

INTRODUCTION A LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

La thermographie infrarouge est un outil de diagnostic permettant de détecter des variations thermiques locales et des déperditions de chaleur (ensemble des fuites calorifiques). Cet outil est utilisé en grande partie sur des bâtiments publics ou privés, mais aussi dans d'autres cas que nous verrons à travers les activités proposés.

La technique est basée sur la captation d'images par une caméra thermique, l'énergie émise (voir annexe 1) ayant un rapport direct avec la température du matériau.

La thermographie infrarouge se limite à la mesure de températures de surfaces. La visualisation de défauts d'isolation, ignorés ou soupçonnés, peut être ainsi mise en évidence, tant sur des bâtiments anciens (visualisation des défauts à traiter en priorité) que sur des bâtiments neufs (qualité de réalisation).

Le rayonnement capté par la caméra est analysé et corrigé par un logiciel de calcul thermographique et le résultat final est une image correspondant à la répartition de la température sur la scène filmée.

Le thermogramme est généralement présenté en couleurs ou niveaux de gris. Chaque couleur ou niveau de gris représente un niveau de température défini.

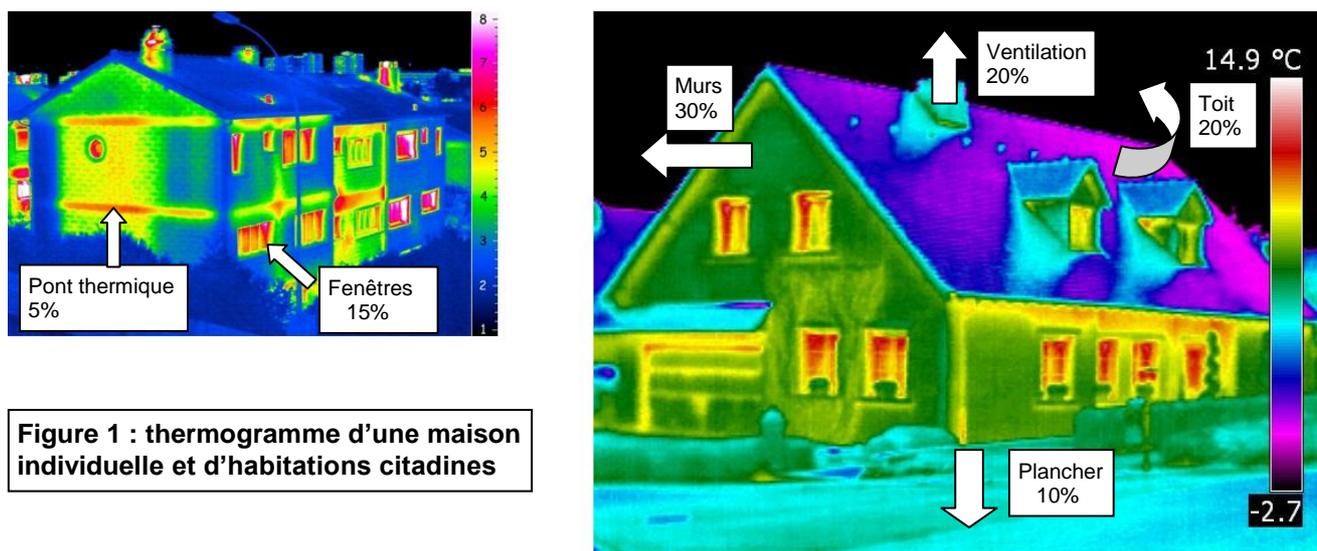


Figure 1 : thermogramme d'une maison individuelle et d'habitations citadines

Dans le bâtiment les déperditions, ainsi mises en évidence, peuvent être dues à :

- des isolants de mauvaise qualité, dégradés ou sous-dimensionnés ;
- une existence de ponts thermiques(1) ;
- une présence d'humidité ;
- des défauts d'étanchéité

(1) Un pont thermique est une zone ponctuelle ou linéaire qui, dans l'enveloppe d'un bâtiment, présente une variation de résistance thermique. Il est généralement situé à la jonction de deux parois.

