

M/621.864

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



**Domaine : Sciences et Technologie**  
**Filière : Automatique et Informatique Industrielle**  
**Spécialité : Commande et Diagnostic des Systèmes Industriels**

**Mémoire de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

---

**Diagnostic des équipements industriels par  
Thermographie infrarouge**

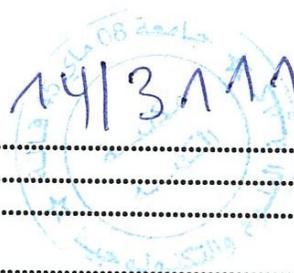
---

Présenté par :  
**Sellaoui Hemza**

Sous la direction de :  
**Mr. Moussaoui Abdelkerim**

**Juin 2015**

# SOMMAIRE



Dédicaces .....	2
Remerciements.....	3
Introduction générale.....	4
<b>Chapitre 1 : Diagnostic des systèmes .....</b>	<b>6</b>
<b>I/- Introduction.....</b>	<b>7</b>
<b>II/- Quelques définitions.....</b>	<b>8</b>
II.1/- Caractérisation des défauts .....	8
II.2/- Principe du diagnostic :Détection et Isolation des défauts.....	9
II.2.1/-Détection : problème fondamentale de la génération du résidus .....	12
II.2.2/- Isolation des défauts .....	14
II.2.3/- Procédure Post-Diagnostic .....	15
<b>III/- Robustesse et Performance d'un algorithme FDI .....</b>	<b>16</b>
<b>IV/- Conclusion .....</b>	<b>16</b>
<b>Chapitre 2 : Thermographie infrarouge.....</b>	<b>17</b>
<b>I/- Introduction.....</b>	<b>18</b>
I.1/- Notion de température.....	18
I.2/- Mesure de température & thermographie infrarouge.....	18
I.3/- La caméra infrarouge.....	19
<b>II/- Loi du rayonnement infrarouge.....</b>	<b>20</b>
II.1/- Le spectre électromagnétique .....	20
II.2/- Bandes spectrales utilisées.....	21
II.3/- Etude théorique et référentielle.....	22
II.4/- Etude pratique.....	24
<b>III/- Grandeur d'influence pour la mesure de T° .....</b>	<b>27</b>
<b>IV/- La caméra infrarouge.....</b>	<b>31</b>
IV.1/- Les détecteurs.....	31
IV.2/- Les systèmes de mesure des caméras infrarouge .....	32
IV.3/- Caractéristiques d'appareillage .....	35
<b>V/- Principe et méthodes, cas des équipements électriques .....</b>	<b>36</b>
V.1/- Principe de détection .....	36
V.2/- Méthode d'inspection .....	37
V.3/- Avantages de l'analyse infrarouge des installations électriques .....	38
V.4/- L'analyse infrarouge : gain de temps et d'argent .....	38
V.5/- Compétences requises: Qui peut pratiquer ces mesures ?.....	39
<b>VI/- Conclusion .....</b>	<b>40</b>
<b>Chapitre 3 : Application de la thermographie.....</b>	<b>41</b>
<b>I/- Applications.....</b>	<b>41</b>
1/- Contrôle des équipements électriques haute et basse tension .....	41
2/- Contrôle de réfractaire .....	43
3/- Contrôle de la qualité d'isolation des bâtiments .....	44
4/- Contrôle sur des équipements mécaniques :.....	45
5/- Contrôle sur des équipements thermiques.....	45
6/- Contrôles qualitatifs et quantitatifs des échanges thermiques.....	46
7/- Localisation d'une canalisation d'eau chaude dans une chape.....	48
<b>II/- Matériels utilisés.....</b>	<b>49</b>
II.1/- ThermaCam Researcher .....	49
II.2/- Matlab .....	50
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>53</b>
<b>Références bibliographie.....</b>	<b>54</b>

## *Dédicaces*

*Je remercie avant tout ALLAH le tout puissant qui m'a donné les capacités physiques et intellectuelles nécessaires à la réalisation de ce projet de fin d'études.*

*Je dédie ce travail à :*

### *A ma chère mère Rahima*

*En lui exprimant mon amour, mon respect et ma vive gratitude pour sa patience, son amour et ses prières qui m'ont toujours encouragé à la réussite tout au long de mes études. Que dieu la protège.*

### *A mon père Lakhdar*

*En lui exprimant mon respect .Je lui souhaite une vie plein de santé.*

### *A mes frères Cherif et Khaled et à mes sœurs Amel, Zineb, et Boutheyne*

*Je leur souhaite une belle vie avec mes sincères gratitudes, je les remercie pour leurs sacrifices.*

### *A ma future femme (Inshaa Allah) Amel*

*Je lui souhaite une agréable vie avec mes sincères gratitudes, je la remercie pour son aide et son encouragement.*

*Tous mes chers amis, tous ceux que j'aime et qui me sont très chers.*

*A toute ma grande famille.*

*Hamza*

## Remerciements

*Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères envers Monsieur Moussaoui Abdelkerim, mon enseignant, pour son encadrement, disponibilité, compréhension et pour son aide précieuse.*

*Mes remerciements aussi à Monsieur Ziari Slimane, Chef de laboratoire de l'URASM pour sa disponibilité et son aide dans l'élaboration du projet.*

*J'adresse aussi ma reconnaissance à tous ceux qui j'ai apporté leur aide précieuse qui sont (Mr Laib Yazid, Mr Boudiaf Adel, Mme Ben Salem).*

*Je remercie le président et membres du jury pour bien vouloir évaluer notre travail.*

# Introduction Générale

## 1.1 Contexte et Objectifs

Les systèmes industriels se complexifient avec l'automatisation des processus. Malgré cette complexité, ils doivent assurer les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus et notamment la sûreté de leur fonctionnement. Cela signifie assurer la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité.

L'AFNOR (Association Française de Normalisation) définit la fiabilité comme l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée. La maintenabilité est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits. La disponibilité correspond à l'aptitude à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné. Quant à la sécurité, c'est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

Un système industriel qui a un fonctionnement sûr doit pouvoir fonctionner sans causer de dommages pour et autour de lui. Améliorer leurs performances en termes de sûreté de fonctionnement conduit alors à l'élaboration de systèmes de surveillance.

Un système de surveillance réalise trois tâches consécutives : la détection, l'isolation et l'identification. La détection consiste à indiquer si le système fonctionne correctement ou si un défaut est survenu. L'isolation vise à déterminer la partie défectueuse du système. L'identification consiste en la détermination du type de défaut afin de mettre en œuvre le type de maintenance (corrective ou préventive) approprié au défaut.

La nécessité du diagnostic de défauts pour les systèmes industriels a conduit au développement de nouvelles techniques. Parmi ces nouvelles techniques développées, l'automatique industrielle introduit les notions d'observation des systèmes.

Dans un but de commande (par exemple commande par retour d'état dynamique ou statique), l'on peut avoir besoin de l'intégralité de l'état. Cependant, pour des raisons

techniques (exemple flux de la machine asynchrone) ou économiques (coût des capteurs), cela ne peut pas toujours se faire. Ainsi, sont alors utilisées des techniques d'observation du système considéré qui consistent en l'estimation des grandeurs non mesurées de ce système à partir des grandeurs mesurées.

Un observateur est un système auxiliaire qui permet d'estimer de façon dynamique l'état. Dans la majorité des cas un observateur est utilisé dans un but de commande. Il peut aussi être utilisé dans le domaine de la détection et de l'isolation de défauts, ou encore pour filtrer des mesures bruitées.

Les techniques de synthèse d'observateurs diffèrent suivant les classes des systèmes auxquels ces observateurs sont associés. Les observateurs peuvent être de type discret, linéaire ou non linéaire. Leurs applications sont tout aussi multiples : elles vont de l'électrotechnique à la robotique en passant par la biologie.

L'objectif souhaité est de diagnostiquer les défauts indépendamment des perturbations. Nous définissons tout d'abord une stratégie robuste de diagnostic. Cette stratégie repose sur le découplage des défauts et des perturbations. Une transformation sera donc appliquée aux équations du système. Elle permet de découpler défauts et perturbations. Grâce à cette dernière, le diagnostic sera rendu aussi robuste que possible vis-à-vis des perturbations et aussi sensible que possible vis-à-vis des défauts.

Par la suite, des observateurs seront synthétisés pour le système découplé. Les observateurs serviront d'une part à la commande mais aussi au diagnostic. Ils devront donc être sensibles aux défauts pour le diagnostic tout en étant robustes pour la commande. C'est sur l'étude de ce paradoxe "Robustesse-Sensibilité" que reposent les travaux développés dans cette thèse. En outre, cette étude se fera avec la contrainte suivante : pas de capteurs supplémentaires autre que ceux existants pour la commande. Nous validons ensuite la stratégie définie pour le diagnostic et la commande à l'aide d'observateurs. Cette validation consiste en l'application de la stratégie à travers des simulations sur différents types de machines électriques avant une future mise en oeuvre expérimentale.

" The process of scientific discovery is, in effect, a continual flight from wonder." -  
Albert Einstein

# Chapitre I

## Diagnostic de Systèmes

Depuis longtemps, l'intérêt des scientifiques s'est porté sur le diagnostic des systèmes industriels. Plusieurs raisons peuvent expliquer l'intérêt de la communauté automatique pour le diagnostic des systèmes. Il est évident qu'un système défaillant aura des conséquences lourdes pour la production industrielle voire encore plus lourdes pour l'Homme comme pour l'Environnement. L'on peut citer en exemples les catastrophes industrielles de Bhopal, le 3 décembre 1984 ou Tchernobyl, le 26 avril 1986.

Parce qu'un petit défaut peut avoir de grandes conséquences, le diagnostic des systèmes industriels est nécessaire !

Parce que les conséquences de ces dégâts peuvent affecter indifféremment non seulement l'Environnement mais aussi et surtout l'Homme, et ce, à court, moyen ou long terme, la supervision des systèmes industriels est nécessaire !

Dans ce chapitre, nous rappelons quelques définitions concernant la supervision et le diagnostic. Puis nous énonçons le principe du diagnostic des systèmes et nous décrivons brièvement certaines méthodes appliquées à la détection et l'isolation de défauts.

"L'homme et sa sécurité doivent constituer la première préoccupation de toute aventure technologique ." - Albert Einstein

### I - Introduction

La complexité croissante des systèmes industriels, leur utilisation de plus en plus fréquente rendent nécessaire le diagnostic des défauts pouvant affecter le fonctionnement normal de ces mêmes systèmes.

Le diagnostic d'un système matériel désigne toute méthode permettant de déterminer si ce système est affecté par un défaut quelconque et de discriminer l'origine du défaut. Le diagnostic des systèmes s'effectue grâce à des algorithmes de détection utilisant les informations relevées par observation, contrôles et tests.

L'intérêt porté au diagnostic des systèmes date du début des années 70. Beard (1971) et Jones (1973) ont été les pionniers dans le domaine du diagnostic : ils ont posé les jalons du diagnostic et défini la problématique du diagnostic des systèmes par observateur. Les premières applications de ces travaux sur le diagnostic concernaient principalement les industries aéronautique, aérospatiale et chimique.

La raison d'exister du diagnostic est la défaillance. La finalité du diagnostic n'est autre que la nécessité de systèmes efficaces et sûrs, autrement dit plus fiables et robustes face aux défaillances. La défaillance est définie comme étant "le résultat d'un mécanisme pathologique rationnel et explicable, dû à une ou plusieurs causes à identifier".

Les méthodes développées jusqu'alors pour le diagnostic des systèmes industriels concernent le diagnostic des systèmes linéaires [69, 70]. Cependant, la majorité des systèmes présents dans l'industrie sont non linéaires. Il n'existe pas de méthodes générales systématiques pour le diagnostic de tels systèmes. Les méthodes développées pour le diagnostic des systèmes non linéaires reposent le plus souvent sur une connaissance du comportement du système non linéaire en question.

Les nombreuses méthodes proposées au fil des années et des recherches peuvent être classées selon qu'elles sont basées ou non sur la connaissance du modèle mathématique du système à diagnostiquer.

Les approches floues, à base de réseaux de neurones ou par analyse stochastique des signaux ne sont pas considérées comme des approches basées sur le modèle. Les approches basées sur le modèle comprennent entre autres, les équations de parité, l'identification paramétrique et les observateurs.

Nous rappelons dans la suite du chapitre, quelques définitions concernant la terminologie du diagnostic et des défauts. Nous expliquons, ensuite, le principe du diagnostic des systèmes de part les différentes étapes qui le composent.

## II - Quelques Définitions

De manière générale, un système industriel est composé de trois parties :

- les actionneurs,
- le procédé,
- les capteurs.

Les défauts peuvent survenir sur chacune de ces trois parties.

Selon le Comité Technique de l'International Federation of Automatic Control (IFAC) Safeprocess, un défaut est une déviation non permise d'au moins une propriété ou un paramètre caractéristique du système par rapport à un comportement usuel, nominal ou acceptable.

Le diagnostic de défaut consiste donc en la détermination du type, de l'amplitude, de la localisation et de l'instant d'occurrence  $t_d$  d'un défaut. Il comprend trois étapes successives :

- la détection du défaut,
- l'isolation du défaut,
- l'identification du défaut.

La surveillance et la supervision constituent un complément du diagnostic. La surveillance d'un système est une tâche continue et en temps réel pour déterminer l'état d'un système. Elle se fait à travers l'enregistrement des informations pouvant indiquer la survenue d'éventuelles anomalies dans le comportement du système. Quant à la supervision, elle consiste en la prise de décisions appropriées, lors de l'étape de surveillance du système, afin de maintenir le fonctionnement nominal du système malgré l'apparition de défauts.

L'ensemble de ces tâches vise à assurer les performances optimales du système, en termes de disponibilité, fiabilité et maintenabilité. Cela équivaut à prévenir la survenue de pannes. Une panne est un dysfonctionnement voire une défaillance autrement dit un arrêt de fonctionnement momentané et accidentel, d'une partie ou de tous les composants d'un système matériel.

Il est opportun, lors du diagnostic d'un système, de différencier défaut et perturbation. Une perturbation est une entrée inconnue et non commandée qui agit sur un système. Contrairement au défaut, qui est interne au système, une perturbation est une entrée exogène au système.

### II-1 Caractérisation de défauts

Les défauts peuvent être caractérisés d'une part, selon leur comportement dans le temps et d'autre part selon leur modélisation mathématique. Ainsi, ils peuvent être brusques, intermittents ou graduels, additifs ou multiplicatifs comme l'illustre la figure 2.1.

