

Créé en coopération
avec Fluke Corporation
et The Snell Group

Présentation

des principes de thermographie



AMERICAN TECHNICAL PUBLISHERS, INC.
ORLAND PARK, ILLINOIS 60467-5756

The  **Snell** Group

Le manuel de présentation des principes de la thermographie fait état des procédures communément déployées dans l'industrie et dans la pratique. Notez toutefois que la procédure exacte variera en fonction de chaque tâche. Dans tous les cas, elle devra être réalisée par un technicien qualifié. Pour une sécurité optimale, tenez toujours compte des recommandations particulières du fabricant, des réglementations spécifiées par l'assurance, des procédures en vigueur sur le site de travail et au niveau de l'installation, comme au niveau local, national et fédéral, ainsi que de toute loi et autorité applicable dans un tel cadre juridique. Les informations fournies ont pour seul but d'informer l'utilisateur. American Technical Publishers, Inc., Fluke Corporation et The Snell Group ne pourront être tenus responsables en cas de réclamation, de perte ou de dommage, personnel ou matériel, causé par la seule observation de ces informations.

© 2009 American Technical Publishers, Inc., Fluke Corporation et The Snell Group.
Tous droits réservés.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 – 09 – 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Imprimé aux Pays-Bas

ISBN 978-0-8269-1535-1





TABLE DES MATIERES

1

INTRODUCTION À LA THERMOGRAPHIE ET AUX CAMÉRAS INFRAROUGES

1

Thermographie infrarouge • Petit historique de la technologie infrarouge • Fonctionnement des caméras infrarouges

2

LA THERMOGRAPHIE ET LE RETOUR SUR INVESTISSEMENT

9

Dépannage

3

FORMATION ET SÉCURITÉ

13

Qualification et certification des thermographes • Sécurité sur le lieu de travail • Normes et procédures d'inspection écrites

4

THÉORIE PRATIQUE APPLIQUÉE

19

Principes de la thermodynamique • Méthodes de transfert thermique • Précision de la mesure de température

5

THERMOGRAMMES COULEURS D'APPLICATIONS

29

6

APPLICATIONS THERMOGRAPHIQUES

45

Applications électriques • Applications électromécaniques et mécaniques • Applications de contrôle des processus • Diagnostic de bâtiments

7

MÉTHODES D'INSPECTION

57

Thermographie comparative • Thermographie de référence • Tendances thermiques

8

ANALYSES, GÉNÉRATION DE RAPPORTS ET DOCUMENTATION

61

Analyses d'inspection • Génération de rapports et documentation

9

RESSOURCES EN MATIÈRE DE THERMOGRAPHIE

63

Ressources

10

AUTRES TECHNOLOGIES CONNEXES

65

Inspection visuelle et sonore • Analyse électrique • Détection des ultrasons ultraportés • Analyse des vibrations • Analyse de l'huile de graissage • Analyse des particules d'usure

INDEX

67



Présentation des principes de thermographie

INTRODUCTION

Le manuel Présentation des principes de thermographie, développé en coopération avec Fluke Corporation et The Snell Group, a été rédigé en vue d'expliquer dans leurs grandes lignes les principes de fonctionnement et les procédures d'utilisation des caméras infrarouges. Ces dernières sont devenues des outils de recherche et de dépannage incontournables dans le cadre des opérations de diagnostic et de maintenance préventive pour les électriciens comme les techniciens, et ce dans le cadre d'applications industrielles, commerciales et de contrôle des processus. Les caméras infrarouges constituent également un outil essentiel pour les prestataires de services spécialisés dans le diagnostic et l'inspection des bâtiments. Ce document couvre l'essentiel de la thermographie, de la théorie fondamentale au fonctionnement et à la mise en application des caméras infrarouges.

Pour obtenir des informations supplémentaires concernant les outils de diagnostic, le dépannage, la maintenance et les principes d'application aux bâtiments, consultez les sites de Fluke Corporation (www.fluke.com/thermograph), The Snell Group (www.thesnellgroup.com) et American Technical Publishers, Inc. (www.go2atp.com).

L'éditeur



INTRODUCTION A LA THERMOGRAPHIE ET AUX CAMERAS INFRAROUCHES

Les caméras infrarouges fonctionnent sur les principes de la thermographie infrarouge. Ces appareils à la fois rentables et profitables sont souvent utilisés pour la réalisation de diagnostics dans le cadre d'opérations de dépannage, de maintenance et d'inspection des circuits électriques/mécaniques, ainsi que pour les enveloppes de bâtiment.

LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

La thermographie infrarouge est la science qui consiste à utiliser des appareils électroniques de surveillance optique dans le but de mesurer la radiation et de la mettre en corrélation avec la température en surface. La *radiation* désigne le mouvement de chaleur généré par le déplacement de l'énergie radiante (ondes électromagnétiques) sans support de transfert direct. La thermographie infrarouge moderne, quant à elle, s'appuie sur des appareils optiques électroniques destinés à détecter et à mesurer les radiations de manière à les mettre en corrélation avec la température en surface de la structure ou de l'équipement inspecté.

L'homme a toujours été capable de détecter les radiations infrarouges. Les terminaisons nerveuses que nous avons sur la peau peuvent réagir à des écarts de température de l'ordre de $\pm 0,009^\circ\text{C}$. Malgré leur extraordinaire sensibilité, ces terminaisons nerveuses ne sont pas conçues pour une évaluation thermique non destructive.

Par exemple, même si l'homme était, comme certains animaux, capable de détecter une proie à sang chaud dans l'obscurité, il est fort probable qu'il nécessiterait quand même des outils de détection thermique plus sophistiqués. En raison des limites physiques de l'homme à pouvoir détecter la chaleur, des dispositifs mécaniques et électroniques hypersensibles ont été développés. Ceux-ci se sont imposés comme la norme en

matière d'inspection thermique pour de très nombreuses applications.

HISTORIQUE DE LA TECHNOLOGIE INFRAROUGE

Le mot « infrarouge » signifie « au-delà du rouge », faisant ainsi référence à la situation de cette longueur d'onde dans le spectre de radiation électromagnétique. Le terme « thermographie », quant à lui, est dérivé de mots racines signifiant « image de température ». La thermographie doit son origine à l'astronome allemand Sir William Herschel qui, en 1800, réalisa des expériences avec la lumière du soleil.



Une caméra infrarouge permet de détecter très facilement le thermogramme de la chaleur résiduelle transférée d'une main sur la surface d'un mur.

2 PRESENTATION DES PRINCIPES DE THERMOGRAPHIE

Herschel découvrit les radiations infrarouges en faisant passer les rayons du soleil à travers un prisme, tout en plaçant un thermomètre au mercure très sensible dans les différentes couleurs. Il mesura ainsi la température de chaque couleur. Herschel remarqua également que la température augmentait au-delà de la lumière rouge, dans une zone qu'il appela « chaleur noire », à savoir la partie du spectre électromagnétique connue de nos jours sous le terme « infrarouge » et reconnue comme le domaine des radiations électromagnétiques.

Vingt ans plus tard, le physicien allemand Thomas Seebeck découvrit l'effet thermoélectrique. Cette découverte donna lieu à l'invention du thermomultiplicateur, une ébauche du thermocouple, par le physicien italien Leopoldo Nobili en 1829. Ce dispositif de contact tout simple se basait sur la conviction qu'une différence de tension entre deux métaux de nature différente pouvait varier avec la température. Très vite, l'associé de Nobili, Macedonio Melloni, redéfinit le thermomultiplicateur pour créer une thermopile, une succession de thermomultiplicateurs arrangés en série, et y concentra la radiation thermique de sorte à pouvoir détecter la chaleur corporelle à une distance de 9,1 µ.

En 1880, l'astronome américain Samuel Langley eut recourt à un bolomètre, lequel lui permit de détecter la chaleur corporelle d'une vache se tenant à plus de 304 µ de distance. Plutôt que de mesurer la différence de tension, le bolomètre mesure les variations au niveau de la résistance électrique en rapport avec la variation de température. A l'aide d'un dispositif du nom d'évaporographe, le fils de Sir William Herschel, Sir John Herschel, produisit la première image infrarouge en 1840. Le thermogramme ainsi obtenu était causé par l'évaporation différentielle d'une fine pellicule d'huile et la réflexion de la lumière sur cette dernière.

Une caméra infrarouge est un dispositif capable de détecter les tendances thermiques sur le spectre d'ondes infrarouges sans entrer en contact direct avec l'équipement. Voir **Figure 1-1**. Les premières caméras infrarouges portaient le nom de « détecteurs photoconducteurs ». De 1916 à 1918, l'inventeur américain Theodore Case procéda à des expérimentations impliquant des détecteurs photoconducteurs en vue de produire un signal par le biais d'une interaction directe avec les photons plutôt que par le biais de facteurs thermiques. Le résultat ? Un détecteur plus rapide et plus sensible. Au cours des années 1940 et 1950, la technologie thermographique a été développée pour répondre à la demande grandissante liée à l'essor des applications militaires. Des scientifiques allemands découvrirent que le refroidissement du détecteur photoconducteur permettait d'augmenter les performances globales.

Mais il fallut attendre les années 60 pour que la thermographie infrarouge soit utilisée dans des applications non militaires. Les premiers systèmes déployés au sein d'applications industrielles telles que l'inspection de vastes systèmes de transmission et de distribution électriques, ils n'en étaient pas moins encombrants, lents et d'une résolution encore très faible. Les progrès réalisés au cours des années 1970 dans le domaine des applications militaires permirent de fabriquer les premiers systèmes portatifs pouvant ainsi être utilisés pour des opérations telles que le diagnostic de bâtiments et l'essai non destructif de matériaux.

CONSEIL TECHNIQUE

Les premières caméras infrarouges affichaient les images thermiques par le biais de tubes cathodiques noir et blanc. Des enregistrements sur bande magnétique ou la prise de photographie permettaient d'en conserver des archives.

Caméras infrarouges

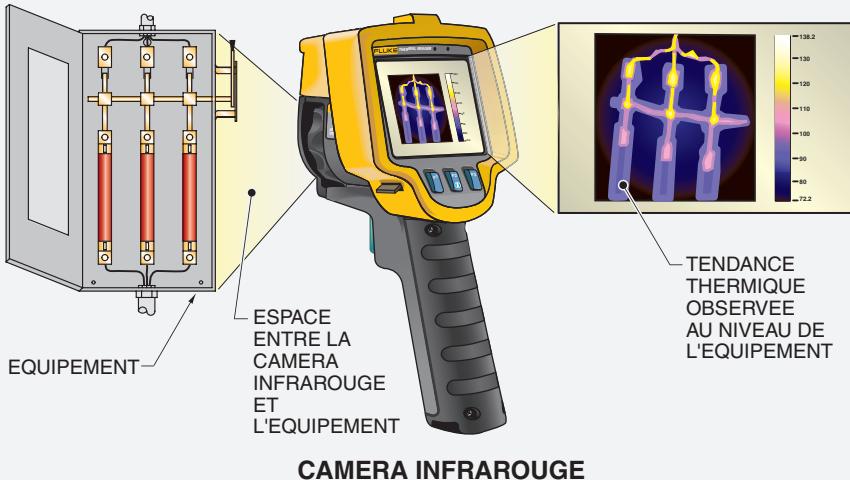


Figure 1-1. Une caméra infrarouge est un dispositif capable de détecter les tendances thermiques sur le spectre d'ondes infrarouges sans entrer en contact direct avec l'équipement.

Dans les années 1970, les systèmes thermographiques étaient fiables et durables, mais la qualité des images n'avait rien de comparable à celle des caméras infrarouges actuelles. Au début des années 1980, la thermographie infrarouge était largement utilisée dans le milieu médical, au sein de l'industrie et pour les inspections de bâtiments. Les systèmes de thermographie infrarouge étaient étalonnés de sorte à générer des images entièrement radiométriques, permettant ainsi de mesurer des températures radiométriques à n'importe quel point de l'image. Une *image radiométrique* est un thermogramme présentant des calculs de température en différents points de l'image.

Des refroidisseurs de caméra infrarouge fiables ont été développés pour remplacer le gaz comprimé ou liquéfié, utilisé jusqu'alors pour refroidir les caméras infrarouges. Des systèmes de thermographie plus abordables, fabriqués autour d'un tube, à base de vidicon pyroélectrique (PEV), ont également été créés et produits en masse. Malgré l'absence de propriétés

radiométriques, les systèmes de thermographie PEV étaient légers, portatifs et capables de fonctionner sans refroidissement.

A la fin des années 1980, un nouveau dispositif du nom de matrice à plan focal (FPA), jusqu'alors réservé au domaine militaire, fit son apparition dans la sphère commerciale. La *matrice à plan focal (FPA)* est un dispositif de détection des images constitué d'un réseau (généralement de forme rectangulaire) de détecteurs de lumière se trouvant sur le plan focal d'un objectif. **Voir Figure 1-2.**

Ceci marqua une nette amélioration par rapport aux détecteurs balayeurs d'origine, avec notamment une meilleure qualité d'image et une résolution spatiale plus sophistiquée. Sur les caméras infrarouges modernes, les matrices affichent généralement une résolution allant de 16×16 à 640×480 pixels. Un *pixel*, dans ce sens, est la plus petite unité indépendante d'un FPA capable de détecter l'énergie infrarouge. Pour les applications spécialisées, des matrices d'une résolution supérieure à $1\,000 \times 1\,000$ pixels sont

proposées. Le premier chiffre désigne le nombre de colonnes verticales ; le deuxième indique le nombre de rangées affichées à l'écran. Par exemple, une matrice de 160×120 correspond à un total de 19 200 pixels (160×120 pixels = un total de 19 200 pixels).

Matrices à plan focal

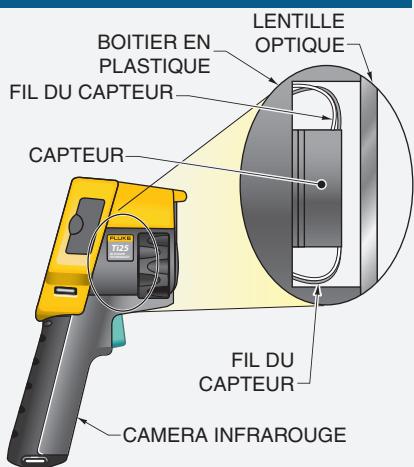


Figure 1-2. La matrice à plan focal (FPA) est un dispositif de détection des images constitué d'un réseau (généralement de forme rectangulaire) de pixels détecteurs de lumière se trouvant sur le plan focal d'un objectif.

La technologie FPA impliquant différents détecteurs s'est largement développée depuis l'an 2000. Une *caméra infrarouge à ondes longues* est un dispositif capable de détecter l'énergie infrarouge sur une bande de longueur d'onde comprise entre 8 et 15 μm . Un *micron* (μm) est une unité de mesure de longueur équivalant à un millième de millimètre (0,001 m). Une *caméra infrarouge à ondes moyennes* est un dispositif capable de détecter l'énergie infrarouge sur une bande de longueur d'onde comprise entre 2,5 et 6 μm . Certains modèles de systèmes de thermographie infrarouge à ondes longues et moyennes intègrent désormais des capacités radiométriques, très souvent associées à une fusion d'image et à une sensibilité thermique inférieure ou égale à 0,05 °C.

Ces systèmes ont vu leur prix divisé par dix depuis le début du millénaire, avec une nette amélioration de la qualité. Sans parler de l'incroyable développement des logiciels de traitement de l'image. Presque tous les systèmes infrarouges modernes disponibles dans le commerce proposent des applications logicielles facilitant l'analyse et la génération de rapports. Des rapports peuvent ainsi être créés en un rien de temps et envoyés de façon électronique via Internet ou enregistrés sous un format de type PDF sur différents types de périphériques de stockage numériques.

FONCTIONNEMENT DE LA CAMERA INFRAROUGE

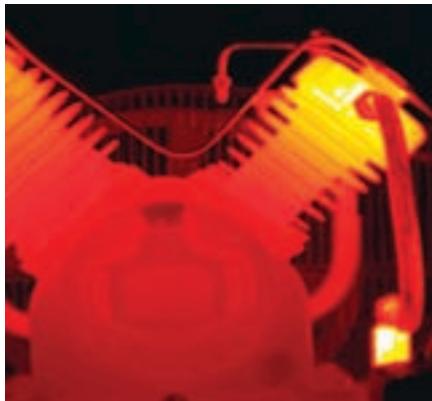
Une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes de thermographie peut s'avérer très utile, puisqu'elle permet au thermographe d'opérer dans les limites de son appareil, et ainsi de détecter et d'analyser de la façon la plus précise possible les problèmes éventuels. Le thermographe infrarouge a pour rôle de détecter les radiations infrarouges émises par la cible. **Voir Figure 1-3.** Une *cible* est un objet à inspecter à l'aide de la caméra infrarouge.

Les radiations infrarouges sont concentrées par l'objectif de la caméra sur un détecteur, générant ainsi une réponse généralement sous la forme d'une variation au niveau de la tension ou de la résistance électrique, laquelle est ensuite lue par le circuit électrique du système de thermographie. Le signal généré par la caméra infrarouge est ensuite converti en image électronique (thermogramme) sur un écran d'affichage. Un *thermogramme* est alors traité de façon électronique sur un écran d'affichage, avec la répartition de la radiation infrarouge sur toute la surface de la cible illustrée par toute une échelle de couleurs. Ce simple processus permet au thermographe de visualiser le thermogramme correspondant à l'énergie irradiée émanant de la surface de la cible.

Cibles



LA CAMERA INFRAROUGE DETECTE LES RADIATIONS INFRA-ROUGES EMISES PAR LA CIBLE



Un thermogramme est alors traité de façon électronique sur un écran d'affichage, avec la répartition de la radiation infrarouge sur toute la surface de la cible illustrée par tout un nuancier de couleurs

Figure 1-3. Une cible est un objet à inspecter à l'aide de la caméra infrarouge. Le thermographe infrarouge a pour rôle de détecter les radiations infrarouges émises par la cible.

Objectifs. Les caméras infrarouges ont toutes au moins un objectif. Cet objectif fait converger les radiations infrarouges vers un détecteur infrarouge. La réaction générée au niveau du détecteur produit une image (thermique) électronique, également appelée thermogramme. L'objectif d'une caméra infrarouge permet de faire converger les radiations infrarouges vers le détecteur. Les objectifs des caméras à ondes longues sont réalisés à base de germanium (Ge). De fines couches antiréfléchissantes améliorent les capacités de transmission des objectifs.

Composants d'imagerie thermique

De manière générale, les caméras infrarouges sont constituées de plusieurs composants : l'objectif, le cache-objectif, l'affichage, le détecteur et son équipement diélectrique, les commandes, les dispositifs de stockage des données et un logiciel de traitement des données et de génération de rapports. Ces composants peuvent varier selon le type et le modèle de système de thermographie. Voir Figure 1-4.

CONSEIL TECHNIQUE

Avec le besoin de plus en plus pressant en matière d'économies d'énergie, les municipalités et les agences gouvernementales ont recours à un procédé de balayage aérien dérivé des cartes aériennes thermographiques utilisées par l'armée. Ces balayages ont pour but de fournir aux communautés, résidents et entreprises des informations concernant la déperdition de chaleur au sein de leurs bâtiments.

Caméras infrarouges



Figure 1-4. De manière générale, les caméras infrarouges sont dotées de plusieurs composants tels que l'objectif, le cache-objectif, l'affichage, les commandes et la poignée à sangle.



Les caméras infrarouges sont généralement fournies avec une sacoche de transport dans laquelle peuvent être rangés l'instrument, les logiciels et autres équipements nécessaires lors d'un usage sur le terrain.

Affichage. Un thermogramme s'affiche sur l'écran à cristaux liquides (LCD) de la caméra infrarouge. L'écran LCD doit être suffisamment large et lumineux pour permettre une bonne visualisation, quelles que soient les conditions d'éclairage rencontrées. Un affichage permet également d'accéder à des informations telles que la charge de la batterie, la date, l'heure, la température de la cible (en °F, °C ou °K), l'image en lumière visible, ainsi qu'une légende des couleurs utilisées pour indiquer la température.

Voir Figure 1-5.

Détecteur et électronique de traitement

Le détecteur et l'électronique de traitement permettent d'extraire les informations exploitables

de l'énergie infrarouge. Les radiations thermiques d'une cible sont concentrées sur le détecteur (généralement un dispositif électronique à semi-conducteurs). Les radiations thermiques suscitent une réaction mesurable auprès du détecteur. Sa réaction est traitée de façon électronique au sein de la caméra infrarouge de sorte à générer une image thermique sur l'écran d'affichage de la caméra.