ETUDE DE CAS 1 : THERMOGRAPHIE D'UNE STATION DE SKI

La thermographie terrestre permet de réaliser des mesures sur les façades et sur des toitures peu élevées à l'aide d'un mât télescopique. La mise en œuvre est, dans ce cas, simple et particulièrement économique mais le champ d'action reste limité en hauteur.

La thermographie aérienne permet de réaliser des cartographies thermiques de toitures de bâtiments d'une grande hauteur, mais elle offre d'autres applications :

- détection des cavités souterraines ;
- détection de fuites hydrauliques souterraines importantes ;
- contrôle de centres d'enfouissement ;
- recherche des pollutions sur terre et en mer.

Type	Consommation de carburant	Niveau sonore	Prix de l'heure de vol	Hauteur de prise de vue	Émission de CO ₂	Type de mesures
Hélicoptère léger (2/3 places)	30 à 40 L · h ⁻¹	70 dB à 500 m	250 €	Mini 400 m	Oui	Toitures sur grande zone
Hélicoptère mono-turbine (5/6 places)	100 à 140 L · h ⁻¹	70 dB à 500 m	500 €	Mini 400 m	Oui	Toitures sur grande zone
Avion de tourisme	27 L · h ⁻¹	70 dB à 500 m	110 €	Mini 400 m	Oui	Toitures sur grande zone
ULM	12 à 14 L · h ⁻¹	35 dB à 500 m	60 €	Mini 400 m	Oui	Toitures sur grande zone
Ballon captif		0 dB à 30 m	30 €	Maxi 150 m	Non	Toitures, façades et sites difficiles d'accès

Tableau 1 : différents moyens de transport utilisés pour la thermographie aérienne

La thermographie par ballon captif (ballon relié au sol par un câble) permet de cibler plus précisément un bâtiment. Elle présente l'avantage de réduire les délais d'intervention, de simplifier les démarches administratives, et elle est sans danger pour les personnes présentes sur la zone d'intervention.

Le ballon, gonflé à l'hélium (gaz porteur plus léger que l'air), peut être équipé d'un système de géo-référencement intégrant un récepteur GPS. La caméra thermique est fixée sur une nacelle, l'ensemble est piloté depuis le sol par un système de radiocommande. Les images sont visualisées en temps réel depuis le sol sur un écran de contrôle grâce à un système de transmission vidéo sans fil.

Pourquoi un tel projet ?

Le maire d'une commune de montagne incluant une station de ski située à 1 800 m d'altitude désire lancer une opération de thermographie aérienne. Lors des vacances d'hiver, la venue des vacanciers génère un revenu important pour la commune mais elle est aussi un facteur influant sur les dépenses énergétiques.

Le but de cette opération sera de valider le travail réalisé sur les constructions neuves et de mesurer les progrès effectués sur les bâtiments en cours de réhabilitation. Cette étude qui portera autant sur les toitures que les façades devra se dérouler en période froide pour être exploitable. Elle devra donc être sans nuisance pour les vacanciers qui affluent dans la station pendant cette période.

Une politique de maîtrise de l'énergie est un facteur de communication important auprès du grand public. Le maire espère donc, par la publication des résultats des travaux entrepris via un site internet, la presse et les plaquettes de l'office du tourisme, la valorisation de sa station.

