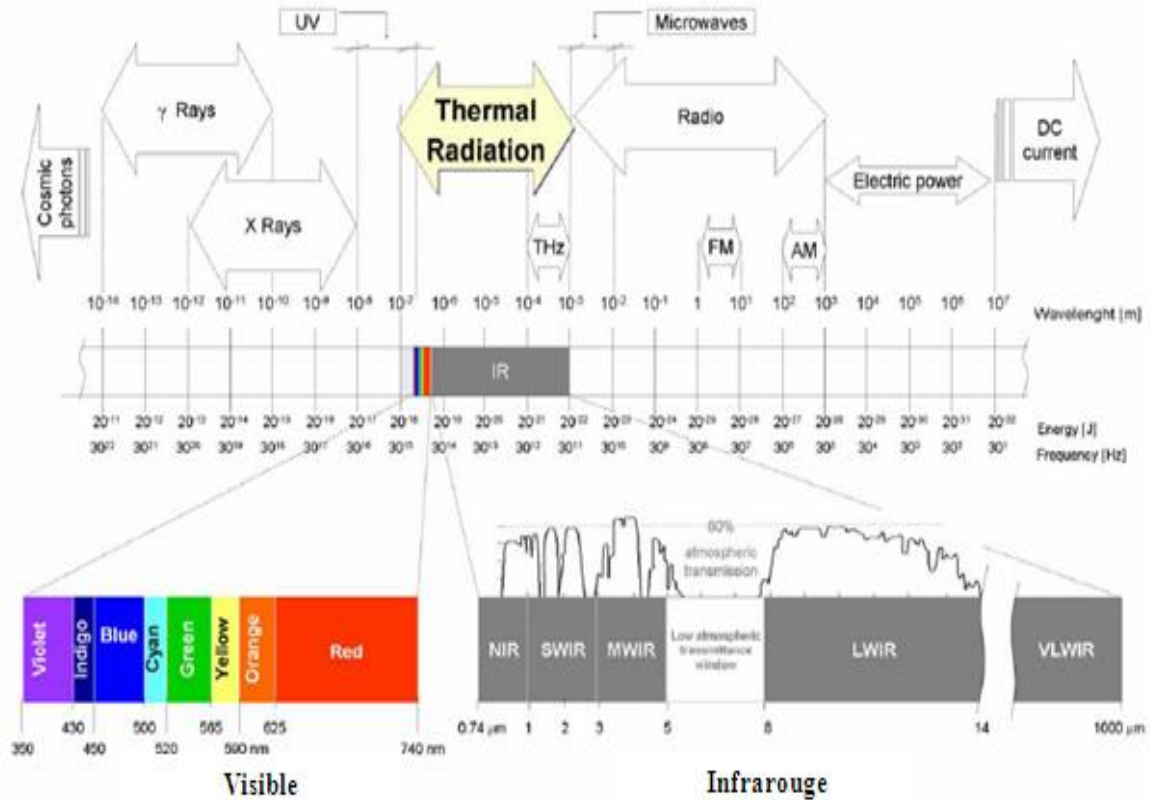


Figure I 2 : Spectre des ondes électromagnétiques [5]

4. Principes physiques de la thermographie

4.1 Transfert d'énergie par rayonnement

4.1.1 Cas d'un corps noir

Le corps noir est défini comme corps de référence dans la théorie du rayonnement infrarouge : celui-ci est capable d'absorber totalement tout rayonnement incident, quelque soit sa longueur d'onde et d'émettre à son tour des radiations à toutes les longueurs d'onde. Ce corps référentiel cède à l'environnement l'énergie captée jusqu'à l'établissement d'un équilibre thermodynamique.

La figure I.3 illustre un corps noir expérimental [6]. Deux approches sont possibles pour la réalisation pratique d'un tel système :

- La cavité presque totalement fermée, il s'agit d'une cavité à l'intérieur d'un solide, débouchant à l'extérieur par un orifice dont la dimension est très faible devant celle de la cavité. Le système se comporte comme un piège à rayonnement.
- Le revêtement absorbant parfait, il est possible grâce à certains traitements de surface et peintures, d'obtenir à partir d'un objet quelconque une très bonne approximation du radiateur parfait.

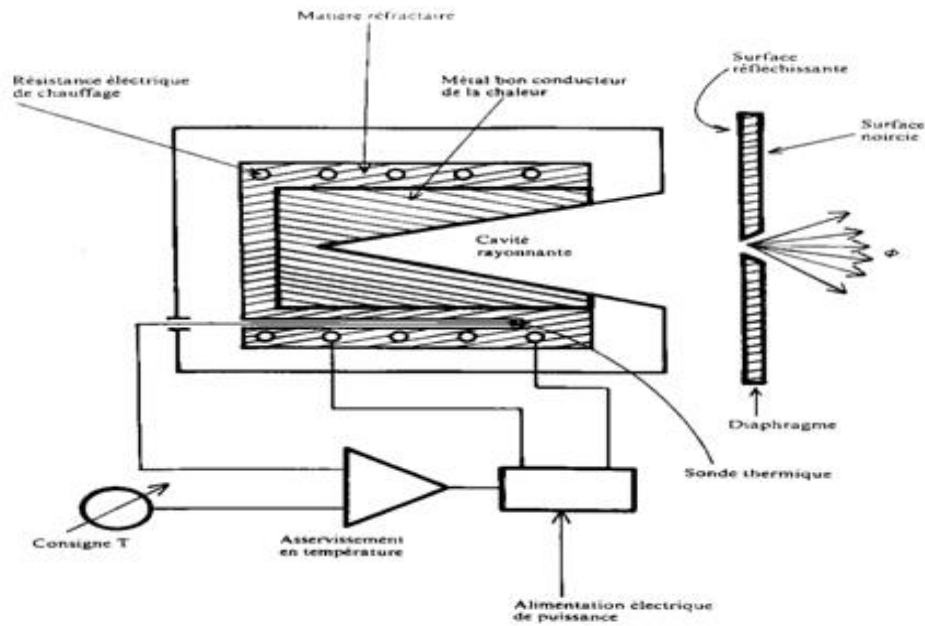


Figure I 3 :Schéma de principe d'un corps noir de laboratoire [6]

4.1.2 Cas d'un corps réel

Le corps noir est un corps idéal au sens physique : il émet un maximum de puissance de rayonnement à une température donnée. En effet, dans la réalité les corps réels rencontrés ne sont pas des radiateurs idéaux. L'objet réel émet toujours moins de rayonnement que le corps noir, quelle que soit la température ou la longueur d'onde [7].

Pour un corps réel, le mécanisme de transfert d'énergie fait intervenir quatre phénomènes (voir Figure I.4) :

- L'émission : le corps produit de la chaleur qui est transférée au milieu extérieur sous forme de rayonnement électromagnétique ;
- La transmission : le matériau peut transmettre tout ou une partie du rayonnement incident ;
- La réflexion : la surface du matériau renvoie vers le milieu extérieur une partie du rayonnement incident ;
- L'absorption : le corps récupère le rayonnement incident pour le transformer en énergie calorifique.

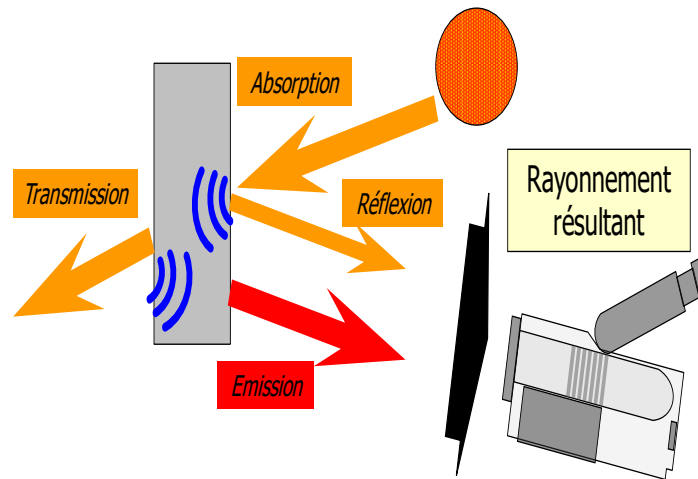


Figure I 4 :Bilan radiatif

On fait le bilan des rayonnements :

$$\varphi = \varphi_r + \varphi_a + \varphi_t \quad (1.11)$$

Ou :

$$\varphi_r / \varphi + \varphi_a / \varphi + \varphi_t / \varphi = 1 \quad (1.12)$$

- φ_r / φ est le facteur de réflexion, ρ .
- φ_a / φ est le facteur d'absorption, α .
- φ_t / φ est le facteur de transmission, τ .

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (1.13)$$

C'est l'équation de base résultant du bilan radiatif.

En absorbant le rayonnement φ_a le corps s'échauffe, jusqu'à un certain équilibre de température. Il émet du rayonnement, en fonction de sa propre température. Il finit donc par émettre autant de puissance de rayonnement (φ_e) qu'il en absorbe (φ_a).

Ainsi $\varphi_a = \varphi_e$ et on a aussi $\rho = \epsilon$, où ϵ est le facteur d'émission ou émissivité. On peut donc écrire le cas général :

$$\epsilon + \rho + \tau = 1 \quad (1.14)$$

5. Lois fondamentales du rayonnement thermique

5.1 Exitance

L'exitance est le flux émis par un élément de surface d'un objet quelconque. Elle est exprimée en W / m^2 [8].

5.2 Luminance

Elle est définie par le quotient de l'exitance quittant une surface par un angle solide autour d'une direction donnée. En $W.m^{-2}.sr^{-1}$. La luminance L se décline en luminance spectrique, partielle ou totale. La luminance est une grandeur directionnelle (voir figure I.5) [8].

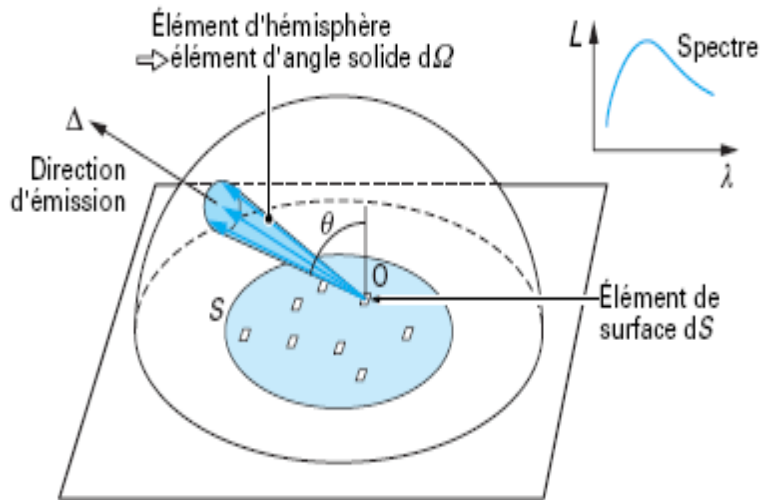


Figure I 5 :Luminance totale [9]

5.3 Emittance

La quantité de flux de rayonnement émise par une surface élémentaire dS dans la demi-sphère limitée par son plan tangent traduit l'émittance hémisphérique totale E ($W.m^{-2}$). Celle-ci représente la densité de puissance totale émise par dS dans toutes les directions [10].

6. Propriétés du corps noir

6.1 Loi de Planck

La matière émet un rayonnement électromagnétique dont la puissance est une fonction de sa température. A une température de $-273^{\circ}C$, le corps est énergétiquement "inerte". En 1900, Planck a calculé l'émission d'un corps idéal. La loi de Planck est explicitée sous forme de courbes très intéressantes à considérer. Elles sont la base même de la possibilité et de la pertinence de la mesure des températures par rayonnement.

Sur les courbes de Planck ci-dessus (voir figure.1.6), on voit que, à $30^{\circ}C$, le maximum de rayonnement est émis vers $10 \mu m$. A $500^{\circ}C$, le maximum se situe vers $3,7 \mu m$. Ces courbes indiquent que, quelle que soit la longueur d'onde considérée, il y a toujours une puissance émise :

Chapitre I : Aperçu sur la méthode de thermographie infrarouge : principe et applications

le corps idéal émet à toutes les longueurs d'onde. Il n'est pas une radio émettrice sur une seule longueur d'onde. Les courbes sont continues : le spectre d'émission est un spectre continu.

L'émission spectrale du corps noir est décrite par la loi de Planck bâtie sur des considérations thermodynamiques statistiques.