Dispositifs d'affichage

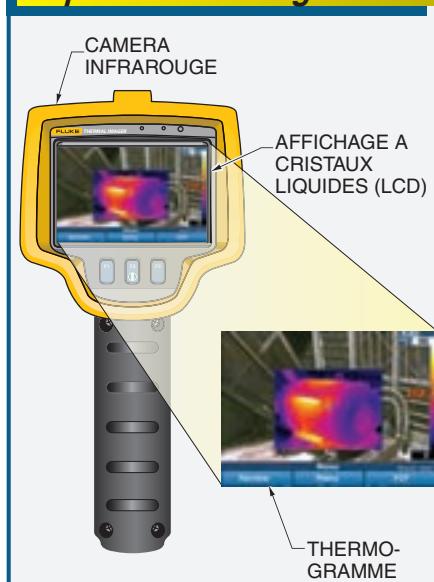


Figure 1-5. Un thermogramme s'affiche sur l'écran à cristaux liquides (LCD) de la caméra infrarouge.

Commandes. Les commandes permettent de procéder à des ajustements électroniques visant à affiner l'image thermique présente à l'écran. De tels ajustements peuvent notamment porter sur la plage de température, le niveau et la portée thermique, les palettes de couleur et la fusion d'images. L'émissivité et la température d'arrière-plan refléchie peuvent également être ajustées.

Voir Figure 1-6.

Commandes



Figure 1-6. Les commandes permettent d'ajuster des variables essentielles telles que la plage de température, l'échelle et le niveau thermique, etc.

Périphériques de stockage des données

Des fichiers numériques contenant les images thermiques et les données connexes sont enregistrés sur différents types de cartes mémoires électroniques, ou de périphériques de stockage et de transfert. De nombreux systèmes d'imagerie

8 PRESENTATION DES PRINCIPES DE THERMOGRAPHIE

infrarouge permettent également de stocker des données vocales ou textuelles complémentaires, ainsi qu'une image visuelle obtenue au moyen d'une caméra à lumière visible intégrée.

Logiciel de traitement de données et de génération de rapports. Les logiciels accompagnant la plupart des systèmes de thermographie modernes se veulent à la fois puissants et conviviaux. Des images thermiques et visuelles sont importées

sur un ordinateur, pour pouvoir y être affichées selon différentes palettes de couleurs et bénéficier d'ajustements supplémentaires au niveau de l'ensemble des paramètres radiométriques et des fonctions d'analyse. Les images ainsi traitées sont alors insérées dans des modèles de rapport, puis envoyées vers une imprimante, enregistrées sous un format électronique ou transférées à des clients via Internet.



THERMOGRAPHIE ET RETOUR SUR INVESTISSEMENT

Par le biais de caméras infrarouges, la thermographie permet de réaliser de nombreuses opérations essentielles au bon fonctionnement des environnements commerciaux et industriels, notamment au dépannage et à la maintenance des équipements et à l'inspection des enveloppes de bâtiments. Les caméras infrarouges ont de tout temps été considérées comme onéreuses. Les tâches de maintenance préventive et prédictive réalisées grâce à elles permettent pourtant de réduire de façon considérable les coûts associés à la maintenance des opérations au sein d'une infrastructure et aux interruptions de service non planifiées.

DÉPANNAGE

La thermographie infrarouge joue un rôle important dans la résolution des problèmes au sein des applications commerciales et industrielles. Certains symptômes ou dysfonctionnements permettent souvent de remettre en cause l'état de l'équipement. Ceux-ci peuvent prendre une forme simple et évidente (vibration, bruit ou relevé de température). Mais ils peuvent aussi s'avérer très difficiles, voire impossibles, à détecter.

Une *signature thermique* est une fausse image colorée de l'énergie infrarouge, de la « chaleur » dégagée par un objet. Une excellente méthode de dépannage consiste à comparer la signature thermique d'un équipement fonctionnant normalement et celle de l'équipement susceptible de présenter des anomalies. Voir Figure 2-1. La thermographie infrarouge présente le principal avantage de permettre une réalisation rapide et non destructive de diagnostics au niveau de l'équipement. De plus, comme les caméras infrarouges fonctionnent sans contact, elles peuvent être utilisées pendant le fonctionnement de l'équipement ou du composant.

Même si un thermographe n'est pas en mesure d'interpréter en intégralité un thermogramme anormal, il permet néanmoins de déterminer

la nécessité ou non de tests plus approfondis. Il est, par exemple, assez facile de procéder à une inspection rapide d'un moteur électrique pour déterminer la moindre anomalie au niveau des roulements et des couplages. Un roulement de moteur qui serait beaucoup plus chaud que le carter du moteur laisserait entendre un éventuel problème de graissage ou d'alignement. Une différence de température entre les deux côtés du couplage peut également indiquer un problème d'alignement. Voir Figure 2-2.



Un chapeau de palier très chaud indique généralement un problème au niveau de l'alignement, du graissage, du moteur ou de l'équipement auquel il est raccordé.

Signatures thermiques

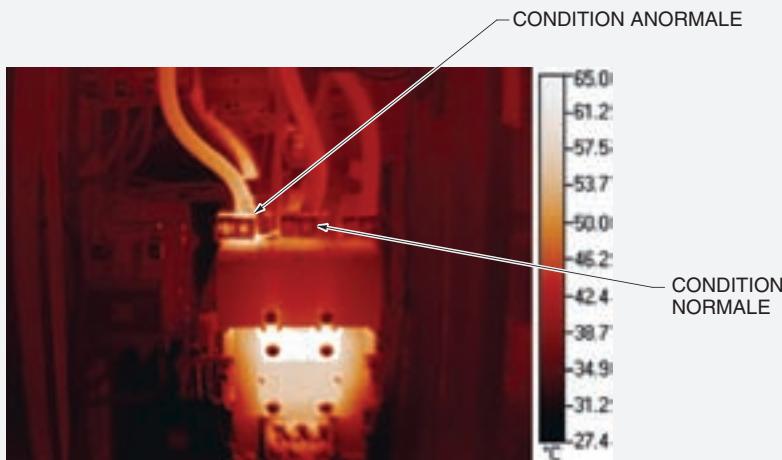


Figure 2-1. Les signatures thermiques de l'équipement d'exploitation peuvent rapidement indiquer des conditions normales et anormales.

Dépannage de roulements de moteur

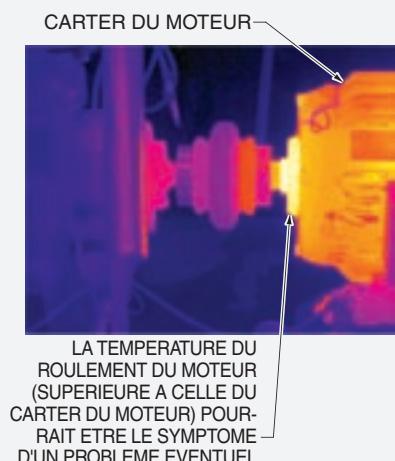


Figure 2-2. Un roulement de moteur qui serait beaucoup plus chaud que le carter du moteur laisserait entendre un éventuel problème de graissage ou d'alignement.

Pour bien réussir vos opérations de dépannage lorsque vous avez recours à la thermographie infrarouge, il est essentiel de bien comprendre les conditions requises pour la détection des anomalies et problèmes éventuels au sein d'un équipement. Par exemple, l'utilisation d'une caméra infrarouge pour le dépannage d'un disjoncteur est absolument inutile si celui-ci n'est pas activé puisque les zones d'échauffement où se situent les problèmes éventuels ne seront visibles que si le disjoncteur est sous tension. De même, le dépannage d'un purgeur de vapeur ne sera efficace que si celui-ci fait l'objet d'une observation pendant toute la durée d'un cycle de fonctionnement.

Il n'est pas toujours facile d'identifier de façon précise les conditions nécessaires à la réalisation des opérations de dépannage pour un équipement donné. En plus d'une connaissance de l'appareil et des principes de thermographie, le dépannage sous-entend une bonne compréhension des variables (transfert thermique, radiométrie,

utilisation de la caméra, fonctionnement et dysfonctionnement de l'équipement, etc.). *La radiométrie* désigne le processus de détection et de mesure de l'énergie électromagnétique irradiée dans la partie infrarouge du spectre.

Maintenance préventive

La maintenance préventive (MP) désigne les opérations planifiées en vue de préserver le bon état de fonctionnement de l'équipement. Un tel calendrier permet de réduire les dysfonctionnements et les pannes d'équipement, tout en veillant à ce que le rendement des installations et les conditions de sécurité des infrastructures restent à un niveau optimal. Le résultat ? Une plus longue durée de vie, des interruptions de service moins nombreuses et un meilleur rendement général des installations. Les tâches à effectuer pour chaque équipement et leur périodicité sont dictées par les spécifications du fabricant, les manuels d'accompagnement, les publications spécialisées et l'expérience du technicien.

La définition d'une stratégie permettant une bonne compréhension globale des conditions de fonctionnement de l'équipement, avec évaluation et contrôle des problèmes constatés, est considérée comme essentielle dans le cadre des programmes de MP. Les programmes de MP intégrant une évaluation et un contrôle des problèmes constatés peuvent être facilités par le recours à un équipement de thermographie infrarouge. L'étude des thermogrammes permet de prendre des décisions plus efficaces quant à la réparation ou au remplacement du matériel, de réduire le prix de revient global et d'augmenter la fiabilité de l'équipement. L'équipement est ainsi fonctionnel à 100 %, avec des performances garanties.

La maintenance correspond à un ensemble d'activités complexes, régies par des méthodes spécifiques. Au cours des dernières années, des recherches ont montré que de nombreuses méthodes déployées jusqu'à présent, qui impliquaient une maintenance préventive, avaient

en réalité un effet plus négatif que positif. Sans compter qu'elles n'offraient pas toujours un bon retour sur investissement.

Maintenance prédictive

La maintenance prédictive (MP) désigne le principe de surveillance de l'usure et des caractéristiques de l'équipement par rapport à un cahier des charges bien précis en vue d'anticiper la moindre panne ou le moindre dysfonctionnement. Une collecte et une analyse des données relatives au fonctionnement de l'équipement permettent d'établir des tendances au niveau des performances et des caractéristiques des composants. Des réparations sont alors effectuées en fonction des besoins.

Un tel type de maintenance exige souvent un investissement important en matière d'équipement de surveillance et de formation du personnel. Ce type de maintenance est généralement réalisé sur les équipements les plus onéreux ou essentiels au bon déroulement des opérations de fonctionnement. Les données collectées auprès de l'équipement de contrôle sont régulièrement analysées en vue d'établir la conformité des relevés par rapport aux spécifications. **Voir Figure 2-3.** Les procédures de maintenance sont uniquement réalisées si les valeurs ne correspondent pas aux spécifications. Après quoi, l'équipement fait l'objet d'un contrôle rigoureux. Si le problème réapparaît, l'application et la conception de l'équipement sont alors analysées et les modifications nécessaires sont apportées.

Un programme de maintenance prédictive bien mené permet généralement de limiter l'entretien préventif. Certaines opérations de maintenance, telles que la lubrification ou le nettoyage, sont ainsi réalisées au moment requis, plutôt que selon un calendrier fixe. La thermographie peut alors servir à déterminer l'état de santé de l'équipement et, en cas de doute, à contrôler le matériel jusqu'à la prochaine intervention possible.

Une inspection pour acceptation est une vérification réalisée au moment de l'installation initiale de l'équipement ou du remplacement d'un composant en vue d'établir une référence quant au fonctionnement de cet appareil. Une telle référence permettra de se situer par rapport aux caractéristiques de performances stipulées par le fabricant ou à établir des comparaisons par la suite. La réalisation d'inspections pour acceptation sur des équipements neufs ou remis en état est essentielle à la rentabilité des programmes de maintenance prédictive.

Quelle que soit l'application industrielle (installation d'une nouvelle salle de commandes machines, d'un nouveau toit ou d'une nouvelle conduite de vapeur, isolation d'un bâtiment), la thermographie permet de documenter l'état réel de l'équipement au moment de l'acceptation. Un thermogramme permet d'établir si l'installation a été

réalisée correctement. Toute déficience au niveau de l'installation peut être immédiatement réparée ou, si les circonstances le permettent, contrôlée jusqu'à la prochaine intervention possible.

L'utilisation de la thermographie et des thermogrammes est très utile, quels que soient les programmes de maintenance utilisés au sein d'une entreprise. Dans le cadre d'opérations de dépannage et de maintenance, ils permettent de réduire les interruptions de service et d'optimiser la durée de fonctionnement utile des équipements. En outre, ils permettent également de réaliser d'importants retours sur investissements grâce à un maintien de la fiabilité et des économies non négligeables grâce à une réduction du temps d'immobilisation, tout en facilitant la tâche des techniciens chargés de la maintenance.

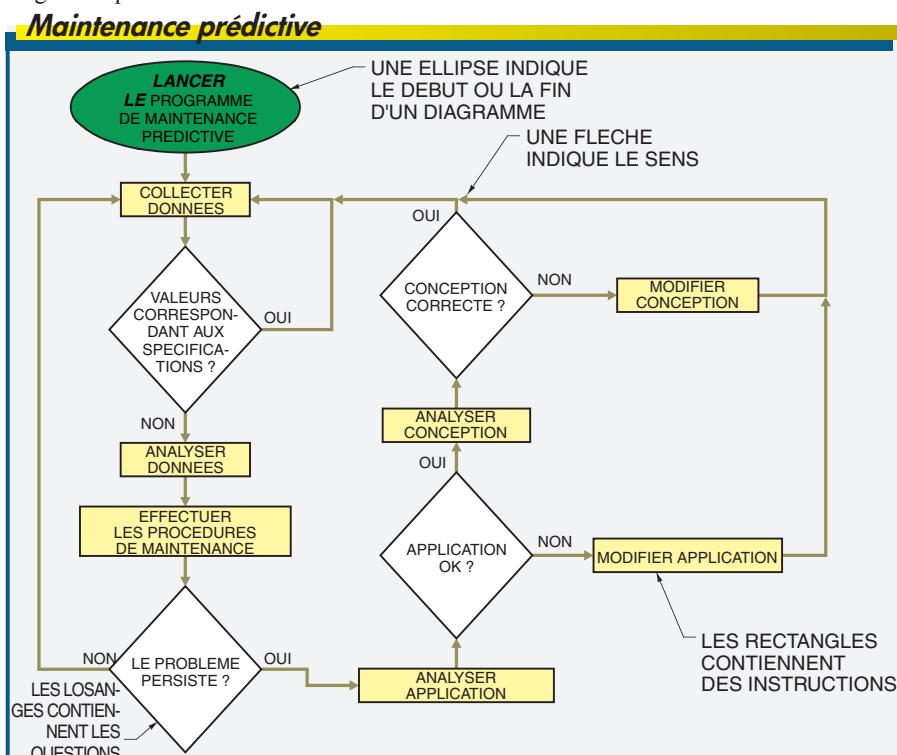


Figure 2-3. La maintenance prédictive est généralement effectuée sur l'équipement le plus onéreux ou essentiel au bon fonctionnement des opérations au sein d'une infrastructure.



FORMATION ET SECURITE

Les caméras infrarouges mettent leur incroyable polyvalence au service des applications commerciales et industrielles, où elles permettent de réaliser un grand nombre d'opérations, la plupart d'entre elles dans des lieux à haut risque tels que les équipements électriques sous tension et les installations en hauteur. Pour être réalisées de façon efficace et en toute sécurité, ces tâches exigent une formation adéquate quant à l'utilisation de la caméra infrarouge, ainsi qu'à la mise en application des mesures de sécurité. De telles formations sont régies par toute une série de normes et de procédures.

QUALIFICATION ET CERTIFICATION DES THERMOGRAPHES

La manipulation d'une caméra infrarouge moderne est assez facile à maîtriser. Il suffit généralement d'une formation de base et d'une bonne expérience sur le terrain. L'interprétation correcte d'une image correcte, cependant, est une question beaucoup plus complexe qui exige non seulement une bonne connaissance de l'application des principes de thermographie, mais aussi un apprentissage pratique et une expérience solide sur le terrain avec des caméras infrarouges.

La qualification et la certification des thermographes seront le gage d'un retour sur investissement optimal. Quel que soit le degré de certification ou l'application précise de la technologie, la qualification du thermographe se base sur trois critères : la formation, l'expérience et l'évaluation. **Voir Figure 3-1.**

La certification d'un thermographe représente certes un investissement important, mais qui portera largement ses fruits. Le personnel qualifié est ainsi en mesure d'effectuer des inspections de meilleure qualité et plus cohérentes d'un point de vue technique. Les thermographes non

certifiés seront plus à même de faire des erreurs ayant des conséquences financières et humaines très sérieuses, telles qu'un manque de précision au niveau des recommandations concernant la gravité des problèmes rencontrés, voire même une incapacité à détecter un problème. Pour pouvoir obtenir des résultats de haute qualité, les qualifications sont une chose, mais les procédures d'inspection sont tout aussi importantes.

Degrés de certification des thermographes	
NIVEAU 1	Qualifié pour la collecte de données de haute qualité et leur classification selon des critères de conformité ou non.
NIVEAU 2	Qualifié pour la configuration et l'étalonnage de l'équipement, l'interprétation des données, la génération de rapports et la supervision de techniciens de niveau 1.
NIVEAU 3	Qualifié pour le développement de procédures d'inspection, l'interprétation de codes pertinents et la gestion de programmes de supervision ou d'apprentissage, allant de la formation à l'évaluation.

Figure 3-1. Un thermographe peut être qualifié selon trois degrés de certification.

Aux Etats-Unis, c'est l'employeur qui délivre la certification, en conformité avec les normes de l'American Society for Nondestructive Testing. L'*American Society for Nondestructive Testing (ASNT)* est une organisation œuvrant à la création d'un environnement plus sécurisé, qui agit auprès des professions procédant à des essais non destructifs et encourage le développement de telles technologies par le biais de publications, de certifications, de recherches et de conférences. Dans d'autres pays, une telle certification est régie par un organisme de certification central à l'échelle nationale agissant selon les normes ISO. L'*International Organization for Standardization (ISO)* est une organisation internationale non gouvernementale constituée d'instituts de normalisation dans plus de 90 pays.

Dans les deux cas, la qualification se base sur l'adéquation de la formation reçue, comme le stipulent les documents relatifs aux normes concernées. Une période d'apprentissage ainsi qu'un examen constitué d'épreuves écrites et pratiques sont également demandés.

soient prescrites pour une application donnée. Les thermographes procédant à l'inspection des circuits électriques, par exemple, risquent d'être beaucoup plus exposés aux explosions électriques.

Dans de nombreux cas, ils sont en effet amenés à inspecter des équipements sous-tension risquant, dès l'ouverture du boîtier, de déclencher un arc de type phase à phase ou phase à masse. Un *arc électrique* est une décharge d'une température extrêmement élevée, causée par un court-circuit dans l'air. Les arcs électriques peuvent atteindre des températures de l'ordre de 19 427 °C.

Une *explosion électrique* désigne une explosion déclenchée par l'ionisation et la conductivité de l'air entourant l'équipement électrique. Le risque d'explosion électrique est plus important pour les circuits électriques alimentés par une tension supérieure ou égale 480 V.

Un *périmètre de protection contre les arcs électriques* désigne la distance suggérée à partir de laquelle le port d'un équipement de protection est prescrit en vue de réduire le risque de brûlure en cas d'arc électrique. Voir Figure 3-2. Même si un circuit doit toujours être mis hors tension avant d'effectuer une réparation, la possibilité d'une présence de circuits sous-tension au sein du périmètre de protection ne peut être totalement écartée. Des dispositifs de protection tels que des couvertures d'isolation doivent donc être utilisés en plus de l'équipement préconisé en prévention des arcs électriques. Un arc électrique a souvent des conséquences mortelles et étendues. Toujours faire preuve de prudence et agir avec sécurité.

Certes, un technicien peut réduire les risques d'explosion électrique en n'ouvrant pas la porte ou le couvercle d'un boîtier, mais une telle approche vient interférer avec la thermographie, puisque le faisceau des caméras est incapable de traverser les panneaux des boîtiers. Voir Figure 3-3. De nos jours, un grand nombre de boîtiers sont désormais dotés de hublots ou de fenêtres transparentes spécialement conçues pour laisser passer les rayons infrarouges. Ces caractéristiques permettant de réduire les risques d'arcs électriques se sont révélées très probantes.

Pour les interventions nécessitant l'ouverture de boîtiers électriques, des procédures doivent

CONSEIL TECHNIQUE

Avant de procéder à l'inspection thermique, le thermographe doit effectuer lui-même le trajet sur lequel aura lieu l'inspection afin de garantir des conditions optimales et d'écartier toute question de sécurité éventuelle.

SÉCURITÉ SUR LE LIEU DE TRAVAIL

Tout programme de certification insiste sur la prise de conscience des dangers inhérents de la thermographie, ainsi que sur les techniques et les compétences permettant de veiller à la sécurité de chacun sur le lieu de travail. La sécurité des méthodes de travail déployées relève très souvent du bon sens, mais il n'est pas rare que des précautions particulières

Périmètres de protection contre les arcs électriques				
Spécifications nominales du système (tension, portée, passage d'une phase à l'autre*)	Périmètre à approche limitée		Périmètre à approche restreinte (tenant compte des mouvements accidentels)	Périmètre interdit d'approche
	Conducteur amovible exposé	Partie de circuit -fixe exposée		
0 à 50	N/A	N/A	N/A	N/A
51 à 300	3 m	1 m	Eviter tout contact	Eviter tout contact
301 à 750	3 m	1 m	30 cm	2,5 cm
751 à 15 000	3 m	1,5 m	65 cm	18 cm

* en V

Figure 3-2. Un périmètre de protection contre les arcs électriques désigne la distance à partir de laquelle le port d'un équipement de protection est prescrit en vue de réduire le risque de brûlure en cas d'arc électrique.