1. Analyse du besoin

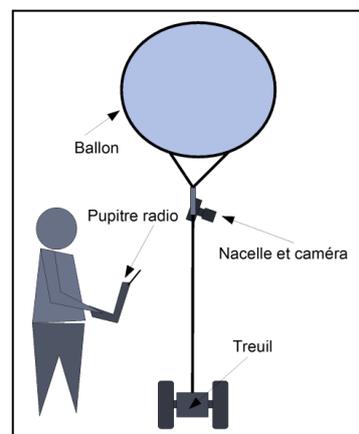
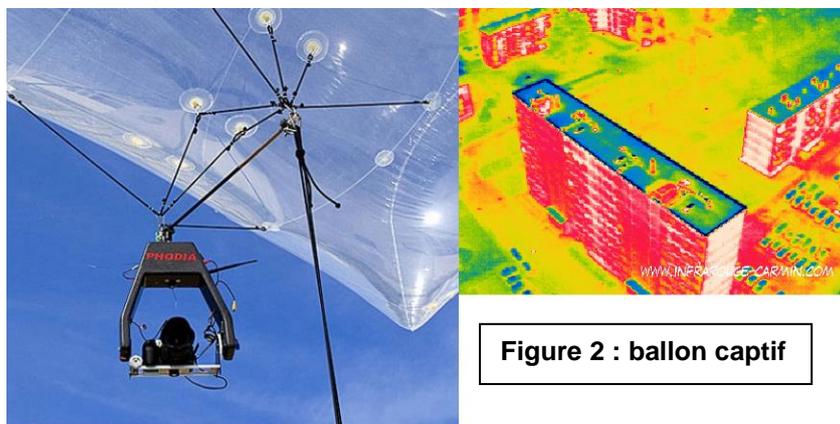
Objectifs de cette partie : **analyser** le besoin à l'origine des prises de vues thermographiques et **comparer** la solution retenue avec les autres solutions possibles.

1-1. Argumenter, en quelques lignes, sur l'intérêt d'une thermographie aérienne plutôt que terrestre.

1-2. Analyser les différents choix possibles de thermographie aérienne (tableau 1 précédent) et donner pour chaque solution les avantages et les inconvénients en complétant le tableau sur le document réponse **suivant** :
Quantifier par oui, non, élevé, faible, modéré

	Thermographie par hélicoptère	Thermographie par avion	Thermographie par ULM	Thermographie par ballon captif
Nuisances sonores				
Production de CO ₂				
Précision des prises de vue				
Thermographie façades				
Thermographie toitures				
Démarches administratives				

La solution qui est retenue est la prise de vues par ballon captif.



Le ballon est hissé en altitude par déroulement d'un câble en matière synthétique à haute performance sur le tambour d'enroulement du treuil.

La caméra embarquée sous le ballon sera pilotée à distance, un module vidéo est ajouté pour transmettre l'image jusqu'au sol.

	FLIR P660	NEC AVIO TVS 500EXZ	Variocam HR Research
Modèle			
Résolution	640 × 480 pixels	640 × 480 pixels	1 280 × 960 pixels
Zoom	× 8	× 8	aucun
Masse	2,18 kg	1,5 kg	1,4 kg
Autonomie	3 heures	2 heures	3 heures
Dimensions	355 × 144 × 147 mm	226 × 140 × 140 mm	133 × 106 × 110 mm

Tableau 2 : caméras pour la thermographie

13 Donner, pour chacun des modèles de caméra ci-dessus, les avantages et les inconvénients pour l'utilisation souhaitée.

La nacelle porte la caméra, elle est motorisée pour orienter la caméra, les mouvements sont commandés depuis le sol par radiocommande. La caméra retenue est le modèle **NEC AVIO TVS 500EXZ**.

	Nacelle 1	Nacelle 2
Modèle		
Masse nacelle	800 g	1 100 g
Masse transportable	jusqu'à 1,2 kg	jusqu'à 4 kg
Structure	Carbone - aluminium	Carbone
Rotation horizontale	360° dans les 2 sens	360° dans les 2 sens
Inclinaison	100°	100°
Alimentation	2 batteries haute capacité	2 batteries haute capacité
Pilotage zoom	Rotation progressive	Rotation progressive
Pilotage caméra	Déclencheur infrarouge universel	Déclencheur infrarouge universel
Autres	Amortisseur élastomère	Amortisseur élastomère

Tableau 3 : nacelles pour ballon captif

1-4 **Choisir**, en le justifiant, un type de nacelle permettant le montage sous le ballon de la caméra sélectionnée.

Etude de cas 2 : ANALYSE D'IMAGES INFRAROUGES ET PRISE D'IMAGE

On souhaite par une prise d'image identifier les conducteurs chargés (traversé par un courant) sur un système. Le système est la « thermobox ».