### Défaut brusque

Ce type de défaut apparaît à un instant  $t_d$  et est d'une amplitude constante non nulle. Un défaut de ce type représente des pannes brutales.

### Défaut intermittent

Un défaut intermittent est un cas particulier de défaut brusque. Il s'agit d'un défaut imprévisible. Par conséquent, le caractère aléatoire de ce défaut le rend difficile à détecter. Il peut représenter des défauts de connexion, d'alimentation voire de faux contacts.

### Défaut à dérive lente

Un défaut de type graduel apparaît à un instant  $t_d$ . Cependant, contrairement au défaut brusque, l'amplitude de ce type de défaut ne reste pas constante. Elle augmente proportionnellement avec le temps.

Ce type de défaut caractérise généralement des défauts d'usure.

Chaque type de défaut rappelé ci-dessus peut se modéliser sous la forme soit d'un défaut additif, soit d'un défaut multiplicatif.

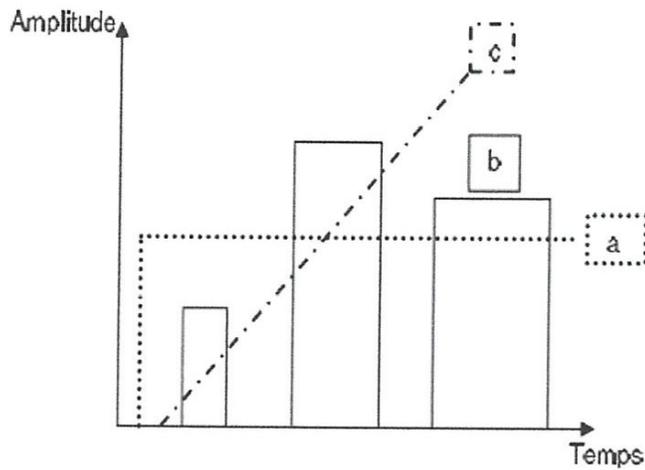
### Modélisation du défaut : défaut additif ou multiplicatif :

Deux modèles mathématiques sont utilisés selon l'effet du défaut sur le système.

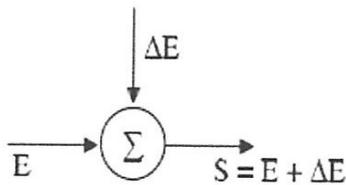
Un défaut est dit additif quand il est modélisé par l'ajout d'une variable  $\delta E$ . Quant au défaut multiplicatif, il affecte un système à travers la multiplication de l'entrée  $E$  du système par un défaut  $\delta x$ .

Un défaut  $\delta x$  affecte une variable  $x$  du système. L'équation de sortie  $S = Ex$  est alors modifiée et en présence du défaut  $\delta x$ , elle s'écrit  $S = E(x + \delta x)$ .

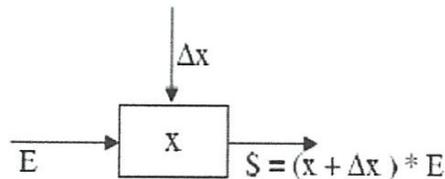
La figure 2.1 récapitule les types de défauts ainsi que leurs possibles modélisations.



a) défaut brusque ; b) défaut intermittent ; c) défaut à dérive lente ou graduel



d) défaut additif



e) défaut multiplicatif

## II-2 Principe du diagnostic : Détection et Isolation des défauts

Associé à l'origine aux Sciences de la Santé, le terme diagnostic désigne, dans le domaine des Sciences de l'Ingénieur, l'analyse des mauvais fonctionnements, défauts ou défaillances d'un système afin d'en déterminer la nature et la cause.

Le diagnostic de défauts passe, en ce sens, par deux étapes fondamentales, la détection et l'isolation des défauts. La première consiste en la génération d'un signal indiquant l'occurrence d'un défaut. Ce signal, communément appelé résidu, une fois généré, est utilisé pour détecter puis isoler le défaut lors de la seconde étape. Les algorithmes qui aident à la réalisation de ces deux tâches portent le nom d'algorithmes FDI (Fault Detection and Isolation)

Une dernière étape succède à celle de détection et d'isolation. Il s'agit de l'identification du défaut en vue du type de maintenance à mettre en place. Il est alors possible d'implémenter les méthodes pour diagnostic de défauts sur le système soit en exploitation soit hors ligne, selon le type de maintenance, corrective ou préventive, mise en place.

L'identification permettra en outre la mise en place de procédures tolérantes aux défauts telles que la reconfiguration de la commande.

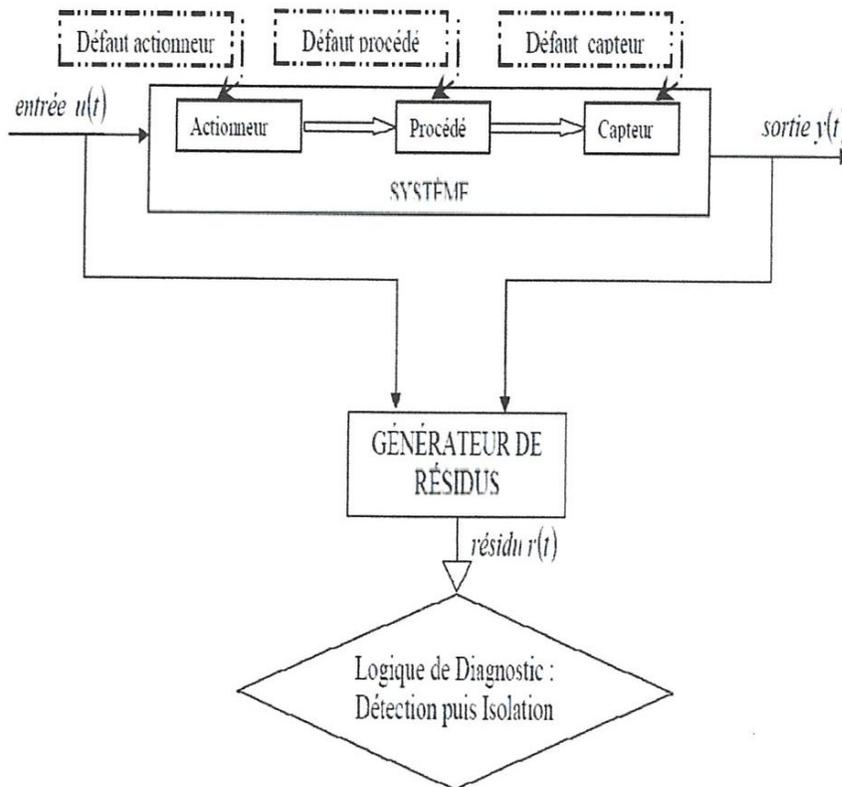


Fig. 2.2: Principe du diagnostic.

La logique de diagnostic (Fig 2.3) consiste en une prise de décisions résultant directement de l'évaluation des résidus  $r(t)$ . Des résidus nuls indiquent que le système fonctionne normalement. Il s'agira donc de poursuivre la tâche de surveillance du système en temps continu.

Des résidus non nuls indiquent un mauvais fonctionnement du système. Il s'agira alors d'en comprendre les raisons à travers les étapes de détection et d'isolation qui composent le diagnostic.

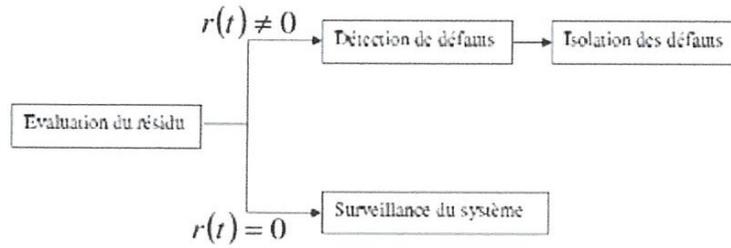


FIG. 2.3: Logique de Diagnostic.

### II.2.1 Détection de défauts - Problème Fondamental de la Génération de Résidus

La première étape du diagnostic consiste en la détection de défauts. Cette phase de détection est rendue possible par la génération de signaux, les résidus. Un résidu est un signal généré à partir des informations fournies par le système à diagnostiquer (Fig. 2.2), notifiant de l'éventuelle occurrence d'un défaut sur le système.

De manière générale, un résidu correspond à la différence entre la sortie mesurée et la sortie observée. En supposant que l'erreur d'estimation converge pour un système sans défaut, dans le cas d'un système avec défaut, cette même erreur d'estimation serait non nulle.

L'amplitude du signal résidu obtenu en sortie du générateur indique donc l'occurrence ou non d'un défaut. En effet, si le résidu est d'une amplitude non nulle, un défaut est apparu sinon aucun défaut n'affecte le système (Fig. 2.4).

La détection de défauts est donc basée sur l'évaluation des différents résidus générés. Ces résidus peuvent être générés suivant plusieurs méthodes : stochastiques ou déterministes, basées sur le modèle mathématique ou sur la connaissance du comportement du système

### DéTECTABILITÉ des défauts:

Un défaut est détectable si, et seulement si, il a un effet sur au moins une des sorties du système.

Remarque 2.1 Cette définition est différente de la détectabilité au sens de l'automatique

### DéCOUPLAGE défauts-perturbations

Le découplage des défauts et des perturbations peut se faire à l'aide d'une transformation. Cette transformation, appliquée à un système avec des défauts et des perturbations, vise à séparer ce système en deux sous-systèmes, l'un des deux étant sensible aux défauts et insensible aux perturbations.

Différentes méthodes de découplage ont été développées suivant le modèle du système non linéaire considéré .

Cependant, pour un système réel/physique donné, le découplage parfait des défauts et des perturbations est peu plausible. Dans la réalité, pour des systèmes industriels non linéaires, un tel découplage est, en pratique, difficile à mettre en œuvre.

### Prise de décision : évaluation des résidus

Cette étape consiste en l'analyse de l'information fournie par les résidus. Elle fait suite à l'étape de génération de résidus. En effet, dans le cas de défauts multiples, afin de faciliter l'isolation des défauts, la génération de résidus a pour but de construire des résidus structurés.

Des résidus structurés sont définis comme des résidus sensibles à un unique défaut et insensibles aux autres. Ces résidus sont générés suivant une table de signature, comme suit

	Défaut $d_1$	Défaut $d_2$	Défaut $d_3$	...	Défaut $d_j$
Résidu $r_1$	1	0	0	...	0
Résidu $r_2$	0	1	0	...	0
Résidu $r_3$	0	0	1	...	0
...	...	...	...	...	...
Résidu $r_j$	0	0	0	...	1

Tab. 2.1: Table de signature pour le cas de défauts multiples.

Ainsi, un résidu non nul informe de l'occurrence du défaut auquel il est sensible.

### II.2.2 Isolation de défauts

L'isolation de défauts fait suite à la détection de défauts. Ces deux étapes consécutives constituent le diagnostic des systèmes. Si la détection de défauts est la génération de résidus grâce auxquels les défauts pourront être détectés, l'isolation, quant à elle, permet de caractériser ces défauts, d'en définir le type et surtout de les localiser.

L'isolation de défauts introduit la question de leur isolabilité.

Isolabilité :

Des défauts seront isolables si, à partir des signaux de mesure et de commande, il est possible de les discriminer et de les distinguer. Cela revient à spécifier, pour chaque défaut précédemment détecté, l'amplitude et l'instant d'apparition.

Après la localisation et la caractérisation des défauts vient l'étape de prise de décision.

### II.2.3 Procédures Post-Diagnostic

Cette étape correspond à l'analyse des options qui s'offrent à l'issue du diagnostic de défauts et à leur mise en œuvre.

Ainsi, suite à la détection puis à l'isolation de défauts, cela revient à choisir entre :

- arrêter le système et faire de la maintenance, corrective ou préventive,
- garder le système en fonctionnement mais réévaluer l'objectif assigné au système : passer d'un fonctionnement en mode normal à un fonctionnement en mode dégradé,
- reconfigurer le système : réorganiser le système afin de prendre en compte le défaut constaté ; redéfinir par exemple la structure des lois de commande.

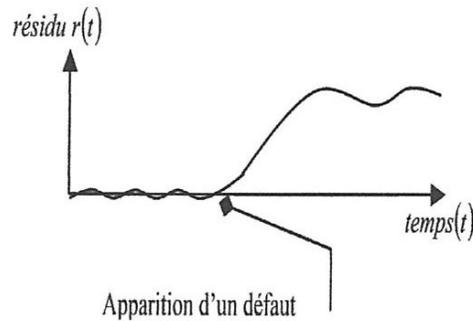


Fig. 2.4: Allure du signal résidu

De nombreuses méthodes ont été développées pour la génération de résidus [30, 37, 38, 41, 51, 52]. Elles sont regroupées généralement sous deux catégories :

- les méthodes basées sur une connaissance du comportement du système,
- les méthodes basées sur le modèle mathématique du système.

Nous ne présentons que le deuxième type de méthodes dans ce mémoire.

### III - Robustesse et Performance d'un algorithme FDI

Un algorithme FDI sera dit robuste si la méthode utilisée pour générer les résidus tient compte des incertitudes de modèle.

En effet, de manière générale, le modèle mathématique d'un système, bien qu'étant précis dans la formulation et l'écriture des équations, ne décrit pas toujours le fonctionnement réel du système. Dans la réalité, d'autres paramètres peuvent intervenir. Des bruits de mesure, des incertitudes paramétriques et/ou une méconnaissance de la structure des perturbations peuvent engendrer, lors de la détection des défauts, des fausses alarmes ou des non détections.

Une fausse alarme correspond à la détection de "faux" défauts, autrement dit, des défauts qui n'en sont pas. Une non détection correspond à la non détection de "vrais" défauts, autrement dit des défauts qui affectent réellement le système.

L'une et l'autre sont à éviter dans le sens où elles peuvent entraîner une prise de décision inadéquate. A cause d'une fausse alarme, un défaut, qui n'en est pas un, sera traité en tant que tel avec tout ce que cela implique en termes de sûreté de fonctionnement.

A cause d'une non détection, un défaut qui ne sera pas traité pourrait entraîner des défauts plus graves et mener à un mauvais fonctionnement du système, des défaillances, voire à des pannes et donc à son arrêt complet.

La performance d'un algorithme FDI est donc quantifiée selon son pourcentage de fausses alarmes et de non détections.