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda KT}\right) - 1} \quad (\text{en W.m}^{-3}) \quad (1.15)$$

Avec :

$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda}$; exittance spectrale, c'est-à-dire puissance rayonnée par unité de surface de corps noir et par unité de longueur d'onde.

h : constante de Planck (J.s ou W.s²).

K : constante de Boltzmann (J.K⁻¹).

c : vitesse de la lumière (m.s⁻¹)

T : température absolue en degrés Kelvin du corps noir.

L'exittance spectrale du corps noir dépend de la longueur d'onde et de la température. Il est commode de représenter la loi de Planck sous forme d'un réseau de courbes :

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = f_T(\lambda) \quad (1.16)$$

La figure I.6 montre l'émission spectrale d'un corps noir suivant la longueur d'onde à une température donnée.

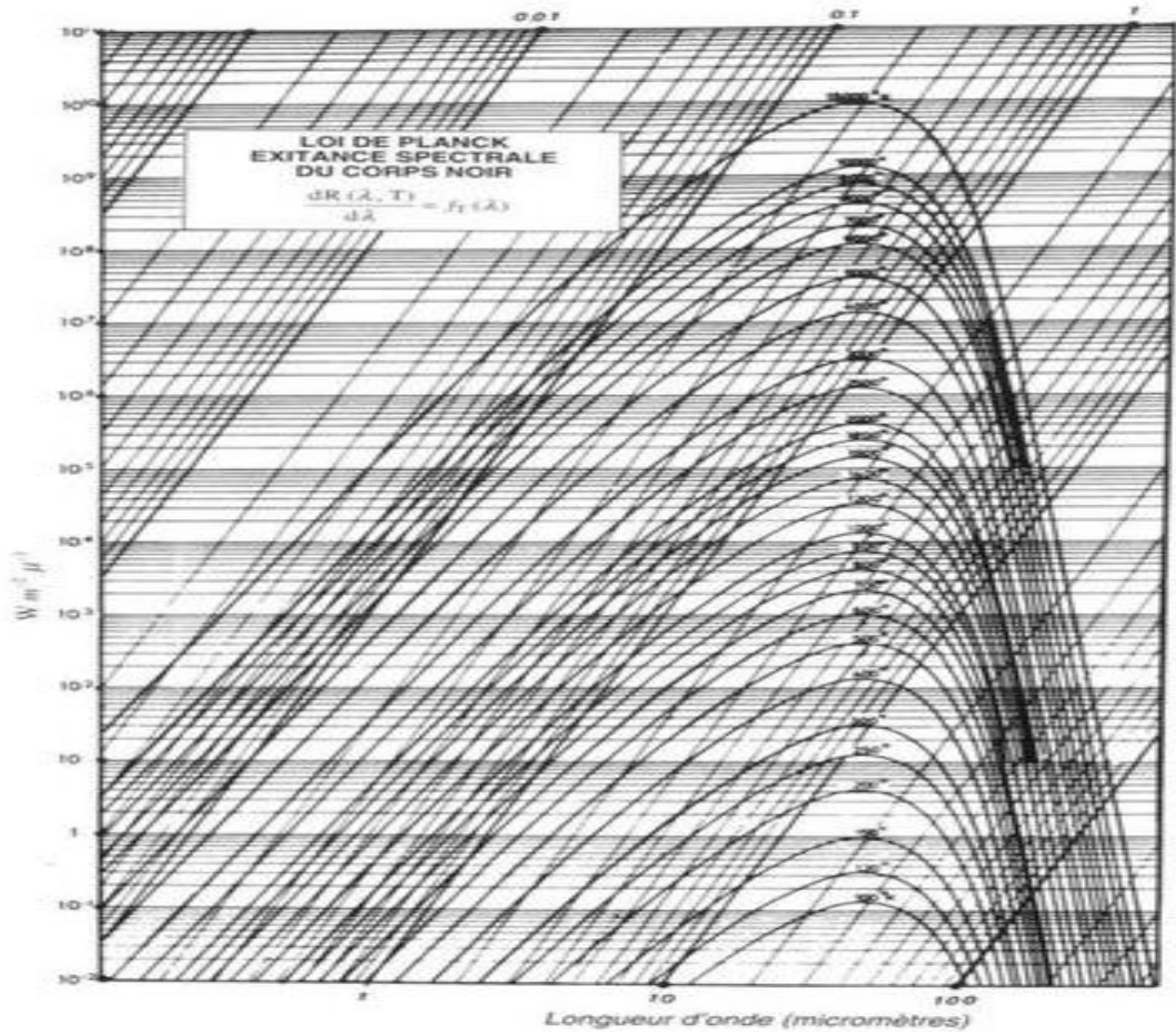


Figure I 6: Distribution spectrale du corps noir [4]

6.2 La loi de Wien

Comme indiqué sur la figure I.7, la courbe de distribution spectrale $\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda}$ obtenue une valeur de la température T , passe par un maximum. Le déplacement de ce maximum en fonction de la température, décrit par la loi de Wien est obtenu par dérivation de la loi de Planck :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{max} = \frac{2898}{T} \\ \frac{dR(\lambda_m, T)}{d\lambda} = 1.286 \cdot 10^{-15} T^5 \end{array} \right. \quad (1.17)$$

$$= 1.286 \cdot 10^{-5} T^5 \text{ (W.m}^{-3}\text{)}. \text{ (T en K).}$$

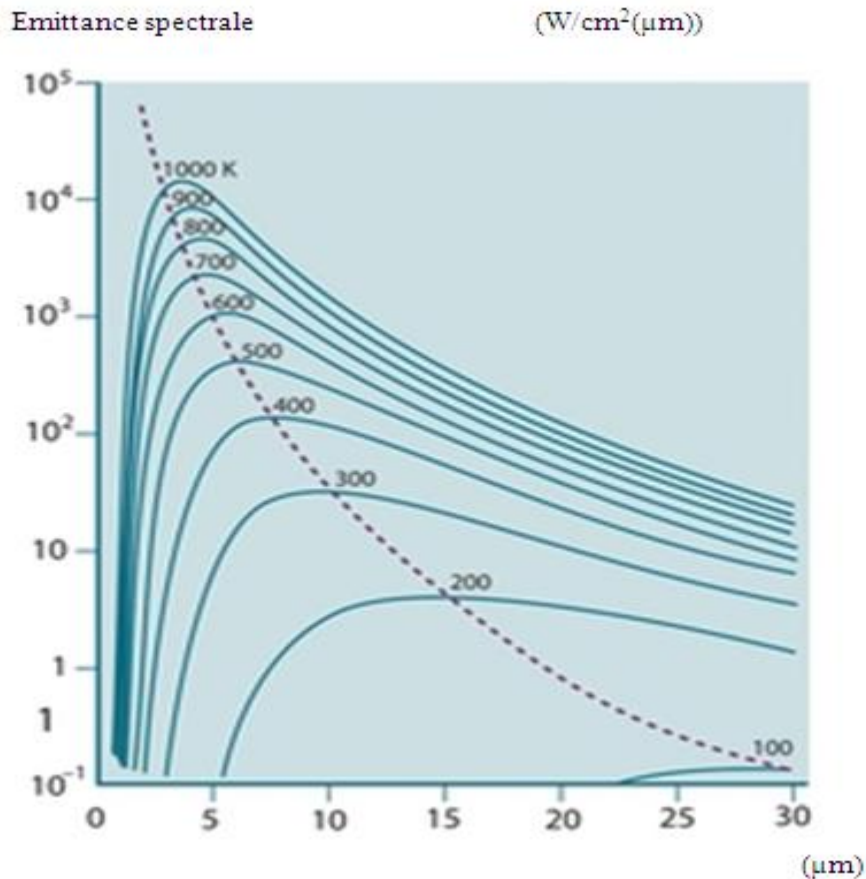


Figure I 7: Courbe de Wien [11]

La relation de Wien explique le déplacement vers les courtes longueurs d'onde d'émission des corps de plus en plus chauds.

6.3 Loi de Stefan-Boltzmann

Le mode de transfert par rayonnement thermique est par nature très différent des deux précédents : la propagation se fait sans support matériel et dans toutes les directions à la vitesse de la lumière dans le vide. Il est régi par la loi fondamentale de Stefan-Boltzmann (établie en 1879), qui s'écrit, dans le cas d'un corps noir :

$$q = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (1.18)$$

Avec :

q : flux de chaleur radiante émis par une surface idéale, dite noire (en W),

σ : constante universelle de Boltzmann ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$),

A : l'aire de la surface (en m^2),

T : température absolue de la surface (en K).

6.4 Émissivité du matériau

Au sens théorique, un corps noir est un corps parfait. Il émet un maximum de puissance de rayonnement à une température donnée. En revanche, les corps réels ne peuvent qu'émettre moins de rayonnement que ce dernier, quelle que soit la température ou la longueur d'onde.

Supposons un corps noir et un corps réel opaque, de même température T_0 . Supposons également qu'aucun rayonnement ne se réfléchit sur le corps réel. Le corps noir émet du rayonnement : la caméra mesure un flux L^0 . C'est le maximum que puisse mesurer la caméra pour un corps à cette température. L'aptitude du corps noir à émettre du rayonnement est maximale. Le corps réel, de même température T_0 , émet un rayonnement inférieur à celui du corps noir ; la caméra mesure un flux L' [8]. L'émissivité du corps réel est le rapport $\varepsilon = L' / L^0$. Si le corps n'est capable à émettre aucun rayonnement, la caméra mesure $L' = 0$. Et ainsi $\varepsilon = 0$. Ainsi, l'émissivité est comprise entre 0 et 1 : $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

Dans une bande spectrale donnée, donc pour une caméra donnée, il se peut que l'émissivité du corps réel ne change pas trop avec la longueur d'onde. On parle alors de corps gris, l'émissivité du corps est une grandeur d'influence. Elle influe sur le résultat de la mesure de température. Il convient d'en tenir compte pour déduire la température vraie du corps observé au moyen des courbes d'étalonnage. C'est la première grandeur d'influence à considérer en thermographie.

Par conséquent, on dira qu'un corps est émissif, s'il a une bonne émissivité et qu'il est émetteur s'il émet du rayonnement, ce qui est possible selon la valeur de son émissivité et de sa température.

7. Paramètres influençant la mesure

L'émissivité prend des valeurs variables selon le matériau et change pour le même matériau en fonction de plusieurs paramètres importants.

7.1 Influence de l'état chimique de la surface

Les derniers micromètres proches de la surface de la plupart des matériaux peuvent présenter une hétérogénéité physique. Tenons compte du cas le plus fréquent rencontré dans l'industrie, celui d'un métal oxydé. L'émission du métal distingué par une faible émissivité ou l'émission de la mince couche d'oxydes de forte émissivité [12].

Le facteur intéressant est la transmittivité de la couche d'oxydes donnée par l'expression :

$$\tau = \exp(-4\pi\chi_e/\lambda) \quad (1.19)$$

Avec :

e : épaisseur de la couche,

χ : indice d'extinction,

τ : transmittivité.

Dans la majorité des cas, le paramètre τ prend des valeurs différentes. Soit il est proche de 0, dans ce cas c'est la surface d'oxydes qui émet ; soit il est proche de 1, dans ce cas c'est le métal sous-jacent qui émet. La difficulté consiste à apprendre l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la couche superficielle, à étudier l'indice d'extinction du matériau de cette couche puis à calculer la transmittivité de la couche.

7.2 Influence de la rugosité

La rugosité de la surface d'un matériau engendre des réflexions multiples (figure I.9) qui accroissent l'émissivité. Par conséquent, il est à noter qu'un matériau très peu émissif comme l'or peut, par dépolissage, être 10 fois plus émissif. En revanche, un corps très émissif comme un verre ($\epsilon = 0,90$) voit son émissivité croître de 3 % seulement après dépolissage.