2-1 Prendre une image infrarouge des câbles électriques à une distance de 20 - 30 cm (Thermobox porte ouverte).

2-2 Connecter l'alimentation et mettre sous tension la Thermobox.

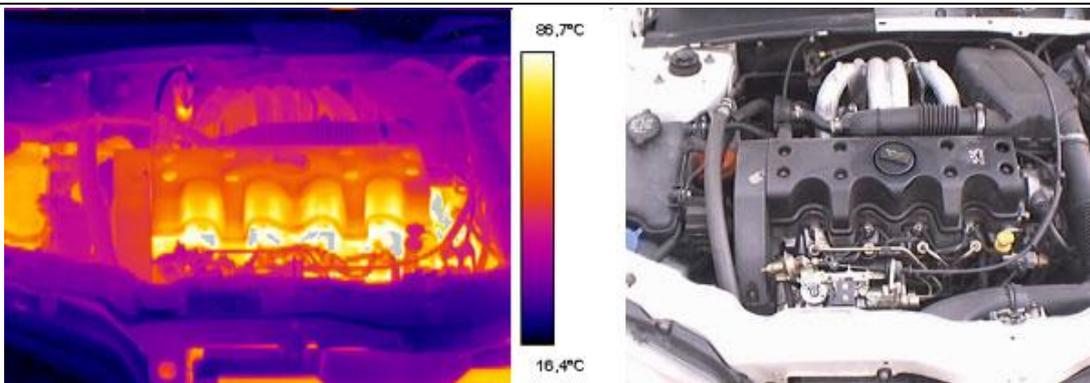
2-3 Laisser chauffer la Thermobox quelques minutes. Les manipulations sont faites porte ouverte.

Pendant le temps de préchauffage (10 minutes environ), vous répondrez aux questions suivantes. L'annexe 1 et les documents ressource vous permettront de répondre aux questions en toute autonomie :

2-4 Déterminer le type de phénomène thermique mise en évidence par thermographie infrarouge (conduction, convection forcée) et commenter les images ci-dessous :

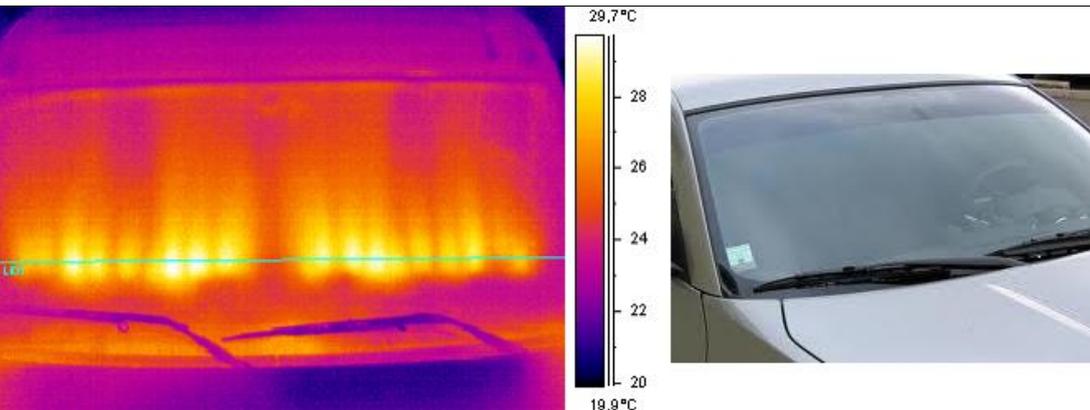
Q1-type de phénomène :

Commentaires :



Q2-type de phénomène :

Commentaires :