Figure 3-3. Pour les interventions nécessitant l'ouverture de boîtiers électriques, des procédures doivent être soigneusement étudiées, mises en place et observées en vue de réduire au maximum les risques d'arc électrique.

être soigneusement étudiées, mises en place et observées en vue de réduire au maximum les risques d'arc électrique. La National Fire Protection Agency (NFPA) 70E est l'un des organismes de normalisation méritant d'être pris en compte lors du développement de telles procédures.

Confier à une équipe, la réalisation des inspections électriques de routine pourrait alors prendre un

caractère plus sûr et plus efficace. Une telle équipe pourrait être constituée de deux personnes, le thermographe et le technicien qualifié pour l'ouverture et la fermeture du boîtier et la mesure des charges, par exemple. Le terme *technicien qualifié* désigne toute personne jouissant de connaissances et de compétences relatives à la constitution et au fonctionnement de l'équipement électrique, ayant reçu une formation adéquate en matière de sécurité.

Les travaux d'inspection des bâtiments sont généralement beaucoup moins risqués. Il existe toutefois des risques lors de l'accès à des galeries et aux greniers. Une certaine prudence s'impose également en présence de travaux de construction en cours.

Les thermographes travaillant dans un environnement industriel quel qu'il soit doivent toujours se tenir à l'affût d'autres dangers potentiels (risques de chutes ou dangers associés à l'accès à des espaces confinés). De nombreux chantiers exigent également le port d'une tenue bien voyante. Sur les toits, une prudence s'impose face aux risques de chute, non seulement en bordure du toit, mais aussi face aux variations de niveau ou aux possibilités d'affaiblissement de la structure du toit. Les travaux réalisés sur les toits doivent systématiquement impliquer au moins deux personnes.

De même, des précautions particulières doivent être observées pour les travaux réalisés de nuit. Un thermographe peut souffrir de cécité crépusculaire après avoir observé un thermogramme sur l'affichage lumineux d'un système de

thermographie. *La cécité crépusculaire* désigne l'aveuglement temporaire d'un thermographe qui, après avoir visualisé un écran d'affichage lumineux, a du mal à ajuster sa vision et voir ainsi des objets dans l'obscurité.

Les accidents se produisent généralement quand les travaux ne sont pas planifiés ou lorsque la nature des travaux programmés est modifiée sans que le plan soit altéré pour autant. Les travaux devraient toujours être organisés autour d'un plan de sécurité scrupuleusement observé. Le moindre changement de circonstances devra donner lieu à une réévaluation du plan afin d'y apporter toute modification nécessaire.

L'Occupational Safety and Health Administration (OSHA) est une agence gouvernementale américaine constituée dans le cadre de l'*Occupational Safety and Health Act* de 1970 exigeant des employeurs qu'ils garantissent à leurs employés un environnement de travail sécurisé. OSHA exige, par exemple, que les espaces de travail soient exempts de tout danger risquant de provoquer des blessures graves. Le gouvernement américain fait appliquer les provisions de l'OSHA. Des plans de travail sécurisés peuvent être créés conformément aux directives de l'OSHA.



Les inspections thermiques des équipements électriques haute puissance doivent être réalisées au-delà d'un certain périmètre de sécurité.

NORMES ET PROCÉDURES D'INSPECTION ÉCRITES

Des procédures d'inspection écrites sont essentielles à l'obtention de résultats de qualité. Par exemple, un gâteau est beaucoup plus difficile à réaliser sans recette. Même si elles représentent un véritable investissement, ces « recettes pour réussir » n'ont pas besoin d'être particulièrement compliquées.

De manière générale, l'implication d'un petit groupe d'individus jouissant d'une expérience adéquate du processus d'inspection peut s'avérer très utile afin de rassembler différents points de vue, différents domaines d'expertise et différentes responsabilités. Une fois créée, une procédure d'inspection doit être scrupuleusement vérifiée et faire l'objet de révisions régulières par un personnel certifié afin de veiller à ce qu'elle continue à représenter les pratiques exemplaires.

Il existe de nombreuses normes d'inspection sur lesquelles baser des procédures d'inspection basiques. L'*International Organization for Standardization (ISO)* et l'*American Society of Testing Materials (ASTM)*, par exemple, ont travaillé en collaboration avec des représentants de différentes professions à la création d'un certain nombre de normes. *La société technique American Society of Testing Materials (ASTM) International* est l'un des principaux organismes de normalisation volontaire, mettant à disposition les données techniques et les services destinés à la promotion de la sécurité et de la santé publiques. ASTM International contribue également à la fiabilité des produits, matériaux et services proposés sur le marché.

En plus de permettre une évaluation des performances des systèmes infrarouges, ces normes décrivent les pratiques exemplaires à appliquer lors de différentes opérations (détectons de fuites d'air, inspection de l'isolation des bâtiments, des circuits électriques/mécaniques, des toitures et des tabliers de ponts autoroutiers). D'autres normes dictées par des organismes de

normalisation nationaux peuvent s'avérer utiles. Ils sont nombreux, par exemple, à proposer des normes régissant la sécurité électrique directement applicables aux travaux des thermographes qui inspectent les circuits électriques.

La technologie infrarouge est devenue très accessible, grâce au vaste choix de caméras infrarouges actuellement sur le marché et

disponibles à tous les prix. Les organisations choisissant d'investir dans le développement de programmes de thermographie infrarouge fiables et robustes impliquant des procédures d'inspection et une qualification du personnel ont un atout particulier : celui de bénéficier d'avantages à long terme dont d'autres organisations ne jouiront pas forcément. **Voir Figure 3-4.**

Caméras infrarouges



MAINTENANCE GENERALE,
DEPANNAGE ET INSPECTIONS
DE BASE



APPLICATIONS SPECIALISEES,
COMPLEXES OU INTENSES EXIGEANT
DES CAPACITES DE DETECTION
ET D'ANALYSE AVANCEES

Figure 3-4. Différents types de caméras infrarouges sont proposés selon le type d'application et d'inspection souhaité.

18 PRESENTATION DES PRINCIPES DE THERMOGRAPHIE



THEORIE PRATIQUE APPLIQUEE

En théorie et dans son étude, la thermodynamique se base sur les variations de transfert de chaleur entre les différents matériaux. Les relevés effectués par les caméras infrarouges reposent sur les principes de thermodynamique de base. Les techniciens doivent être capables de comprendre les limites de la thermographie et des caméras infrarouges en fonction des structures, des équipements et des matériaux.

PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE

La thermodynamique désigne l'étude des mouvements et de la transformation de l'énergie thermique (chaleur), ainsi que de son effet sur la matière. Une bonne compréhension des principes de base en matière de transfert et de radiation thermiques est essentielle à l'utilisation de l'équipement infrarouge moderne. Aussi puissant soit-il, l'équipement moderne a toujours besoin d'une intervention humaine. Sa valeur se définit par la capacité de son utilisateur à interpréter les données, exercice qui nécessite une bonne compréhension pratique des principes du transfert et de la radiation thermiques.

L'énergie désigne la capacité à réaliser une tâche. Cette énergie peut s'exprimer de façons très différentes. Prenons l'exemple d'une centrale thermique alimentée au charbon. L'énergie chimique du combustible fossile est transformée en énergie thermique par un principe de combustion. Cette énergie produit à son tour une énergie mécanique ou un mouvement au sein d'un générateur à turbine pour y être convertie en énergie électrique. Malgré la difficulté grandissante à canaliser l'énergie au fil des différentes conversions, celle-ci est intégralement préservée.

Le premier principe de la thermodynamique est une loi scientifique selon laquelle l'ampleur du mouvement et la quantité de chaleur sont toujours équivalentes lors de la transformation

d'un mouvement mécanique en chaleur ou de chaleur en mouvement mécanique. Pour les thermographes, ceci présente l'avantage de garantir que la quasi-totalité des produits dérivés des conversions énergétiques auront une forme thermique. L'énergie ne peut être créée ni détruite. Elle peut uniquement être altérée.

La température correspond à la mesure de la chaleur ou de la fraîcheur relative d'un corps par rapport à un autre. Pour ce faire, nous prenons inconsciemment pour référence la température de notre corps ou de l'air ambiant, ainsi que les points de gel et d'ébullition de l'eau.

Le deuxième principe de la thermodynamique stipule qu'en cas de différence de température entre deux corps, l'énergie thermique passe des parties les plus chaudes (énergie supérieure) aux parties les plus froides (énergie inférieure), jusqu'à obtention d'un équilibre thermique. Un transfert de chaleur donne lieu à un transfert d'électrons, ou à une augmentation au niveau de la vibration atomique ou moléculaire. Il s'agit-là d'un point important à retenir puisque de tels effets sont mesurés en même temps que la température.

MÉTHODES DE TRANSFERT THERMIQUE

Il existe trois méthodes de transfert pour l'énergie thermique : la conduction, la convection ou la radiation. Chaque méthode peut être réalisée de

façon stationnaire ou transitoire. Un transfert stationnaire s'effectue à une vitesse constante et toujours dans la même direction. Sous charge constante, une machine correctement préchauffée procède, par exemple, à un transfert thermique régulier vers les éléments qui l'entourent. Mais, en réalité, aucun flux de chaleur n'est parfaitement stationnaire. Il existe toujours de légères fluctuations transitoires, mais pour des raisons pratiques, celles-ci ne sont généralement pas prises en compte.

La conduction désigne le transfert d'énergie thermique d'un objet à un autre par le biais d'un contact direct. *La convection* désigne le transfert de chaleur obtenu lors d'un mouvement de molécules et/ou d'une circulation de courants entre des masses d'air, de gaz ou de liquides chaudes et froides. *La radiation* désigne le mouvement de chaleur généré par le déplacement de l'énergie radiante (ondes électromagnétiques) sans support de transfert direct. Lorsqu'une machine se réchauffe ou se refroidit, la chaleur est transférée de manière transitoire. En raison de l'étroite relation existant bien souvent entre le mouvement de chaleur et la température d'un objet, il est important que les thermographes soient familiers avec de tels principes et qu'ils comprennent parfaitement la relation entre les différents éléments.

Concept de la capacité thermique

La capacité thermique désigne la capacité d'un matériau à absorber et à retenir la chaleur. Un transfert de chaleur qui s'effectue à des vitesses différentes et/ou dans différentes directions est qualifié de transitoire.

En outre, l'implication de différents matériaux sous-entend un échange d'énergie en quantités différentes lors des ajustements de température. Par exemple, le changement de température de l'air d'une pièce nécessite très peu d'énergie par rapport à la quantité requise pour modifier la température d'un volume d'eau équivalent au sein d'une piscine. La capacité thermique spécifie l'ajout ou la perte d'énergie requise au

changement de température d'un matériau. La rapidité d'un tel échange dépend également du mouvement de chaleur.

Le principe de la capacité thermique, le nom que nous donnons aux relations entre la chaleur et la température, n'est certes pas toujours très clair, mais, bien maîtrisé, il peut s'avérer très utile pour le thermographe. Il permettra par exemple de déterminer le niveau de liquide dans un réservoir grâce à un calcul de la différence entre la capacité thermique de l'air et du liquide. A l'état transitoire, les deux matériaux coexistent souvent à des températures différentes.

Conduction

La conduction désigne le transfert d'énergie thermique d'un objet à un autre par le biais d'un contact direct. Le transfert thermique par conduction s'opère principalement au niveau des solides et, dans une certaine mesure, des liquides. Les molécules les plus chaudes transfèrent directement leur énergie aux molécules plus froides se trouvant à proximité. Lorsque vous touchez, par exemple, une tasse de café chaude ou une cannette de soda froide, une conduction s'opère.

La vitesse de transfert de la chaleur dépend de la conductivité des matériaux et de la différence de température (ΔT ou « température delta ») entre les objets. La loi de Fourier explique de tels rapports de façon plus formelle. Lorsque vous prenez une tasse de café avec des gants, par exemple, l'échange de chaleur est beaucoup plus faible que si vous le faisiez à main nue. La différence de température étant moindre, une tasse de café chaude ne transfert pas autant d'énergie qu'une tasse brûlante. De même, un transfert énergétique selon un rapport similaire, mais sur une surface beaucoup plus importante, demande bien plus d'énergie.

Un *conducteur* est un matériau capable de transférer la chaleur. Les métaux sont généralement de très bons conducteurs de chaleur, mais leur conductivité peut varier d'un métal à un autre. Le fer, par exemple, est beaucoup moins conducteur que l'aluminium. Un *isolant* est

un matériau incapable de transférer la chaleur. Les matériaux dont les propriétés conductrices sont très faibles sont appelés isolants. Il s'agit souvent tout simplement de matériaux, telle la mousse isolante ou une succession d'épaisseurs de vêtements, reposant sur la capture de petites poches d'air en vue de ralentir le transfert énergétique. Voir Figure 4-1.

Convection

La convection désigne le transfert thermique généré par une circulation de courants au sein de masses de liquide chaudes et froides. Un tel échange de chaleur s'opérant au niveau des gaz et des liquides implique un mouvement en masse des molécules à différentes températures. Un cumulonimbus est un exemple de convection à grande échelle : la remontée de masses d'air chaud provoque un mouvement d'air froid vers le bas. Autre exemple à plus petite échelle : l'Irish Coffee, avec la crème froide qui, une fois versée dans le café chaud, descend au fond de la tasse par mouvement de convection.

Le transfert de chaleur convectif est également déterminé en partie par la différence de température et de surface. Par exemple, un radiateur de moteur est capable de transférer une quantité de chaleur plus importante lorsqu'il est associé à un gros moteur plutôt qu'à un petit en raison de la surface de contact plus importante. Le transfert thermique convectif est également influencé par d'autres facteurs tels que la vitesse du liquide, le sens d'écoulement du liquide et la surface de l'objet. Un radiateur de moteur rempli de poussière ne sera pas aussi efficace qu'un radiateur propre. Comme pour la conduction, nous disposons généralement d'une bonne idée pratique de ces relations décrites de façon plus formelle par la loi du refroidissement de Newton. Une convection naturelle s'opère lorsque des liquides chauds remontent, provoquant ainsi un mouvement vers le bas des liquides plus froids, tels que dans le cas des tubes de refroidissement de transformateurs à bain d'huile. Voir Figure 4-2.

Isulateurs

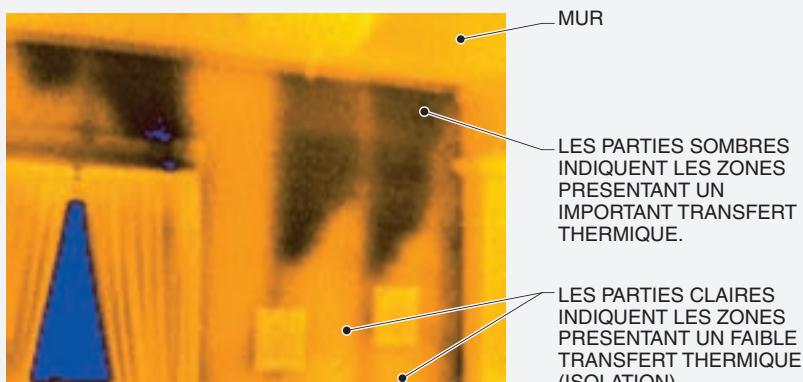
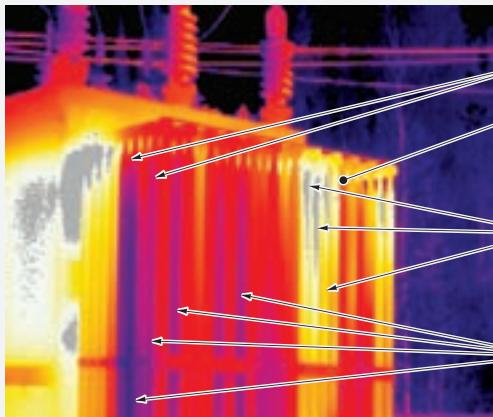


Figure 4-1. Des isolants sont intégrés aux murs en vue de contrôler le transfert de chaleur. Une mauvaise isolation empêche un contrôle correct du transfert de chaleur.

Convection naturelle



TUBES DE REFROIDISSEMENT

TRANSFORMATEUR A BAIN D'HUILE (REFROIDISSEMENT PAR CONVECTION NATURELLE, AVEC CIRCULATION D'HUILE CHAUTE DANS DES TUBES DE REFROIDISSEMENT)

DANS UN MODELE DE CIRCULATION NORMAL, DE L'HUILE CHAUTE (PLUS CLAIRE) CIRCULE DANS LA PARTIE SUPERIEURE ET DE L'HUILE FROIDE (PLUS FONCÉE) CIRCULE DANS LA PARTIE INFÉRIEURE.

LES SECTION FONCÉES AU NIVEAU DES TUBES INDIQUENT UNE QUANTITÉ FAIBLE OU NULLE D'HUILE EN CIRCULATION

Figure 4-2. Une convection naturelle se produit par mouvement de chassé-croisé entre l'huile chaude qui s'élève et l'huile froide qui descend, comme, par exemple, au sein des tubes de refroidissement d'un transformateur à bain d'huile.

Une convection forcée (pompe, ventilateur, etc.) vient généralement par sa puissance contrecarrer les réponses naturelles. Nous avons plus froid en plein vent qu'à l'abri, ce qui vient prouver que nous perdons plus rapidement de la chaleur lorsque nous sommes exposés à l'air. Le vent a également une forte influence sur la température des objets inspectés au moyen de thermogrammes.

L'énergie électromagnétique peut prendre des formes diverses : lumière, ondes radio, radiation infrarouge, etc. La principale différence entre chacun de ces aspects se trouve au niveau de leur longueur d'onde. L'œil normal détecte des longueurs d'ondes appelées « lumière visible ». Les caméras infrarouges, elles, détectent des longueurs d'ondes appelées « chaleur irradiée » (ou radiation infrarouge). Chaque longueur d'onde se situe à un endroit différent du spectre électromagnétique.

L'équation de Stefan-Boltzmann décrit par le terme radiation les rapports régissant les mouvements thermiques. Tous les objets irradiient de la chaleur. Comme dans le cas de la conduction et de la convection, la quantité nette d'énergie irradiée dépend de la surface et des différences de température. Plus un objet est chaud, plus il rayonne d'énergie. Par exemple, lorsqu'un brûleur de gazinière chauffe, il irradie une quantité d'énergie plus importante que lorsqu'il est froid.

La radiation thermique désigne la transmission de chaleur au moyen d'ondes électromagnétiques. La principale différence entre les ondes se trouve

Radiation

La radiation correspond au transfert d'énergie, et de chaleur, notamment, qui s'opère de façon extrêmement rapide entre deux objets grâce à une énergie électromagnétique. L'absence de support de transfert requis permet même de réaliser des radiations dans du vide. La chaleur du soleil que vous ressentez lors d'une journée d'hiver est un exemple d'énergie électromagnétique.

L'énergie électromagnétique se définit comme une radiation sous forme d'ondes présentant des propriétés électriques et magnétiques.

au niveau de leur longueur. Contrairement aux radiations électromagnétiques (lumière) visibles à l'œil humain, la chaleur irradiée est visible uniquement par le biais de systèmes de thermographie. Le *spectre électromagnétique* correspond à la plage constituée par tous les types de radiation électromagnétique en fonction de leur longueur d'onde. Voir Figure 4-3.

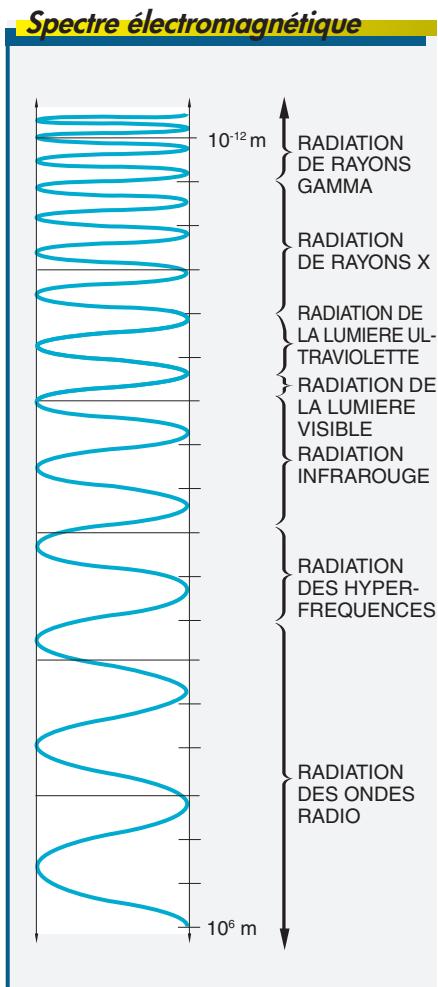


Figure 4-3. Le spectre électromagnétique correspond à la plage constituée par tous les types de radiation électromagnétique en fonction de leur longueur d'onde.