Un algorithme de détection de défauts sera performant si les probabilités des fausses alarmes et de mauvaises détections sont toutes deux les plus petites possible.

Le compromis réside dans le choix du seuil de détection de défauts. En effet, le seuil de détection devra être choisi de telle sorte que l'on puisse détecter même les défauts les plus faibles tout en évitant de confondre les perturbations et les bruits de mesure avec des défauts à détecter.

### IV - Conclusion

Nous avons rappelé dans ce chapitre quelques définitions concernant le diagnostic de défauts. Le diagnostic de défauts est constitué de deux étapes consécutives, la détection suivie de l'isolation de défauts. Il est nécessaire que les défauts soient, au préalable, détectables puis isolables afin de les diagnostiquer.

Des signaux sont générés afin de permettre la détection des défauts. Les différentes méthodes pour la génération des résidus utilisent la redondance analytique. Elles se basent sur le modèle d'état du système et comparent les variables estimées à partir de ce modèle avec celles mesurées. Les résidus sont donc fonction des sorties estimées et des sorties mesurées.

Si on associe à l'observation d'une même scène un système radiométrique de captation spatiale adjoint à un calculateur qui à la fois convertit les rayonnements infrarouges en points lumineux et en températures, on obtient une caméra infrarouge. Cet équipement permet de visualiser et de quantifier les températures d'une scène thermique : cette technique est appelée "**Thermographie infrarouge**". Et ça ce qu'on va voir dans le chapitre suivant.

**Chapitre II -  
Thermographie  
Infrarouge**

### I. Introduction

#### I.1 Notions de température :

La température d'un corps est une grandeur physique qui caractérise le niveau énergétique de ce corps : celle-ci s'exprime en degrés Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) ou en Kelvin (K). L'échelle en Kelvin est référencée au zéro absolu qui vaut  $-273,15^{\circ}\text{C}$  : à cette température, tout corps a une valeur énergétique nulle.

#### I.2 Mesure de température & Thermographie infrarouge :

La température se mesure à l'aide de thermomètres, par contact ou par rayonnement. La mesure par contact nécessite comme l'indique la définition, un contact entre l'élément dont on veut mesurer la température et l'appareil de mesure. La mesure au moyen de thermomètres à rayonnement ne nécessite aucun contact : ces appareils mesurent des rayonnements émis par tout corps dont la  $T^{\circ}$  est supérieure à  $-273,15^{\circ}\text{C}$  ou zéro K : ces rayonnements ont des longueurs d'onde qui se situent dans l'infrarouge et sont proportionnels à la température des corps. Un calculateur intégré au thermomètre convertit les rayonnements en températures sur base d'un étalonnage référentiel spécifique réalisé en laboratoire.

Le thermomètre à rayonnement se compose en fait d'un radiomètre et d'un calculateur : Le radiomètre mesure la puissance de rayonnement émis et le calculateur la transcrit en températures.

Pour les hautes températures, on parle de pyromètres.

Si on associe à l'observation d'une même scène thermique un système radiométrique de captation spatiale adjoint à un calculateur qui à la fois convertit les rayonnements infrarouges en points lumineux et en températures, on obtient une caméra infrarouge. Cet équipement permet de visualiser et de quantifier les températures d'une scène thermique : cette technique est appelée "**Thermographie infrarouge**".

Il existe deux systèmes de captation spatiale des radiations électromagnétiques :

##### ■ Le système à balayage spatial :

Le radiomètre (détecteur unique) est couplé à un dispositif optomécanique 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.

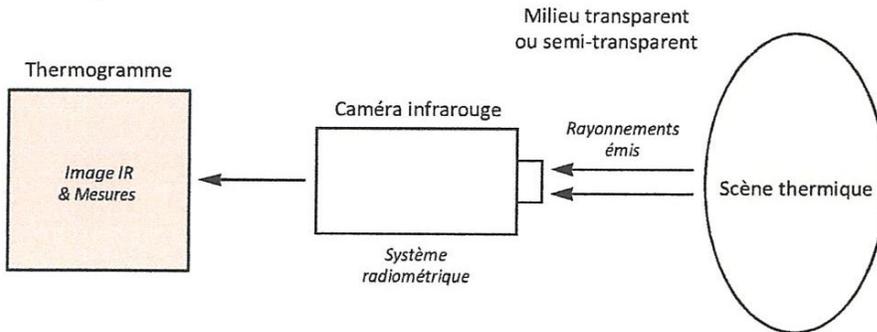
##### ■ Le système à plan focal :

Celui-ci est constitué par une multitude de radiomètres 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.

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge

### I.3 La caméra infrarouge :

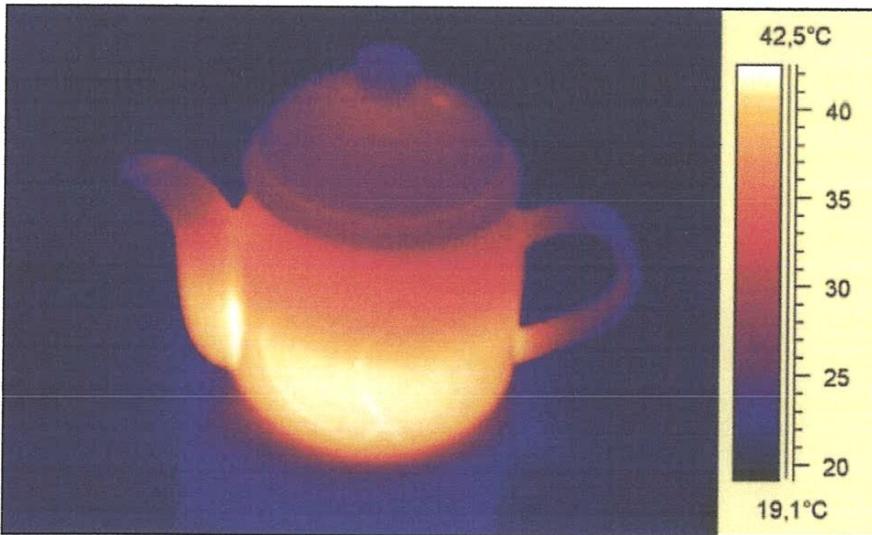
#### > Principe :



#### > Fonctionnement :

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 "Thermogramme".

#### Exemple de thermogramme



La théière contient encore du thé à 50% de sa capacité.

Ce thé est toujours chaud : il émet du rayonnement infrarouge qui chauffe la porcelaine. La théière rayonne à son tour : cette émission est directement influencée par la source de chaleur initiale. La caméra infrarouge mesure tous les rayonnements émis par la surface du récipient et les restitue sous forme de thermogramme : cette image thermique est composée par des niveaux de couleur ou de gris (thermogramme N&B), lesquels sont en corrélation avec les niveaux de  $T^{\circ}$  mesurés (échelle des températures).

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge

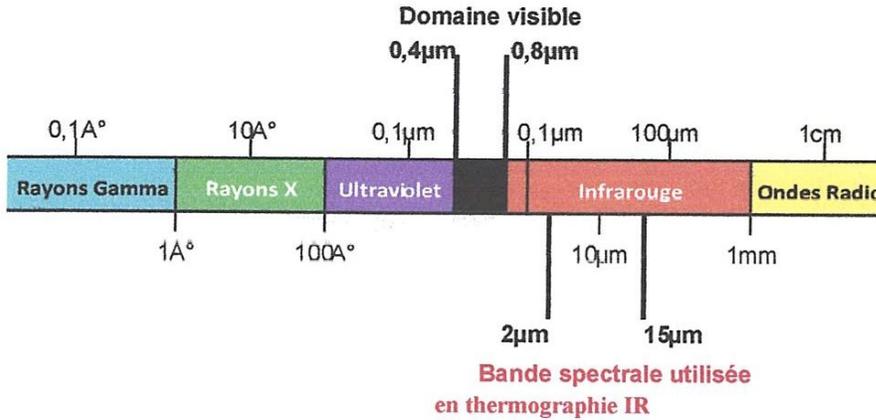
Dans ce cas, le thermogramme nous indique le niveau de thé restant ainsi que sa situation thermique avant consommation...

### II. Lois du rayonnement infrarouge

#### II.1.1 Le spectre électromagnétique :

La lumière visible, les ondes radio, TV, les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques :

Le spectre électromagnétique



Le domaine visible s'étend des longueurs d'onde allant de  $0,4$  à  $0,8 \mu\text{m}$  (micromètres). La bande infrarouge s'étend de  $0,8$  à  $1000 \mu\text{m}$  : celle-ci peut-être divisée en plusieurs

sections :

- l'infrarouge proche :  $0,8$  à  $3 \mu\text{m}$ ;
- l'infrarouge moyen :  $3$  à  $6 \mu\text{m}$ ;
- l'infrarouge éloigné :  $6$  à  $15 \mu\text{m}$ ;
- l'infrarouge lointain :  $15$  à  $1000 \mu\text{m}$ .

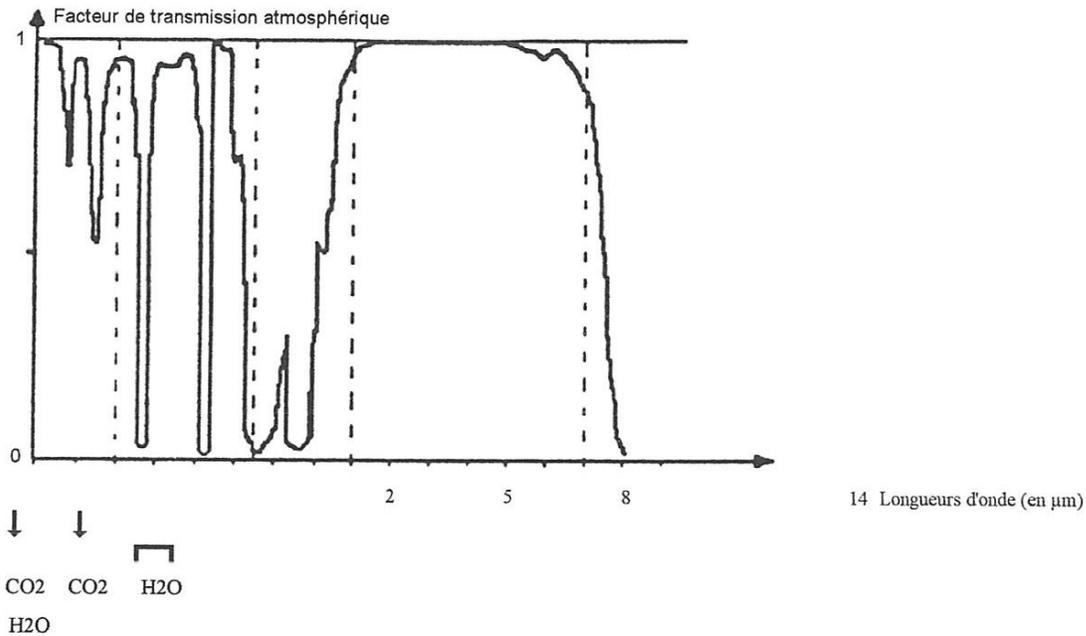
#### II.1.2 Bandes spectrales utilisées en thermographie infrarouge :

En thermographie infrarouge, on travaille généralement dans une bande spectrale qui s'étend de  $2$  à  $15 \mu\text{m}$  et plus particulièrement dans les fenêtres  $2-5 \mu\text{m}$  et  $7-15 \mu\text{m}$ . Il faut savoir que classiquement, les applications de la thermographie infrarouge s'effectuent dans un milieu ambiant naturel ou atmosphère naturelle : celle-ci constitue un milieu semi transparent ou "hublot" entre les rayonnements émis par un corps quelconque dont on veut mesurer la température et la caméra thermique. Ce milieu transmet donc en partie le rayonnement émis par une scène thermique.

Pour optimiser la qualité d'imagerie et de mesures thermiques, il faut que la transmission des rayonnements infrarouges soit optimale. Dans ce contexte, les fabricants de matériel infrarouge

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge

ont analysé la transmission atmosphérique des ondes infrarouges et ont relevé 2 bandes spécifiques où la transmission est maximale mais non optimale (transmission inférieure à 100%) :



- La bande 2-5 µm appelée Ondes courtes (SW, Short Waves).
- La bande 7-15 µm appelée Ondes longues (LW, Long Waves).

C'est principalement la vapeur d'eau et le gaz carbonique contenus à l'état gazeux dans l'atmosphère naturelle qui atténuent les rayonnements.

### > Remarque :

Dans le cas de mesures infrarouges réalisées dans des milieux particuliers (gaz spécifiques, ...), il faut en étudier la transmission afin d'adapter au mieux le matériel de mesure : celui-ci ne sera plus classique mais bien spécifique.

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge

### II.2 Etudes théoriques et référentielles :

#### > Le corps noir : radiateur idéal :

Le corps noir est le corps de référence dans la théorie du rayonnement infrarouge : celui-ci est capable d'absorber 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 : **le corps noir est un radiateur idéal.**

Trois lois définissent le rayonnement d'un corps noir :

- la loi de Plank;
- la loi de Wien;
- la loi de Stefan-Boltzman.

#### a) Loi de Plank :

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

On a :

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

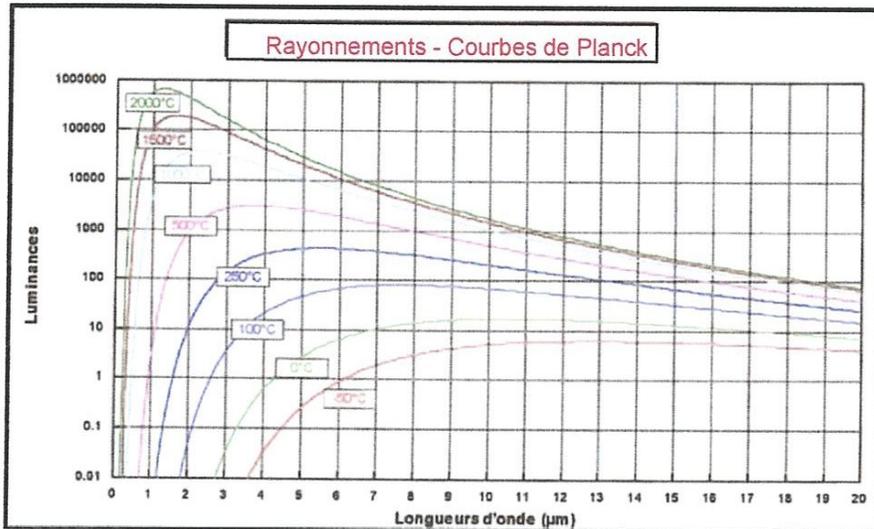
avec : •  $\lambda$  Longueur d'onde;

- $W_{\lambda}$  Flux de puissance émis par un corps noir à la longueur d'onde;
- $c$  Vitesse de la lumière =  $3 \cdot 10^{10}$  cm/s;
- $h$  Constante de Plank =  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Watt.s<sup>2</sup>;
- $k$  Constante de Boltzman =  $1,4 \cdot 10^{-23}$  Watt.s<sup>2</sup>/°K;
- $T$  Température absolue du corps noir en Kelvin.