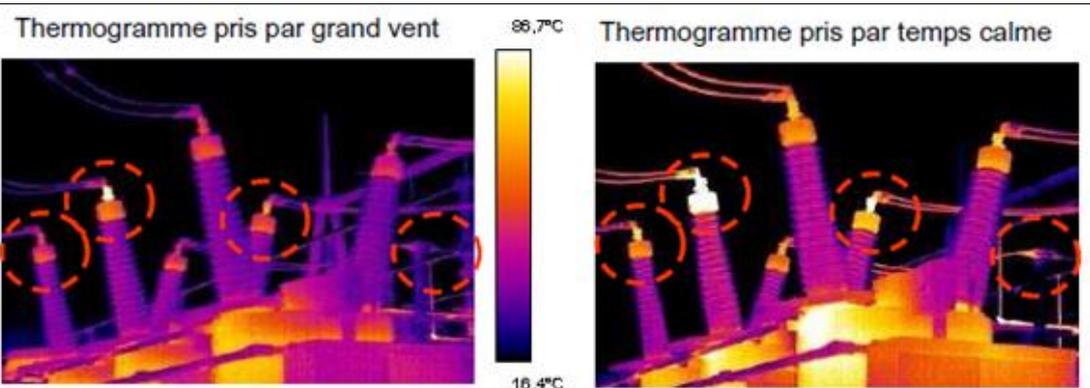
Q3-type de phénomène :

Commentaires et estimation de la quantité de thé contenue :



Q4-type de phénomène :

Commentaires :

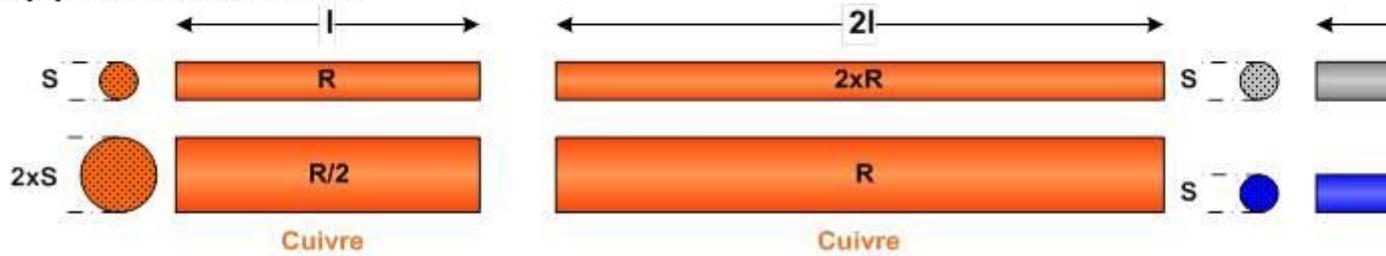


Resistivite

La résistance électrique d'un conducteur homogène est directement proportionnelle à sa longueur, inversement proportionnelle à sa section, et dépend de sa nature :

ρ est un coefficient dépendant de la nature du corps ; il est appelé résistivité.

$$R_{(\Omega)} = \rho \frac{l}{S}$$



Conducteurs		Isolants	
Argent	$\rho = 1.46 \cdot 10^{-8} \Omega.m$	Air	$\rho = \text{infini}$
Cuivre	$\rho = 1.7 \cdot 10^{-8} \Omega.m$	Verre	$\rho = 9 \cdot 10^{18} \Omega.m$
Or	$\rho = 2.44 \cdot 10^{-8} \Omega.m$	Mica	$\rho = 10^{17} \Omega.m$
Aluminium	$\rho = 2.5 \text{ à } 4.5 \cdot 10^{-8} \Omega.m$	Porcelaine	$\rho = 10^{16} \Omega.m$
Tungstène	$\rho = 5.6 \cdot 10^{-8} \Omega.m$	Silicone	$\rho = 10^{16} \Omega.m$
Mercure	$\rho = 95 \cdot 10^{-8} \Omega.m$	Téflon	$\rho = 10^{16} \Omega.m$
Fer	$\rho = 10^{-7} \Omega.m$	Huile	$\rho = 10^{14} \Omega.m$
Carbone	$\rho = 20 \text{ à } 80 \cdot 10^{-6} \Omega.m$	Papier sec	$\rho = 5 \cdot 10^{13} \Omega.m$

Etude de cas 3 : Etude des réflexions

Nous allons prendre conscience des pièges de la thermographie infrarouge (IR).