Concept de la préservation de l'énergie

Les radiations lumineuses et infrarouges se comportent de la même manière dans la façon dont elles réagissent avec certains matériaux. Les radiations infrarouges sont réfléchies par certains types de surfaces, tels que le revêtement métallique figurant sous le brûleur d'une gazinière. Des caméras infrarouges permettent de visualiser les reflets d'objets chauds et froids sur certaines surfaces telles que des métaux brillants que nous appelons « miroirs thermiques ». Dans quelques rares cas, la radiation infrarouge est transmise par le biais d'une surface telle que l'objectif d'un système de thermographie infrarouge. Une radiation infrarouge peut également être absorbée par une surface. C'est le cas d'une main qui s'approcherait du brûleur. Dans ce cas, une température entraîne un changement au niveau des résultats et une plus grande émission d'énergie au niveau de la surface.

La transmission désigne le passage d'une énergie irradiée par un matériau ou une structure. Une radiation infrarouge peut également être absorbée par une surface, provoquant ainsi un changement de température et une plus grande émission d'énergie à la surface de l'objet. *L'absorption* correspond à l'interception d'une énergie irradiée. *L'émission* désigne la décharge d'énergie irradiée. Un système de thermographie infrarouge est capable de capter les radiations réfléchies, transmises, absorbées et émises, même si seule l'énergie absorbée ou émise a une incidence sur la température de la surface. Voir Figure 4-4.

CONSEIL TECHNIQUE

Le type et l'orientation des réflexions sont dictés par les irrégularités de la surface. Les surfaces lisses sont considérées comme des réflecteurs spéculaires ; les surfaces rugueuses ou présentant des motifs comme des réflecteurs diffus.

Réflexion, Transmission, Absorption et Emission

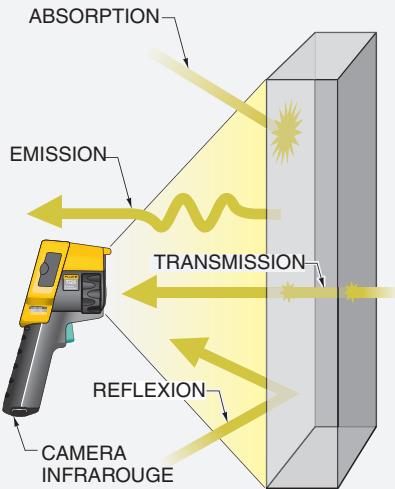


Figure 4-4. Les radiations peuvent susciter différentes réactions : une réflexion, une transmission, une absorption ou une émission.

En outre, l'efficacité de l'émission d'énergie en surface détermine l'ampleur de la chaleur irradiée par une surface. La plupart des matériaux non métalliques (surfaces peintes, peau, etc.) émettent de l'énergie de façon plutôt efficace. Ce qui signifie que, plus leur température augmente, plus ils rayonnent de l'énergie. Exactement comme dans le cas de la gazinière.

D'autres matériaux (métalliques pour la plupart) non peints ou fortement oxydés affichent des propriétés moindres en matière de radiation énergétique. Le chauffage d'une surface métallique nue offre une très faible augmentation relative au niveau du transfert de chaleur irradiée. La différence entre deux surfaces métalliques, l'une froide, l'autre chaude, est donc très difficile à percevoir, à l'œil nu comme sur un thermogramme. Les métaux nus jouissent généralement d'une faible émissivité (faible efficacité d'émission). L'émissivité se caractérise

sous la forme d'une valeur comprise entre 0,0 et 1,0. Une surface présentant une valeur de 0,10, comme c'est généralement le cas pour le cuivre brillant, n'émet que très peu d'énergie par rapport à la peau humaine, laquelle présente une émissivité de 0,98.

Les caméras infrarouges affichent l'énergie généralement invisible à l'œil nu, un phénomène parfois déconcertant. Les surfaces présentant une faible émissivité, les métaux, par exemple, sont incapables d'émettre de l'énergie de façon efficace et réfléchissent la chaleur des éléments se trouvant à proximité. La lecture d'une surface à l'aide d'un dispositif de thermographie infrarouge permet d'obtenir une image sur laquelle les radiations émises et réfléchies se côtoient. Pour bien interpréter les éléments affichés, le thermographe doit distinguer l'énergie émise de l'énergie réfléchie.

L'émissivité des matériaux peut être affectée par plusieurs facteurs autres que le type de matériaux, tels que l'état de la surface, la température et la longueur d'onde. L'émissivité réelle d'un objet peut également varier avec l'angle de champ. Voir Figure 4-5.

L'émissivité de la plupart des matériaux mats est relativement facile à caractériser. La plupart des matériaux ont déjà fait l'objet d'une caractérisation. Leurs valeurs d'émissivité sont indiquées dans les tableaux correspondants. Ces valeurs d'émissivité sont fournies uniquement à titre indicatif puisque l'émissivité exacte d'un matériau pourrait varier par rapport à ces valeurs. Aussi, un thermographe expérimenté devra également savoir mesurer sa valeur réelle. Voir Figure 4-6.

L'émission d'énergie thermique est plus importante et plus rapide au niveau des cavités, des écarts et des orifices que sur les surfaces qui les entourent. Il en va de même pour la lumière visible. Si la pupille de nos yeux est de couleur noire, c'est qu'il s'agit d'une cavité absorbant la lumière qui y pénètre. Lorsque toute la lumière

Emissivité

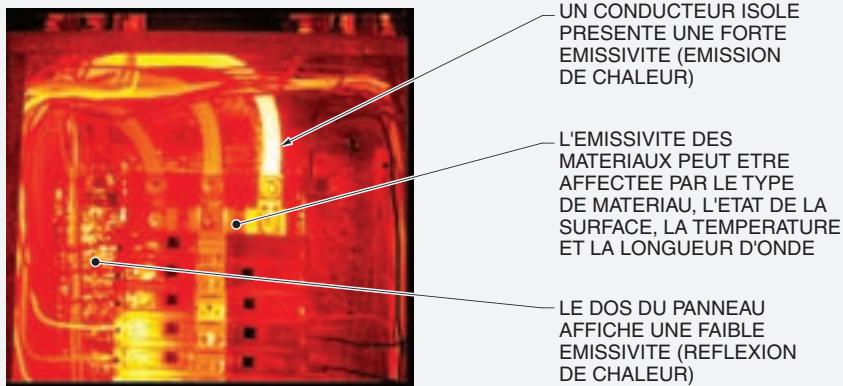


Figure 4-5. Le type de matériau, l'état des surfaces, la température et la longueur d'ondes... autant de critères ayant une influence sur le degré d'émissivité des matériaux.

Valeurs d'émissivité des matériaux communs

Matériau	Emissivité*
Acier, forte oxydation	0,88
Acier, galvanisé	0,28
Aluminium, poli	0,05
Bandé isolante électrique, noire, en plastique	0,95
Béton	0,54
Brique, commune	0,85
Brique, réfractaire, rugueuse	0,94
Caoutchouc	0,93
Cuivre, poli	0,01
Cuivre, noir oxydé	0,88
Eau	0,98
Fonte, brute de fonderie	0,81
Laque, bakélite	0,93
Papier goudronné	0,92
Papier, noir, mat	0,94
Peinture à base d'huile de type normal	0,94
Porcelaine, vitrifiée	0,92
Verre	0,92

* La quasi totalité de l'émissivité des matériaux est mesurée à 0 °C, mais celle-ci ne varie guère à température ambiante.

Figure 4-6. Les tableaux d'émissivité dressent une liste des valeurs d'émissivité de nombreux matériaux.

est absorbée par une surface, celle-ci est qualifiée de « noire ». Si la profondeur d'une cavité est sept fois supérieure à sa largeur, son émissivité approchera les 0,98.

Température de surface

De manière générale, puisque seul le modèle de température en surface est visible pour la plupart des objets en raison de leur opacité, les thermographes doivent interpréter et analyser ces modèles et les mettre en corrélation avec la température et la structure internes de l'objet. Le mur extérieur d'une maison, par exemple, présentera différents modèles de chaleur, mais le thermographe aura pour mission de les mettre en relation avec la structure et les performances thermiques du bâtiment. Pour agir avec précision, il devra comprendre les principes du déplacement de la chaleur à travers les différents composants et matériaux rentrant dans la composition du mur.

Par temps froid, la chaleur présente à l'intérieur de la maison traverse la structure du mur jusqu'à la surface extérieure du bâtiment, pour atteindre

alors en surface un équilibre thermique avec son environnement. C'est ce phénomène que les thermographes étudient à la surface du bâtiment au moyen d'une caméra infrarouge et dont ils interprètent les manifestations. De tels rapports s'avèrent assez complexes, mais leur compréhension n'est souvent qu'une question de bon sens et d'observation des principes de base.

Emissivité

En raison de leur faible degré d'émission et de leur forte réflexion, les métaux non peints ou fortement oxydés sont difficilement lisibles sur un thermogramme. Ces facteurs doivent être pris en compte dans l'observation des modèles thermiques ainsi que lors d'un relevé de température radiométrique. De nombreuses caméras infrarouges permettent de corriger l'émissivité et l'environnement thermique reflété. Des tableaux de correction de l'émissivité ont été développés pour de nombreux matériaux.

Ceux-ci peuvent s'avérer très utiles à une bonne compréhension du comportement d'un matériau donné, mais, dans la réalité, les erreurs rencontrées lors des corrections effectuées sur la plupart des surfaces présentant une faible émissivité peuvent être beaucoup trop importantes pour être tolérées. Pour augmenter l'émissivité de ces surfaces, il est donc conseillé de les peindre ou de les recouvrir de ruban adhésif électrique. L'interprétation et les mesures n'en seront que plus précises et plus pratiques.

PRÉCISION DE LA MESURE DE TEMPÉRATURE

Les instruments de diagnostic infrarouges modernes sont très précis. Les diagnostics réalisés sur des surfaces moyennement chaudes présentant une forte émissivité sur une plage de résolution d'un système ont généralement une précision de l'ordre de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou de 2 % de la

mesure (caractéristiques variables en fonction du modèle de caméra). L'absence de contact avec les objets testés confère ainsi une valeur considérable à la technologie et aux instruments infrarouges en raison du caractère toujours plus précis des mesures.

Les mesures de la température étant basées sur la détection des radiations infrarouges, leur précision sera affectée par les facteurs suivants :

- Valeurs d'émissivité inférieures à 0,6
- Variations de température de $\pm 30^{\circ}\text{C}$
- Prise de mesures au-delà de la résolution du système (cible trop petite ou trop éloignée)
- Champ de visée

Champ de visée (FOV)

Le *champ de visée (FOV)* est une caractéristique définissant la taille des éléments affichés sur un thermogramme. L'objectif influe énormément sur le champ de visée et ce, quelle que soit la taille de la matrice. Cependant, des matrices larges offriront un niveau de détail plus élevé que les matrices étroites, quel que soit l'objectif utilisé. Un champ de visée large peut s'avérer très utile dans le cadre de certaines applications telles que les travaux sur des postes extérieurs ou à l'intérieur d'un bâtiment. Des matrices plus petites offrent un niveau de détail suffisant pour l'intérieur d'un bâtiment, mais une précision supplémentaire est requise pour les postes électriques. Voir Figure 4-7.

Champ de visée instantané (IFOV)

Le *champ de visée instantané (IFOV)* est une caractéristique décrivant la capacité d'une caméra infrarouge à décomposer les détails dans l'espace (résolution spatiale). L'IFOV est généralement spécifié sous la forme d'un angle en milliradians

Champ de visée (FOV)

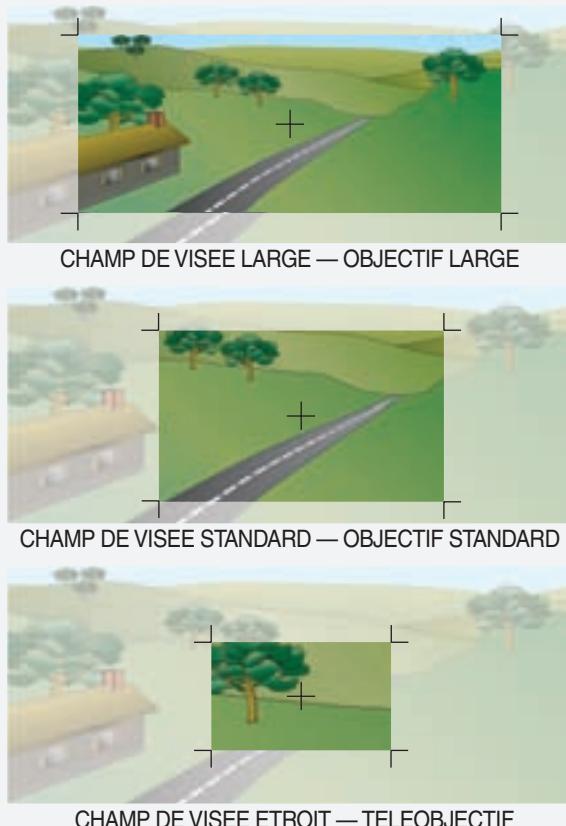


Figure 4-7. Le champ de visée (FOV) désigne la zone présente sur le thermogramme avec un objectif particulier.

(mRad). Projecté par l'objectif du détecteur, le champ de visée instantanée permet d'obtenir la taille d'un objet visible à une distance donnée.

Le *champ de visée instantané (IFOV)* correspond à la résolution mesurée d'une caméra thermique décrivant l'objet le plus petit possible pouvant être mesuré à une distance donnée. **Voir Figure 4-8.** Généralement spécifié sous la forme d'un angle (en mRad), il est généralement trois fois plus grand que le champ de visée instantané réel. Ceci est dû au fait que, pour procéder aux

mesures, la caméra nécessite plus d'informations concernant la radiation qu'elle n'en a besoin pour la détecter. Il est donc essentiel de comprendre les résolutions spatiales et mesurées applicables

CONSEIL TECHNIQUE

Le rayonnement énergétique des cibles des caméras infrarouges peut être mesuré sur le spectre infrarouge. Plus la cible chauffe, plus elle rayonne de l'énergie. La chaleur irradiée par les cibles très chaudes est perceptible par l'œil humain.

à chaque système et d'opérer en fonction, pour éviter d'obtenir des données imprécises ou des résultats improbables.

Effets sur l'environnement

La valeur d'une mesure de surface, aussi précise soit-elle, peut chuter largement en cas de rapport thermique important entre la surface étudiée et la source de chaleur interne, comme dans le cas de problèmes de connexion interne au sein d'un équipement électrique à bain d'huile. Le thermographe n'observera que très peu de changements en surface au moment de la transition qui s'opère au niveau de la connexion. Bizarrement, des objets tels que des connexions électriques vissées présentent souvent un

important gradient thermique, même sur une courte distance physique. La prudence s'impose donc lors de l'interprétation d'un thermogramme, afin de comprendre les conditions internes réelles.

Une baisse de valeur similaire peut être observée sous l'effet d'influences extérieures importantes ou inconnues sur la température en surface. Ceci peut, par exemple, être pris en compte lors de la recherche d'une intrusion d'humidité sous un toit peu incliné en cas de grand vent. Aucun signe ne laisse entrevoir la présence d'humidité. La signature thermique caractéristique du problème disparaît souvent. Les surfaces humides peuvent être déconcertantes en cas d'évaporation ou de gel.

Résolution spatiale et mesurée

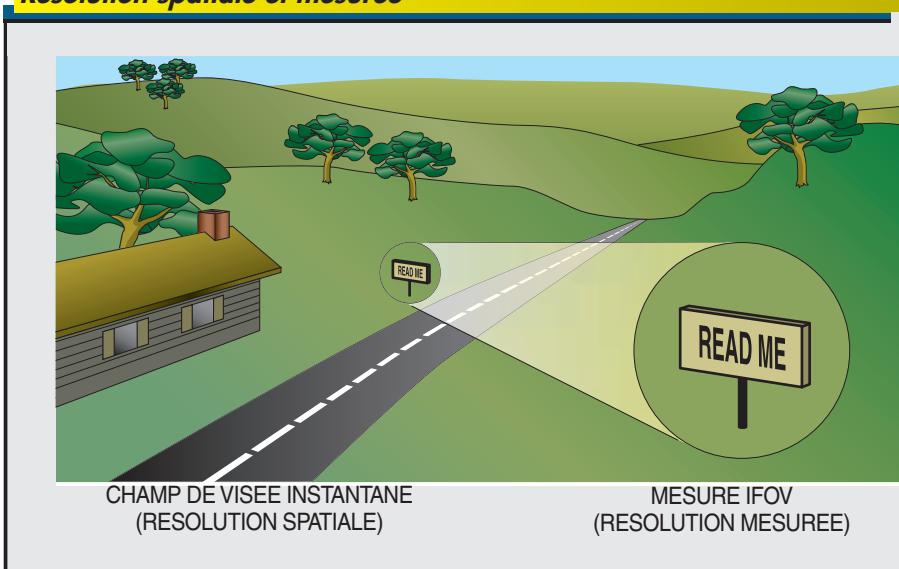


Figure 4-8. Le champ de visée instantané (IFOV) correspond à la résolution mesurée d'une caméra infrarouge décrivant l'objet le plus petit possible pouvant être mesuré à une distance donnée. Par comparaison, l'IFOV correspondrait plus ou moins à la vue d'un panneau qui se trouverait à distance. Sa mesure, quant à elle, équivaudrait à la lecture de ce panneau suite à un rapprochement ou à un agrandissement.



THERMOGRAMMES COULEURS DE DIFFERENTES APPLICATIONS

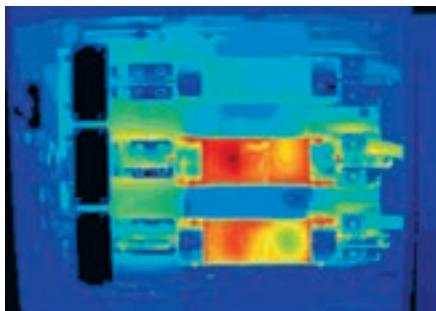


Figure 5-1. Sur un thermogramme, la zone d'échauffement ne correspond pas toujours à la source du problème. Cette image laisse entendre que le fusible supérieur pourrait être grillé et que le fusible central pourrait bien, lui aussi, connaître quelques problèmes.

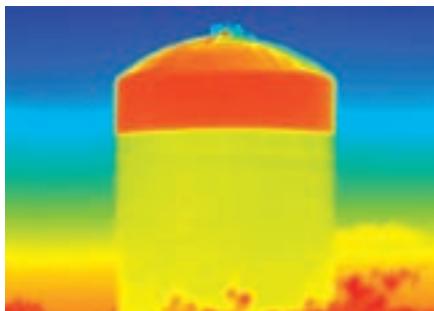


Figure 5-2. Des conditions propices permettent de détecter facilement le niveau de liquide dans un réservoir de stockage.

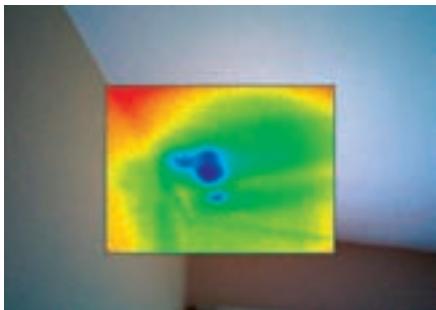


Figure 5-3. Sur le thermogramme, une tache bleue (ou sombre) indique une présence d'humidité anormale sur le plafond.



Figure 5-4. Sur cette incrustation d'images d'un registre HVAC, la traînée thermique de couleur claire indique une importante fuite d'air au niveau des raccords du système de gaines.

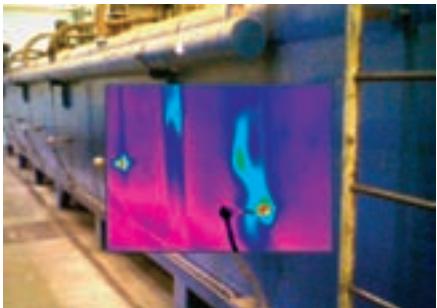


Figure 5-5. Des modèles thermiques inhabituels sur un four à recuit pourraient indiquer une éventuelle dégradation de l'isolation réfractaire.

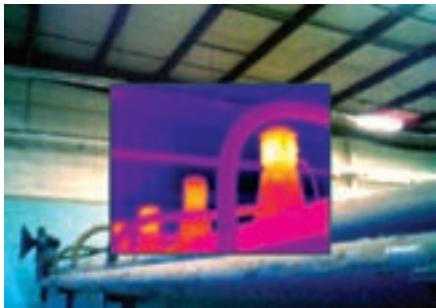


Figure 5-6. Le moteur du ventilateur de recirculation présent sur le côté droit du four à recuit, bien plus chaud que les autres, semblerait défaillant.