Ces formulations mathématiques complexes sont représentées par les courbes ci-dessous.

Les longueurs d'ondes sont exprimées en micromètres et les puissances de rayonnement sont exprimées en luminances (NB : l'échelle des luminances est logarithmique).

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge



Par ce graphe, nous constatons que :

- Le spectre d'émission du corps noir est continu.
- La puissance électromagnétique émise croît avec la température du corps noir.
- L'émission de rayonnement passe par un maxima : ce maxima se produit à des longueurs d'onde de plus en plus faibles lorsque la température du corps noir croît.
- A partir d'une température de l'ordre de 520°C, l'émission du rayonnement infrarouge apparaît dans le domaine spectral visible (0,4-0,8µm) : les objets chauffés au moins à cette température deviennent donc visibles par l'œil humain de par la couleur rouge sombre.

En-dessous de cette température, nous ne "voyons" pas les températures car l'émission de rayonnement se fait au-delà de la bande spectrale sur laquelle sont calibrés nos yeux. Dès lors, pour visualiser des corps dont la  $T^{\circ}$  est inférieure à 520°C, il faut utiliser des appareils dont le seuil de détection est inférieur à celui de l'œil humain. **b)**

### b) La loi de Wien :

Par dérivation de la loi de Planck, on obtient la loi de Wien.

On a :

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} (\mu\text{m})$$

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

### c) La loi de Stefan-Boltzmann :

Par intégration de la loi de Planck, on obtient la loi de Stefan-Boltzmann. Celle-ci détermine le flux de puissance total émis par un corps noir.

On a :

$$W = \sigma \cdot T^4 (\text{Watts/cm}^2)$$

- avec :
- $\sigma$  Constante de Stefan-Boltzmann =  $5,7 \cdot 10^{-12}$  (Watts/cm<sup>2</sup>/°K<sup>4</sup>);
  - T Température absolue du corps noir en Kelvin.

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge

Le flux de puissance total émis par un corps noir est proportionnel à la quatrième puissance de sa température absolue.

Pour information, le flux de puissance émis par le soleil dans le spectre visible n'est que de 25% du flux total.

### II.3 Etudes pratiques :

#### > Les corps noirs et les corps réels :

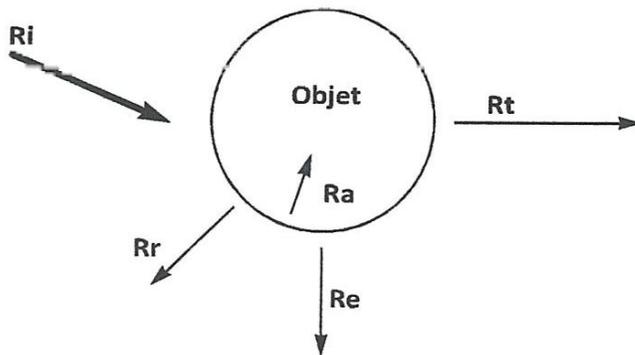
Le corps noir est un corps parfait au sens physique : il émet un maximum de puissance de rayonnement à une température donnée. La réalité est toute autre : en effet les corps réels rencontrés dans notre environnement ne sont généralement pas des radiateurs idéaux. L'objet réel émet toujours moins de rayonnement que le corps noir, quelle que soit la température ou la longueur d'onde. Ainsi, les lois que nous avons décrites ne sont applicables qu'avec certaines corrections.

#### > Bilan radiatif du corps noir et du corps réel :

##### 1) Cas général :

On considère un objet placé dans le vide (ceci annule la prise en compte d'autres modes de transfert d'énergie tels que la convection et la conduction; dans notre cas, on s'intéresse exclusivement au transfert d'énergie par rayonnement).

- avec :
- $R_i$  Rayonnement incident en provenance d'un autre élément;
  - $R_a$  Rayonnement absorbé par l'objet;
  - $R_t$  Rayonnement transmis par l'objet;
  - $R_e$  Rayonnement émis par l'objet;
  - $R_r$  Rayonnement réfléchi par l'objet.



**NB :** Tous ces facteurs sont sélectifs : leurs grandeurs varient en fonction de la longueur d'onde du rayonnement.

#### > Explications :

- a) L'objet reçoit du rayonnement incident  $R_i$  en provenance d'une source quelconque.
- b)  $R_i$  est directement restituée en partie au milieu extérieur par réflexion : c'est le rayonnement réfléchi  $R_r$ .
- c) L'objet absorbe une partie de  $R_i$  : c'est le rayonnement absorbé  $R_a$ .  
Cette énergie absorbée chauffe donc l'objet jusqu'à obtenir un équilibre thermodynamique avec le milieu extérieur : l'objet finit alors par émettre autant de puissance qu'il n'en absorbe.  
Le rayonnement absorbé est donc égal au rayonnement émis :  $R_a = R_e$ .
- d) L'objet transmet une partie de  $R_i$  : c'est le rayonnement transmis  $R_t$ .

#### > Bilan des rayonnements :

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge

$$R_i = R_r + R_a + R_t \quad \text{avec } R_a = R_e$$

donc

$$R_i = R_r + R_e + R_t$$

ou

$$1 = \{R_r / R_i\} + \{R_e / R_i\} + \{R_t / R_i\}$$

avec  $\{R_r / R_i\}$  Facteur de réflexion "r";  
 $\{R_e / R_i\}$  Facteur d'émission (ou émissivité) "ε";  $\{R_t / R_i\}$  Facteur de transmission "t";

ainsi

$$1 = r + \varepsilon + t$$

Cette formulation est le cas général ou l'équation de base du bilan radiatif.

### 2) Cas du corps noir référentiel :

Le corps noir, comme nous l'avons défini ci-dessus, est un radiateur idéal : il absorbe intégralement tous les rayonnements incidents et les restitue complètement au milieu environnant :

- Le facteur de réflexion est nul :  $r = 0$
- Le facteur de transmission est nul :  $t = 0$

- L'émission est maximale

$$\varepsilon = 1$$

### 3) Cas du corps réel :

#### 3.1) Cas général :

En thermographie infrarouge classique, on s'intéresse principalement à la visualisation et à la quantification de  $T^\circ$  de surface de divers objets dits "opaques" aux rayonnements infrarouges captés par la caméra thermique. Le facteur de transmission est nul :  $t = 0$

$$1 = \varepsilon + r$$

#### 3.2) Cas particuliers:

##### a) Le miroir thermique :

Le miroir parfait réfléchit intégralement tous les rayonnements incidents. Le facteur d'absorption ou d'émission est nul :  $\varepsilon = 0$

$$r = 1$$

##### b) Les corps semi-transparents :

Certains "objets" transmettent en partie le rayonnement incident : c'est le cas des gaz (atmosphère par ex.) ou des hublots. Ces corps semi-transparents sont des milieux de propagation des rayonnements IR que l'on retrouve généralement entre l'objet opaque sur lequel on désire réaliser une mesure de température et la caméra thermique.

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge

Pour les gaz, le facteur de réflexion est nul :  $r = 0$

$$\varepsilon + t = 1$$

### c) Le corps transparent idéal :

Le vide est le milieu parfaitement transmetteur :

$$t = 1$$

### 4) Remarque importante :

En thermographie infrarouge, l'émission de rayonnement par un corps quelconque est le facteur correctif de mesure essentiel.

Le flux de puissance total émis par un corps réel pourrait s'assimiler à :

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ (Watts/cm}^2\text{)}$$

- Avec :
- $\varepsilon$  Emissivité du corps réel ;
  - $\sigma$  Constante de Stefan-Boltzmann =  $5,7 \cdot 10^{-12}$  (Watts/cm<sup>2</sup>/°K<sup>4</sup>);
  - $T$  Température absolue du corps noir en Kelvin.

Seulement, l'émissivité d'un corps réel n'est pas systématiquement constante dans tout le spectre électromagnétique, ce qui rend aléatoire l'application de la formule de Planck. En thermographie infrarouge on distingue trois types de corps dont l'émissivité respective a un comportement particulier dans le spectre de la lumière :

- le corps noir ;
- le corps gris ;
- le corps sélectif ou radiateur sélectif.

Le corps noir est le radiateur idéal : son émissivité est maximale et constante à toutes les longueurs d'ondes :  $\varepsilon = 1 = \text{Constante}$ .

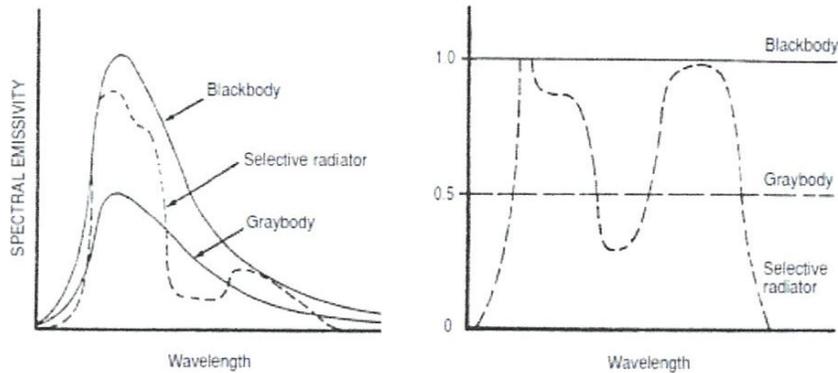
Le corps gris est un objet dont l'émissivité n'est pas maximale mais "constante à toutes les longueurs d'onde" :  $\varepsilon < 1 = \text{Constante}$ .

En thermographie infrarouge classique, on considère que les objets réels sur lesquels on réalise de l'image et de la mesure de T° sont des corps gris.

Cette hypothèse tient compte du fait que les bandes spectrales ou fenêtres infrarouges utilisées par les caméras thermiques sont étroites par rapport au spectre électromagnétique de la lumière.

Le radiateur sélectif est un corps dont l'émissivité n'est pas maximale et varie avec la longueur d'onde :  $\varepsilon < 1 = \text{Variable}$ .

Les figures ci-dessous détaillent graphiquement l'émission spectrale ainsi que les variations d'émissivité des trois types de corps :



### III. Grandeurs d'influence pour la mesure de $T^{\circ}$ par thermographie

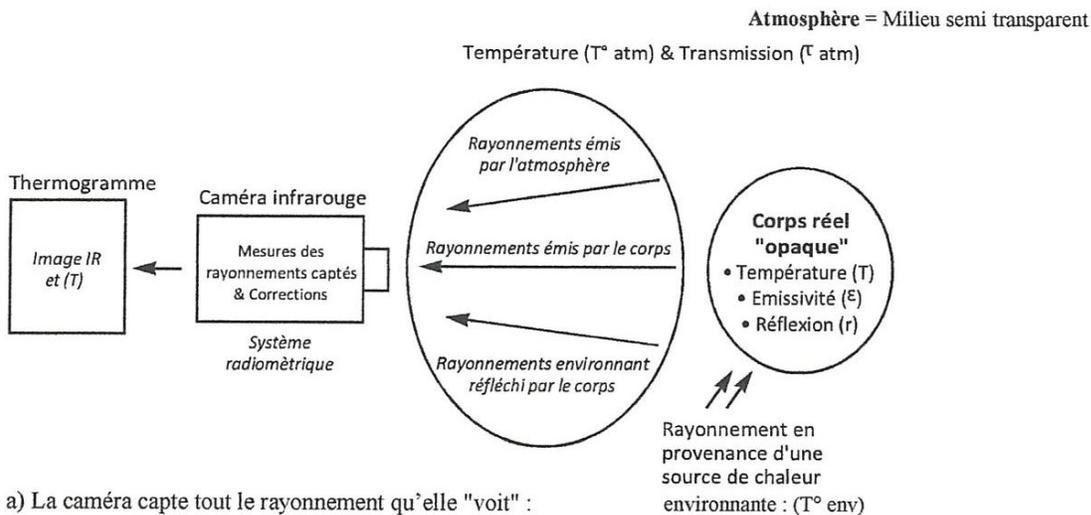
#### Cas général de mesure de $T^{\circ}$ par thermographie IR :

Mesure de la température d'un corps réel "opaque" dans une atmosphère classique à une distance  $d$ .



On a :

Distance de Mesure entre le corps et  
la caméra infrarouge : ( $d$ )



a) La caméra capte tout le rayonnement qu'elle "voit" :

- Une partie du rayonnement émis par l'objet.
- Une partie du rayonnement émis par une source environnante et partiellement réfléchi par l'objet. Chacune de ces fractions est transmise au travers de l'atmosphère, donc atténuée de par la transmission atmosphérique non optimale.
- Le rayonnement émis par l'atmosphère.

b) Le système radiométrique doit corriger le rayonnement capté afin de calculer avec précision la valeur de la température du corps. Cette correction tient compte d'une série de paramètres influant directement la mesure exacte de température. Ces paramètres sont appelés "**Grandeurs d'influence**".

### Le facteur d'émission ou EMISSIVITE $\epsilon$ :

L'émissivité d'un corps représente l'aptitude de ce corps à émettre du rayonnement infrarouge. C'est le rapport entre le flux de puissance émis à une longueur d'onde par un corps réel porté à une température T et le flux de puissance qui serait émis à la longueur d'onde par un corps noir porté à la température T. on a :

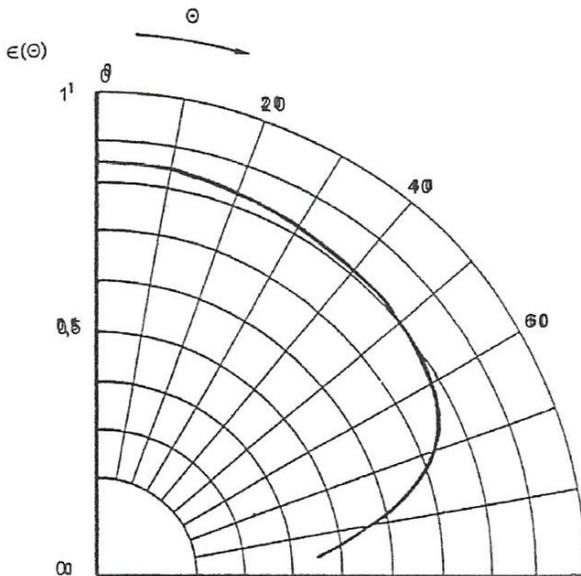
$$\epsilon_{\lambda} = \frac{W_{\lambda}}{W_{\lambda_0}} \text{ (sans unité)}$$

- avec :
- $W_{\lambda}$  Flux de puissance émis par un corps réel à la longueur d'onde  $\lambda$  ;
  - $W_{\lambda_0}$  Flux de puissance émis par un corps noir à la longueur d'onde  $\lambda$ .
- Les corps noir et réel sont à la même température.