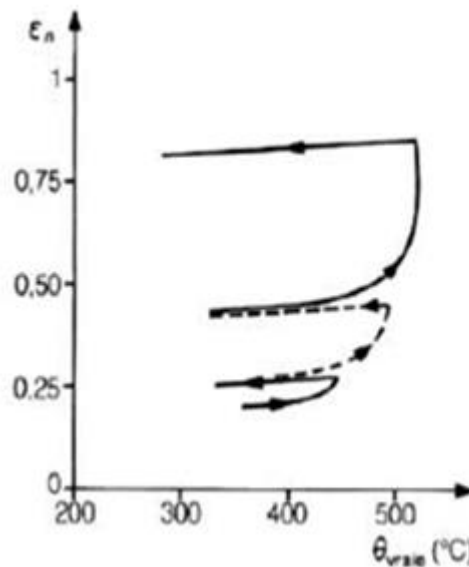
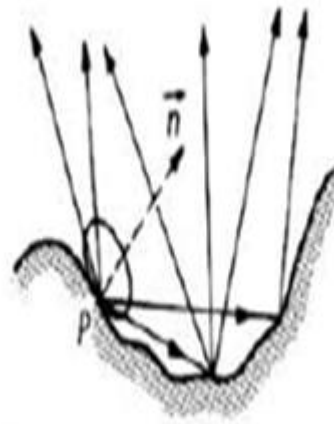


Figure I 8 : Variation de l'émissivité lors de l'oxydation du nickel [13]

A cause de l'émission angulaire d'un matériau, la rugosité provoque deux effets : dépolarisation du rayonnement émis et croissance de l'émissivité. Pour les corps ordinaires, tels que les métaux industriels, les effets de la rugosité sont moins observés. Dans le cas des diélectriques, corps de forte émissivité, la rugosité de la surface influe peu sur l'émission [13].



\vec{n} normale à la surface au point P

Figure I 9 : : Influence de la rugosité sur l'émissivité ϵ [13]

7.3 L'influence de l'angle d'incidence

L'émissivité des matériaux peut dépendre d'une part de l'incidence d'observation en outre de l'état de polarisation du rayonnement considéré. Cette caractéristique déduite des relations de Fresnel qui représentent la réflectivité des surfaces séparant deux milieux différents. évoquons l'exemple de l'eau qui est un corps noir presque parfait à la longueur d'onde $10\mu\text{m}$ pour l'incidence normale, et transforme en un miroir ($\epsilon = 0$) à l'incidence rasante (voir figure I.10).

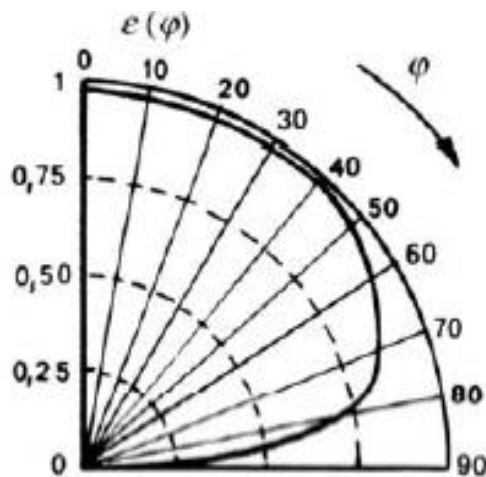


Figure I 10 : Emissivité de l'eau en fonction de l'angle d'observation [13]

L'émissivité prend sa valeur maximale pour une incidence normale (0°) et diminue très fortement pour une incidence supérieure à 45° (figure I.11)

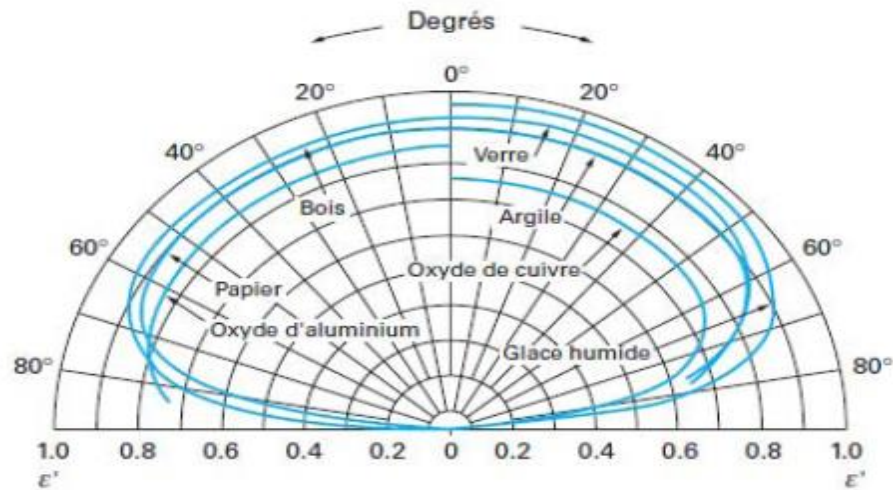


Figure I 11 : Influence de l'angle d'incidence sur l'émissivité totale [13]

7.4 L'influence de la température

Les métaux présentent généralement une émissivité faible dans le spectre infrarouge, cette émissivité a tendance à se croître avec la température du métal. L'état de surface et l'oxydation du métal peut considérablement changer l'émissivité (voir figure I.12).

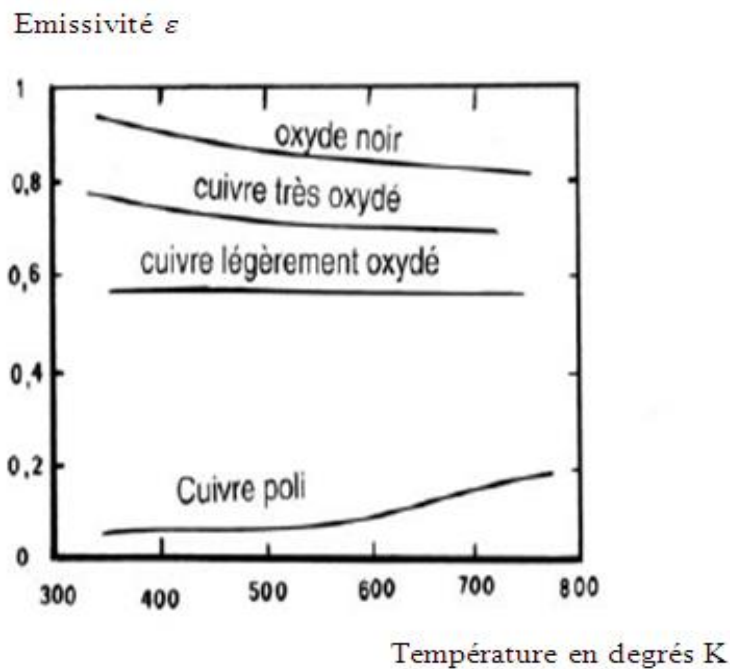


Figure I 12 : Influence de l'état de surface sur l'émissivité [4]

7.5 Influence de la longueur d'onde

L'émissivité spectrale change, relativement avec la longueur d'onde en ce qui concerne les objets solides. Un corps pour lequel l'émissivité ne change pas avec la longueur d'onde est nommé corps gris. Par contre, un corps dont l'émissivité varie avec la longueur d'onde est nommé corps sélectif [14]. Par conséquent, un corps sélectif peut se comporter en corps gris ou même en corps noir dans la bande spectrale donnée.

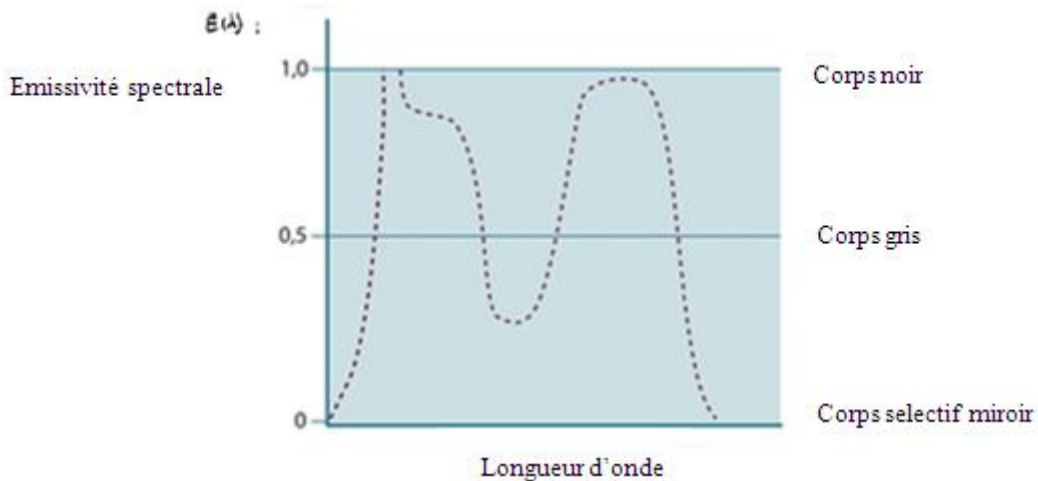


Figure I 13 : Emissivité spectrale des différents types de matériaux [11]

8. Principe de la mesure par thermographie infrarouge

L'objectif d'une caméra infrarouge dirigée vers une scène thermique, opère une sélection des objets qui s'y trouvent en fonction de leur température et de leur émissivité respectives. En effet, tout matériau absorbe et émet de l'énergie appelée rayonnement thermique dans la gamme spectrale des infrarouges dépendant de sa température de surface [15]. La caméra infrarouge dont la gamme spectrale couvre les longueurs d'onde d'émission des objets, capte ce rayonnement lié à la luminance et une électronique d'interprétation convertit le rayonnement reçu en signaux électriques. Mais, ce rayonnement reçu n'est pas que l'émission propre de l'objet visé, il comprend aussi, la réflexion sur l'objet de l'énergie d'excitation et l'émission de l'atmosphère séparatrice. La figure I.14 montre les phénomènes physiques partie prenante de l'information reçue par la caméra.

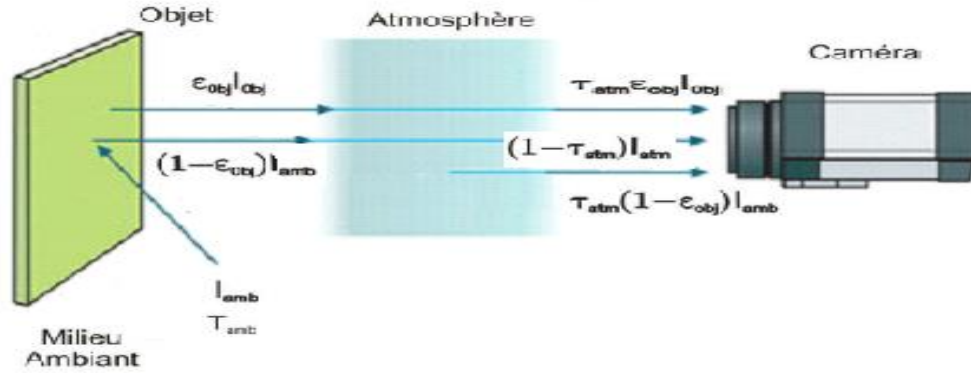


Figure I 14 : Composition du rayonnement reçu par caméra infrarouge [11]

Le bilan des flux thermiques entrant dans la caméra se présente comme suit :

$$I_{cam} = \tau_{atm} \epsilon_{obj} I_o + \tau_{atm} (1 - \epsilon_{obj}) I_{amb} + (1 + \tau_{atm}) I_{atm} \quad (1.20)$$

Où :

$\tau_{atm} \epsilon_{obj} I_o$ = flux émis par l'objet,

$\tau_{atm} (1 - \epsilon_{obj}) I_{amb}$ = flux réfléchi par l'objet,

$(1 + \tau_{atm}) I_{atm}$ = flux émis par l'atmosphère,

I_{cam} = luminance reçue par la caméra,

I_o = luminance propre de l'objet,

I_{amb} = luminance de l'environnement,

I_{atm} = luminance de l'atmosphère,

ϵ_{obj} = coefficient d'émissivité de l'objet,

τ_{atm} = coefficient de transmission de l'atmosphère.

La température mesurée par la caméra infrarouge est fonction de la température T_o de l'objet, de la température T_{amb} de l'ambiance, de la température T_{atm} de l'atmosphère, de ϵ_{obj} le coefficient d'émissivité de l'objet et de τ_{atm} le coefficient de transmission de l'atmosphère [16].

La mesure de température passive est basée sur l'utilisation du contraste d'émissivité et de température d'un objet avec son environnement pour le détecter et le caractériser.

9. Thermographie

9.1 Thermographie passive

Cette approche se base sur la loi de la conservation de l'énergie. Suivant le principe de la première loi de la thermodynamique, un corps recevant de l'énergie transforme une partie de celle-ci en

chaleur. Si cette énergie libérée est détectée par une caméra infrarouge, elle pourra révéler des zones de températures différentes qui pourraient être attribuées à la présence d'un défaut ou d'un mal fonctionnement. Cette approche est utilisée dans plusieurs domaines tels que la maintenance industrielle.