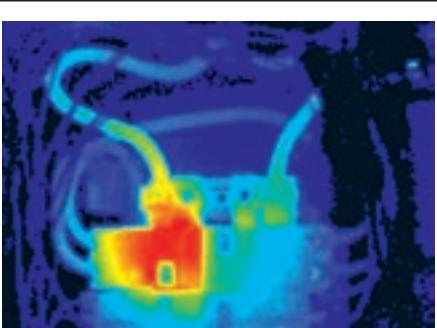


Figure 5-7. Contrairement à l'image à la lumière visible, le thermogramme permet d'identifier rapidement le dysfonctionnement d'un composant ou une forte résistance au niveau d'une connexion au sein d'un coupe-circuit à caractère résidentiel.



Figure 5-8. Alors que le thermogramme d'un moteur et d'un couplage laisse apparaître des modèles thermiques évocateurs d'un problème d'alignement du couplage des deux côtés, rien ne semble indiquer une telle anomalie sur l'image à la lumière visible.

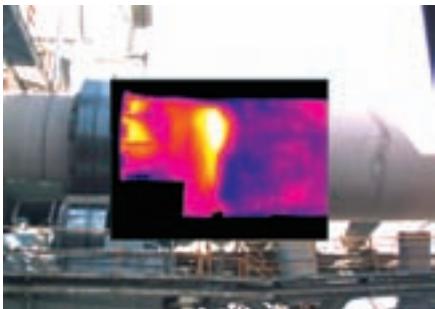


Figure 5-9. La thermographie peut permettre de mesurer la réfraction dans la durée et de détecter les zones problématiques au sein des fours à ciment et autres équipements de traitement.

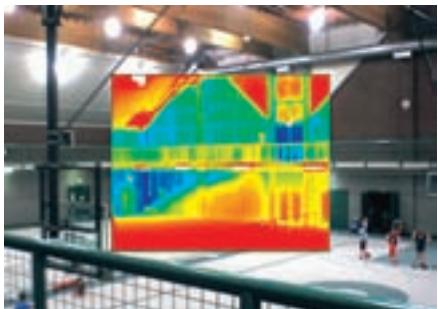


Figure 5-10. La thermographie peut permettre de visualiser la structure cachée d'un bâtiment ou d'autres éléments tels qu'une butte de terre, comme ici, à l'extérieur de ce gymnase.

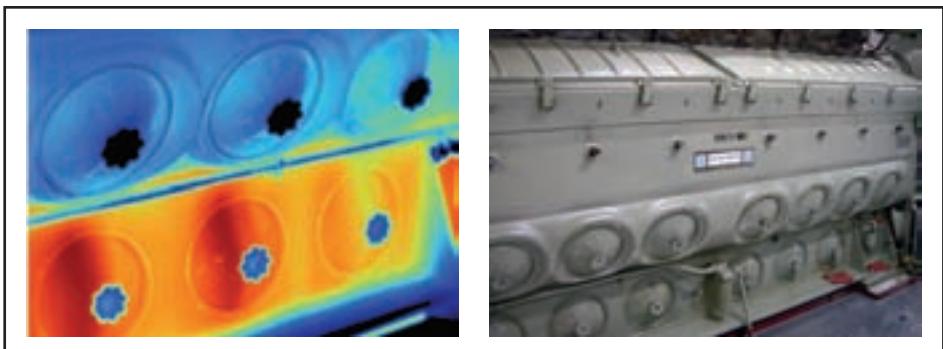


Figure 5-11. Le raté d'allumage d'un des cylindres d'une installation électrique-diesel génère des modèles thermiques plus froids que les cylindres fonctionnant normalement.



Figure 5-12. Les caméras infrarouges permettent d'analyser des bâtiments et des infrastructures de grande envergure en vue de détecter la moindre variation thermique inhabituelle pouvant indiquer l'apparition d'un problème éventuel.

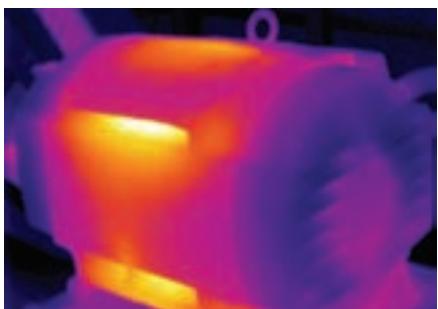


Figure 5-13. Le thermogramme d'un moteur de système de traitement de l'air en bon état de fonctionnement montre la chaleur se dissiper par les événets.

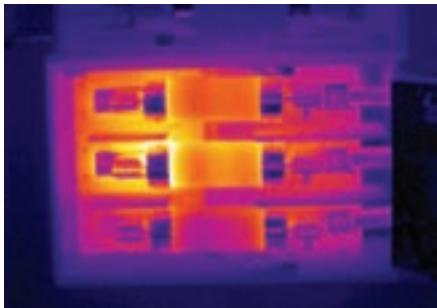


Figure 5-14. La zone plus claire au niveau du bloc de fusibles indique un éventuel problème dû à une résistance élevée ou à une défaillance interne de la phase centrale.

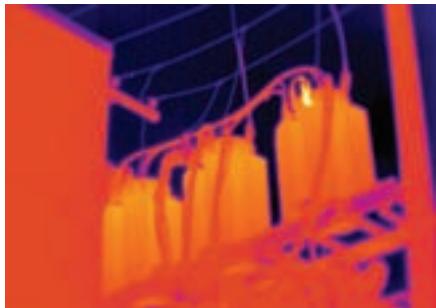


Figure 5-15. La forte chaleur de la douille et du chapeau au niveau de ce transformateur en hauteur indique clairement la présence d'un problème.



Figure 5-16. Une connexion présentant une forte résistance au niveau d'un câble de liaison (phénomène probablement dû à la corrosion) peut avoir de graves conséquences en cas de montée en puissance de la charge.



Figure 5-17. Une caméra infrarouge permet de détecter en toute simplicité le moindre problème au niveau d'un composant interne d'un centre de commande des moteurs.

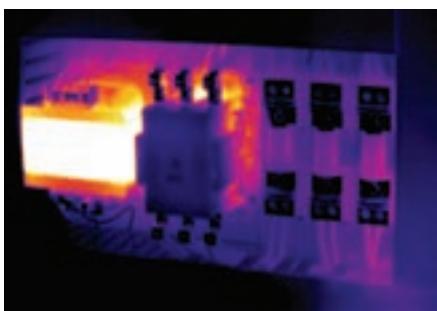


Figure 5-18. Un ajustement du niveau et de la portée de l'image permet de détecter un déséquilibre éventuel au niveau du fusible situé le plus à droite.



Figure 5-19. Un technicien jouissant d'une bonne connaissance de l'équipement mécanique sera en mesure de réaliser de nombreuses opérations de dépannage et de maintenance.

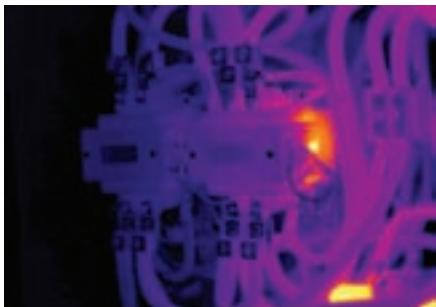


Figure 5-20. Une comparaison de composants similaires sous des conditions de charge tout aussi similaires permet de détecter d'éventuels problèmes internes.

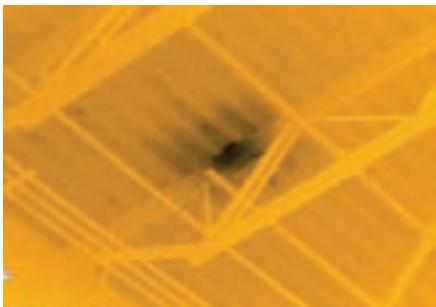


Figure 5-21. Les caméras infrarouges permettent de détecter une isolation humide en relation à une infiltration d'eau sur les toits en pente douce. Dans de bonnes conditions (impliquant notamment la peinture du platelage du toit), elles sont même capables d'en déceler les signes de l'intérieur.

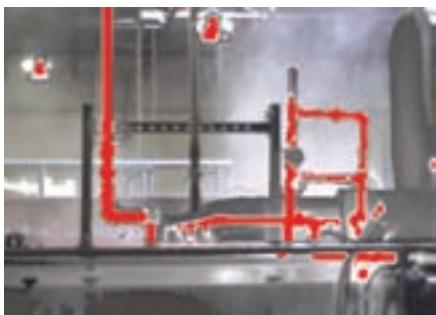


Figure 5-22. L'intégration de couleurs saturées et d'alarmes de couleur au sein d'une palette de gris peut présenter l'avantage d'aider à déterminer, des valves d'eau chaude et de vapeur, lesquelles sont ouvertes et en bon état de fonctionnement.

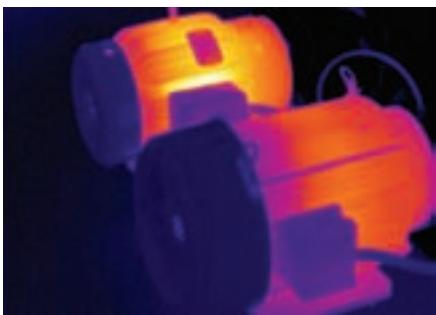


Figure 5-23. Même si le modèle thermique diffère d'un ensemble moteur/pompe à l'autre, les deux modèles peuvent indiquer un fonctionnement tout à fait acceptable.

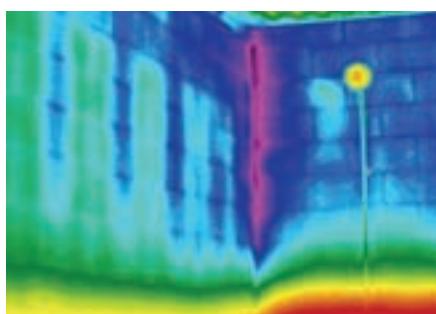


Figure 5-24. Le modèle thermique d'une construction en parpaing montre une importante pénétration d'humidité au niveau de la jonction entre les deux murs, ainsi que des anomalies de réalisation.

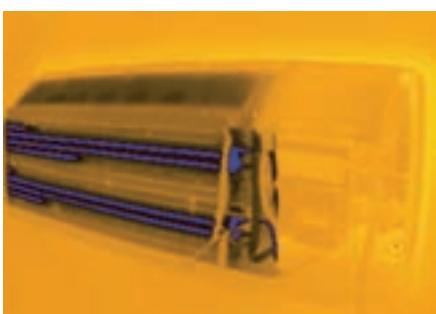


Figure 5-25. Les zones plus foncées indiquent le déplacement du liquide de refroidissement au sein des serpentins d'un système de climatisation mural.



Figure 5-26. Les effets des matériaux à faible émissivité sur la thermographie infrarouge sont clairement visibles sur cette image de camion-citerne à revêtement métallique. Par une belle journée ensoleillée, le métal réfléchit la fraîcheur du ciel dégagé d'une part et la chaleur irradiée par le sol d'autre part.

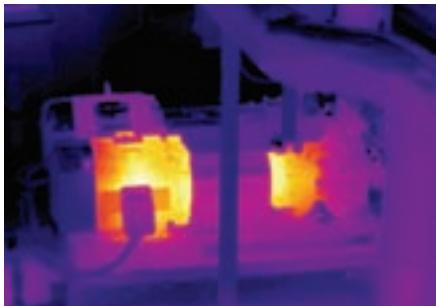


Figure 5-27. La thermographie infrarouge permet d'identifier le mauvais fonctionnement de l'équipement. Le thermogramme de l'ensemble moteur/pompe figurant en arrière plan indique un dysfonctionnement.

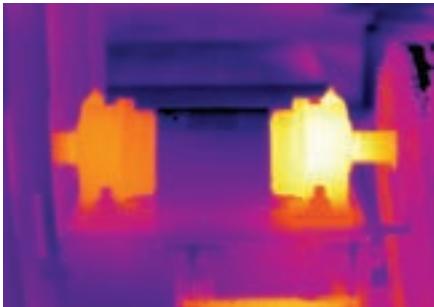


Figure 5-28. Le chapeau de palier droit de ce système de traitement de l'air est beaucoup plus chaud que celui de gauche, suggérant un éventuel problème de graissage, d'alignement ou de courroie.

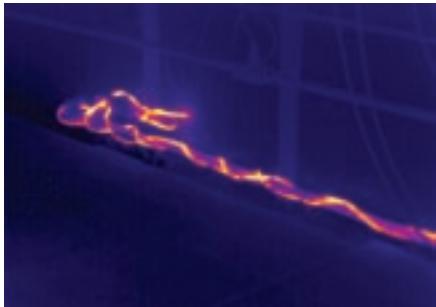


Figure 5-29. La thermographie peut même être utilisée pour le dépannage d'un fil de chauffage d'une conduite d'eau externe, empêchant ce dernier de geler en hiver.

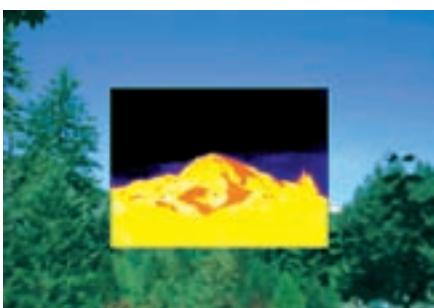


Figure 5-30. Sur la terre, l'énergie infrarouge est partout, même sur les glaciers au sommet des montagnes.

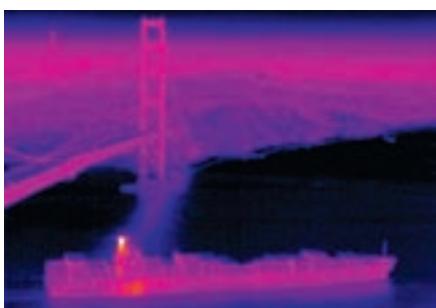


Figure 5-31. Le thermogramme nocturne d'un porte-conteneurs montre comment la cheminée d'échappement et la salle des moteurs peuvent être détectées à distance.

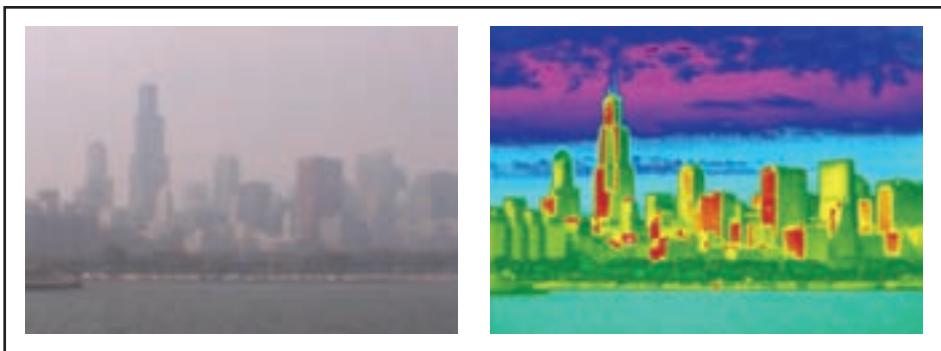


Figure 5-32. Sur cette photo prise lors d'une journée d'été brumeuse, le ciel et l'horizon semblent plutôt flous et difficilement perceptibles. Le thermogramme, lui, permet de distinguer clairement les détails et même de faire la différence entre les différents types de nuages dans le ciel.

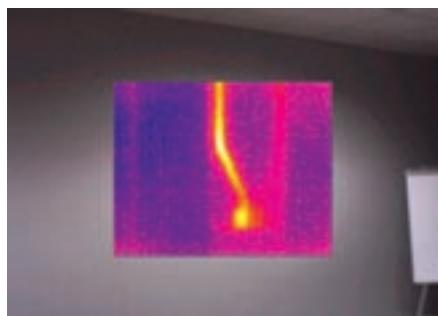


Figure 5-33. D'infimes variations de températures en surface peuvent parfois témoigner d'un problème de taille tel qu'une multitude de connexions sur la ligne de neutre ou une masse neutre incorrecte sur un système d'éclairage. Ceci peut provoquer l'échauffement du conduit métallique dans le mur, au point d'aller jusqu'à constituer un risque d'incendie.



Figure 5-34. Une charge correcte, l'absence de vent ou une simple brise permettent souvent de localiser des problèmes tels que l'échauffement du verrou et des extrémités de charnière d'un sectionneur haute tension.

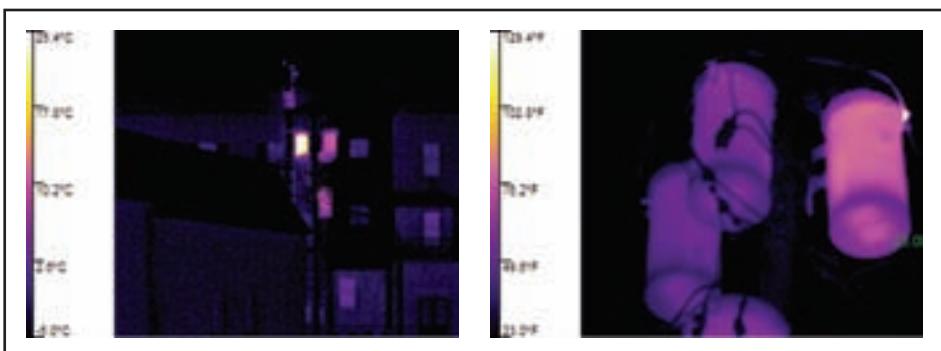


Figure 5-35. Une caméra infrarouge permet de détecter certains problèmes de très loin (gauche). Une analyse plus détaillée exigera souvent le recours à un téléobjectif ou tout simplement un zoom rapproché (droite) sur l'équipement.

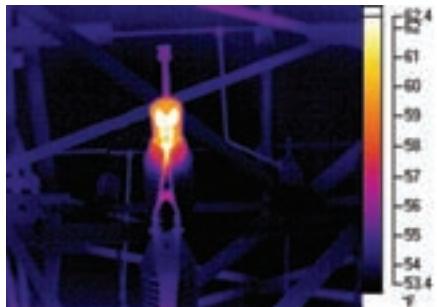


Figure 5-36. L'échauffement abnormal d'un sectionneur associé à une forte résistance constitue souvent un problème à la fois grave et coûteux en raison du manque de protection et des dégâts que peuvent causer des températures pourtant modérées.

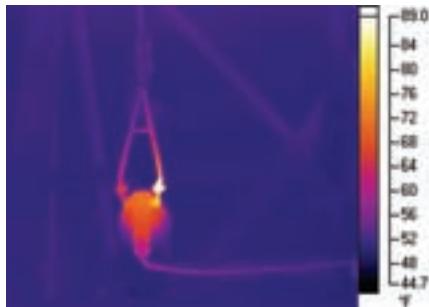


Figure 5-37. En raison de la présence de trajectoires d'intensité de courant parallèles au sein de nombreux sectionneurs, l'échauffement peut être observé au niveau d'une connexion normale alors que le problème se situe en réalité sur le côté le plus froid.

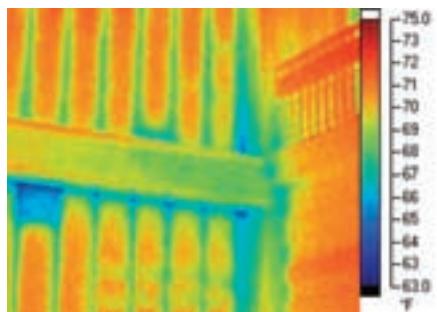


Figure 5-38. L'absence d'isolant en fibre de verre ne serait-ce que sur une petite partie d'un bâtiment peut être à l'origine d'une fuite d'air anormale en bordure d'autres zones.



Figure 5-39. La mauvaise étanchéité à l'air permet à l'air chaud de contourner l'isolant en fibre de verre, comme ici à de nombreux endroits de ce bâtiment commercial.



Figure 5-40. Un transformateur qui afficherait une température de fonctionnement supérieure à celle des autres composants similaires d'un rack en hauteur pourrait indiquer un problème éventuel.

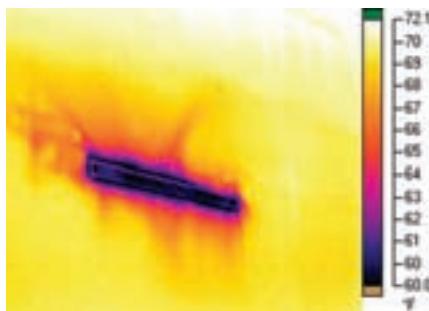


Figure 5-41. De l'air climatisé peut s'échapper par les joints du système de gaines de chauffage et de climatisation, pour s'infiltrer dans le mur, derrière un diffuseur.

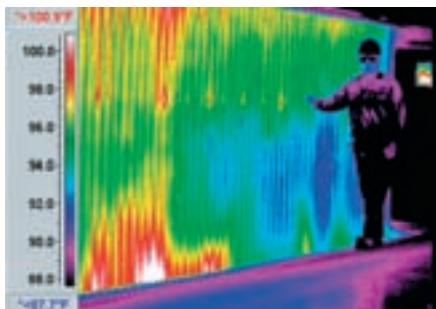


Figure 5-42. L'échauffement de la surface d'une chaudière peut être dû à une dégradation des matériaux réfractaires et/ou à une fuite d'air.