#### > Facteurs d'influence de l'émissivité :

- a) Le matériau constituant le corps et son état de surface : plus la surface est rugueuse ou oxydée, plus l'émissivité est élevée.
- b) La longueur d'onde : l'émissivité d'un corps est sélective : comme on travaille dans des bandes spectrales étroites, un objet sélectif peut-être assimilé à un corps gris dont l'émissivité est constante.
- c) La direction de l'émission : l'émission du rayonnement infrarouge varie avec l'angle d'observation d'une même surface d'un corps. L'émissivité reste constante jusqu'à plus ou moins  $50^{\circ}$  par rapport à la normale : au-delà, celle-ci chute fortement.

#### Exemple :



9 0 Emissivité directionnelle du caoutchouc pour la bande de 3 à 5  $\mu\text{m}$

### d) La température du matériau

La variation de l'émissivité est due dans ce cas à la modification de l'état de surface du matériau par la température.

#### > Détermination du facteur d'émissivité :

Nous n'aborderons pas dans ce paragraphe les méthodes de déterminations pratiques de l'émissivité de corps réels du fait de leur complexité.

Il faut savoir que la quantification précise de l'émissivité d'un matériau est une opération particulière qui est généralement réalisée en laboratoire à l'aide de matériel spécifique. Ces mesures spéciales contribuent à l'élaboration d'abaques classiquement utilisés en thermographie infrarouge. On trouve ainsi dans la littérature technique des tables d'émissivités de divers matériaux : celles-ci sont approximatives et peuvent être utilisées, avec précaution, afin de dégrossir les calculs de température.

#### Quelques exemples :

- T est la température en °C à laquelle a été réalisée la mesure.
- "dl" est la longueur d'onde en  $\mu\text{m}$  ou la bande spectrale.
- $\epsilon_n(\text{dl} \& \text{T})$  est l'émissivité normale pour dl et T.

Matériaux	T(°C)	dl ( $\mu\text{m}$ )	$\epsilon_n(\text{dl} \& \text{T})$
Peau	30	2 à 5	0,98
Papier	30	8 à 12	0,95
Bois brut	20	2 à 5	0,83
Argile	30	8 à 12	0,95
Béton	20	2 à 5	0,94
Sol sec	20	2 à 5	0,90
Sol humide	20	2 à 5	0,95
Eau	0 à 100	8 à 12	0,93
Eau	0 à 100	2 à 5	0,95
Glace	< 0	8 à 12	0,95
Peinture mate	20 à 100	2 à 5	0,95
Peinture brillante	20 à 100	2 à 5	0,90
Vêtements (Textile)	30	8 à 12	0,95
Acier oxydé	100	2 à 5	0,74
Acier poli	100	2 à 5	0,07
Acier rouillé	20	2 à 5	0,69
Aluminium en feuille mate	100	2 à 5	0,09
Argent	30	8 à 12	0,02
Carbone graphite	30	8 à 12	0,70/0,80
Cuivre grossier	30	8 à 12	0,05/0,10
Fer galvanisé	30	2 à 5	0,25
Fonte en fusion	1300	2 à 5	0,28
Or etc...	30	8 à 12	0,01/0,10

#### > Comment procède-t-on sur le terrain ?

Le matériel de mesure utilisé, la nature du matériau, les conditions d'analyse et l'expérience de l'opérateur sont les critères principaux dans la détermination à l'aide d'abaques de l'émissivité à utiliser. Si dans certains cas on ne peut déterminer avec précision l'émissivité d'un matériau quelconque, ou

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge

que sa valeur est trop faible pour réaliser une mesure fiable de température, il est alors possible de modifier l'émissivité du matériau en l'augmentant et en lui donnant une valeur connue.

Cette méthode, souvent utilisée en thermographie infrarouge, consiste à recouvrir, lorsque c'est possible, la zone à mesurer par une fine couche d'eau, d'huile ou de peinture mate : ceci modifie l'émissivité de surface à des valeurs de l'ordre de 0,95 dans la bande 3 à 5 $\mu$ m..

### Le facteur de réflexion {r} & la température environnante {T°env}

L'objet réel réfléchit en partie du rayonnement en provenance de sources de chaleur environnantes.

La quantité de rayonnement réfléchi dépend de la quantité d'énergie émise par la source auxiliaire et le coefficient de réflexion de la surface de l'objet.

Dans le cas général de mesure par thermographie, le facteur de réflexion vaut:

$$r = 1 - \epsilon$$

La quantification du rayonnement émis par la source "parasite" est assimilée à celui qui serait émis par un radiateur idéal ou corps noir : on mesure donc à l'aide du même appareil de mesure infrarouge la température de la source environnante en considérant donc son émissivité égale à 1. Cette température appelée température environnante intègre ainsi dans le calculateur de la caméra infrarouge le rayonnement qui se réfléchit partiellement sur la surface de l'objet.

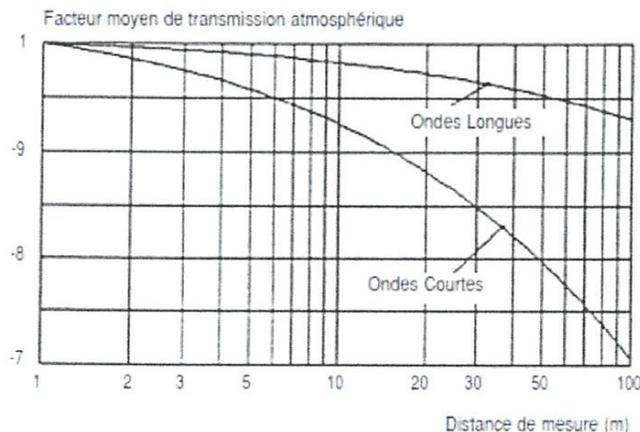
### La température atmosphérique T° {ATM} et la distance de mesure {d}

L'atmosphère dans laquelle on réalise la thermographie émet des rayonnements infrarouges qui perturbent également la mesure de la température d'un corps.

Les rayonnements émis par l'atmosphère doivent être déduits par le calculateur de la caméra thermique : ceux-ci dépendent de la température atmosphérique et de son émission. L'atmosphère est un milieu semi-transparent aux rayonnements infrarouges : celle-ci propage tous les rayonnements en provenance de l'objet réel (émis & réfléchis).

Cette propagation n'est pas optimale et est régie par le facteur moyen de transmission atmosphérique.

Ce facteur, assimilé aux fenêtres spectrales utilisées par les caméras thermiques, dépend de la distance de mesure entre la caméra et l'objet et du taux d'humidité atmosphérique.



Facteur moyen de transmission

Courbes du facteur moyen de transmission de l'atmosphère en fonction de la distance de mesure, pour une atmosphère à 50% d'humidité relative.

### IV. La caméra infrarouge

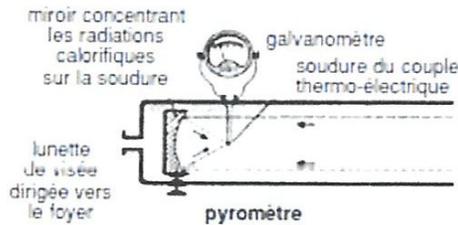
La caméra infrarouge moderne ressemble extérieurement de plus en plus à un caméscope. Si son aspect s'assimile à celui d'une caméra vidéo normale, son mode de fonctionnement en est tout différent.

#### IV.1 Les détecteurs :

Il existe 2 types de détecteurs :

- Les détecteurs thermiques : ceux-ci sont basés sur la détection d'une augmentation de température au niveau du détecteur. La variation de température fait varier l'une des propriétés physiques du matériau détecteur (résistance électrique par exemple) et provoque une variation du signal délivré. Ce type de détecteur a un temps de réponse relativement long. On utilise entre-autre cette technique dans la fabrication de tubes pyroélectriques.

**Exemple :** le pyromètre pour les mesures de hautes températures dans les fours :



- Les détecteurs quantiques : ceux-ci sont constitués de semi-conducteurs où l'absorption d'un photon (particule d'énergie lumineuse) provoque la libération ou le transfert d'électrons. Ce type de détecteur a une sensibilité élevée et un temps de réponse extrêmement faible. L'utilisation de ces détecteurs au maximum de leur sensibilité nécessite leur refroidissement à des températures très basses :
  - système refroidi par de l'azote liquide :  $-196^{\circ}\text{C}$ ;
  - refroidisseur thermoélectrique à effet Peltier :  $-70^{\circ}\text{C}$ ;
  - refroidisseur "Stirling" à mini compresseur :  $-196^{\circ}\text{C}$ .

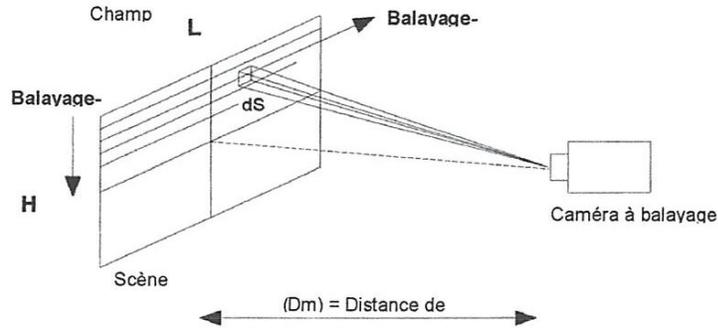
On utilise principalement les détecteurs quantiques dans les appareils de thermographie; ceux-là travaillent dans les bandes spectrales 2 à  $5\mu\text{m}$  et 8 à  $13\mu\text{m}$  (pour les raisons définies préalablement).

#### IV.2 Les systèmes de mesure des caméras infrarouges :

Il existe deux systèmes de mesure des flux électromagnétiques ou luminances :

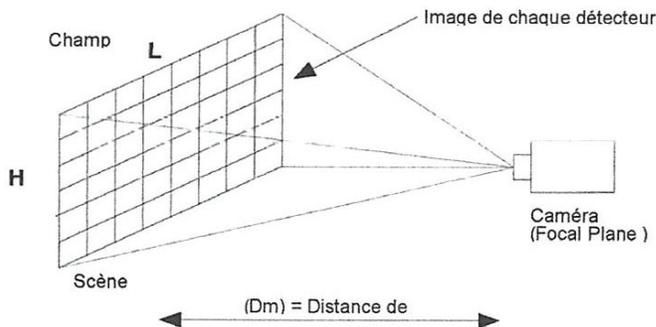
- La caméra à mono détecteur ou système à balayage spatial : comme le nom l'indique, l'appareil est muni d'un détecteur unique couplé à un système optomécanique à balayage horizontal (ligne) et à balayage vertical (trame). L'addition des deux balayages à des fréquences spécifiques autorise l'analyse d'une scène thermique par l'image successive du détecteur ou de la surface élémentaire {dS}.

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge



La taille du champ scanné ( $L \times H$ ) est fonction :

- du système de balayage optomécanique; • de l'objectif de la caméra; • de la distance de mesure.
- La caméra à plan focal : celle-ci est équipée d'une matrice de détecteurs. L'image de chaque détecteur couvre de façon permanente une surface élémentaire dans le champ scanné. La scène thermique est ainsi quadrillée et analysée simultanément en tout point par le "détecteur matriciel".
- On peut trouver sur le marché des caméras à plan focal avec une matrice de  $240 \times 320$  éléments détecteurs.



La taille du champ scanné est fonction de :

- la taille de la matrice de détecteurs; • l'objectif de la caméra; • la distance de mesure.

Dans chaque cas, les détecteurs influencés par les rayonnements émis par une scène thermique délivrent un "thermo signal" ou réponse thermique individuelle : celle-ci est amplifiée dans une unité de traitement et ensuite convertie en points lumineux sur un écran. Généralement, l'intensité lumineuse délivrée sur l'écran est en corrélation avec l'intensité des rayonnements infrarouges captés : la visualisation d'une scène thermique est donc réalisée par transcription des rayonnements électromagnétiques suivant une échelle de gris ou de couleurs dont les intensités lumineuses varient de manière proportionnelle avec les intensités du rayonnement infrarouge.

### > Compréhension des courbes d'étalonnage :

(Courbe d'étalonnage d'une caméra fonctionnant dans la bande  $2$  à  $5 \mu\text{m}$ )

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge

- Résolution thermique : Inférieure ou égale à 0,1°C pour la mesure de T° de l'ordre de 30°C. La sensibilité d'une caméra infrarouge est l'aptitude du Détecteur à mettre en évidence des écarts de T°. Plus la résolution thermique est faible, plus la sensibilité est élevée.
- Surface élémentaire de : de l'ordre de 1,2 mrad avec objectif standard. Celle-ci détermine la résolution spatiale de mesure la caméra infrarouge. L'IFOV peut-être considéré comme "une grandeur d'influence" dont il faut tenir compte dans le cas de mesure de T° sur des objets de petites tailles ou sur des corps situés à une distance de mesure.
- Facteurs correctifs : Emissivité, T° atmosphérique, T° environnante, distance de mesure, taux d'humidité relative. Chaque appareillage de thermographie est doté d'accessoires et de systèmes de traitements numériques qui permettent d'élargir leurs capacités initiales.

Chaque appareillage de thermographie est doté d'accessoires et de systèmes de traitements numériques qui permettent d'élargir leurs capacités initiales.

## V. Principe et méthode, cas des équipements électriques

### V.1 Principe de détection :

Tout équipement conducteur parcouru par un courant électrique s'échauffe : c'est l'effet Joule (Physicien anglais (1818-1889) qui étudia la chaleur dégagée par les courants électriques dans les conducteurs) :

#### Formule de Joule :

$$W = R \cdot I^2 \cdot t$$

- avec : • **W** Energie calorifique dissipée en Joule(s);
- **R** Résistance électrique de l'équipement en ohm(s);
  - **I** Courant électrique en ampère(s);
  - **t** Temps de passage du courant en seconde(s).