9.2 Thermographie active

Par opposition à la thermographie passive, la thermographie active demande une source externe de chaleur pour entraîner une stimulation thermique à la surface de l'échantillon à inspecter afin de provoquer l'apparition d'un gradient de température. Ce dernier permet de mettre en relief toute présence de défauts internes. On remarque qu'au repos, la température de l'échantillon est égale à la température ambiante ce qui prévient toute détection, une excitation thermique est donc nécessaire. Suite à la stimulation thermique, la température du spécimen change rapidement à cause de la propagation thermique par diffusion au-dessous de la surface. La présence d'un défaut à l'intérieur du spécimen change alors le taux de diffusion, ce qui se traduit par l'apparition de zone de température différente par rapport à la zone normale. Ce phénomène s'explique aussi comme suit, dans le cas où le défaut a une diffusivité thermique inférieure à celle du spécimen, il offre une résistance relativement plus grande qui s'oppose à la propagation du front thermique. Il ya donc accumulation de chaleur en surface au-dessus du défaut. Dans le cas contraire, c'est le phénomène inverse qui se produit et dans ces conditions le front thermique se propage plus vite que dans la zone saine.

10. Détection et Diagnostic des défauts par thermographie infrarouge

10.1 La surveillance thermique

Plusieurs techniques de détection de défauts peuvent être utilisées dans le secteur industriel, on peut évoquer la thermographie infrarouge, l'analyse des vibrations mécaniques et la détection ultrasonore. Une des techniques qui est largement utilisées jusqu'à ce jour, pour prévoir les risques de défaillance des systèmes de production est l'inspection avec utilisation de la thermographie infrarouge. Antérieurement, l'inspection des systèmes était basée sur l'utilisation des cinq sens, il est ordinaire de voir un technicien faire le tour des appareils (systèmes), les ouvrir et les inspecter, à la recherche d'une fuite dans les pompes, d'un moteur surchauffé, ou pour détecter une mauvaise connexion et détérioration interne. Ainsi les sens les plus exploités sont, la vue, l'odorat, et le toucher [17]. De nos jours cette pratique laisse la place à l'inspection thermographique infrarouge.

Les études pratiques ont prouvé que la température des installations industrielles dans plusieurs cas est représentative soit de leur état de santé, soit de leur état de fonctionnement. La thermographie infrarouge permet de localiser les points chauds à partir d'une image thermique. Tout objet à température normale émet un rayonnement dans le domaine infrarouge dépendant de sa

température. Cette propriété est utilisée par l'électronique des détecteurs infrarouges pour donner la température d'un objet en captant l'énergie infrarouge qu'il émet. C'est un paramètre dont le suivi peut renseigner l'exploitant et le mainteneur, et cela dans de nombreux domaines techniques.

11. Les sources d'incertitude de mesure

Les incertitudes de mesure en thermographie sont celles de la radio-thermométrie auxquelles se rajoutent des incertitudes spécifiques. Cependant, en thermographie infrarouge, le fait de disposer d'une image permet une meilleure maîtrise de la situation de mesure que celle que l'on peut réaliser avec un simple thermomètre par rayonnement. Nous nous limiterons dans cette étude à une liste non finie des origines des incertitudes. L'incertitude sur la valeur mesurée de température résultera des incertitudes liées :

- à la situation d'étalonnage ;
- à la situation de mesure ;
- à l'opérateur.

11.1 Incertitudes liées à la situation d'étalonnage

Pour étalonner la caméra en situation d'étalonnage, sur corps noirs et à courte distance. Les constructeurs spécifient une incertitude sur la température apparente, mais, jusqu'à maintenant, ils n'ont publié aucune étude raisonnable sur le sujet. Les corps noirs utilisés pour l'étalonnage de caméra infrarouge présentent un ensemble de caractéristiques qu'aucune norme ne précise. Le corps noir se doit être un étalon de rayonnement, mais la relation rayonnement - température n'est pas établie pour toutes les longueurs d'onde et toutes les températures, ce qui ne permet pas de considérer tous les corps noirs disponibles comme des étalons de rayonnement [18]. En général, il existe trois types d'incertitudes qui influent sur les mesures dans cette situation :

- Incertitudes dues au corps noir ;
- Incertitudes dues à la caméra ;
- Incertitudes dues aux conditions d'étalonnage ;

11.2 Incertitudes liées à la situation de mesure

Lorsque la caméra est utilisée en situation de mesure. Les grandeurs d'influence sont connues avec des incertitudes incluant les dispersions des valeurs de ces grandeurs. Les valeurs de ces grandeurs permettent de remonter de la situation de mesure à la situation d'étalonnage par une équation de transcription en température sensée décrire correctement la situation de mesure [7].

- Incertitudes dues à la caméra thermique ;

- Incertitudes dues aux grandeurs d'influence.

11.3 Incertitudes liées à l'opérateur

Les sources d'incertitude les plus importantes sont dues à l'opérateur lui-même. Celui-ci se devrait de maîtriser sa caméra et la situation de mesure, de sorte que cette situation soit décrite correctement par l'équation de transcription en température qu'il utilise ou qu'utilise sa machine [19]. Dans ce cas, deux types d'incertitudes apparaissent :

- Incertitudes dues à la caméra thermique ;
- Incertitudes dues à la maîtrise de la situation de mesure

12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous venons d'aborder la théorie de la technique de thermographie infrarouge, le choix du contrôle par cette technique repose sur divers avantages qu'on en retire sur le plan pratique :

- Le procédé est rapide à cause de la possibilité d'inspection de surfaces étendues ;
- Les moyens informatiques actuels (systèmes d'acquisition et méthodes de traitements d'images) permettent facilement l'exploitation des images en vue du contrôle ;
- La simplicité du système de contrôle et son caractère non intrusif permettent la réalisation d'opérations in situ ;
- Le procédé offre des facilités d'application dans la mesure où l'accès est difficile ou limité à un seul côté ; c'est le cas des pièces complexes et fermées dont la face opposée à l'éclairage est inaccessible.

Les limitations de la technique thermique :

- La distance maximale de détection de cibles est moindre que celle des caméras visibles.
- La détection par thermographie devient difficile lorsque la température de la cible est très proche de celle du milieu ambiant.
- De même, pour des surfaces très réfléchissantes, la réflexion devient prédominante devant l'émission propre et aucune mesure par thermographie n'est alors possible sans peinture additive.

Chapitre II : Aspect théorique de la thermographie active

1. Introduction

Alors que les techniques présentées précédemment sont essentiellement des techniques dites passives, il existe une technique active qui utilise donc une stimulation thermique :

la thermographie appliquée à l'évaluation non destructive. Il s'agit d'utiliser les anomalies thermiques mesurées avec une caméra infrarouge pour détecter et, ensuite, caractériser des défauts en dessous de la surface d'un objet.

Afin de détecter un éventuel défaut sur un échantillon de matériau d'épaisseur quelconque. En utilisant les données fournies par la caméra infrarouge, on veut estimer des informations caractéristiques en tout point de l'échantillon. La thermographie infrarouge active, qui consiste à analyser le flux de chaleur transitoire de la scène thermique suite à sa sollicitation, peut être utilisée et ce dans de nombreuses thématiques industrielles (aéronautique, automobile, adhésifs, soudage, bâtiment, inspection de canalisations, etc.).

Les sollicitations les plus couramment rencontrées sont : l'impulsion (ou Dirac), l'échelon, le créneau ou de type périodique. Pour cela, on considère que les défauts recherchés se traduisent par une variation locale de certains paramètres physiques de l'échantillon : son épaisseur e , sa diffusivité thermique a , sa chaleur volumique (ρc), sa conductivité thermique λ et la présence d'une résistance thermique R . la variation d'un de ces paramètres influe sur l'évolution de la température en tout point du matériau soumis à un flux de chaleur.

Nous allons donc exprimer la relation, fonction de ces paramètres, qui lie température et flux en tout point du matériau, plus particulièrement en face avant puisque la caméra utilisée nous en donne une image. Pour cela, on suppose hypothèses simplificatrices suivantes :

- Transfert thermique unidimensionnel suivant l'épaisseur x de l'échantillon (justifié du fait de la géométrie plane de l'échantillon et de la faible épaisseur).
- Echantillon isolé sur son support, sans source interne.[20]

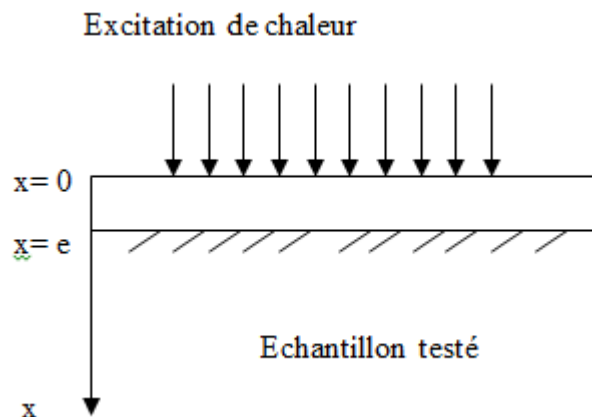


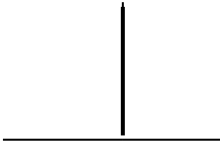
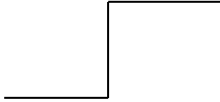
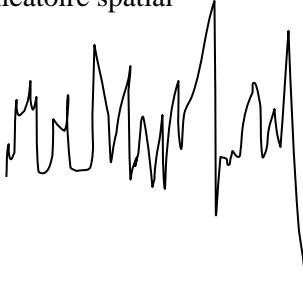
Figure II 1 : Échantillon excité par une source externe

Chapitre II : Aspect théorique de la thermographie active

On note $T(x,t)$ et $\varphi(x,t)$ respectivement la température et le flux thermique en un point de l'échantillon situé à une profondeur x , à un instant t .

Il existe plusieurs méthodes d'excitation thermique, nous allons définir les trois principales excitations :

- L'excitation avec un flash (impulsion), cette dernière est intéressante car elle permet d'exciter un maximum de longueurs d'onde. Cependant sa rapidité empêche une bonne montée en température de la face excitée.
- L'excitation avec un échelon, cette méthode permet d'imposer de très forts gradients de températures entre la face avant et face arrière. C'est une excitation temporelle.
- L'excitation aléatoire permet d'obtenir spatialement de forts gradients de température. C'est une excitation spatiale.

Excitation thermique		
<p>Impulsion de Dirac</p>  <p>Le Dirac est intéressant car il permet d'exciter un maximum de longueurs d'onde. Cependant sa rapidité empêche une bonne montée en température de la face excitée. C'est une excitation temporelle.</p>	<p>Echelon temporel</p>  <p>L'échelon est une excitation brutale. Cette méthode permet d'imposer de très forts gradients de températures entre la face avant et la face arrière. C'est une excitation temporelle.</p>	<p>Aléatoire spatial</p>  <p>Le flash aléatoire spatial permet d'obtenir spatialement de forts gradients de température. C'est une excitation spatiale.</p>

Les propriétés thermophysiques sont regroupées en une seule variable appelée diffusivité, notée $a(x, y, z, t)$. Nous utiliserons donc la forme suivante de l'équation de la chaleur, en prenant en compte la remarque précédente sur « Q » ($Q = 0$) :

$$\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = \text{div}(a(x, y, z) \text{grad}(T(x, y, z, t))) \quad (2.1)$$

Chapitre II : Aspect théorique de la thermographie active

Avec :

a : diffusivité thermique du matériau (en m^2/s),

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (2.2)$$

L'équation (2.1) lie les propriétés thermophysiques du matériau à sa température. Par conséquent en connaissant l'évolution en température du matériau au cours du temps, il est possible de remonter à la diffusivité et donc aux propriétés thermophysiques du matériau.[20]

2. Méthode des quadripôles thermiques pour un milieu homogène

On note $T(x,t)$ et $\phi(x,t)$ respectivement la température et le flux thermique en un point de l'échantillon situé à une profondeur x , à un instant t :

$$\frac{1}{a} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

Le flux est en outre relié à la température par l'équation de la conduction

$$\phi(x,t) = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

Où λ représente la conductivité thermique de l'échantillon matériau.