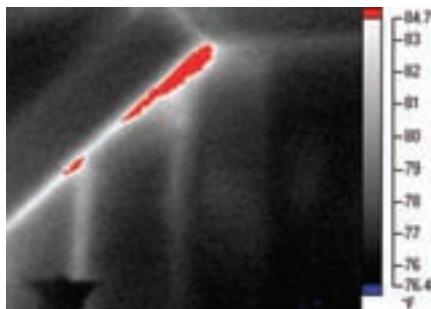


Figure 5-43. La palette de saturation de couleur rouge indique clairement la mauvaise installation de l'isolant en fibre de verre sur ce plafond incliné.



Figure 5-44. Dans le cas de ce centre de commande des moteurs, la connexion à la douille de fusible semble particulièrement chaude.



Figure 5-45. Une vérification rapide de la température d'un carter de moteur permet d'évaluer son bon fonctionnement.

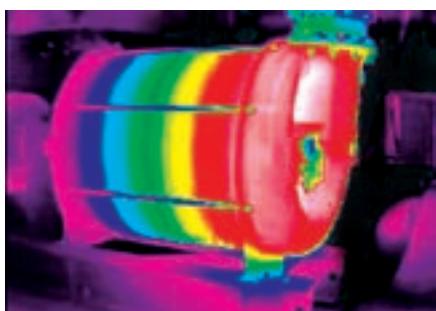


Figure 5-46. La hausse de température à chaque étage témoigne du bon fonctionnement de ce compresseur d'air multi-étages.
G. McIntosh

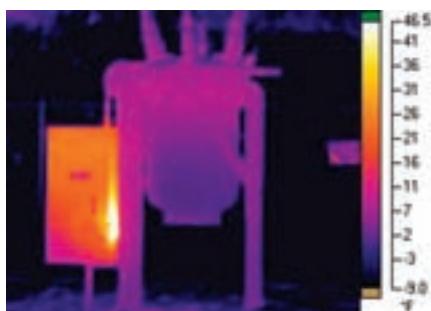


Figure 5-47. La thermographie permet d'établir le bon fonctionnement d'un élément chauffant au sein d'une armoire électrique en vue de réduire les problèmes liés à la condensation.



Figure 5-48. Un thermogramme de la façade extérieure de ce bâtiment permet d'identifier clairement les zones sensibles, telles que les sections plus claires, exemptes d'isolation.



Figure 5-49. Sur cette image, les parties non isolées ressemblent à des zones d'échauffement vues de l'extérieur, par temps froid.

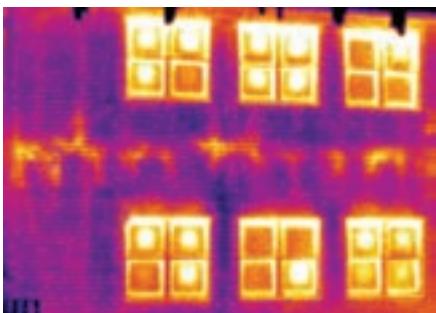


Figure 5-50. Des zones d'échauffement au centre de fenêtres en double-vitrage peuvent indiquer une dégradation de la lame d'argon, l'isolant remplissant normalement l'espace compris entre les deux panneaux de verre.

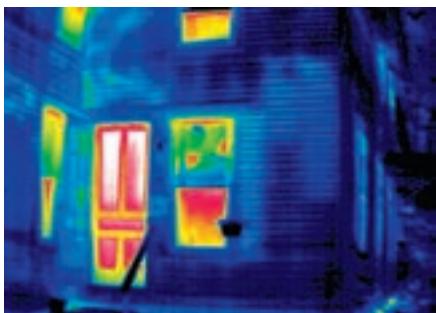


Figure 5-51. La thermographie permet de diagnostiquer des problèmes tels qu'un manque d'isolation ou un isolant endommagé.

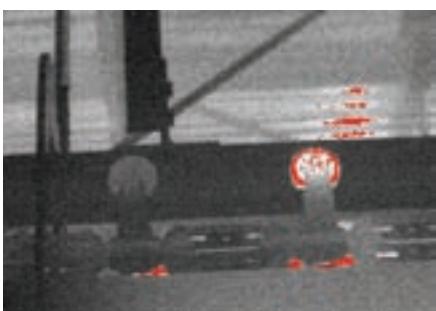


Figure 5-52. La surchauffe d'un roulement de trolley aérien peut entraîner une surconsommation d'énergie et l'étiirement de la chaîne avec le temps.



Figure 5-53. Un thermogramme réalisé en début de soirée, au moment où les conditions sont optimales, fait apparaître une tache d'isolation humide sous la forme d'une zone de chaleur.

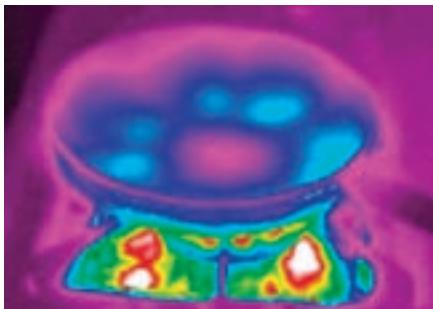


Figure 5-54. Cette poêle en fonte sur le feu dévoile une signature thermique unique.

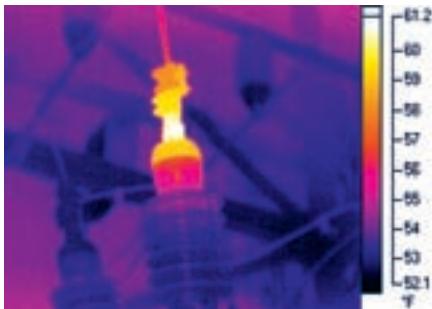


Figure 5-55. La partie claire de ce disjoncteur à bain d'huile montre que la connexion interne entre le chapeau de la douille et la tige de la douille est anormalement chaude.

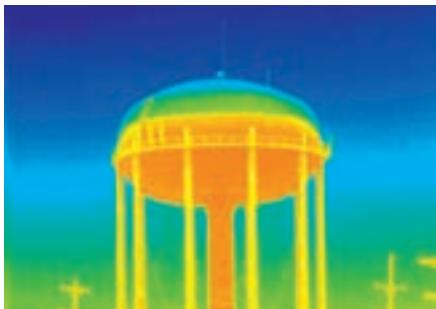


Figure 5-56. La zone claire montre le niveau de remplissage d'un réservoir de stockage d'eau municipale.

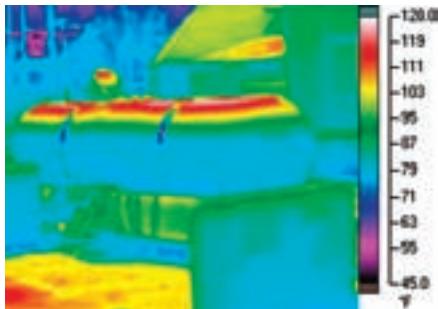


Figure 5-57. Une caméra infrarouge permet de visualiser en toute simplicité le niveau de propane liquide au sein d'une cuve de stockage.



Figure 5-58. La signature thermique d'un transformateur triphasé non immergé suggère un échauffement anormal du câble principal de phase gauche.



Figure 5-59. Deux des six capuchons de douille d'un disjoncteur à bain d'huile affichent une température anormalement élevée, qui aurait engendré des frais importants si elle n'avait pas été détectée et réparée.



Figure 5-60. Comme illustré par cette image, le purgeur de vapeur doit être plus chaud côté vapeur que côté condensat.



Figure 5-61. Dans des conditions optimales, une caméra infrarouge permet de déterminer facilement les niveaux de liquide au sein des réservoirs de stockage.

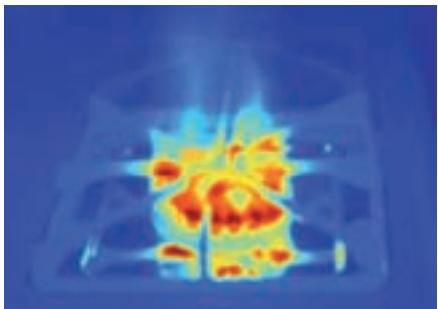


Figure 5-62. Cette gazinière a beau sembler chaude, sa flamme est à peine visible sur un thermogramme à ondes longues.

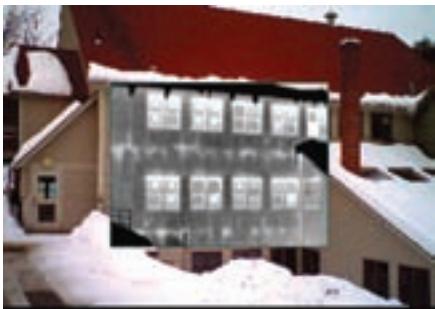


Figure 5-63. Les nombreuses zones d'échauffement présentes sur la façade extérieure de ce bâtiment commercial sont liées à une mauvaise installation de l'isolant en fibre de verre.

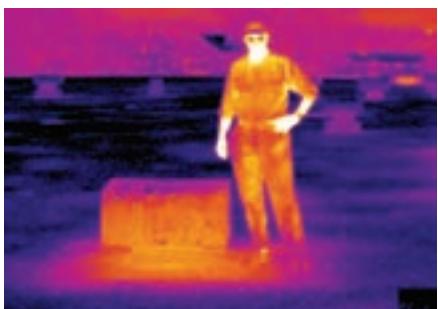


Figure 5-64. Outre les produits d'étanchéité, un grand nombre d'objets présents sur le toit peuvent avoir une signature thermique, notamment les hottes d'évacuation des systèmes de chauffage et de climatisation.

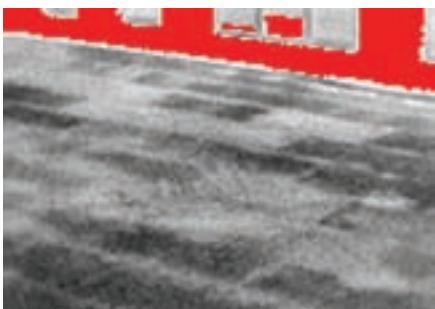


Figure 5-65. Les toits unicouches recouvert d'un isolant mousse peuvent avoir une signature plus subtile que les toits multicouches.

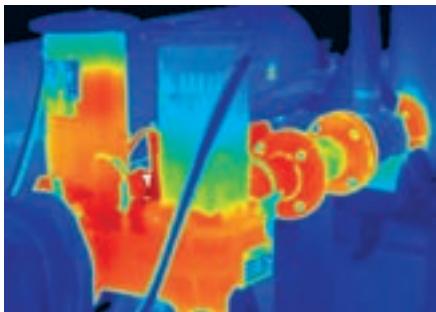
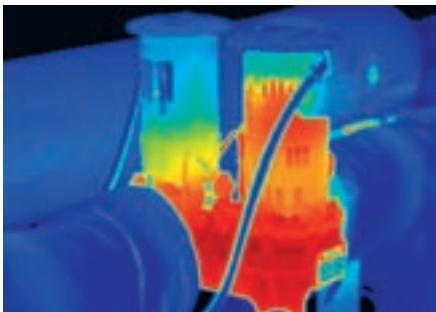


Figure 5-66. La signature thermique peut servir à évaluer le fonctionnement de chaque étage d'une pompe à deux étages.



Figure 5-67. La signature thermique montre une zone d'échauffement causée par le frottement d'une courroie contre le plateau du convoyeur aérien. La présence d'un roulement de rouleau usé à proximité a affecté l'alignement de la courroie, dont la friction ainsi intensifiée a contribué à la surchauffe du moteur d'entraînement.

Figure 5-68. L'air chaud s'échappant dans les parties mal isolées peut causer d'importantes déperditions de chaleur et poser ainsi des problèmes plus ou moins importants et onéreux dans de nombreux bâtiments, malgré le fait qu'ils soient isolés.



Figure 5-69. Un isolant en vrac mal installé dans une cavité murale existante peut se tasser et ne pas avoir l'effet attendu.

Figure 5-70. Le nez d'une personne est souvent plus froid que les autres parties de son corps en raison du flux sanguin moins important et des grandes capacités de refroidissement par convection.

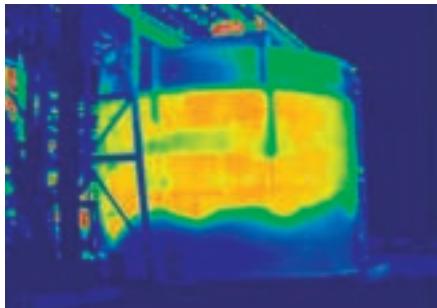


Figure 5-71. Les niveaux de liquide et de boues au sein d'un réservoir sont souvent décelables en phase de transition thermique.

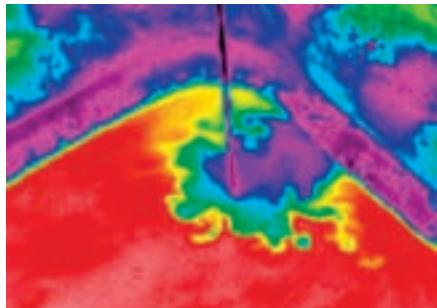


Figure 5-72. L'écoulement d'un filet d'eau froide dans un évier rempli d'eau chaude donne lieu à un transfert de chaleur par convection.

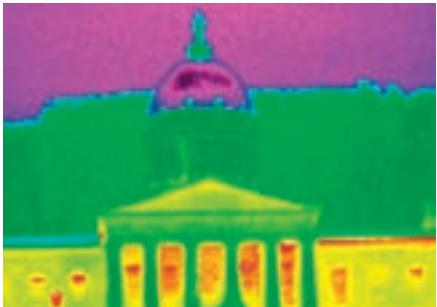


Figure 5-73. Le dôme plaqué or de ce bâtiment reflète la fraîcheur du ciel.

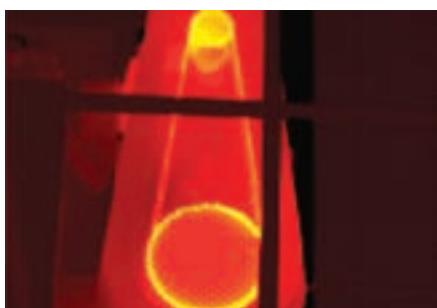


Figure 5-74. Les zones claires de ce thermogramme d'un assemblage de courroies et de poulies indiquent très probablement un problème d'alignement.

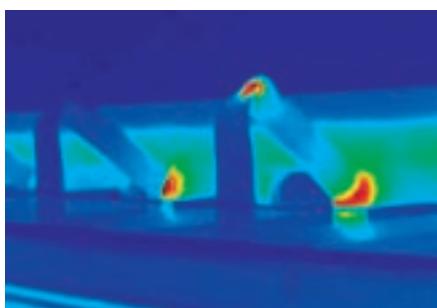


Figure 5-75. Les zones marquées en rouge sur cette image indiquent la surchauffe de plusieurs roulements à rouleaux du convoyeur.

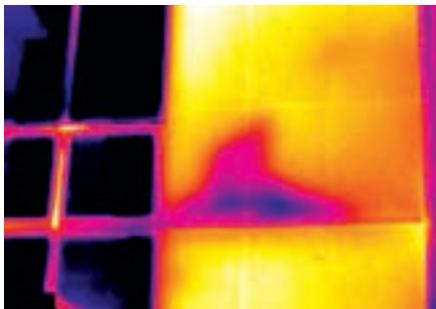


Figure 5-76. L'humidité peut pénétrer dans la façade en pierre d'un bâtiment commercial et l'exposer ainsi à d'importants dégâts.

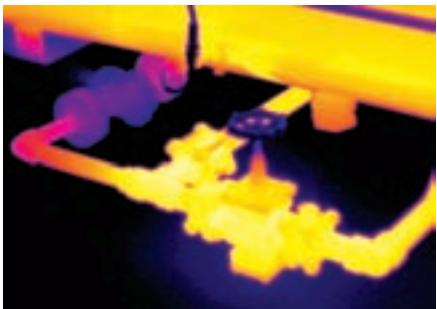


Figure 5-77. Cette image thermique montre un distributeur hydraulique ouvert et fonctionnant normalement.

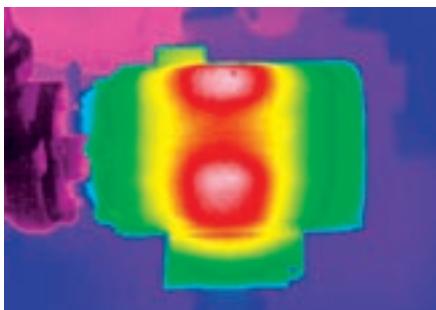


Figure 5-78. Le modèle de chauffage d'un moteur de pompe fonctionnant normalement affiche une signature thermique uniforme.

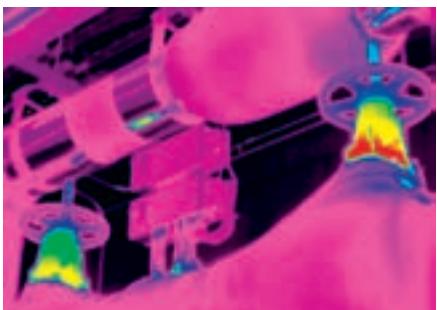


Figure 5-79. Les endroits plus clairs, situés à proximité des robinets, correspondent aux endroits d'où la chaleur s'échappe des parties non isolées d'un système à vapeur.

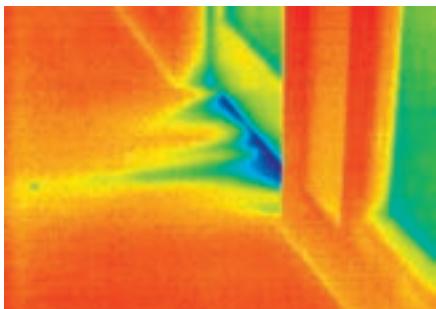


Figure 5-80. L'air froid s'échappant sous une porte d'entrée apparaît comme une traînée sur le sol.

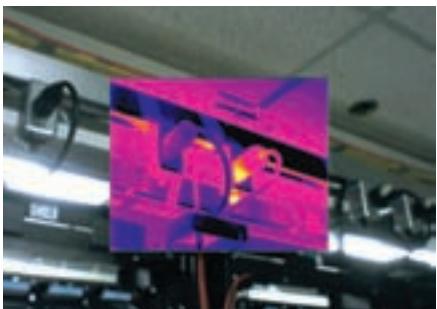


Figure 5-81. La prise électrique de droite de cette banque de serveurs affiche un modèle thermique suggérant une connexion haute résistance ou un problème au niveau du câblage interne.

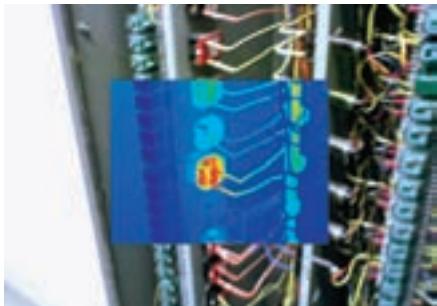


Figure 5-82. La zone très colorée suggère une éventuelle connexion haute résistance ou la défaillance d'un composant au sein d'un panneau de commande d'éclairage.

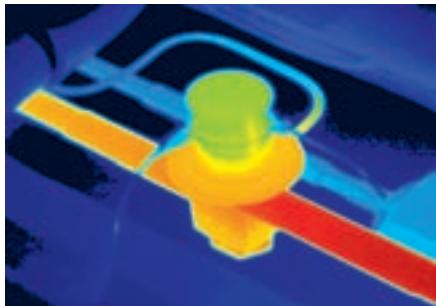


Figure 5-83. La différence de couleur de part et d'autre de ce condensateur en ligne, ainsi que de la dérivation, correspond à un fonctionnement normal.



Figure 5-84. Cette image thermique indique que le transformateur se trouvant sur la droite présente une panne interne.

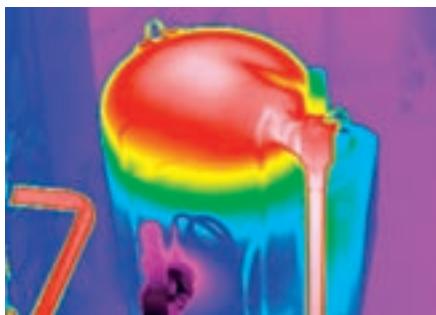


Figure 5-85. Le thermogramme d'un compresseur de climatisation et de chauffage fonctionnant normalement peut faire ressortir d'importantes différences de température entre les différentes sections et composants.

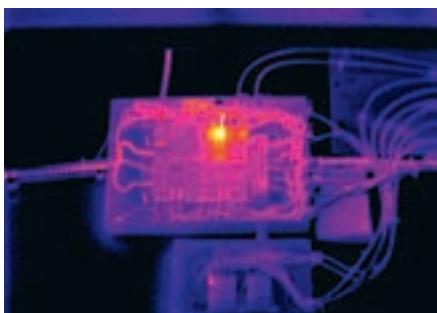


Figure 5-86. La thermographie peut permettre d'identifier les connexions haute résistance au sein de circuits de commande basse tension.