#### Loi de Joule :

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge

Dans un équipement conducteur parcouru par un courant, la quantité d'énergie calorifique dissipée par échauffement est proportionnelle à la résistance électrique de l'équipement au carré du courant et au temps pendant lequel passe ce courant.

L'appareillage électrique en charge (parcouru par des courants) s'échauffe donc jusqu'à ce que l'énergie calorifique produite par les courants soit égale à l'énergie dissipée dans l'espace environnant : il y a dans ce cas équilibre thermodynamique.

Une installation électrique est composée de nombreux appareillages par lesquels transitent des courants. Ces appareils sont reliés entre eux par des éléments conducteurs : l'ensemble des liaisons génère des milliers de connexions.

- Dans des conditions identiques de fonctionnement, les équipements et connexions similaires doivent avoir le même comportement thermique.
- Dans des conditions spécifiques de fonctionnement, l'appareillage électrique doit se comporter thermiquement dans des limites nominales déterminées.

Dans chaque cas, la thermographie infrarouge met en évidence des anomalies de comportement thermique par des mesures de températures relatives ou absolues. Ces anomalies plus communément appelées "points chauds" identifient des défauts ou dégradations locales par des élévations anormales de température.

Les points chauds trouvent généralement leur origine suite à la variation de la résistance de passage du courant.

Les défauts thermiques les plus souvent détectés sont (par ordre décroissant) :

- 1) Problème de serrage.
- 2) Usure, oxydation ou corrosion de contacts.
- 3) Positionnement incorrect de contacts mobiles.
- 4) Problème de calibration de l'appareillage.
- 5) Déséquilibre des charges entre phases.
- 6) Ventilation insuffisante de tableaux ou locaux électriques.
- 7) Problème de conception des installations (Problèmes d'induction).

### V.2 Méthode d'inspection :

L'opérateur est muni d'une caméra infrarouge classique, portable, avec une résolution thermique faible afin de mettre en évidence de faibles écarts de température. Les installations électriques doivent impérativement fonctionner en régime permanent sans nécessairement disposer de la pleine charge : tout le système doit-être en équilibre thermodynamique.

Les équipements uniquement sous tension sont incontrôlables par thermographie : seuls les courants génèrent les échauffements à analyser.

L'inspecteur analyse les composants des cellules haute-tension (HT), basse-tension (BT), coffrets et tableaux électriques divers.

Le contrôle par infrarouge est réalisé en trois temps :

- 1) La visualisation du comportement thermique global des éléments d'un même tableau : celle-ci met en évidence des points dont les températures sont plus élevées.
- 2) L'opérateur doit interpréter la scène thermique afin de différencier les échauffements normaux (bobines de contacteurs, résistances, selfs, transformateurs) des échauffements anormaux : ces derniers sont

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge

facilement identifiables par comparaison entre composants identiques fonctionnant dans des conditions similaires (mêmes charges transitâtes).

- 3) La quantification des températures des points chauds. L'opérateur cherchera toujours à réaliser la mesure des points chauds sur des parties de bonne émissivité (boulons oxydés, isolant conducteurs, ...) afin d'éliminer la prise en compte des rayonnements perturbateurs réfléchis et ainsi diminuer les temps d'analyse. Les mesures dans ce cas sont dites "relatives" : la mise en évidence d'un point chaud se fera par comparaison des températures mesurées sur l'élément défectueux et sur un élément similaire fonctionnant dans des conditions identiques (élément de référence). **C'est la différence de température ou  $dT^{\circ}$  qui caractérise le défaut thermique.**

### V.3 Avantages de l'analyse infrarouge des installations électriques :

- Contrôle Non Destructif (CND).
- Technique de contrôle "on Stream" : les installations fonctionnent normalement pour la réalisation de la thermographie.
- Analyse sans contact sur des équipements soumis à des contraintes non maximales.
- Rapidité & Précision du diagnostic des installations.
- Mesures fiables de par la précision des scanners IR modernes : sensibilités accrues.
- Sécurité d'analyse : visualisation et quantification des températures avec respect des distances de sécurité.
- Maintenance prédictive : interventions uniquement sur les éléments défectueux repérés par l'analyse infrarouge.  
Conséquences :
  - diminution des frais directs d'entretien ;
  - augmentation de la fiabilité des installations.
- Maintenance préventive : prévention d'anomalie potentielle avec optimisation de l'évaluation de la gravité des défauts par adaptation de la fréquence d'analyse (suivis évolutifs, préventions des dégradations, ...).
- Coût peu élevé (proportionnellement aux coûts d'entretien classique et aux coûts d'arrêt de production).

### V.4 L'analyse infrarouge : gain de temps et d'argent :

#### **Il suffit parfois d'un grain de sable ...**

... pour enrayer tout un système, un petit incident qui, hors contexte, peut paraître insignifiant mais dont les effets peuvent s'avérer économiquement ou humainement désastreux !  
Malgré l'accroissement constant du facteur "fiabilité", il subsiste toujours le risque de pannes indétectables à l'œil nu.

Pourtant les technologies évoluent et de nouveaux types de spécialistes sont apparus : "les professionnels de la "MAINTENANCE PREDICTIVE".

Leurs compétences alliées à un matériel thermographique High-Tech garantissent un résultat précis :

- L'anticipation de la panne et de l'arrêt des équipements
- une réduction des coûts d'immobilisation ;

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge

- L'optimisation du temps presté par le personnel d'entretien
- la diminution des coûts de maintenance ;
- L'augmentation de la fiabilité et de la longévité des équipements
- l'accroissement de la rentabilité des investissements ;
- Une sécurité accrue
- l'occasion de mieux négocier le volet de primes auprès des assureurs "Incendies".

### V.5 Compétences requises, agréments, règlements : Qui peut pratiquer ces mesures ?

L'achat du matériel (matériel de prise de vue et logiciels) reste logiquement réservé à des sociétés spécialisées qui, par le nombre des examens pratiqués, parviennent à amortir l'investissement.

De plus, il ne s'agit pas seulement de réaliser des prises de vue mais bien de pouvoir interpréter des situations pour lesquelles un écolage spécifique et une expérience régulière en thermographie IR s'avèrent indispensables.

Pour le responsable d'un service technique, l'achat de ce matériel et l'acquisition des compétences ad hoc relève davantage d'une approche superficielle ou d'une attitude ludique.

Comme dans toute sous-traitance, l'appel à un partenaire extérieur demande quelques garanties.

La qualité des prestations peut varier entre différentes sociétés spécialisées. Ces différences ne tiennent certainement pas dans le fait d'avoir ou non le statut d'organisme de contrôle. Il y a des organismes de contrôle qui en complément des examens réglementés par le R.G.I.E., pratiquent des contrôles thermographiques. Il y a aussi des sociétés de renom qui pratiquent des services hautement spécialisés en thermographie sans être reprises dans le répertoire des organismes de contrôle. Quant à l'Union Professionnelle des Entreprises d'Assurances (UPEA), elle a édité un document intitulé "Réglementation des assureurs pour les installations électriques".

Cet ouvrage a pour objectif de promouvoir la prévention des risques d'incendies d'origine électrique. Le recours aux techniques de thermographie y est bien évidemment et logiquement stimulé.

Toutefois, on pourrait s'interroger sur les raisons pour lesquelles ce texte extra-légal est présenté sous forme de règlement ce qui ouvre la porte à bon nombre de confusions entre ce qui est obligatoire et ce qui ne l'est pas.

Le titre "Cahier de recommandations des assureurs pour les installations électriques" ne serait-il pas plus adéquat ?

Quoi qu'il en soit, ce texte, édité en 1986 et mis à jour en 1991, présente un éventail d'examen à réaliser, ainsi qu'un accroissement très important de certains cycles de contrôle, en complément des obligations légales imposées par le Règlement Général pour la Protection du Travail (R.G.P.T.), le Règlement Technique (R.T.) et/ou le Règlement Général pour les Installations Electriques (R.G.I.E. / A.R.E.I.).

Certains assureurs ou organismes tentent d'imposer l'application intégrale de ce programme extra-légal édité par l'U.P.E.A. D'autres, par contre, cherchent davantage à étudier, avec le gestionnaire, un programme personnalisé d'examen préventifs, considérant les particularités de sa situation technique, de son risque et de son budget.

De ce fait, ils se montrent généralement plus ouverts à négocier le montant des primes d'assurances en relation directe avec la qualité de gestion observée sur le terrain.

## Chapitre II - Thermographie Infrarouge

Contrairement à ce qu'on peut lire dans certaines littératures, seuls les contrôles légiférés sont obligatoires et doivent impérativement être réalisés par un organisme de contrôle.

Concernant les autres examens, analyses, essais ou vérifications, et notamment la thermographie, aucun organisme de contrôle ou prestataire de services spécialisés ne peut disposer légalement d'agréments dans ce cadre, puisque pour ces types de prestations, aucun ministère ne délivre d'agrément bien spécifique.

Dès lors, l'organisme de contrôle et le prestataire de services spécialisés sont statutairement, mis sur un pied d'égalité pour ces types de prestations et, seule, la loi du Libre Marché permet de déceler les réelles compétences de chacun.

En fait, la qualité du service réside, à notre sens, dans la performance du matériel de prise de vue, dans la qualité de son entretien et de l'étalonnage, la rigueur scientifique dans le travail, la bonne connaissance de la "normalité" dans les équipements inspectés et la déontologie observée dans une technologie où l'objectivation des résultats passe par une maîtrise parfaite des paramètres de la prise de vue.

Enfin, on considère que le niveau de qualité du rapport de visite établi par le partenaire devra constituer un véritable outil d'aide à la décision.

### VI- CONCLUSION :

Nous avons vu donc que la technique de thermographie infrarouge est éminemment pluridisciplinaire et fait appel à des notions sur les rayonnements, sur l'optique, sur les détecteurs et l'électronique, sur le traitement du signal et de l'image, sur la thermique ainsi que sur l'instrumentation et la mesure en général.

La matière, du fait qu'elle est "non idéale", implique que le mesureur soit apte à comprendre ce qui se passe, à faire la part des choses dans ce que mesure son appareil. Cet appareil ne fait pas la distinction entre les rayonnements d'origines diverses, et le rayonnement réfléchi par l'objet visé ne nous renseigne pas sur la température de cet objet.

Parmi les outils utilisés pour interpréter les images de températures, le traitement de ces images est qualifié de puissant.

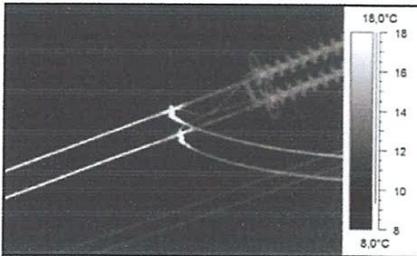
Après la prise des images thermiques on va passer à la partie logiciel et dans cette partie on va utiliser deux logiciels importants qui sont **THERMACAM RESEARCHER & MATLAB** pour le traitement d'image ; chose qu'on va l'éclairer dans le troisième chapitre de ce travail.

**Chapitre III -  
Applications de la  
thermographie  
infrarouge**

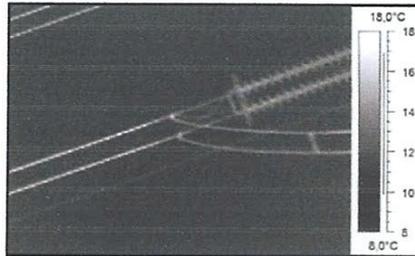
La thermographie infrarouge classique est principalement utilisée dans l'industrie en tant que maintenance. Son avantage décisif est de permettre l'estimation de la qualité d'un équipement ou d'une installation en exploitation normale, et de prévenir les irrégularités de fonctionnement bien avant les pannes effectives. La thermographie infrarouge peut-être également utilisée dans des applications R&D (recherche et développement), pour le contrôle de procédés de fabrication, pour la surveillance continue de systèmes. Dans ces applications, la thermographie n'est plus classique mais bien spécifique : celle-ci conduit à la mise en œuvre d'appareillages plus adaptés aux conditions d'analyse, donc requière des connaissances bien plus approfondies sur le sujet. Chaque utilisateur de caméra infrarouge ou autres systèmes radiométriques de mesure de températures doit connaître impérativement les limites physiques de son matériel ainsi que les limites de ses connaissances afin de préserver au mieux sa crédibilité à l'égard d'une clientèle de plus en plus avertie. Il n'est pas honteux de reconnaître une "certaine incompétence" face à une demande spécifique qui nécessitera l'intervention d'un spécialiste garanti.

#### 1. Contrôle des équipements électriques haute et basse-tension :

##### a) Ligne 380kV : conducteurs pour le transport d'énergie :



Thermogramme 1



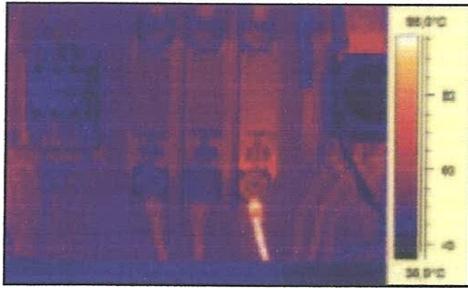
Thermogramme 2

Les thermogrammes 1 & 2 identifient des composants électriques haute-tension soumis à des conditions d'exploitation similaires : il s'agit de conducteurs raccordés à un support (pylône) par un encrage isolant. Ce type de fixation est identique en amont et en aval du support : les conducteurs sont reliés entre eux par une "bretelle" de raccordement, fixée par boulonnage sur des raccords "T" de descente.

L'ensemble des raccords en série avec chaque conducteur est étudié de manière à uniformiser le comportement thermique de la ligne : normalement, tous ces composants fonctionnant dans de mêmes conditions doivent s'échauffer quasi uniformément.