Il est possible d'effectuer une analogie entre la conduction thermique et la conduction électrique avec les grandeurs suivantes :

Température T → Potentiel U

Flux ϕ → Intensité I

Résistance thermique surfacique → Résistance électrique R

Les lois régissant la conduction en régime permanent sont identiques à celles régissant la conduction électrique, soit :

$$U = R_e I \quad \rightarrow \quad T_1 - T_2 = R_e \phi \quad \text{avec} \quad R_e = \frac{e}{\lambda a} \quad (2.5)$$

Pour simplifier notre étude, nous nous plaçons dans le cadre des hypothèses simplificatrices suivantes :

- Transfert thermique unidimensionnel suivant l'épaisseur de l'échantillon.

Chapitre II : Aspect théorique de la thermographie active

- Echantillon isolé sur son support, sans source interne.

Afin de détecter un éventuel défaut sur un échantillon, il s'agit en utilisant les données fournies par la caméra infrarouge, d'estimer des informations caractéristiques en tout point de l'échantillon. [21]

Le problème ainsi modélisé peut se résoudre par la méthode des quadripôles. L'équation de la chaleur dans le domaine temporel s'écrit, par application de la transformée de Laplace :

$$\begin{cases} \frac{p}{a} \theta = \frac{d^2 \theta}{dx^2} \\ \phi(x, p) = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \Big|_{(x,p)} \end{cases} \quad (2.6)$$

Avec $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ et p variable de Laplace.

En utilisant la transformée de Laplace de la température et du flux :

$$\theta(x, p) = \int_0^{\infty} T(x, t) e^{-pt} dt \quad \text{et} \quad \phi(x, p) = \int_0^{\infty} \varphi(x, t) e^{-pt} dt \quad (2.7)$$

Sous forme matricielle, le système précédent devient :

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \theta(x, p) \\ \phi(x, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -\rho c p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(x, p) \\ \phi(x, p) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Soit :

$$\frac{d}{dx} U = -MU \quad (2.9)$$

$$U = \begin{bmatrix} \theta(x, p) \\ \phi(x, p) \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad M = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -\rho c p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

La solution d'une telle équation peut se rechercher sous la forme d'une exponentielle : $U(x) = \exp(-Mx)U(0)$, ou de manière équivalente sous la forme d'une combinaison linéaire de cosinus hyperboliques et de sinus hyperboliques. Le système devient alors :

$$\begin{cases} \theta(x, p) = A \cosh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} x\right) + B \sinh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} x\right) \\ \phi(x, p) = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \Big|_{(x,p)} \end{cases} \quad (2.11)$$

Chapitre II : Aspect théorique de la thermographie active

Avec :

$$A = \theta(0, p) \quad \text{et} \quad B = -\frac{\phi(0, p)}{\lambda \sqrt{\frac{p}{a}}} \quad (2.12)$$

D'où

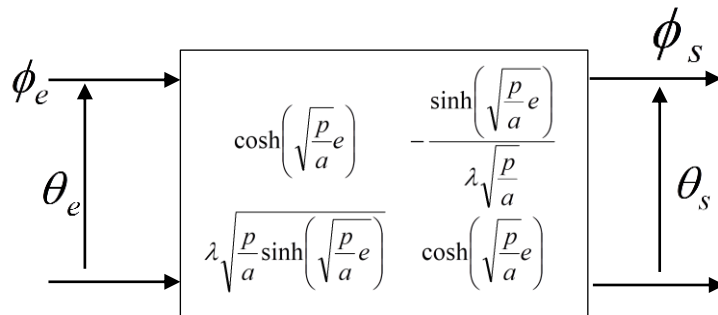
$$\begin{cases} \theta(x, p) = \theta(0, p) \cosh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} x\right) - \frac{\phi(0, p)}{\lambda \sqrt{\frac{p}{a}}} \sinh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} x\right) \\ \phi(x, p) = -\theta(0, p) \lambda \sqrt{\frac{p}{a}} \sinh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} x\right) + \phi(0, p) \cosh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} x\right) \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \theta(x, p) \\ \phi(x, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} x\right) & -\frac{\sinh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} x\right)}{\lambda \sqrt{\frac{p}{a}}} \\ -\lambda \sqrt{\frac{p}{a}} \sinh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} x\right) & \cosh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} x\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta(0, p) \\ \phi(0, p) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

L'inversion de la matrice N nous permet d'exprimer l'entrée en $x=0$ du système en fonction de la sortie en $x=e$. [21]

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \theta(0, p) \\ \phi(0, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} e\right) & -\frac{\sinh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} e\right)}{\lambda \sqrt{\frac{p}{a}}} \\ \lambda \sqrt{\frac{p}{a}} \sinh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} e\right) & \cosh\left(\sqrt{\frac{p}{a}} e\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta(e, p) \\ \phi(e, p) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Ainsi en posant $\phi_e = \phi(x=0, p)$, $\theta_e = \theta(x=0, p)$, $\phi_s = \phi(x=e, p)$ et $\theta_s = \theta(x=e, p)$ on peut modéliser le système par le quadripôle suivant :



Chapitre II : Aspect théorique de la thermographie active

Le flux de sortie ϕ_s est nul du fait de l'hypothèse d'adiabaticité.

La réponse en température s'exprime alors en fonction du flux d'entrée par la relation :

$$\theta(0, p) = \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{p}{a}}e\right)}{\lambda\sqrt{\frac{p}{a}}\sinh\left(\sqrt{\frac{p}{a}}e\right)}\phi(0, p) \quad (2.16)$$

Le développement du système matriciel, nous donne la formule de la température surfacique du spécimen étudié :

$$\theta(0, p) = \frac{\phi \cosh\left(\sqrt{\frac{p}{a}}e\right)}{\lambda s \sqrt{\frac{p}{a}} \sinh\left(\sqrt{\frac{p}{a}}e\right)} \quad (2.17)$$

Lorsque le temps $t \rightarrow 0$ dans le domaine temporelle, la variable $p \rightarrow$ vers l'infini dans le domaine de Laplace. L'expression précédente devient alors :

$$\theta(0, p) = \frac{\phi}{\lambda s \sqrt{\frac{1}{a}} \sqrt{p}} = \frac{\phi}{\sqrt{b} \sqrt{p}} \quad (2.18)$$

Soit après application de la transformée de Laplace inverse on a :

$$T(0, t)_{t \rightarrow 0} = \frac{\phi}{\sqrt{\lambda \rho c} \sqrt{\pi t}} = \frac{\phi}{b \sqrt{\pi t}} \quad (2.19)$$

Or nous utilisons un seul échantillon et le chauffage se fait par des projecteurs lumineux : on a ainsi :

$$T(t) = Q \frac{\sqrt{t}}{s \sqrt{\pi r c \lambda}} \quad (2.20)$$

On peut donc remonter à la puissance injectée au système :

$$Q = \frac{T(t) s b \sqrt{\pi}}{\sqrt{t}} \quad (2.21)$$

Où b est l'effusivité du matériau (connue au moins pour un matériau).

Chapitre II : Aspect théorique de la thermographie active

On remarque que cette formule présente la variation de la température en fonction du temps aux tous instants initiaux de l'essai. Cette évolution est liée d'une manière simple à l'effusivité thermique de l'échantillon étudié. [21]

3. Milieu de type résistif

Pour un milieu avec un défaut de type résistif (1D) :

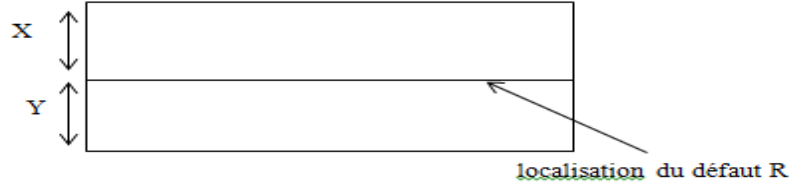
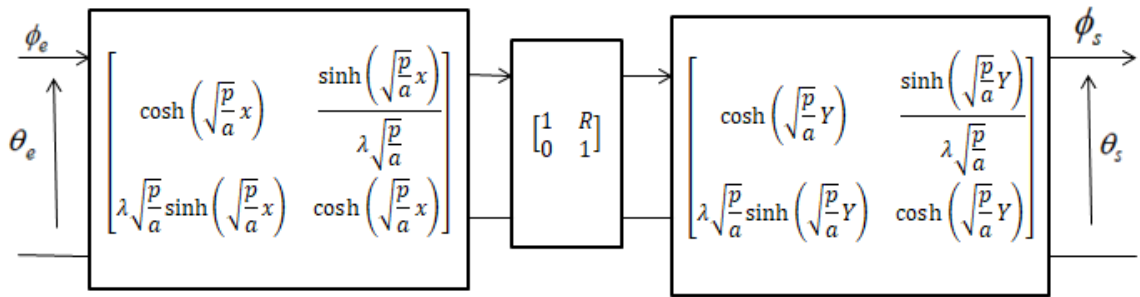


Figure II 2 : Modélisation d'un défaut résistif

En généralisant les résultats précédemment établis, la relation entre le flux et la température d'entrée et de sortie peut être modélisée par l'intermédiaire des quadripôles et donc de matrices :



Le flux de sortie Φ_s est nul du fait de l'hypothèse d'adiabaticité. [21]

La relation liant la température d'entrée θ_e et le flux d'entrée Φ_e est donc dans ce cas :

$$\theta(0, p) = \frac{ch\left(\sqrt{\frac{p}{a}}e\right) + \lambda R \sqrt{\frac{p}{a}} ch\left(\sqrt{\frac{p}{a}}X\right) sh\left(\sqrt{\frac{p}{a}}Y\right)}{\lambda \sqrt{\frac{p}{a}} \left(sh\left(\sqrt{\frac{p}{a}}e\right) + R \lambda \sqrt{\frac{p}{a}} sh\left(\sqrt{\frac{p}{a}}X\right) sh\left(\sqrt{\frac{p}{a}}Y\right) \right)} \phi(0, p) \quad (2.22)$$

Remarque: en posant $R=0$, on retrouve logiquement la formule (2.16), expression de la relation sans défaut. [21]

4. Méthodes de caractérisation de défauts

La prédiction quantitative de la profondeur de défauts a été un sujet de recherche important au cours des vingt dernières années. De nombreuses méthodes ont été proposées, principalement basées sur la relation entre cette profondeur et un temps caractéristique (SCT, Specific Characteristic Time). Ce temps caractéristique est généralement choisi au pic de la dérivée

Chapitre II : Aspect théorique de la thermographie active

première ou seconde des relaxations en température après un traitement approprié. Parmi ces traitements, la plupart des travaux sont basés sur le contraste thermique (T_C , Temperature Contrast) qui est obtenu par soustraction d'un champ de température de référence. Cette courbe de référence est normalement issue d'une zone saine de l'échantillon, dont l'identification peut être problématique, la position des défauts n'étant pas connue a priori. Certains travaux ont cherché à lever cette difficulté. Par exemple ceux qui utilisent la température moyenne de la surface totale comme température de référence et ceux qui exploitent les premières images de l'expérience pour simuler cette référence.