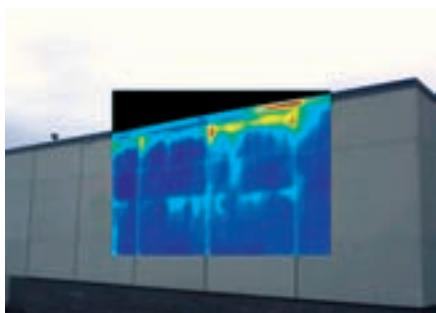


Figure 5-87. Un toit mal évacué peut provoquer des infiltrations sur le bloc de béton et sur la façade d'un bâtiment.



APPLICATIONS THERMOGRAPHIQUES

La thermographie peut intervenir dans un grand nombre d'applications, de l'inspection des équipements électriques et de contrôle des processus aux opérations de diagnostic des bâtiments. Le terme « équipement électrique » fait référence aux moteurs, au matériel de distribution et aux postes électriques. Le terme « équipement de contrôle des processus » désigne l'équipement de fabrication et d'assemblage automatisé. Les opérations de diagnostic de bâtiments portent notamment sur la vérification de la présence éventuelle d'infiltrations d'humidité ou encore sur l'inspection de l'isolation des bâtiments en vue de détecter toute fuite d'air ou tout signe d'humidité. L'isolation désigne l'ensemble des matériaux présents dans les murs, les plafonds et les sols qui constituent l'enveloppe thermique.

APPLICATIONS ÉLECTRIQUES

Les caméras infrarouges permettent de réaliser des diagnostics sans aucun contact et, qui plus est, de façon simple et rapide, elles ont trouvé leur principal usage dans la vérification de l'intégrité des circuits électriques. La plupart des travaux de thermographie réalisés dans un contexte électrique sont de nature qualitative. En d'autres termes, ils se basent sur une comparaison des signatures thermiques de composants présentant un certain nombre de similarités. Une signature thermique correspond à un cliché pris à un instant donné de la chaleur diffusée ou émise par un objet. Un tel principe s'applique parfaitement aux circuits triphasés qui, dans la plupart des cas, dans des conditions de fonctionnement normales, ont des signatures thermiques très faciles à interpréter pour leurs différentes phases.

Les signatures thermiques claires et facilement identifiables obtenues en cas de défaillance de l'équipement rendent alors la thermographie particulièrement efficace. Elle permet même de déceler les exceptions thermiques quasiment imperceptibles à l'œil nu. Le terme *exception thermique* désigne une condition anormale ou suspecte au niveau de l'équipement. Certes, ces exceptions thermiques ne sont pas toujours

identifiables et leur cause laisse parfois une part de mystère, mais la chaleur produite par une forte résistance électrique avant les pannes électriques ne fait, elle, aucun doute.

Une différence de température entre plusieurs phases ou composants n'ayant aucun rapport avec l'équilibre de charge peut être due à une exception thermique. Une résistance très élevée peut, par exemple, provoquer un échauffement en un point de connexion. Une fois isolé, et donc désactivé, la température d'un tel composant peut sembler moins élevée.

Le thermographe peut être exposé aux nombreux dangers associés à l'ouverture d'un boîtier électrique. L'électrocution peut généralement être écartée en raison de l'absence de contact, mais le risque d'explosion électrique reste très élevé, surtout dans le cas de tensions supérieures à 480 V.

L'ouverture d'une porte peut, par exemple, en présence d'un verrou défaillant ou d'objets en tous genres (saletés, débris, organismes nuisibles, etc.) au sein du boîtier, déclencher un arc électrique. Un tel phénomène peut provoquer un arc entre la phase et la masse. Une fois déclenché, un arc peut atteindre des températures supérieures à 16 650 °C en moins d'une demi-seconde. Aussi, l'ouverture des boîtiers contenant un équipement

électrique sous tension doit être réservée à un personnel autorisé et dûment formé.

Les thermographes doivent veiller à bien comprendre les risques d'explosion électrique et s'efforcer au maximum de les éviter. Des spécifications détaillées relatives à la limitation des risques d'arc électrique sont disponibles auprès d'instances dirigeantes internationales. Celles-ci portent sur la prise de conscience des dangers, sur les procédures d'inspection et sur les discussions relatives au port d'un équipement de protection personnel (EPP). Généralement constitué de protections pour les yeux, la tête, la peau et les mains, cet EPP a pour but de limiter les dégâts causés par un arc électrique et la très forte chaleur qu'il dégage. Voir Figure 6-1.

Les techniques d'inspection des circuits électriques font généralement appel à des processus technologiques, au déploiement de pratiques exemplaires, ainsi qu'au bon sens du thermographe. Les composants et les équipements devraient, dans la mesure du possible, être

observés sous tension et directement au moyen d'une caméra infrarouge.

De temps à autre, le thermographe peut être amené à réaliser ces inspections de façon indirecte, comme par exemple depuis un boîtier à bornes de moteur ou d'une barre blindée protégés. Une telle procédure a beau être tolérée dans des situations exceptionnelles, dans le cas d'une barre blindée en hauteur, par exemple, elle n'en est pas moins déconseillée pour les opérations normales. Les données obtenues lors de l'inspection thermique pourraient ne pas suffire en cas d'impossibilité d'ouverture d'un boîtier électrique.

L'accès à certains équipements peut être si difficile et/ou si périlleux que d'autres moyens d'inspection doivent être adoptés (recours à une fente d'inspection, à un hublot spécialement conçu pour les rayons infrarouges, etc.) pour pouvoir visualiser l'intérieur du boîtier. Les ultrasons autoportés sont une autre solution envisageable.

Le positionnement bien étudié d'un hublot transparent pour rayons infrarouges est également

Equipement de protection personnelle (EPP)

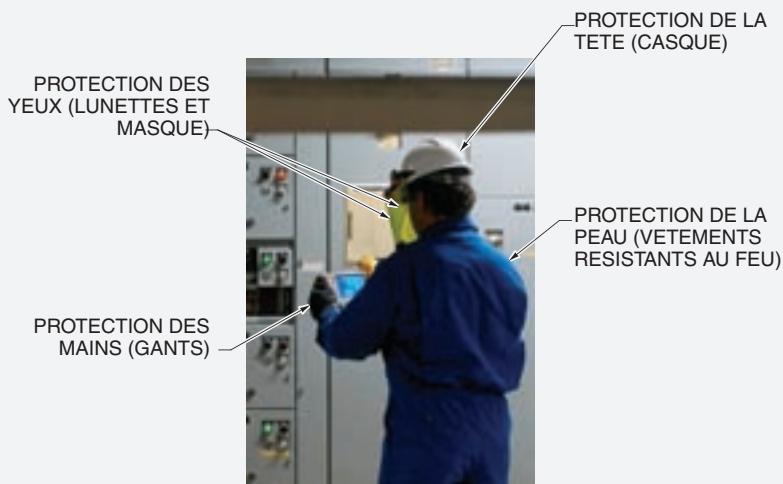


Figure 6-1. L'équipement de protection est généralement constitué de dispositifs pour les yeux, la tête, la peau et les mains destinés à limiter les dégâts que pourrait causer un arc électrique sur l'organisme.

préconisé pour une bonne visualisation de l'ensemble des composants et des dispositifs. Un *hublot transparent pour rayons infrarouges* est un dispositif installé dans les boîtiers électriques en vue de permettre aux caméras infrarouges de capter la transmission de l'énergie infrarouge. Les hublots transparents pour rayons infrarouges permettent souvent de procéder à des thermogrammes sans avoir à ouvrir les portes ou les panneaux des boîtiers électriques. Voir Figure 6-2.

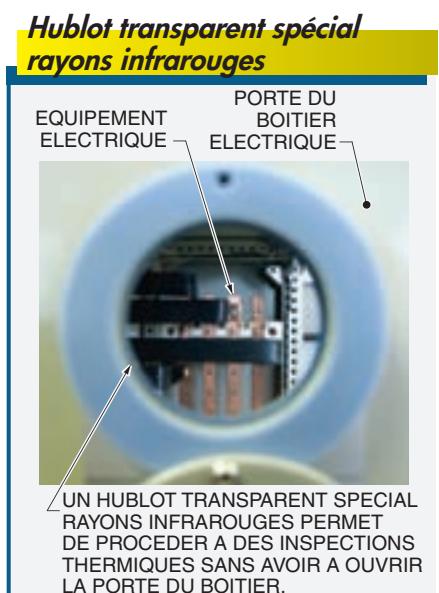


Figure 6-2. Un hublot transparent spécial rayons infrarouges est utilisé afin de permettre aux dispositifs de transmettre l'énergie infrarouge à une caméra infrarouge sans avoir à ouvrir les portes ou les panneaux de boîtiers électriques.

Le thermographe peut également avoir recours à un équipement détectant les ultrasons aéroportés. *Les ultrasons aéroportés* désignent le bruit émis par une connexion électrique défaillante. Généralement inaudibles par l'homme, ils peuvent être captés par des dispositifs spécialisés. Toute formation d'arc, aussi petite soit-elle, au sein d'une connexion

produit généralement une signature ultrasonique aéroportée qui se diffuse par la moindre fissure ou le moindre petit orifice du boîtier.

Une attention toute particulière est accordée aux connexions électriques ou aux points de contacts électriques, quels qu'ils soient, lors des inspections. Ils sont en effet sensibles aux échauffements provoqués par des résistances très élevées, ce qui fait d'eux la première source de défaillance au sein d'un circuit.

Les différences de niveau d'intensité d'une phase à l'autre, souvent considérées comme normales dans un circuit d'éclairage, par exemple, peuvent également être détectées. Elles peuvent en effet être à l'origine de pannes aux conséquences parfois très coûteuses en aval (perte de phase au niveau d'un moteur électrique, surcharge de circuit, etc.).

Malgré leur usage très répandu dans le cadre d'applications électriques, les caméras infrarouges ne sont que trop souvent mal utilisées. Le thermographe peut passer à côté de problèmes potentiels et, s'il les détecte, ne sait pas les interpréter correctement. Outre la gravité du problème, nombreux sont les facteurs pouvant agir sur la température en surface perçue par un système de thermographie. Le rapport entre la chaleur et la panne n'est quant à lui pas toujours très bien compris, surtout s'il s'inscrit dans la durée.

Il est bien connu que la température d'une connexion électrique varie en fonction de la charge. La chaleur émise par une connexion présentant une forte résistance a beau être prévisible (I^2R), la température qu'elle peut atteindre l'est beaucoup moins. Aussi, certaines normes préconisent-elles que les inspections soient réalisées dans la mesure du possible sous une charge minimale de 40 %, ou sous une charge normale maximale. La moindre anomalie détectée sur un équipement soumis à une charge légère susceptible d'augmenter devrait faire l'objet d'une attention toute particulière.

Le rapport thermique entre le problème et la surface observée sera généralement très

élevé dans les cas où les boîtiers ne pourront être ouverts facilement et/ou les composants de chauffage ne pourront être visualisés directement, comme, par exemple, dans le cas d'une barre blindée protégée. Le terme *rappor thermique* désigne la différence entre la température à la source d'un problème et la température détectée ou mesurée à la surface de la caméra infrarouge. Dans le cas d'une barre blindée protégée, une signature thermique en surface de 2,8 °C, aussi infime soit-elle, peut indiquer une défaillance interne. Les dispositifs à bain d'huile de type transformateurs peuvent afficher un rapport thermique similaire, voire même supérieur.



Pour limiter les reflets indésirables sur l'affichage, des visières amovibles sont proposées avec les caméras infrarouges.

Les inspections à l'extérieur devront faire l'objet de précautions toutes particulières, surtout avec des vents supérieurs à 8 km/h. Les zones d'échauffement au sein d'un équipement devront donc, par exemple, être comparées avec l'aspect qu'elles pourraient avoir hors vent. Le vent pourrait refroidir certaines anomalies, qui n'atteindraient plus alors le seuil de détection. Un même phénomène peut se produire à l'intérieur d'une installation, lorsqu'un boîtier électrique est laissé ouvert trop longtemps avant l'inspection. Pour être efficace, l'inspection doit être menée de la façon la plus rapide et la plus sûre possible juste après l'ouverture du boîtier.

La visualisation d'une image sur un écran d'affichage peut également s'avérer assez

difficile en extérieur. Selon l'angle d'éclairage, le thermographe peut être gêné par un reflet l'empêchant de distinguer correctement les moindres détails et les différentes nuances observées. Sans pour autant avoir à réaliser systématiquement de nuit les inspections en extérieur, il est conseillé d'éviter les belles journées ensoleillées durant lesquelles la chaleur solaire pourrait interférer avec l'image affichée. Ceci s'applique particulièrement aux composants sombres tels que les isolateurs de lignes électriques en céramique.

L'acquisition de données thermiques fiables relatives à un circuit électrique n'est pas toujours aussi simple qu'il n'y peut paraître. De nombreux thermographes disposant de données thermiques tout à fait valables ne les utilisent pas toujours correctement lors de l'établissement des priorités en réponse à la gravité relative des résultats obtenus. Dans bien des cas, par exemple, la température ne permet pas d'indiquer de façon fiable la gravité d'un problème en raison des nombreux facteurs pouvant l'influencer. Ceci n'empêche pas de nombreux thermographes de croire (et de s'y méprendre) que plus un composant est chaud, plus le problème est grave.

De même, il serait faux de croire qu'un composant ou un équipement qui ne dégagerait pas de chaleur particulièrement intense ne présenterait aucun problème. Pour profiter au maximum de tous les avantages de la thermographie, la prudence est donc de rigueur lors de la collecte et de l'interprétation des données thermiques.

Plutôt que de baser ses priorités uniquement sur la température, il est donc plus utile de partir du principe que tous les paramètres agissent les uns sur les autres, affectant ainsi le composant problématique. Il reste donc à déterminer comment. Ceci peut être effectué de façon assez simple grâce à des instruments de test ou, pour procéder de façon plus formelle, par le biais d'une analyse des causes profondes de la panne en ayant recours à des outils techniques. La réalisation bien menée d'inspections électriques thermiques peut offrir de nombreux avantages. Les entreprises qui

s'y attachent se voient ainsi en mesure d'éradiquer presque totalement les interruptions de service liées à des pannes électriques.

APPLICATIONS MÉCANIQUES ET ÉLECTROMÉCANIQUES

Les inspections mécaniques et électromécaniques touchent tout un éventail d'appareils et de dispositifs. La thermographie s'est révélée véritablement indispensable pour l'inspection des équipements tels que des moteurs, des engins rotatifs et des purgeurs de vapeur. La plupart de ces applications sont de nature qualitative. Le thermogramme en cours est généralement comparé au précédent. La moindre différence due à une modification de l'état de l'équipement est notée. Pour pouvoir comprendre le fonctionnement de l'équipement et la raison de sa défaillance, le thermographe doit jouir de solides connaissances en matière de transfert thermique.

Les moteurs font l'objet d'une inspection thermique en raison de leur propension aux pannes associées à un échauffement. Les problèmes d'alignement ou de déséquilibre au niveau du moteur, par exemple, donnent généralement lieu à des surchauffes. Aussi utile que puisse être une observation de la température en surface du carter d'un moteur, les variations au niveau de la température interne d'un moteur ne sont pas toujours évidentes dans l'immédiat. La réalisation d'un thermogramme du moteur dans la durée ou en comparaison avec des moteurs de nature et de fonctionnement similaire peut donc s'avérer très précieuse. Un tel exercice peut ainsi permettre, par exemple, de déceler une obstruction due à la poussière au niveau d'un moteur ou encore un passage en mode monophasé s'accompagnant d'une surchauffe.

Les inspections peuvent également se baser sur la signature thermique des roulements du moteur. Des roulements du moteur beaucoup plus chauds que le moteur, par exemple, indiqueraient un problème éventuel qui nécessiterait un examen

plus en détails. De même, des couplages de moteur et des roulements d'arbres fonctionnant normalement devraient présenter des signatures thermiques très proches de celles de la température ambiante. Voir **Figure 6-3**. Un recours à d'autres méthodes de diagnostic, telles que l'analyse du circuit du moteur ou des vibrations, parallèlement à la thermographie peut s'avérer très utile.

Signatures thermiques

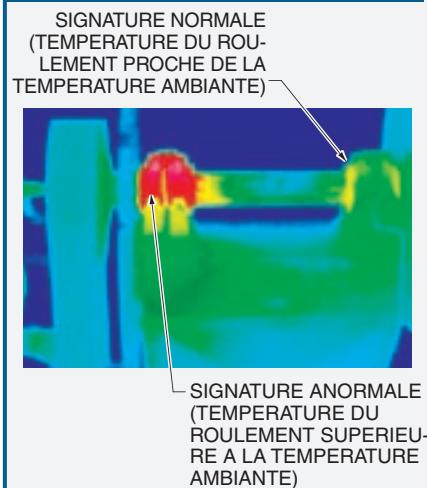


Figure 6-3. Des couplages de moteur et des roulements d'arbre fonctionnant correctement doivent présenter une signature thermique très proche de la température de l'air ambiant.

La thermographie s'est imposée comme un outil de choix dans l'inspection de l'équipement rotatif bas régime de type convoyeur où d'autres méthodes d'inspection ne proposaient pas de résultats fiables ou exploitables. Les caméras infrarouges permettent également d'inspecter des équipements plus complexes tels que des turbines, des boîtiers d'engrenages ou encore des échangeurs thermiques. Elles demandent toutefois un investissement plus important quant à la création d'une banque de données de diagnostic de référence avant de pouvoir porter véritablement leurs fruits.

APPLICATIONS DE CONTRÔLE DES PROCESSUS

Les inspections thermiques sont communément utilisées pour le contrôle des équipements réfractaires, c'est à dire capables de résister à de très hautes températures. Les techniciens chargés de la maintenance sont, par exemple, en mesure de s'appuyer sur des données thermiques pour valider l'état de l'isolement ou pour calculer les températures en surface pouvant être à l'origine d'une panne.

L'inspection de référence a pour objet d'établir un point de repère pour un équipement en bon état de fonctionnement dans des conditions normales de fonctionnement. *L'inspection des tendances* est un contrôle réalisé après l'inspection de référence dans le but de disposer d'images sur lesquelles baser une comparaison. Le suivi des tendances dans la durée permet souvent d'obtenir des informations de diagnostic, ainsi que des prédictions. Le thermographe est ainsi en mesure de comparer les similarités et les différences et de déterminer ainsi l'état de fonctionnement de l'équipement.

Les inspections de référence doivent être réalisées en premier, suivies d'inspections des tendances régulières. Ces inspections doivent être planifiées selon un calendrier dicté par les conséquences des pannes et l'état de l'équipement. Le suivi des tendances permet de faire preuve d'une plus grande proactivité en matière de maintenance et de réduire la fréquence des interruptions de service non planifiées, ainsi que des pannes coûteuses.

L'observation des variations au niveau de la signature thermique en surface permet d'inspecter tout type d'isolant thermique, notamment ceux utilisés sur les conduites de vapeur, les lignes de produits, les circuits de canalisation et le tracé thermique des chaînes de fabrication (électriques et vapeur). De nombreux systèmes d'isolation sont malheureusement recouverts d'un revêtement métallique non peint affectant grandement la

valeur de la thermographie. En raison de sa faible émissivité et de sa forte réflectivité, un tel revêtement ne permet pas d'obtenir de signature thermique nette et évidente.

La thermographie est communément déployée pour la mesure et la confirmation des niveaux de matériaux dans des conteneurs tels que des réservoirs de stockage et des silos. **Voir Figure 6-4.** La plupart des conteneurs sont généralement dotés d'un dispositif permettant de déterminer la quantité de matériau qu'ils contiennent, mais ces données sont souvent imprécises en raison d'un dysfonctionnement dudit dispositif ou, si elles sont précises, nécessitent confirmation par un organisme indépendant.

CONSEIL TECHNIQUE

En fonctionnement normal, les purgeurs de vapeur et la plupart des soupapes présenteront des différences de température d'un dispositif à l'autre. A cela s'ajoute le fait qu'il existe presque autant de signatures thermiques que de purgeurs de vapeurs et de soupapes. Une étude de ces dispositifs dans la durée est donc fondamentale pour bien comprendre leur fonctionnement normal.

La vitesse à laquelle la température de ces matériaux évolue au cours d'un cycle de chauffage transitoire est déterminée par le mode de transfert thermique et des variations des capacités thermiques des solides, des liquides et des gaz contenus dans le réservoir. Les gaz sont les plus versatiles. Le soleil peut, par exemple, provoquer en quelques minutes une variation thermique perceptible au niveau de la partie gazeuse d'un imposant réservoir extérieur. Lors d'un cycle de chauffage ou de refroidissement, les solides, les liquides et les matériaux flottants évoluent tous à des vitesses différentes, un tel phénomène peut même être observé au sein d'un réservoir intérieur.