Dans notre exemple, on distingue par comparaison entre éléments des échauffements sur le thermogramme 1. Ces points chauds se situent au niveau des plages de contact sur des raccords "T" de descente : il s'agit de problèmes liés à des pressions insuffisantes de contact ou à une oxydation des contacts : cet état est anormal à l'égard de la conception initiale de l'installation.

b) Circuits BT 380V :



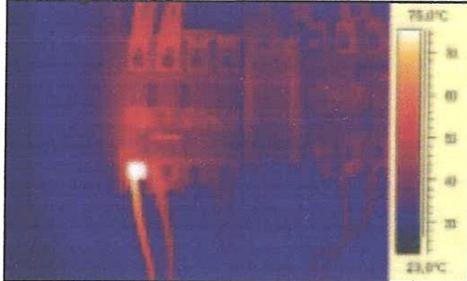
*Fusibles BT :*

Échauffement anormal au niveau d'une cosse de raccordement entre le conducteur et la borne du fusible.

*Cause :*

Sertissage défectueux de la cosse.

Thermogramme 3



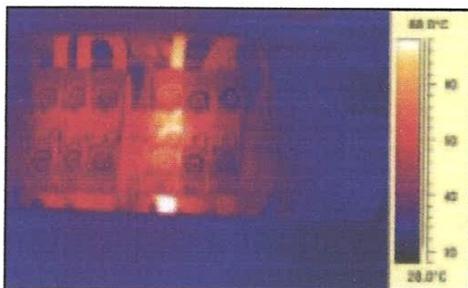
*Contacteur BT :*

Échauffement anormal au niveau d'une borne.

*Cause :*

Pression de serrage insuffisante.

Thermogramme 4



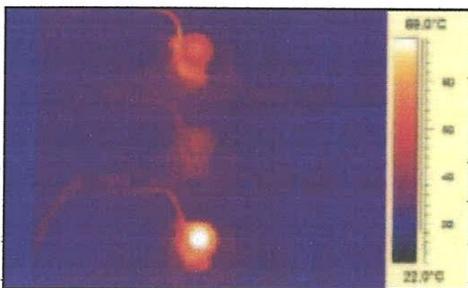
*Borniers BT :*

Échauffements anormaux au niveau de conducteurs.

*Cause :*

Pression de serrage insuffisante.

Thermogramme 5



*Fusibles de type DZ :*

Échauffements anormaux au niveau des cartouches fusibles.

*Cause :*

Contacts internes perlés ou oxydés.

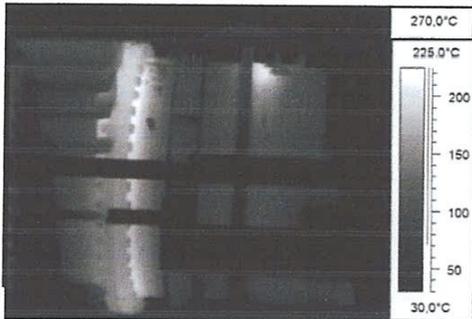
Thermogramme 6

2. Contrôle de réfractaire :

Les réfractaires sont utilisés comme isolants thermiques : ceux-ci canalisent des fluides gazeux ou liquides à très hautes températures. Le briquetage réfractaire est généralement assemblé sur une structure métallique. Des problèmes d'usure de réfractaire ou de jointure provoquent des échauffements importants sur la structure portante : ceux-ci engendrent des contraintes thermiques anormales qui conduisent aux dégradations voire au perçage des éléments métalliques.

La thermographie infrarouge permet de localiser ces zones chaudes et surveiller leur évolution en vue de la planification de leur maintenance.

*Les exemples ci-après émanent du secteur industriel, mais sont comparables à certaines scènes sur des équipements thermiques plus communs.*

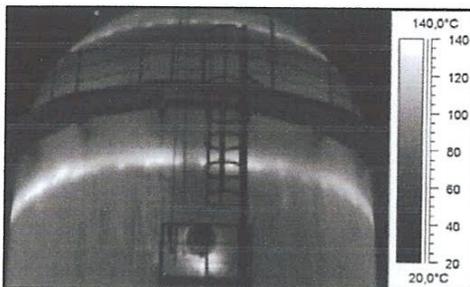


Thermogramme 7

*Circulaire à vent chaud : Réfractaire défectueux dans une chambre de visite.*



*Collecteur sur cowper : Réfractaire défectueux au niveau*



Thermogramme 8

*Coupole de cowper : Contrôle de la jointure entre la coupole et la virole.*

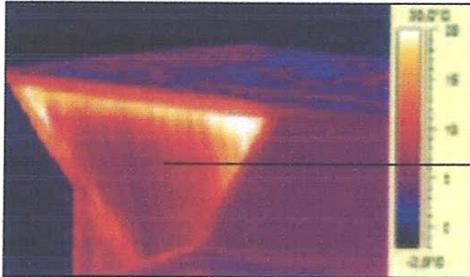


Thermogramme 9

### 3. Contrôle de la qualité d'isolation des bâtiments

La thermographie infrarouge permet de détecter la mise en œuvre défectueuse de l'isolation, une dégradation ou une absence locale d'isolant.

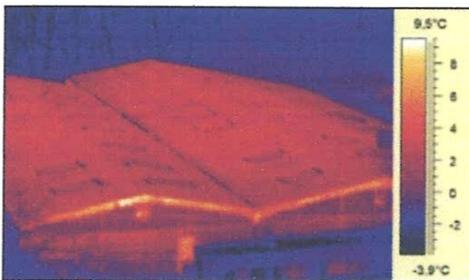
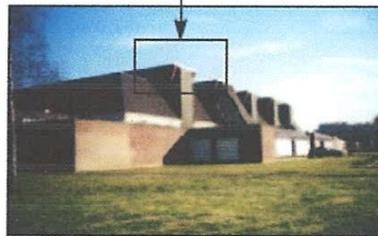
La technique autorise une évaluation qualitative de l'isolation mais ne permet pas de déterminer quantitativement avec précision les pertes énergétiques.



Thermogramme 10

*Bardage sur une paroi latérale d'un bâtiment :*

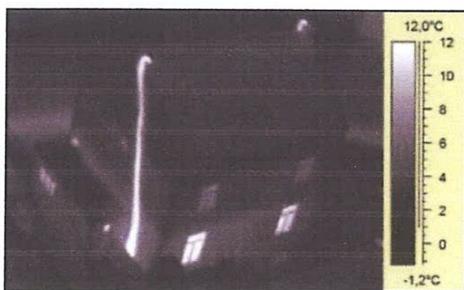
Déperditions thermiques apparentes du fait d'une isolation défectueuse.



Thermogramme 11

*Toiture d'un bâtiment :*

Déperditions thermiques apparentes au niveau des rives : isolation défectueuse.



Thermogramme 12

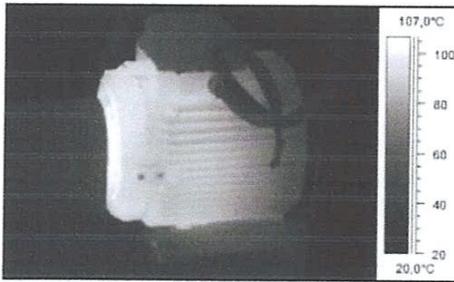
*Déperditions thermiques d'une habitation ancienne (vue de la façade arrière et du pignon droit).*

L'image thermique nous renseigne clairement quant au mode de chauffage de la maison : cette habitation dispose de deux sources de chaleur implantées au rez-de-chaussée, sur chaque pignon du bâtiment. On constate d'importantes déperditions thermiques par les conduits de cheminées ainsi que par les murs du rez-de-chaussée où sont installés les éléments chauffants.

**NB :** on peut apercevoir le tracé de l'égout situé dans la rue bordant l'habitation en façade.

#### 4. Contrôle sur des équipements mécaniques :

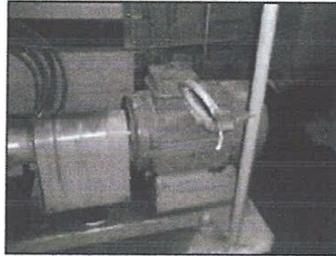
Les pièces mécaniques en mouvement peuvent s'échauffer anormalement par manque de lubrification, usure ou encore déformation dynamique des pièces (alignement incorrect par exemple).



Thermogramme 13

*Moteur entraînant une pompe hydraulique :*

Echauffement anormal au niveau du roulement côté attaque. L'analyse vibratoire indiquera s'il s'agit d'un problème d'usure ou d'alignement.



#### 5. Contrôle sur des équipements thermiques :

Principe identique à la surveillance des réfractaires dans la sidérurgie.

Analyse qui permet de mettre en évidence des dégradations ou déperditions thermiques sur des équipements tels que chaudières, fours, incinérateurs, ...

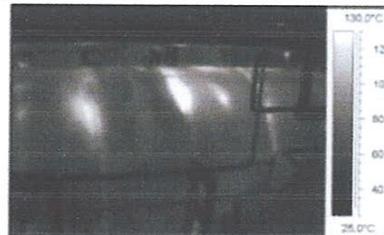
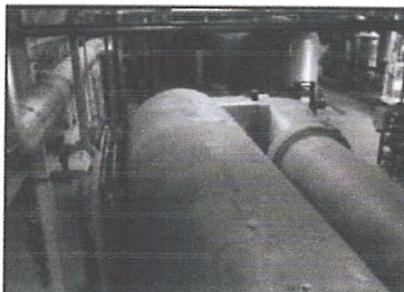


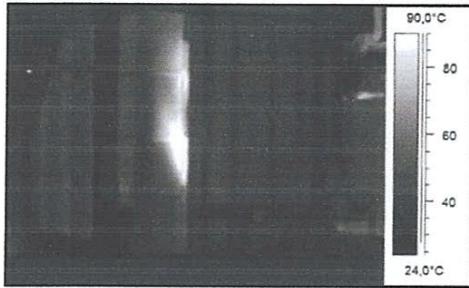
Thermogramme 14

*Incinérateur de fumées :*

Echauffements anormaux au niveau de l'enveloppe extérieure.

L'ouverture de la cuve après l'inspection thermographique indiquera une dégradation importante de la structure interne de par des réglages inadéquats du brûleur (intensité de la flamme).





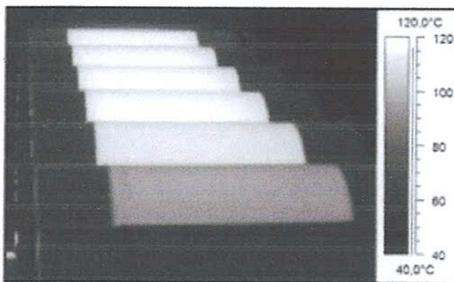
Thermogramme 15

Four de recuit :

Déperditions thermiques importantes au niveau d'un joint latéral de porte.

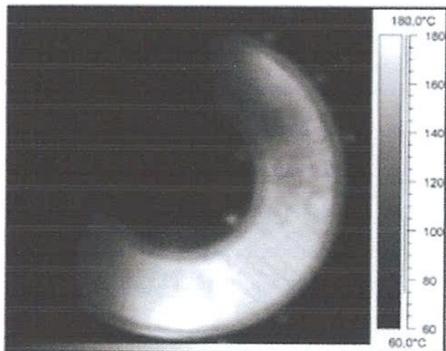
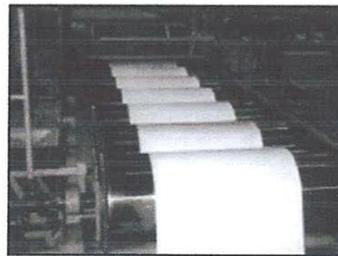
## 6. Contrôles qualitatifs et quantitatifs des échanges thermiques :

Visualisation et quantification d'échanges thermiques dans des procédés de fabrication.



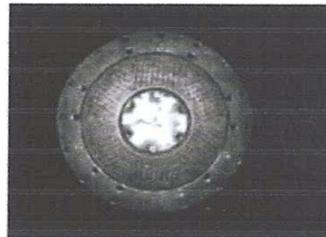
Thermogramme 16

*Cylindres réchauffeurs dans la plasturgie :*  
Analyse des uniformités latérales des  $T^{\circ}$  des rouleaux ainsi que la quantification des températures croissantes des cylindres entre l'entrée et la sortie du système.



Thermogramme 17

*Filière dans la plasturgie :*  
Analyse de l'homogénéité des  $T^{\circ}$  de surface d'une filière à serpentins réchauffée par un liquide calorporteur.  
Le thermogramme met en évidence l'inégalité de répartition des  $T^{\circ}$  donc identifie des zones "froides" qui résultent de l'obturation de serpentins par divers résidus.

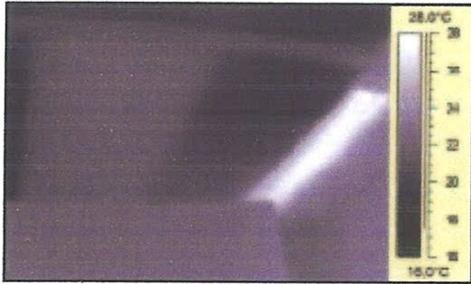




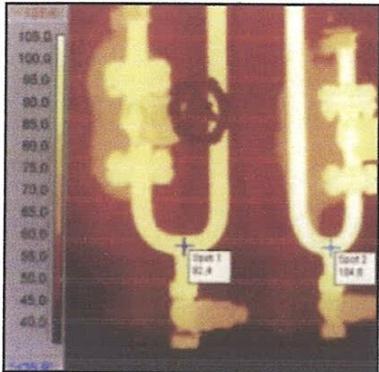
Thermogramme 18

*Plafonds réfrigérants dans un immeuble :*

Analyse de l'homogénéité des zones refroidies et mise en évidence de dysfonctionnement de panneaux réfrigérants (thermogramme 20 : panneau refroidi à 50%).



Thermogramme 19

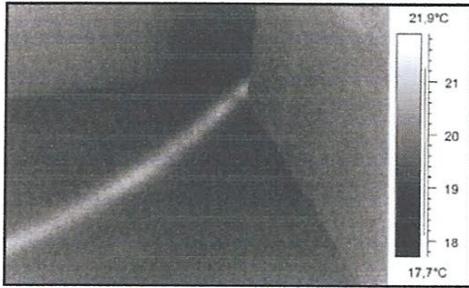


Thermogramme 20

*Image thermique d'un échangeur de chaleur :* Cette image était prise pour des raisons entièrement préventives, pour contrôler son efficacité. L'entrée et la sortie sont visibles et l'écart de température entre les deux conduits peut être mesuré. La température dans les deux conduits est répartie uniformément, ce qui indique que l'échange de chaleur fonctionne correctement.

7. Localisation d'une canalisation d'eau chaude dans une chape :

(Principe identique pour la détection de fuite dans des canalisations dans le sol).