On peut classifier les différentes méthodes de traitement en deux catégories distinctes, l'une regroupant des techniques de résolution dans le domaine fréquentiel, l'autre dans le domaine temporel. Les travaux concernant la première classe de méthode ne seront qu'évoqués dans la dernière section. Les méthodes qui suivent ont en commun l'identification d'un temps caractéristique (SCT). Dans les quatre premières d'entre-elles, il est possible d'estimer la profondeur Z du défaut en utilisant la relation ci-dessous et les coefficients donnés dans la Tableau II 1, où α est la diffusivité thermique de l'échantillon. [22]

$$SCT = \frac{z^2}{b\alpha} \quad (2.23)$$

	PCT	PST	LPSD	APST
b	0.5	2.7114	3.1416	2

Tableau II 1: les coefficients donnés

5. Méthode PCT – Peak Contrast Time

Les méthodes de type PCT s'attachent à identifier le temps correspondant au maximum du contraste thermique. Ce SCT est proportionnel au carré de la profondeur du défaut. Le contraste thermique (T_C) fait référence à la différence de température entre une région de l'échantillon avec défaut (T_D) et une région adjacente sans défaut (T_S) :

$$TC = TD - TS \quad (2.24)$$

T_C est directement lié à la profondeur du défaut. En effet, plus le défaut se trouve proche de la surface, plus la quantité d'ondes thermiques atteignant la surface est importante et plus le T_C est marqué. Le T_C obtenu au-dessus d'un défaut n'est pas constant. En effet, il varie en augmentant puis en décroissant dans le temps. Le temps auquel il atteint son maximum est considéré comme

étant le temps permettant la meilleure estimation de la profondeur du défaut. Ce point peut donc être déterminé à partir du tracé du T_C en fonction du temps. [22]

6. Méthode PST – Peak Slop Time

Les techniques de type PST ont pour objectif d'identifier le moment où la dérivée première atteint son maximum par rapport au moment du contraste thermique, tel que décrit dans le paragraphe précédent. Ce temps spécifique est approximativement proportionnel au carré de la profondeur, sans être influencé par la taille de l'imperfection. Contrairement à la méthode précédente, le temps spécifique n'est plus dépendant du coefficient de réflexion thermique, permettant ainsi une plus grande précision. Toutefois, il peut être nécessaire d'appliquer un prétraitement, comme une approximation polynomiale, pour éviter l'amplification du bruit de mesure suite à la dérivation temporelle. [22]

7. Méthode LPSD - Logarithmic peak second-derivative method

Cette méthode a la particularité de ne pas nécessiter de référence comme c'est le cas pour les techniques basées sur un contraste thermique. D'autre part, les méthodes PCT, PST et LPSD sont basées sur des temps caractéristiques qui diminuent au fil des dérivées successives. Or, le temps caractéristique de la méthode LPSD, correspondant à l'un des pics de la dérivée seconde de la température en coordonnées logarithmiques, est le plus faible. Dès lors, cette méthode présente un avantage sur les précédentes car les estimations seront moins biaisées par l'apparition de phénomènes thermiques 3D. On constate de nouveau que le temps caractéristique ne dépend pas du coefficient de réflexion thermique. Au côté du premier pic utilisé pour déterminer le SCT, on note une fluctuation. Celle-ci sera plus faible si le coefficient de réflexion est moindre si le défaut est plus profond. Le minimum de la courbe peut également être utilisé mais précise que ce dernier sera plus sensible à la diffusion et aux effets 3D car apparaissant plus tard lors de l'expérience. Notons enfin que certains essais peuvent conduire à l'apparition d'un second maximum également exploitable pour l'estimation de la profondeur du défaut. [22]

8. Méthode APST – Absolute peak slope time

La méthode APST est utilisée pour mesurer la profondeur d'un défaut sans utiliser une référence telle que l'évolution de la température dans une zone saine de l'échantillon. Bien que la décroissance en température ne présente pas de pic spécifique, la méthode utilise des thermogrammes multipliés et dérivés dans le temps pour identifier un pic permettant d'estimer la profondeur du défaut. Une étude numérique montre que le temps caractéristique n'est pas affecté par la variation du coefficient de réflexion thermique de l'échantillon. Bien que cette méthode ne nécessite qu'une dérivée pour minimiser le bruit, l'utilisation d'une approximation polynomiale est importante pour obtenir des résultats précis. [22]

$$t_{\text{APST}} = \frac{L^2}{2\alpha} \quad (2.25)$$

9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons discuté de la méthode quaternaire de calcul de la température et identifié les sources d'excitation.

Nous avons également abordé la méthode de propagation du rayonnement en une et deux dimensions, les méthodes de filtrage de l'image pour augmenter sa précision, et les différentes méthodes pour connaître la profondeur du défaut :

- Méthode PCT – Peak Contrast Time
- Méthode PST – Peak Slope Time
- Méthode LPSD - Logarithmic peak second-derivative method
- Méthode APST – Absolute peak slope time

Chapitre III : Aspect appliqué de la thermographie active

1. Introduction:

Ce dernier chapitre présente l'application de toutes les méthodes mentionnées dans le chapitre précédent.

Et voyant les résultats, nous les analyserons et les interpréterons et choisirons la meilleure méthode.

2. Descriptif du banc d'essais :

Le dispositif expérimental se compose de :

- Une caméra thermique de type Flir SC7000
- Une source d'excitation
- Une unité de traitement
- Un support caméra indépendant du banc

Le principe consiste à exciter thermiquement le matériau à l'aide d'une source externe et à observer sa réponse transitoire en température en face avant. Il aura un traitement des images enregistrées afin de localiser les zones d'intérêts sur l'échantillon et d'éliminer le bruit du signal fourni par l'imageur thermique.

Pour des raisons liées à l'utilisation de la caméra infrarouge et des longueurs d'ondes perceptibles, il convient que les échantillons testés soient opaques au rayonnement IR et que leur émissivité soit la plus importante possible. L'échantillon, fortement réfléchissant, a donc été peint avec de la peinture noire, d'émissivité proche de 1. Les essais durent 6 secondes avec un pas de temps de 0.002 secondes.

Pour cette étude, on a utilisé une plaque de composite. Ensuite, on a fait plusieurs acquisitions avec trois caméras différentes. Cette plaque contient différents défauts, pour pouvoir voir, nous allons faire une cartographie de diffusivité avec la méthode du développement asymptotique.

3. Dispositif « Flash caméra » :

L'objet de cette technique est l'estimation de cartographies de diffusivités thermiques (notée a , en m^2/s) dans l'épaisseur des échantillons de matériaux. Aussi, cette section présentera le dispositif expérimental utilisé pour estimer ces cartographies, son adaptation à des essais à hautes températures et sa validation par le biais d'un ensemble d'essais réalisés avec un matériau dont les propriétés thermiques sont connues en fonction de la température.[23]

La méthode flash est une méthode expérimentale de caractérisation thermique de matériaux (solides, liquides, poudres) fiable et bien connue. Elle peut être décrite comme suit :

Chapitre III : Aspect appliqué de la thermographie active

- 1) La face dite face avant d'un échantillon homogène et isotrope, généralement un cylindre à faces parallèles, est excitée thermiquement par un flux radiatif impulsionnel généré par un laser ou une lampe flash.
- 2) La réponse thermique de la face arrière (face opposée à l'excitation) est mesurée par le biais d'un thermocouple (mesure locale), d'un capteur infrarouge (mesure moyennée sur une petite surface) voire d'une caméra infrarouge (mesure pixel à pixel ou moyennée sur une surface plus importante).
- 3) Les propriétés thermiques de l'échantillon (essentiellement sa diffusivité thermique) sont finalement estimées par l'inversion d'un modèle de transfert de chaleur approprié.

Basé sur cette méthode, le dispositif expérimental « Flash caméra », présenté sur la figure 1.20, est composé :

- d'un axe vertical sur lequel est fixée une caméra infrarouge. La caméra est mobile sur cet axe.
- de deux axes horizontaux, mobiles verticalement, sur lesquels sont fixés des lampes flash Xenolux 1500, orientables à 90° et pilotées par un programme d'acquisition.
- Deux axes horizontaux, mobiles verticalement, pour accueillir le porte-échantillon.

Le mode de fixation des lampes, ainsi que leurs angles d'orientation permet de réaliser des mesures aussi bien en face avant qu'en face arrière.

Ce dispositif permet ainsi de réaliser, à l'aide des lampes flash, une impulsion thermique de type Dirac sur un échantillon à faces planes parallèles. [23]



Figure III 1: Dispositif pour la détection des défauts

Chapitre III : Aspect appliqué de la thermographie active

Suite à l'excitation thermique, l'évolution de la température est mesurée par la caméra infrarouge sur la face excitée (méthode face avant) ou sur la face opposée à l'excitation (méthode face arrière).

Dans cette technique de mesure, une caméra thermique peut être utilisée, dont les principales caractéristiques sont :

Taille du capteur	320*256
Sortie Vidéo	vidéo (CCIR, RS 170)
Mode d'acquisition	Sortie Gigabit Ethernet
Type de données	Matrice 320x256 d'entiers 14 bits
Technologie du capteur	InSb
Fréquence	400 Hz et jusqu'à 2 kHz en fenêtrant

Tableau III 1: Fiche technique caméra Flir SC7000 [24]



Figure III 2 : Flir SC7000

4. Altair :

Le logiciel Altair du Cedip est une suite puissante d'outils conçus pour les scientifiques et les ingénieurs qui travaillent avec l'imagerie infrarouge et l'analyse thermique. Il offre des fonctionnalités pour l'acquisition, l'affichage et le traitement d'images provenant de caméras infrarouges. Le logiciel est entièrement compatible avec la gamme de caméras infrarouges du Cedip, ce qui garantit une intégration transparente et des performances optimales.

Altair offre des capacités avancées de stockage en temps réel, de manipulation et de traitement des images radiométriques. Il permet aux utilisateurs d'analyser les images thermiques, d'identifier les modèles de contrainte dans les matériaux et les structures dans des conditions de charge dynamique, et de mener des activités de recherche et de développement . Le logiciel est connu pour ses fonctionnalités de pointe, ses outils sophistiqués et ses puissantes capacités de stockage .

En outre, Altair est souvent décrit comme le compagnon idéal des caméras IR du Cedip, y compris les familles JADE et EMERALD . Il offre une intégration transparente et améliore les capacités de ces caméras, permettant aux utilisateurs d'obtenir des résultats d'imagerie thermique précis et détaillés .

5. Expérience réalisée :

L'échantillon testé est une plaque de composite carbone/époxy. Cette plaque contient trois inclusions (20x20 mm²) de Téflon situées à 0.4, 1.3 et 2.6 mm de la surface excitée.

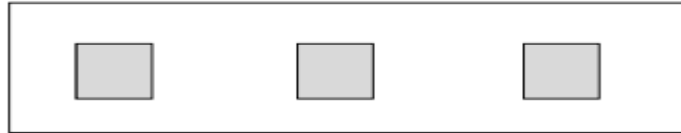


Figure III 3 : échantillon testé

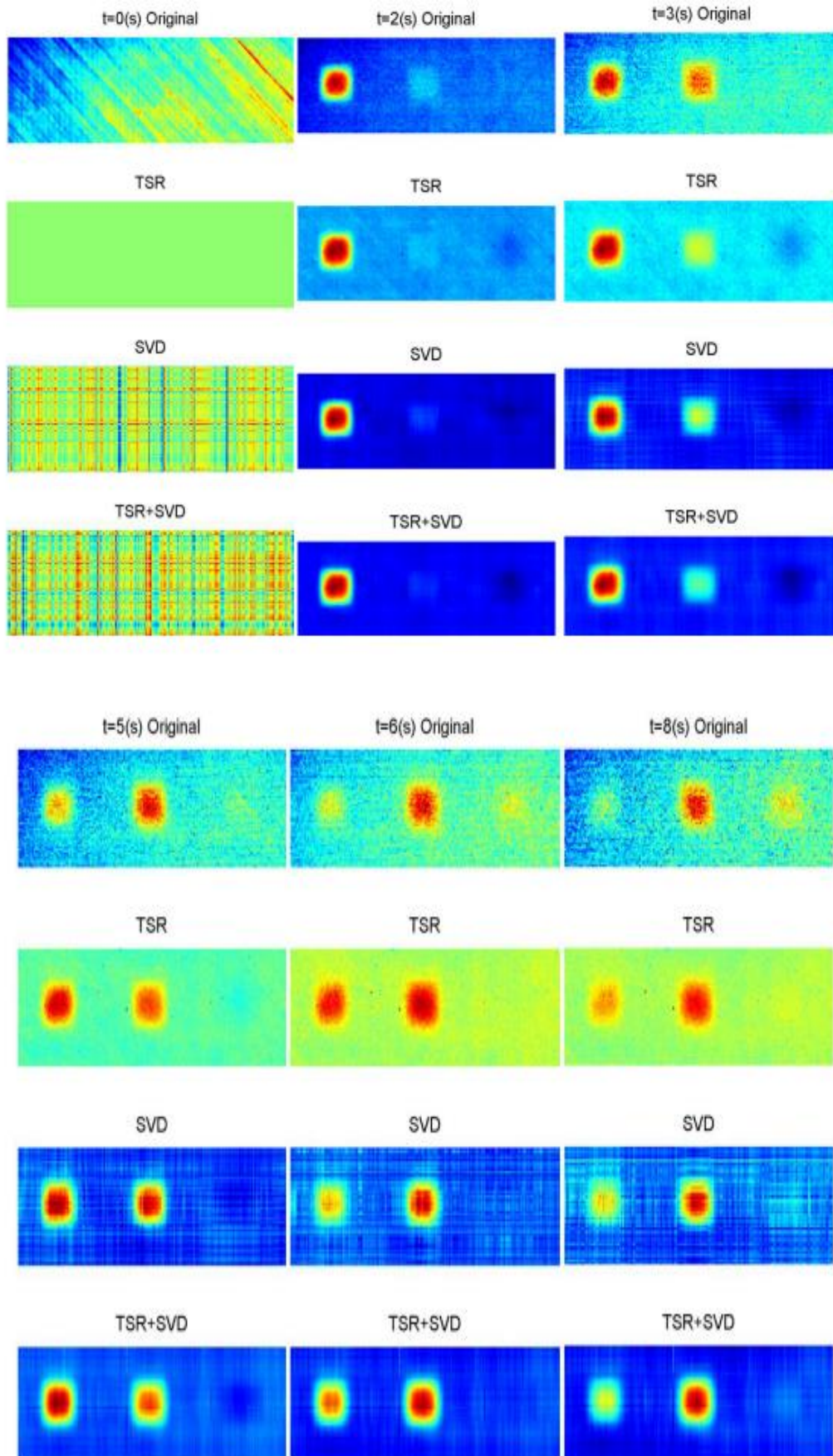
6. Résultats et discussion

La méthode utilisée consiste, dans un premier temps, à visualiser les défauts (voire une zone saine de l'échantillon), à choisir une zone au centre de chacun d'eux et à moyenniser les pixels correspondants. Cette étape préliminaire est destinée à limiter l'effet du bruit sur les traitements. Notons que dans cette partie, le choix des zones d'intérêt est laissé à l'utilisateur mais une détection automatique serait une évolution intéressante. Il est possible d'extraire une séquence infrarouge enregistrée au cours de l'expérience une réponse pour chaque pixel.