Au niveau de la Thermobox, deux tapis chauffants de 15 W sont connectés en parallèle et sont alimentés par un générateur de tension en 12 V. Ceci permet de simuler le plancher chauffant d'une habitation. La caméra permet alors de visualiser les serpentins chauffants contenus dans les tapis. Un thermostat bimétallique est placé sous l'un des tapis, permettant par l'intermédiaire d'un relais, de couper l'alimentation du tapis lorsque la température de contact atteint +60°C et de mettre en fonctionnement un ventilateur situé sur le côté de l'armoire (afin d'extraire l'air chaud de l'armoire). Lorsque la température de contact descend et atteint +40°C, le ventilateur est automatiquement coupé et l'alimentation des tapis est rétablie.

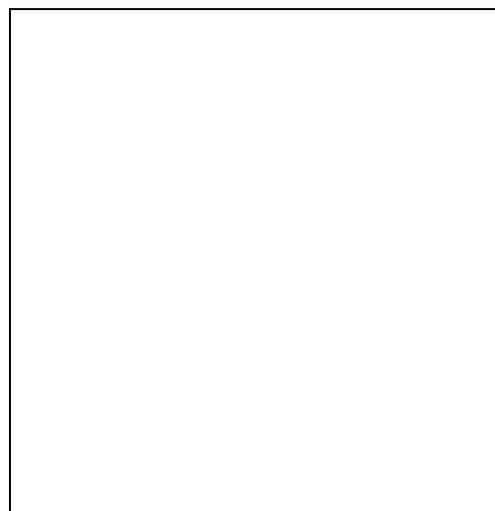
3-1- Réaliser les captures I R du tapis chauffant à une distance de 40 - 50 cm, afin d'obtenir un thermogramme de référence (détermination de la géométrie des tapis).
Puis insérer votre image dans le compte rendu.

Dans la pratique on peut inspecter des planchers chauffants (et déterminer aisément les coupures dans le circuit).

3-2- Placer ensuite un objet en métal poli sur les tapis chauffants et réaliser les captures I R sur cet objet en métal après quelques minutes d'attente.
Que constatez-vous ? De quel type de réflexion s'agit-il (spéculaire ou diffuse)(Voir annexe 1)
Donner un ordre de grandeur de l'émissivité ϵ , justifiez votre réponse.



Thermogramme 2 : Plancher chauffant



Etude de cas 4 : Etude de l'émissivité

Placer le barreau métallique percé sur les tapis chauffants et laisser chauffer les tapis pendant un cycle de chauffe (jusqu'à l'allumage du ventilateur).

Déplacer ensuite le barreau à l'extérieur de l'armoire afin de le visualiser avec la caméra thermique.

4-1- Réaliser les thermogrammes qui mettent en évidence les différences de température mesurées au niveau des trous.

Les trous situés sur la face supérieure du barreau sont de différentes profondeurs : à droite le moins profond et à gauche le plus profond.

Que constatez-vous ? Donner un ordre de grandeur de l'émissivité ϵ , justifiez votre réponse

Thermogramme 3 : barreau métallique percé

- Le Corps noir:
Un corps parfait.

Energie incidente



Corps noir

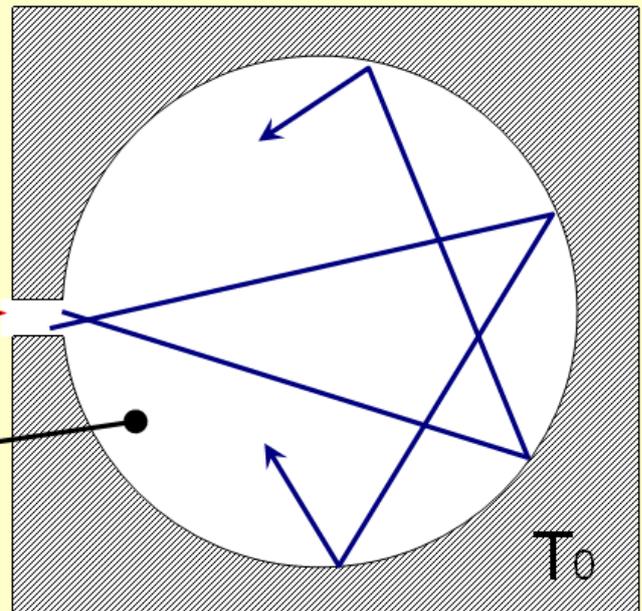
- Absorbe toute l'énergie
- Toute la réflexion est absorbée