*Thermogramme 21*



*Vision réelle avec l'implantation supposée de la conduite*

## II- Matériels utilisés pour la thermographie infrarouge :

### II-1 Caméras infrarouges :

Quelques types des caméras infrarouges :



Caméra AR-40



Caméra FTI Mini LAND



Caméra IR-032



### II-2 logiciels et softwares :

#### 1- ThermaCam Researcher :

Le logiciel ThermaCam Researcher a été conçu spécialement pour les professionnels de Recherche & Développement, pour les scientifiques et tous les autres utilisateurs qui veulent effectuer une analyse détaillée, statique ou en temps réel, des scènes thermiques. Basé sur Windows et extrêmement polyvalent, ThermaCam Researcher augmente encore la puissance et la souplesse de la Thermographie Infrarouge, en offrant des fonctionnalités complètes d'analyse et d'acquisition à haute vitesse. Ce logiciel enregistre, relit et analyse les images et les données IR directement à partir de votre caméra infrarouge, afin de vous permettre une évaluation précise et approfondie des phénomènes thermiques

## 2- Matlab :

MATLAB® est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées, il peut être considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques. Dans notre cas, il va nous permettre d'analyser les images en format bitmap issu de notre webcam. Le format Jpeg est un format d'images compressées d'où la perte d'informations et de qualités. Nous allons utiliser le mode exécutif : c'est-à-dire que MATLAB exécute ligne par ligne un « fichier M » (programme en langage MATLAB).

On va travailler sur les algorithmes de (segmentation, seuillage, filtrage...)

Programme sous Matlab qui fait l'isolation du défaut :

```
I=imread('Indiquer le nom du fichier image infrarouge.jpg');
I1=I(:,1);
I2=I(:,2);
I3=I(:,3);
[y,x,z]=size(I);

d1=zeros(y,x);
d2=d1;
myI=double(I);
I0=zeros(y,x);
for i=1:x
    for j=1:y
        %A·Ê½¼ÛÀà
        d1(j,i)=sqrt((myI(j,i,1)-180)^2+(myI(j,i,2)-180)^2+(myI(j,i,3)-180)^2);
        d2(j,i)=sqrt((myI(j,i,1)-200)^2+(myI(j,i,2)-200)^2+(myI(j,i,3)-200)^2);

        if (d1(j,i)>=d2(j,i))
            I0(j,i)=1;
        end
    end
end
end

figure(1);
imshow(I);
% ÎÔÊ¾RGB¿Ö¼äµÄ»Ò¶ÈÖ±·½Í¼£-È·¶Á½,ö¼ÛÀàÖÐÄ(180,180,180)°Í(200,200,200)
figure(2);
subplot(1,3,1);
imhist(I1);
subplot(1,3,2);
imhist(I2);
subplot(1,3,3);
imhist(I3);

figure(4);
imshow(I0);
```

Après l'exécution de ce programme il nous donne les résultats suivants :

**Exemple 1 :**

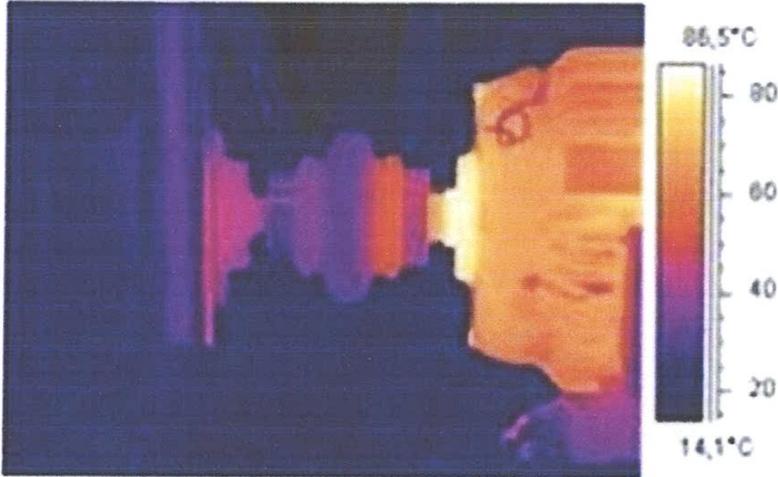
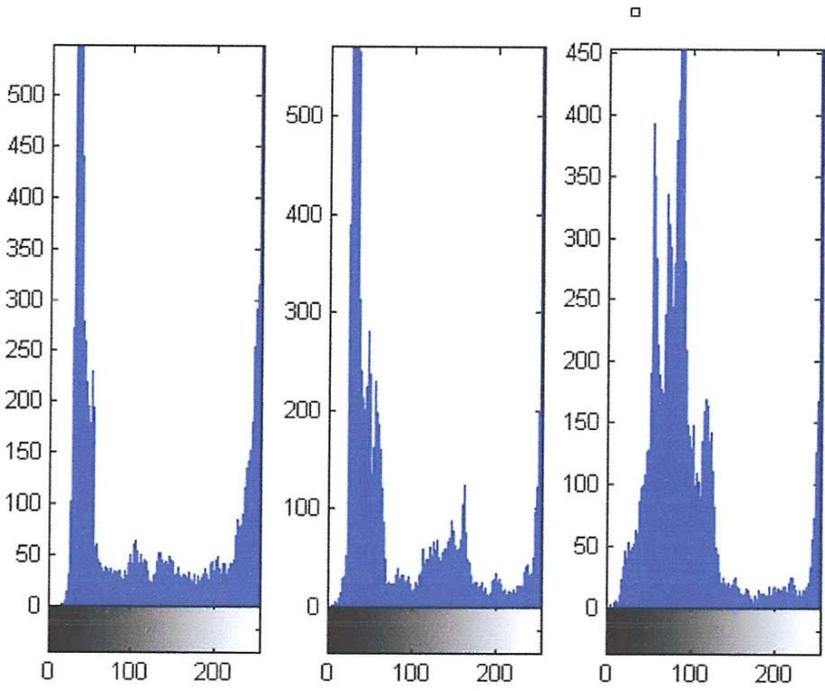
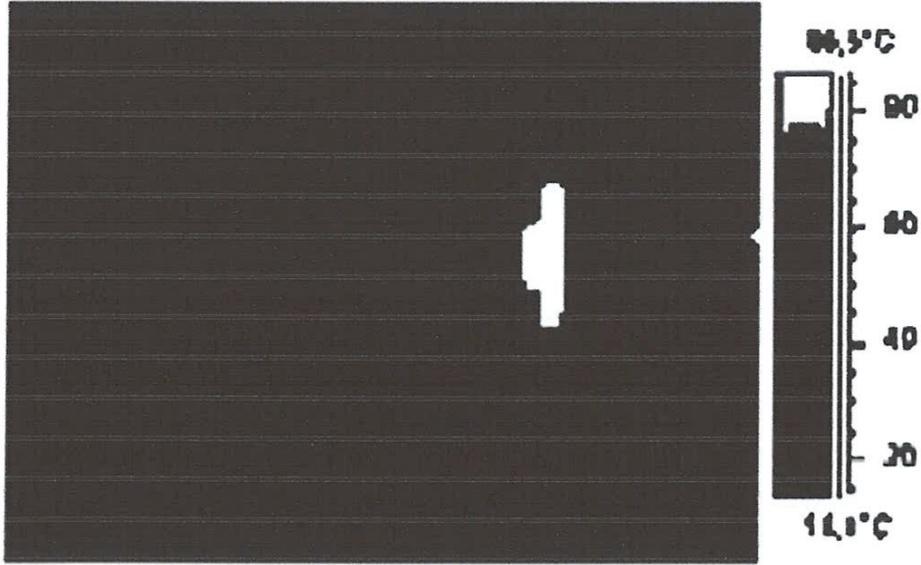


Image thermique

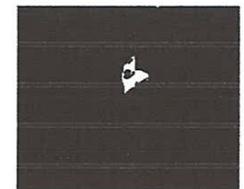
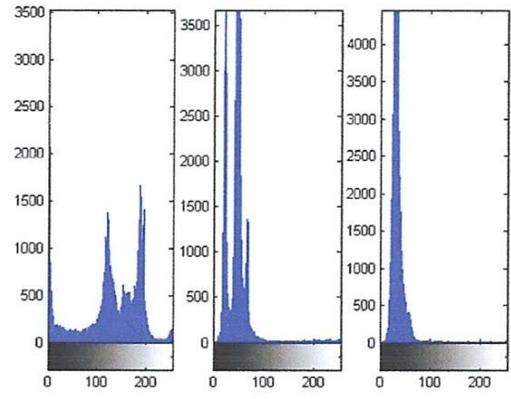


Histogramme de l'image



Isolation du défaut

**Exemple 2 :**



# Conclusion Générale

Grâce aux progrès technologiques qui ont été réalisés dans un passé récent, la Thermographie Infrarouge est une technique multidisciplinaire qui a multiplié le champ de ses applications en mesure, contrôle et détection.

Rendre la chaleur dégagée par un objet visible, constitue un essor considérable à la résolution d'assez de problèmes dans différents domaines de la vie. Ce qui implique la maîtrise de plusieurs disciplines telles que la radiométrie, l'optique, l'électronique, la thermodynamique, l'instrumentation physique, etc.

La caméra infrarouge, par ses résolutions spatiale, spectrale et thermique nous donne une carte de répartition spatiale et temporelle de luminance. En thermographie, il est demandé de trouver une correspondance entre les luminances mesurées et les températures de surface de la scène analysée ; le résultat est une image thermique appelée aussi thermogramme. Ce dernier est considéré comme étant une matière brute emmagasinant d'énormes informations. Extraire ces informations d'images infrarouges, constitue la tâche idéale dont on est obligé de la d'effectuer.

Nous avons donc essayé de donner à cette tâche son aspect pratique à travers l'application des commandes d'un outil puissant de traitement d'images le logiciel « ThermaCam Researcher » ainsi que Matlab sur un ensemble d'images infrarouges qui représentent certains domaines scientifiques courants pour les interpréter, en répondant indirectement sur les questions : comment et combien la température est distribuée dans l'espace de la scène observée dans un moment donné. Cela nous conduira ensuite à répondre à la question pourquoi la température a une telle distribution ou pourquoi l'objet examiné à tel ou tel comportement calorifique. Les étapes suivies se résument en trois étapes essentielles : La restauration et l'amélioration qui conduisent à produire une image la plus proche de la réalité physique de la scène observée et de satisfaire l'œil de l'observateur humain et la segmentation pour extraire et séparer les objets chauds.

Chercher à bénéficier de la thermographie infrarouge ce n'est pas seulement acheter une caméra infrarouge, les matériels périphériques et les programmes de traitement, mais aussi acquérir une connaissance minimum de la théorie du transfert de chaleur et des lois du rayonnement et des techniques de traitement d'image et c'est ce que nous avons essayé de maîtriser tout au long de la réalisation de ce travail.

# Bibliographie

- [1] A. Akhenak, M. Chadli, J. Ragot, and D. Maquin. State estimation of uncertain multiple model with unknown inputs. In IEEE CDC, December 14-17, volume 22, Bahamas, 2004.
- [2] J. Aslund and E. Frisk. An observer for nonlinear differential algebraic systems. *Automatica*, 42 :959–965, 2006.
- [3] C. Aurora and A. Ferrari. Speed regulation of induction motors: An adaptive sensorless sliding mode control scheme. In IEEE American Control Conference ACC '04, 2004.
- [4] S.P. Banks. A note on nonlinear observers. *Int. J. Contr.*, 34 :185–190, 1981.
- [5] J.P. Barbot, T. Boukhobza, and M. Djemai. Triangular input observer form and sliding mode observer. In Proc. of 35 th IEEE CDC, pages 1489–1491, Kobe, Japon, 1996.
- [6] G. Besançon. A viewpoint on observability and observer design for nonlinear systems. in Lecture Notes in Control and Information Science (244), Springer-Verlag, 1999.
- [7] G. Besançon. High-gain observation with disturbance attenuation and application to robust fault detection. *Automatica*, 39 :1095–1102, 2003.
- [8] G. Besançon, G. Bornard, and H. Hammouri. Observers synthesis for a class of nonlinear control systems. *European Journal of Control*, 3(1) :176–193, 1996.
- [9] G. Besançon and H. Hammouri. On observer design for interconnected systems. *Journal of Mathematical Systems, Estimation and Control*, 8, 1998.
- [10] Gildas Besançon, editor. *Nonlinear Observers and Applications*, volume 363 of LNCIS. SpringerVerlag, 2007.
- [11] D. Bestle and M. Zeitz. Canonical form observer design for nonlinear time varying systems. *Int. J. Contr.*, 38 :419–431, 1983.
- [12] J. Birk and M. Zeitz. Extended luenberger observer for nonlinear multivariable systems. *Int. J. Contr.*, 47 :1823–1836, 1988.

- [13] G. Bornard and H. Hammouri. A high gain observer for a class of uniformly observable systems.  
In Proc. of 30 th  
IEEE CDC, pages 1494–1496, Brighton, Angleterre, Décembre 1991.
- [14] T. Boukhobza. Contribution aux formes d'observabilité pour les observateurs à modes glissants et étude des commandes par ordres supérieurs. Thèse de doctorat, Paris-Sud, Orsay, novembre 1997.
- [15] K. Busawon, M.Farza, and H. Hammouri. Observers' synthesis for a class of nonlinear systems with application to state and parameter estimation in bioreactors. In Proc. of the 36 IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, California, USA, 1997.
- [16] K. Busawon, M.Farza, and H. Hammouri. A simple observer for a class of nonlinear systems. Appl. Math. Lett., 11(3) :27–31, 1998.
- [17]. MESURE PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE de Dominique PAJANI.  
ADD Editeur, 72/74 rue B. Iské - F92350 LE PLESSIS ROBINSON.
- [18]. THERMOGRAPHIE INFRAROUGE APPLIQUEE A LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE de Dominique PAJANI & Pierre BREMOND.  
ADD Editeur, 72/74 rue B. Iské - F92350 LE PLESSIS ROBINSON.
- [19]. LA THERMOGRAPHIE par Jean-Pierre de MAGNEE, chargé de cours à l'UCL, FSA-MECA-PRM, Méca 2711/1992.
- [20]. LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE 2ème partie. Revue "Technica"  
N°441 - Novembre - Décembre 1984.
- [21]. THERMOGRAPHIC INSPECTION OF ELECTRICAL INSTALLATIONS.  
Agema Infrared Systems AB, Box 3, 182 11 Danderyd.