Une fois l'interpolation polynomiale réalisée pour chaque pixel, il est possible de revenir aux coordonnées initiales. En plus de cette technique, deux méthodes ont été effectuées. La première consiste à appliquer une transformation de type SVD (Singular Value Decomposition) à chaque image de la séquence infrarouge et à ne garder qu'un nombre limité de composantes pour la reconstruire. Ce traitement est classique en compression de données et permet de mettre en avant les caractéristiques fortes d'une image. La deuxième méthode consiste en l'application de la SVD aux images résultant du filtrage par interpolation polynomiale. Les résultats obtenus à différents temps de l'expérience sont présentés dans la figure suivante. On notera qu'en supposant que l'échantillon a une émissivité homogène sur toute sa surface, que le rayonnement sur celle-ci est également homogène et que l'échantillon est à une température identique en tout point en fin d'expérience, il est possible de normaliser l'ensemble des résultats, ce qui est le cas pour les

Chapitre III : Aspect appliqué de la thermographie active

images ci-dessous :



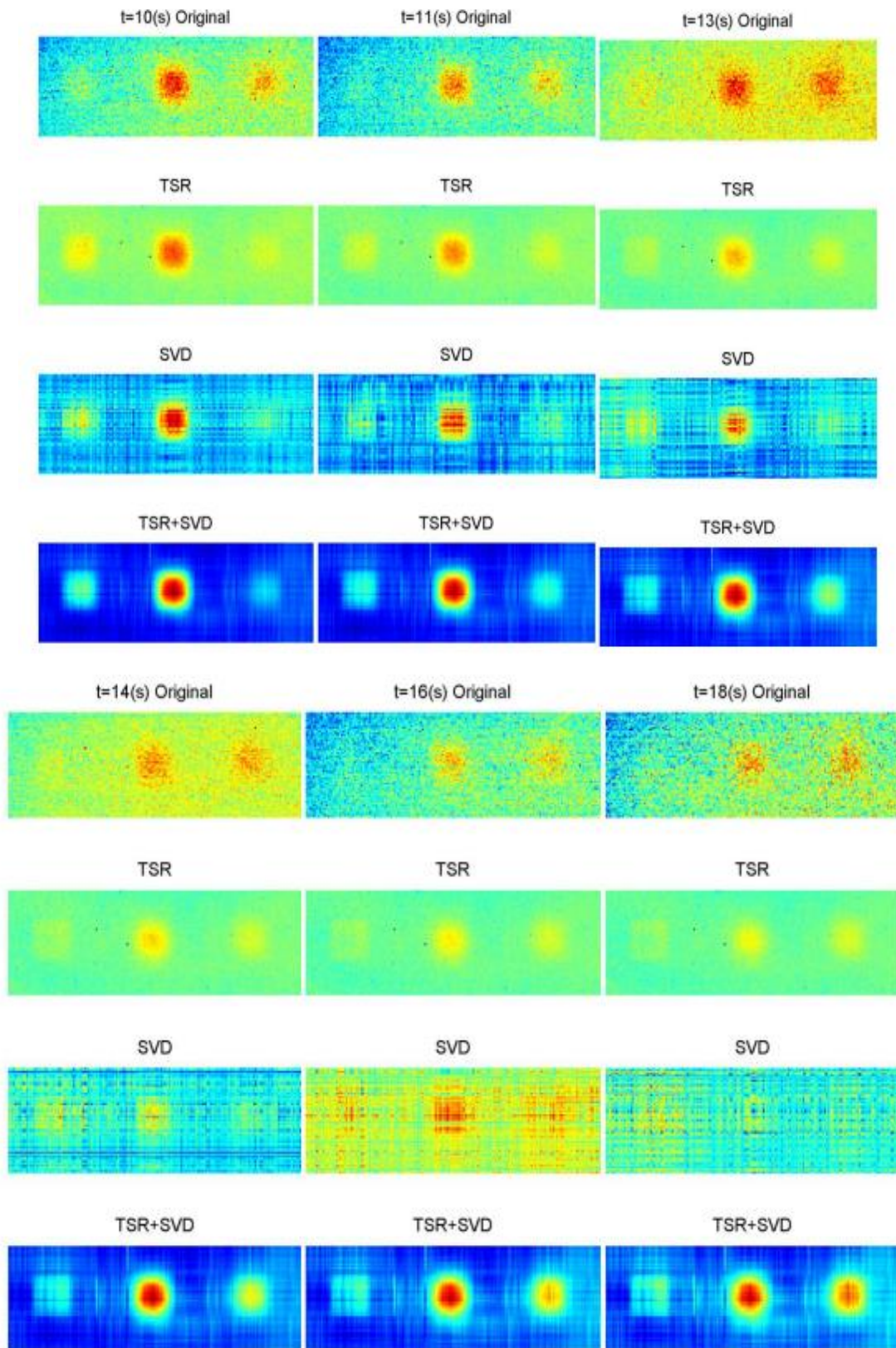


Figure III 4 : Résultats obtenus à $t=0,2,3,5,6,8,10,11,13,14,16$ et 18 s (de gauche à droite). De haut en bas : données non traitées, filtrages par interpolation, SVD et TSR des résultats obtenus par interpolation

Chapitre III : Aspect appliqué de la thermographie active

On remarquera l'intérêt de filtrer les résultats brutes afin de détecter les défauts en vue de leur traitement suivant. Parmi les techniques utilisées, l'utilisation conjointe de l'interpolation polynomiale et de la SVD semble prometteuse. Il convient cependant de souligner le fait que la SVD peut accroître les temps de calcul. Les défauts étant localisés, une zone située au centre de chacun d'eux, et éventuellement une zone considérée comme saine en fonction du traitement utilisé.

zones de Défauts	Real depth z (mm)	PCT		PST		LPSD		APST	
		z (mm)	Erreur (%)	z (mm)	Erreur (%)	z (mm)	Erreur (%)	z (mm)	Erreur (%)
Zone 1	0.4	0.31	22.51	0.380	7.51	0.399	15.03	0.36	10.0
Zone 2	1.3	0.90	31.49	1.191	8.53	1.232	5.410	1.17	10.01
Zone 3	2.6	1.49	42.71	2.343	10.02	2.471	5.030	2.26	13.12

Tableau III 2: Estimation expérimentale de la profondeur pour les trois défauts

Dans cet essai pratique, la méthode PST s'avère plus précise dans l'estimation des profondeurs des trois défauts identifiés. De plus, elle est facile à mettre en œuvre et ne nécessite qu'une dérivée temporelle. Toutefois, pour les défauts plus profonds (2 et 3), la technique LPSD est plus efficace, mais elle exige une double dérivation temporelle, ce qui la rend plus sensible au bruit.

En ce qui concerne l'estimation de l'erreur en profondeur, le tableau III 2 présente l'erreur moyenne en profondeur pour les cinq méthodes proposées. Ce tableau montre que la méthode PST a la capacité de réduire l'erreur moyenne jusqu'à 8,68 %, ce qui correspond relativement aux valeurs expérimentales.

7. Cas d'une plaque contenant plusieurs défauts

Nous avons réalisé une cartographie de diffusivité de la plaque de composite avec la caméra SC7000. Pour faire cette acquisition, nous avons placé la caméra à 50 cm de distance de l'échantillon. Ce qui nous permet d'avoir tout l'échantillon.

Sur cette cartographie de diffusivité, nous pouvons voir tous les défauts qui se trouvent dans la plaque de composite. La dynamique de la caméra est assez grande ce qui nous permet d'avoir une meilleure étude.

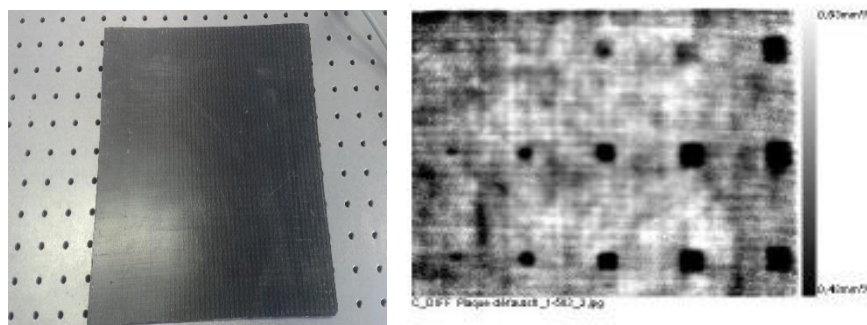


Figure III 5 :Cartographie de diffusivité et échantillon utilisé

Nous avons mesuré le thermogramme moyen de la plaque de composite, nous pouvons remarquer que nous n'avons que très peu de bruits, car notre thermogramme est non bruité. De surcroît, il est réalisé une étude statistique où nous avons la répartition statistiquement des valeurs de la diffusivité de la plaque de composite. Si nous avions eu plus de bruit, nous n'aurions pas eu une gaussienne.

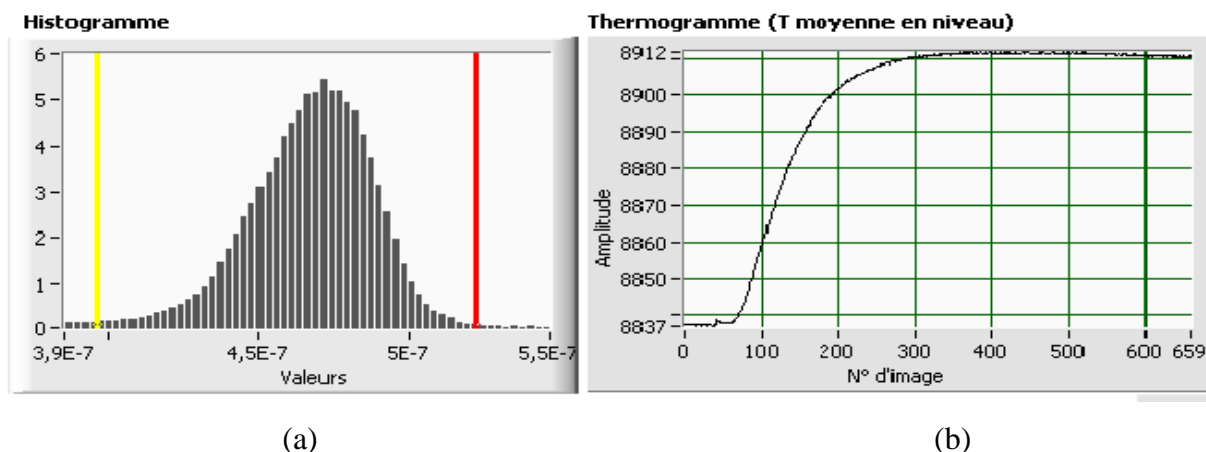


Figure III 6 : (a) histogramme de l'image, (b) thermogramme Flir SC 7000

Pour une meilleure étude, et pour une meilleure comparaison entre les différentes caméras, nous avons sélectionné deux défauts précisément qui se trouvent sur la plaque de composite. Nous avons une meilleure étude avec ces deux défauts car nous avons sur les bords un peu de convection car la plaque de composite est posée sur un porte échantillon métallique. Ainsi, nous avons moins de bruits au centre de l'échantillon.