Rappel:

$$\text{Absorption} = \text{Emission}$$

$$\text{Emission} + \text{Réflexion} = 1$$

minimum



Un corps noir absorbe tout donc émet tout. On a finalement:

$$\text{Emission} = 1$$

Etude de cas 5 : Solution pour lutter contre les réflexions

Remplir une boîte de conserve d'eau chaude à mi-hauteur et coller une bande de scotch type Chatterton. Cette expérience en pratique peut être utile pour mesurer le niveau de remplissage d'une cuve sans contact (donc à distance).



5-1- Réaliser les thermogrammes qui mettent en évidence le niveau de remplissage de la boîte de conserve.

5-2- Peut-on mesurer la température sur l'extérieur de la boîte de conserve ?

Donner un ordre de grandeur de l'émissivité ϵ .

5-3- Peut-on mesurer la température sur le scotch type Chatterton placé à l'extérieur de la boîte de conserve ?

Donner un ordre de grandeur de l'émissivité ϵ .

Thermogramme 4 : extérieur de la boîte de conserve

Thermogramme 5 : scotch sur l'extérieur de la boîte

Commentaires et conclusions:

ANNEXE 1 : PRINCIPE DE LA THERMOGRAPHIE

On considère un objet placé dans le vide avec :

- Ri Rayonnement incident en provenance d'un autre élément ou d'une source quelconque.;
- Ra Rayonnement absorbé par l'objet ;
- Rt Rayonnement transmis par l'objet ;
- Re Rayonnement émis par l'objet ;
- Rr Rayonnement réfléchi par l'objet.

Ri est directement restituée en partie au milieu extérieur par réflexion : c'est le rayonnement réfléchi Rr.

L'objet absorbe une partie de Ri : c'est le rayonnement absorbé Ra.

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 : Ra = Re.**

L'objet transmet une partie de Ri : c'est le rayonnement transmis Rt.

1-Bilan des rayonnements :

Avec Ra = Re \rightarrow Ri = Rr + Re + Rt \rightarrow 1 = {Rr / Ri} + {Re / Ri} + {Rt / Ri}

- {Rr / Ri} Facteur de réflexion « r » ;
- {Re / Ri} Facteur d'émission (ou émissivité) « ε » ;
- {Rt / Ri} Facteur de transmission « t » ;

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

Cette formulation est l'équation de base du bilan radiatif. C'est la loi de Kirchhoff.

2- Bilan radiatif du corps noir :

Le corps noir, comme 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 : ε = 1.

3- Bilan radiatif du corps réel :

En thermographie infrarouge classique, on s'intéresse principalement à la visualisation et à la quantification de T° de surface de divers objets dits « opaques » rayonnements infrarouges captés par la caméra thermique.