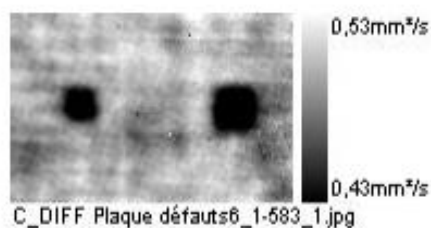


Figure III 7 :Cartographie de diffusivité SC7000

Chapitre III : Aspect appliqué de la thermographie active

Nous avons réalisé une cartographie de diffusivité de la plaque de composite avec la caméra Flir A35. Pour faire cette acquisition, nous avons placé la caméra à 30cm de distance de l'échantillon. Ce qui nous permet d'avoir tout l'échantillon.

Sur cette cartographie de diffusivité, nous pouvons voir tous les défauts qui se trouvent dans la plaque de composite. Dans cette étude, nous avons repris les paramètres de la caméra où nous pouvons avoir une dynamique de la caméra assez grande ce qui nous permet d'avoir de meilleurs résultats.

Nous pouvons remarquer que notre cartographie est très bruitée, et ce qui nous gêne pour mesurer l'effusivité de la plaque de composite. Pour avoir moins de bruit, il est réalisé un porte échantillon, ce qui nous a permis d'avoir un échantillon isolé adiabatiquement.

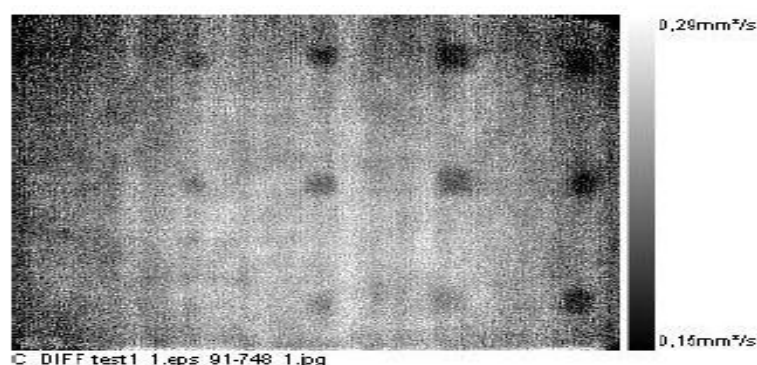
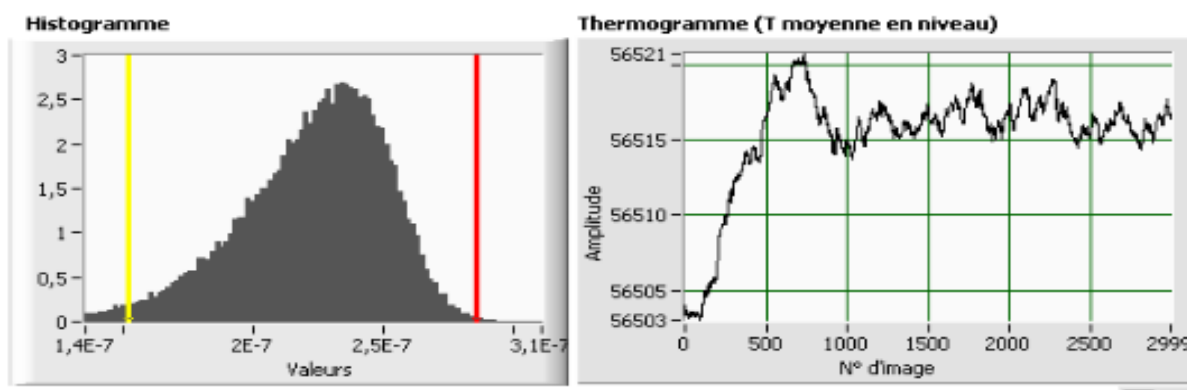


Figure III 8 : Cartographie de diffusivité Flir A35

Nous avons fait un thermogramme moyen de la plaque de composite, nous pouvons remarquer que nous n'avons un peu de bruit, car notre thermogramme est bruité. De surcroît, nous avons réalisé une étude statistique où nous nous avons la répartition statistiquement des valeurs de la diffusivité de la plaque de composite. Les valeurs de diffusivité que nous mesuré sont éloignées des valeurs désirées, ceci est dû aux bruits de mesures.



(a)

(b)

Figure III 9 : (a) Histogramme de l'image, (b) thermogramme Flir A35

Chapitre III : Aspect appliqué de la thermographie active

Ainsi, si on ne s'intéresse qu'à deux défauts comme dans le cas précédent. Nous ne prenons que de deux défauts qui se trouvent au centre de l'échantillon, là où il n'y a que très peu de bruits.

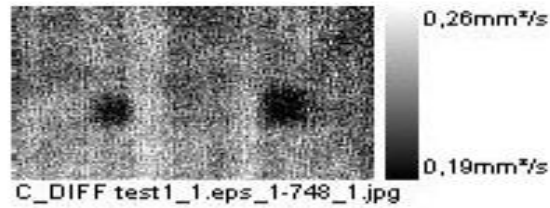


Figure III 10 :Cartographie de diffusivité A35

8. Conclusion

Dans cette étude, nous avons démontré l'utilisation d'un appareil expérimental qui permet la caractérisation thermique des matériaux.

L'étape de validation réalisée à partir d'un échantillon dont les propriétés sont définies en fonction de la température a montré la très bonne précision des estimations ainsi que la qualité du dispositif proposé.

Nous avons également appliqué différentes méthodes et savons quelles méthodes sont les meilleures et dans quel domaine elles sont les meilleures.

Nous avons également comparé les résultats de deux appareils photo différents et découvert lequel est le meilleur et lequel est le plus sujet au bruit.

Conclusion générale

Conclusion générale

Après avoir travaillé sur un cas pratique, plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette expérience :

- 1) Pour estimer la profondeur d'un défaut, il est nécessaire de connaître la diffusivité thermique de l'échantillon sain. Cette étape peut être effectuée en amont en testant un exemplaire sain ou en localisant une zone saine.
- 2) Toutes les méthodes proposées peuvent localiser les défauts dans l'échantillon. Cependant, leur différence réside dans la qualité de l'estimation de la profondeur ainsi que dans la méthode utilisée pour obtenir cette information. Des évaluations supplémentaires sont nécessaires pour déterminer avec précision la méthode la plus performante, mais il est probable que les techniques basées sur un temps caractéristique faible soient plus efficaces pour limiter les effets parasites. La méthode proposée, qui combine une approximation polynomiale et une analyse en valeurs singulières (SVD), offre des opportunités intéressantes.

Bibliographie

Bibliographie :

- [1] : M. Naar Samuel, “Évaluation non destructive du béton par mesures de résistivité électrique et thermographie infrarouge passive,” Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, 2006.
- [2] : P. Agati, N. Mattera, “Mécanique appliquée; Résistance des matériaux, Mécanique des fluides, Thermodynamique,” Edition Dunod, 1996.
- [3] : Flir Systems, “AB Guide de l'imagerie thermique pour les applications industrielles,” 2011.
- [4] : G. Gaussorgues, “La thermographie infrarouge principes – technologies – applications,” Technique et Documentation, Edition Lavoisier, Paris, 4 ème édition, 1999.
- [5] : C. Ibarra-Castanedo, “Évaluation quantitative des défauts souterrains par thermographie à phase pulsée : récupération de la profondeur avec la phase ”, PhD. thèse, Université Laval, 2005.
- [6] : Infrared Training Centre, Documentation sur la thermographie infrarouge, formation de deux jours en thermographie infrarouge, 2010.
- [7] : La thermographie infrarouge en maintenance prédictive cas du Centre hospitalier Saint-Joseph-Espérance, Institut wallon, éditeur Ministère de la Région wallonne, DGTRE – Service de l’Energie, consulter en 2011
- [8] : D 19, “Document Technique - Thermographie infrarouge – Contrôle des installations électriques,” APSAD - CNPP Entreprise, 2002.
- [9] : D. Pajani, “La thermographie infrarouge,” Techniques de l’ingénieur, Traité Mesures et Contrôles. R 2740 et R 2741, 1996.
- [10] : M. Larget, “Contribution à l’évaluation de la dégradation du béton : thermographie infrarouge et couplage de techniques,” Thèse de Doctorat, université Bordeaux, 2011.
- [11] : Flir systems AB, “Documentation du logiciel ThermaCAM Researcher ver 2.9,” copyright © 1997-2007.
- [12] : P. Hervé, “Mesure de l’émissivité thermique,” Techniques de l’Ingénieur, traité Mesures et Contrôle. R 2 737.

Bibliographie

- [13] : D. Majcherczak, “Etude thermique d’un contact glissant : approche numérique et expérimentale application au freinage,” thèse de doctorat, Université de Lille I, 2003.
- [14] : S. Mattei, “Rayonnement thermique des matériaux opaques, ” Techniques de l’Ingénieur, BE 8 210, 2005
- [15] : D. Pajani, “ Mesure par thermographie infrarouge, ” ADD Editeur, 1989.
- [16] : V. Prodjinonto, “ Contribution à l’économie d’énergie dans le bâtiment : mesure de capacité de stockage dynamique d’une paroi, ”Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, 2011.
- [17] : P. L. Foulter, “La thermographie une aide à la maintenance”, Journées d’Etudes de thermographie instrumentale et industrielle, Thermogram’ 2001.
- [18] : D. Pajani, “Les thermographies, technique et système, ” Journées d’Etudes de thermographie instrumentale et industrielle, Thermogram, 2001.
- [19]: W. Minkina S. Dudzik, “Infrared Thermography, errors and uncertainties”, John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [20] : G. P. Joachim, “Contrôle non destructif par thermographie infrarouge”. France, 2003.
- [21] : A. S. C. Maillet, “Thermal quadrupoles: Solving the heat equation through integral transforms”. Wiley, London, 2000.
- [22] : C. L. Zhi Zeng, “ Depth prediction of non-air interface defect using pulsed thermography”. NDT&E International 48, 39–45, 2012.
- [23] : L. D. Yazid, “ Métrologie thermique, asservissement et régulation”. Polycopie de cours, Université de Constantine 1, 2020.
- [24] : Fiche technique caméra Flir SC7000. (s.d.). Récupéré sur masmecca ensta bretagne: <https://www.flir.com>.

Résumé :

Au-dessus de la température de 0 Kelvin, tout corps peut émettre des ondes électromagnétiques - infrarouges - vers le milieu environnant, et jouer le rôle d'une source radioactive en convertissant une partie de l'énergie thermique interne en énergie rayonnante.

La technologie d'imagerie thermique infrarouge consiste à capter ces rayons émis par le corps puis à les évaluer dans le but de pouvoir calculer et lire la température de surface à distance, sans contact, de manière non destructive.

Les images thermiques prises par une caméra thermique sont généralement caractérisées par la présence d'erreurs résultant de la méthode de conversion et d'évaluation des rayons, et la présence de distorsion résultant du rayonnement émis par les objets environnants et l'arrière-plan, et doivent donc suivre un traitement adapté.

Abstract :

Above a temperature of 0 Kelvin, any object can emit electromagnetic waves – infrared-towards the surrounding medium, and plays the role of a radial source by converting part of the internal thermal energy into radiant energy.

Infrared thermal imaging technology consists in capturing these rays emitted by the object and then evaluating them in order to be able to calculate and read the surface temperature remotely, contactless, in a non-destructive way.

Thermal images captured by a thermal camera are usually characterized by errors caused by the way the Rays are converted and evaluated, and there is a distortion caused by the rays emitted by the surrounding objects and the back medium, and therefore they need to undergo appropriate processing.

ملخص

فوق درجة حرارة 0 كالفن بإمكان أي جسم يبعث موجات كهرومغناطيسية – تحت الحمراء – نحو الوسط المحيط به, و يلعب دور المنبع الإشعاعي بتحويل جزء من الطاقة الحرارية الداخلية إلى طاقة إشعاعية.

تتمثل تقنية التصوير الحراري بالموجات تحت الحمراء في التقاط هذه الأشعة المنبعثة من الجسم و من ثم تقييمها بهدف التمكن من حساب و قراءة درجة حرارة السطح عن بعد, بدون تماس, بطريقة غير هدامة.

تتميز الصور الحرارية الملتقطة بواسطة كاميرا حرارية عادة بوجود أخطاء ناتجة عن طريقة تحويل الأشعة و تقييمها, و وجود تشويش ناتج عن الإشعاعات المنبعثة من الأجسام المحيطة و الوسط الخلفي و بالتالي فهي بحاجة إلى الخضوع إلى معالجة مناسبة.