Le facteur de transmission est nul : t = 0

$$1 = \varepsilon + r$$

aux

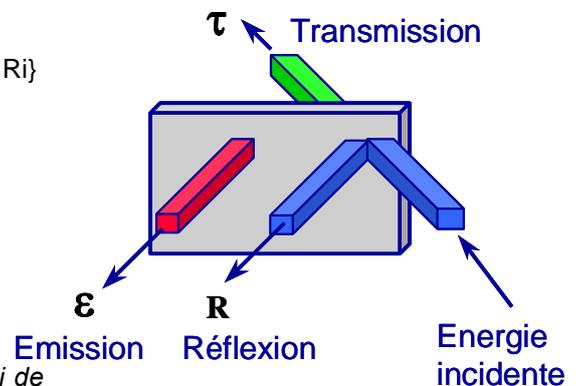
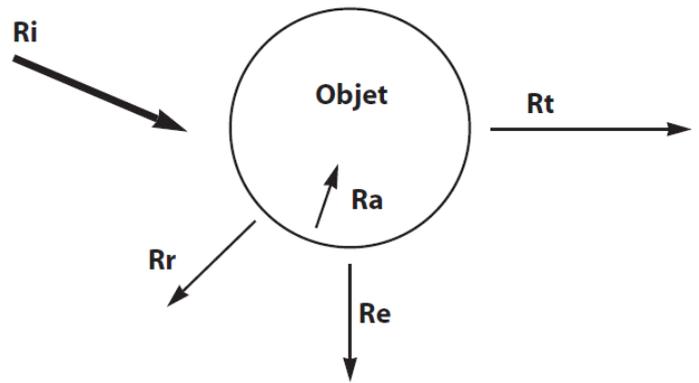
Remarques :

- Le miroir parfait réfléchit intégralement tous les rayonnements incidents. Le facteur d'absorption ou d'émission est nul : ε = 0.
- Certains objets transmettent en partie le rayonnement incident : c'est le cas des gaz (atmosphère) 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.
Pour les gaz, le facteur de réflexion est nul : r = 0.
- Le vide est le milieu parfaitement transmetteur

$$\varepsilon + t = 1$$

$$t = 1$$

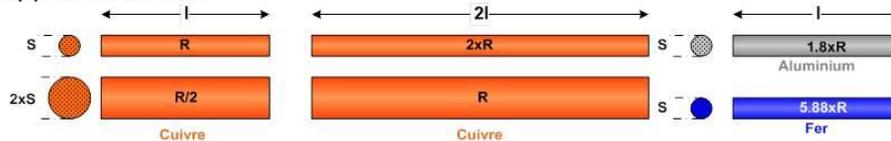
La nuit ou lorsque nous éteignons la lumière, il n'y a plus de source d'émission de rayonnements assez puissante que pour percevoir les objets situés dans notre environnement. Dans ce cas, seuls les éléments portés à plus de 520°C sont vus par l'œil humain.



ANNEXE 2 : THERMOGRAPHIE AU NIVEAU DE CONDUCTEURS ELECTRIQUES

La résistance électrique d'un conducteur homogène est directement proportionnelle à sa longueur, inversement proportionnelle à sa section, et dépend de sa nature :
 ρ est un coefficient dépendant de la nature du corps ; il est appelé résistivité.

$$R_{(\Omega)} = \rho_{(\Omega m)} \frac{l_{(m)}}{S_{(m^2)}}$$



Conducteurs		Isolants		Rigidité
Argent	$\rho = 1.46 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$	Air	$\rho = \text{infini}$	3MV/m
Cuivre	$\rho = 1.7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$	Verre	$\rho = 9 \cdot 10^{18} \Omega \cdot m$	10MV/m
Or	$\rho = 2.44 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$	Mica	$\rho = 10^{17} \Omega \cdot m$	70MV/m
Aluminium	$\rho = 2.5 \text{ à } 4.5 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$	Porcelaine	$\rho = 10^{16} \Omega \cdot m$	6MV/m
Tungstène	$\rho = 5.6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$	Silicone	$\rho = 10^{16} \Omega \cdot m$	40MV/m
Mercure	$\rho = 95 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$	Téflon	$\rho = 10^{16} \Omega \cdot m$	10MV/m
Fer	$\rho = 10^{-7} \Omega \cdot m$	Huile	$\rho = 10^{14} \Omega \cdot m$	10MV/m
Carbone	$\rho = 20 \text{ à } 80 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$	Papier sec	$\rho = 5 \cdot 10^{13} \Omega \cdot m$	5MV/m

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 :

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

- **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).

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) :

- Problème de serrage.
- Usure, oxydation ou corrosion de contacts.
- Positionnement incorrect de contacts mobiles.
- Problème de calibration de l'appareillage.
- Déséquilibre des charges entre phases.
- Ventilation insuffisante de tableaux ou locaux électriques.
- Problème de conception des installations (mauvaise sections des conducteurs).