Un thermographe compétent peut parfois dénoter des différences de niveau au sein d'un

Niveaux de liquide dans les réservoirs



Figure 6-4. La thermographie est communément employée pour la mesure et la confirmation des niveaux de matériaux dans des conteneurs tels que des réservoirs de stockage et des silos.

réservoir non isolé. La présence d'un isolant peut ralentir l'apparition des signatures thermiques ou l'isolement devra être révisé. De simples techniques actives telles que l'application de chaleur ou le refroidissement par évaporation permettent d'améliorer les niveaux de matériaux au sein d'un conteneur. Une simple pulvérisation d'eau sur un réservoir destinée à en refroidir la température, suffit souvent, par exemple, à révéler plusieurs niveaux thermiques en quelques minutes seulement. L'application d'une bande de peinture verticale ou de ruban adhésif aux endroits où les niveaux sont facilement observables permet d'améliorer l'émissivité de l'isolation métallique brillante en surface.

DIAGNOSTIC DE BÂTIMENTS

La thermographie est depuis longtemps utilisée dans de nombreuses applications touchant au diagnostic des bâtiments commerciaux et résidentiels (inspection des infiltrations d'humidité dans le toit, inspection de l'isolement des bâtiments en vue de déterminer la présente de fuites d'air et d'énergie, détection de l'humidité, etc.). Comme pour toute autre application impliquant un procédé thermographique, la réussite dépend des connaissances du thermographe en matière de transfert thermique et de construction des bâtiments. L'inspection des bâtiments commerciaux peut être bien plus complexe que celle des structures résidentielles.

Inspection des infiltrations d'humidité dans le toit

Pour des raisons très diverses ayant trait à la conception, à l'installation et à la maintenance, la plupart des toits à faible déclivité viennent à développer d'importants problèmes en quelques années. Un *toit à faible déclivité* est un toit de type commercial présentant une très légère pente pour permettre l'écoulement des précipitations. Ce type de toit est généralement constitué d'un planelage structurel sur lequel sont placés un isolément rigide et une membrane étanche.

Les dégâts causés par une fuite peuvent être importants, mais ils ne sont rien à côté des dégâts « silencieux » à long terme générés par les retenues d'humidité. L'humidité qui pénètre sous le toit, où elle se retrouve prisonnière, provoque de sérieuses dégradations et une usure prématuée du toit. La localisation et le remplacement de l'isolant mouillé permettent d'éliminer l'humidité présente sous la surface et de prolonger ainsi considérablement la durée de vie du toit.

Les caméras infrarouges permettent de procéder à une inspection non destructrice des infiltrations d'humidité dans le toit. Voir Figure 6-5. Un isolant mouillé à une capacité thermique supérieure à celle d'un isolant sec. Après une chaude après-midi ensoleillée, par exemple, un toit peut rapidement se refroidir pour peu que la soirée soit dégagée et sans vent. Ce rapide refroidissement du toit et de l'isolant sec fait que l'isolant humide reste plus chaud plus longtemps.

Une fois de tels modèles observés, une rapide inspection de vastes portions du toit peut être effectuée en vue de détecter les signes d'isolant humide. La présence d'une telle humidité au sein d'une zone mouillée peut, si nécessaire, être confirmée selon des méthodes plus traditionnelles, souvent plus lentes et destructrices. Si les conditions le permettent, le « hublot d'inspection » peut rester ouvert jusque tard dans la nuit.

La signature thermique exacte qui s'affiche sur l'écran de la caméra infrarouge, ainsi que le moment où elle sera la plus visible, dépendent de l'état du toit et de son type d'isolation. La signature thermique des isolants absorbants généralement utilisés sur les toits à faible déclivité (fibre de verre, fibre de bois et perlite expansée) est généralement très claire. Par contre, les isolants non absorbants de type planche courante en mousse généralement utilisés sur les toits unicouches sont eux beaucoup plus difficiles à inspecter en raison de la faible quantité d'eau absorbée. A cela s'ajoute le fait que de nombreux toits unicouches sont recouverts d'une couche de pierres épaisses affectant largement la valeur de la signature thermique.

Les infiltrations d'humidité ne sont pas les seules à affecter les signatures thermiques. La surface du toit doit être sèche pour empêcher que l'évaporation ne gêne la pénétration de la chaleur solaire. Un ciel très chargé en soirée peut ralentir le refroidissement ; de même, un vent trop important peut effacer toute signature thermique.

Les signatures thermiques dépendent également de la construction du toit et de son état. Un mur en parpaings orienté à l'ouest pourra diffuser de la chaleur en direction du toit jusqu'aux petites heures du matin. La présence d'une couche épaisse de gravillons sur le toit permettra de conserver la chaleur ; les parties réparées du toit peuvent s'afficher différemment. Une bonne compréhension de ces influences et de leur effet sur les signatures thermiques est cruciale à l'efficacité des inspections.

Dans l'idéal, les toits devraient être inspectés peu après leur installation afin d'établir une signature thermique de référence. Ils devraient également être inspectés après tout incident ayant pu avoir une incidence sur leur structure (forte averse de grêle, tornade, ouragan). Lorsque des fuites inévitables commencent à faire leur apparition, une rapide inspection selon une technologie infrarouge permettra de déterminer exactement leur emplacement et l'ampleur des dégâts au niveau de l'isolation.

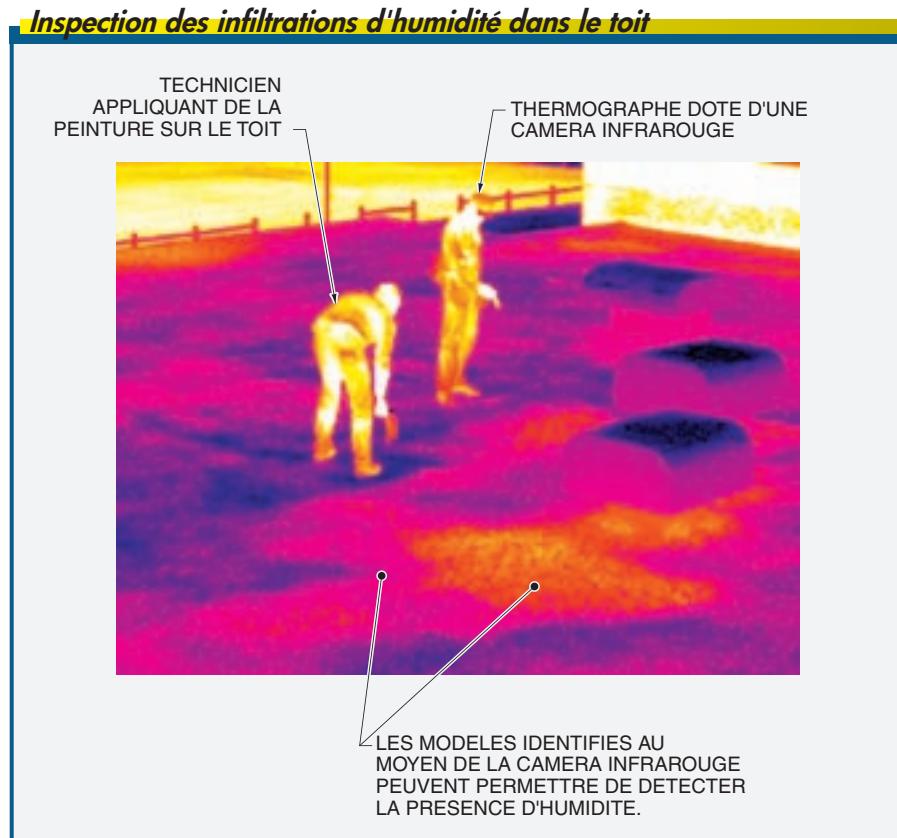


Figure 6-5. L'inspection des infiltrations d'humidité dans le toit est une opération non destructrice facilement réalisable à l'aide d'une caméra infrarouge.

Les inspections sur le toit doivent s'effectuer avec la plus grande prudence et dans le plus grand souci de sécurité. Les travaux réalisés sur les toits doivent systématiquement impliquer au moins deux personnes. Les thermographes sont particulièrement vulnérables ; en effet, soumis à la luminosité de l'affichage, leurs yeux ont beaucoup de mal à s'ajuster à la faible lumière présente sur la plupart des toits. Un tel aveuglement est appelé « cécité crépusculaire ». Une inspection préliminaire du toit doit être effectuée de jour en vue d'identifier les dangers potentiels et de déterminer l'état du toit.

Inspection de l'isolation des bâtiments

La thermographie est un outil idéal pour déterminer la présence et l'état de l'isolation. Un grand nombre d'experts et d'entreprises du bâtiment y ont recours. L'isolation d'un bâtiment sert principalement au contrôle du transfert thermique, qu'il s'agisse des pertes comme des gains de chaleur. L'absence, l'endommagement ou l'inefficacité de l'isolation provoquent une hausse de la consommation d'énergie associée au chauffage et à la climatisation,

avec, en parallèle, une réduction du niveau de confort dans le bâtiment.

Une inspection thermique bien planifiée peut permettre une hausse du confort des occupants, ainsi qu'une réduction de leur consommation d'énergie par rapport au niveau initial. Le recours à des inspections thermiques permet également de détecter d'autres problèmes, notamment la présence indésirable de fuites d'eau et de condensation, l'accumulation de glace sur le toit et le gel des canalisations. La thermographie permet également de vérifier la circulation d'air au sein d'espaces confinés et le positionnement de l'isolation acoustique.

Une différence de température de l'ordre de 10 °C minimum entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment permet généralement d'identifier les problèmes d'isolation. L'absence d'une partie de l'isolation, par exemple, au cours de la saison de chauffage, se traduira au niveau du thermogramme par une température plus faible à l'intérieur et plus élevée à l'extérieur. Cette signature thermique est inversée lors de la saison de rafraîchissement. En raison d'une éventuelle unicité et d'une constante temporelle au niveau de la signature thermique, il est utile de connaître le type d'isolation installé.

La plupart des inspections thermiques exigeront des travaux à l'intérieur comme à l'extérieur d'un bâtiment. Les vents et la lumière directe du soleil peuvent rendre les travaux en extérieur très compliqués, voire impossibles. Ces conditions ont des effets indirects pouvant être observés à l'intérieur comme à l'extérieur, ce qui peut être assez déconcertant. Durant la saison de rafraîchissement, les inspections peuvent être limitées à l'intérieur ou réalisées en soirée en cas de travaux à effectuer sur l'extérieur. Dans des conditions optimales, un thermographe compétent et formé, doté d'une caméra infrarouge adaptée, sera en mesure de détecter tout isolement manquant, endommagé ou inefficace, ainsi que l'emplacement de la structure.

Détection des fuites d'air

Des fuites d'air trop importantes en entrée ou en sortie des bâtiments peuvent représenter à elles seules près de la moitié de la facture de chauffage, de ventilation et de refroidissement. Les fuites d'air sont généralement causées par des différences de pression dans le bâtiment. Ces différences de pression peuvent être dues au vent, mais aussi aux forces de convection propres à chaque bâtiment, ainsi qu'aux déséquilibres de pression apparentés aux systèmes de chauffage/



La thermographie peut servir à identifier une perte de chaleur dans un bâtiment, au niveau des fenêtres, des avant-toits ou de murs mal isolés.

ventilation/climatisation.

Les différences de pression forcent l'air à s'infiltrer dans les nombreux orifices de l'enveloppe thermique d'un bâtiment. Ces orifices tels que les enclâssures de plomberie ou de câblage, sont souvent trop petits pour pouvoir être distingués rapidement. *L'enveloppe thermique* correspond aux limites de l'espace à chauffer, ventiler ou refroidir au sein d'un bâtiment.

De manière générale, seule une légère différence de température de 3 °C entre l'intérieur et l'extérieur permettra de détecter la fuite d'air. L'air en soi est invisible, mais ses modèles de

température sur la surface d'un bâtiment affichent souvent une sorte de traînée au niveau de leur signature thermique. Voir Figure 6-6. Pendant la saison de chauffage, les signatures thermiques sont généralement perçues comme des bandes froides le long de la surface interne des bâtiments, ou des poches de chaleur à l'extérieur, là où s'échappe l'air chaud. Un mouvement d'air peut également être observé à l'intérieur des cavités des bâtiments, voire même des murs intérieurs et extérieurs isolés.

Surface du bâtiment Modèles de température

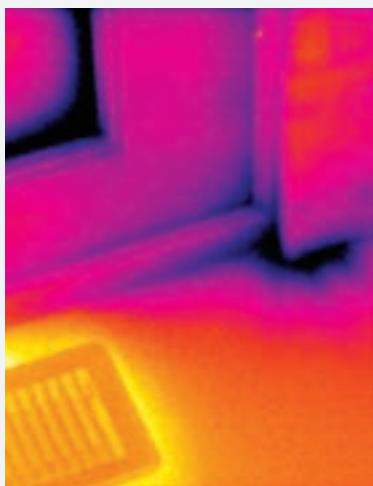


Figure 6-6. Les modèles de température caractéristiques des fuites d'air affichent souvent une sorte de traînée sur leur signature thermique.

L'introduction d'une différence de pression artificielle au sein du bâtiment permet d'améliorer, de diriger et de quantifier les modèles de fuite d'air au moyen d'un système de chauffage/climatisation ou d'une soufflerie.

Détection de l'humidité

L'humidité se fraye fréquemment un chemin dans les bâtiments où elle provoquera d'importants dégâts par dégradation des matériaux de construction. Le point de pénétration est généralement lié à la défaillance d'un joint ou d'une jonction structurel(le) de type bande de recouvrement ou joint d'étanchéité. La présence d'humidité peut également être due à une forte condensation. La condensation est généralement causée par une fuite d'air chaud et humide du bâtiment vers des cavités plus fraîches du bâtiment. Mais il ne s'agit pas là de la seule source d'humidité. Les inondations, les infiltrations par le sol, fuites au niveau de la plomberie, systèmes d'arrosage... la liste est longue.

Dans tous ces exemples, la signature thermique de l'humidité présente est généralement évidente, surtout lorsque les conditions sont propices à l'évaporation de l'humidité, auquel cas, la surface humide semblera froide. Les matériaux de construction humides sont généralement plus conducteurs et présentent, en phase de transition, une capacité thermique largement supérieure à celle des matériaux secs, auquel cas, les signatures thermiques ne sont pas toujours très claires. Il est donc recommandé de prendre le temps de vérifier si les conditions permettent une bonne visibilité de l'humidité, le cas échéant. Des tests supplémentaires doivent donc, par exemple, être réalisés avec un hygromètre afin de vérifier les éléments visibles sur le thermogramme dès lors qu'une fuite est détectée.

Inspection des bâtiments commerciaux

Contrairement à la simplicité relative de l'inspection des bâtiments résidentiels, celle des imposants bâtiments commerciaux s'avère souvent beaucoup plus complexe. Une bonne compréhension de la structure de ces vastes bâtiments représente souvent un important

retour sur investissement capable de justifier une telle inspection et une telle analyse. Pour bien saisir toute la complexité des interactions entre les différents composants intervenant dans la structure d'un bâtiment, le thermographe doit bien comprendre les informations relatives à la construction du bâtiment et les avoir à son entière disposition.

Les fuites d'air, l'infiltration d'eau et la condensation constituent les problèmes les plus couramment observés au niveau des bâtiments commerciaux. La caméra infrarouge vient donc s'imposer dans le dépannage des nombreux problèmes survenant au sein d'une structure aussi vaste. Dans la mesure du possible, une inspection des grands bâtiments doit être effectuée en cours de construction, lors de la réalisation et de l'isolement de chaque étage, ainsi que de la pose des finitions. Les problèmes de construction ou de conception pourront alors être identifiés à la racine et corrigés avant la fin des travaux et l'occupation des locaux.



METHODES D'INSPECTION

Pour procéder à des inspections à l'aide de caméras infrarouges, les thermographes ont recours à trois méthodes différentes dites comparative, de référence et d'établissement de tendances. La méthode adoptée dépend de l'équipement inspecté et du type de données requis. Bien ciblée, chaque méthode est très efficace.

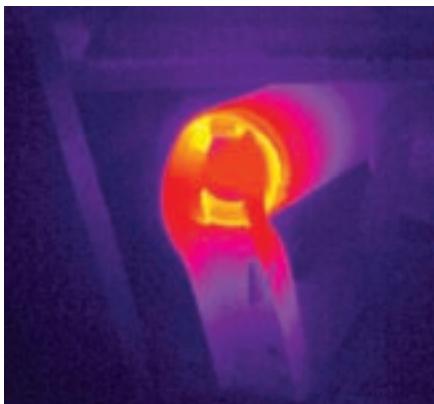
THERMOGRAPHIE COMPARATIVE

Les thermographes ont développé plusieurs méthodes permettant d'exploiter au maximum la technologie à leur portée. La thermographie comparative est la plus couramment déployée. *La thermographie comparative* est un processus visant à comparer des composants de nature similaire dans des conditions similaires afin de déterminer l'état de l'équipement diagnostiqué.

Bien utilisée, la thermographie comparative permettra de faire la lumière sur l'état réel de l'équipement grâce à une étude des différences. La thermographie quantitative, quant à elle, exige une connaissance plus approfondie des variables et des limites associées aux mesures radiométriques. *La thermographie quantitative* est une variante de la thermographie traditionnelle intégrant des températures radiométriques. *La thermographie qualitative* est un type de thermographie ne tenant pas compte des températures radiométriques.

Avant de procéder à une inspection, il est absolument nécessaire de déterminer la marge d'erreur acceptable afin de s'en tenir scrupuleusement aux limites définies. Une formation pratique aux principes du transfert thermique et d'excellentes compétences en matière de thermographie sont essentielles à la

bonne compréhension du fonctionnement de la thermographie quantitative. Une grande partie de l'étude thermographique repose sur des travaux de comparaison. En effet, la comparaison d'un objet particulier avec un autre de nature similaire permet souvent de détecter les problèmes. En raison du grand nombre de variables possibles, formation et expérience sont fondamentales à la réussite du processus.



La thermographie qualitative ne tient généralement pas compte des températures radiométriques. Elle se base plutôt sur une comparaison des signatures thermiques d'éléments similaires.

Pour pouvoir mener à bien son étude comparative, le thermographe doit en effet être capable d'éliminer pratiquement toutes les variables existantes, un exercice trop souvent ignoré malgré son importance en raison de la complexité des conditions d'inspection ou d'une mauvaise habitude de travail du thermographe. Les données ainsi obtenues peuvent alors être non concluantes ou erronées. D'où l'importance de bien comprendre les influences à l'origine des signatures thermiques observées.

Prenons l'exemple du thermogramme d'un disjoncteur électrique triphasé. Celui-ci peut indiquer une phase plus chaude que les autres. **Voir Figure 7-1.** Lorsque les charges sont équilibrées entre les trois phases, cette différence de chaleur peut être due à une connexion présentant une forte résistance. Si toutefois un relevé effectué à l'aide d'un multimètre numérique indiquait une charge de 30/70/30 A, par exemple, un tel modèle serait probablement lié à déséquilibre entre les phases électriques.

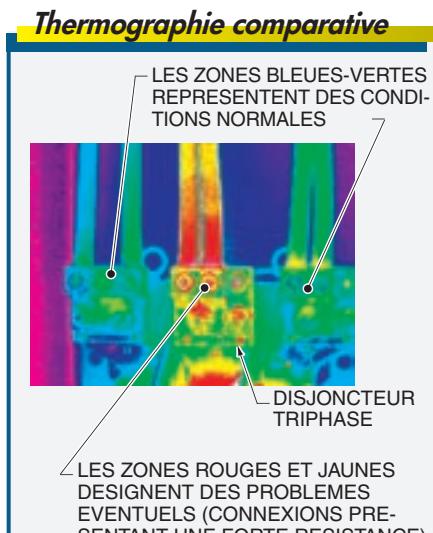


Figure 7-1. La thermographie comparative peut être appliquée à un disjoncteur électrique triphasé et mettre ainsi en évidence une phase plus chaude que les autres.

La caméra infrarouge en soi n'est pas capable de « lire » une image. Ce travail appartient, en effet, au thermographe qui, par ses compétences, son expérience et ses efforts, sa bonne utilisation du système et un recours à d'autres données, interprétera correctement le thermogramme. Et toute erreur de diagnostic d'une exception peut bien évidemment se traduire par l'endommagement ou une perte de matériel précieux.

En cas de recours à une thermographie comparative, le technicien devrait donc glaner un maximum d'informations concernant l'objet étudié (construction, fonctionnement, mécanisme défaillant, sens du flux thermique, historique de fonctionnement d'un objet, etc.). De telles informations ne sont pas toujours clairement accessibles ; aussi, le thermographe doit être capable de se renseigner auprès du propriétaire de l'équipement ou du technicien de maintenance, par le biais de questions simples clairement formulées.

Et bien plus encore : le thermographe doit savoir écouter les réponses. De nombreux thermographes n'attachent malheureusement pas assez d'importance à l'une et/ou l'autre de ces tâches, un manquement qui se répercute forcément sur leurs travaux. Dans le domaine de la thermographie, les capacités de communication sont tout aussi importantes que les compétences techniques, tout particulièrement dès lors qu'il s'agit d'équipements ou de matériels méconnus.

THERMOGRAPHIE DE RÉFÉRENCE

L'inspection de référence a pour objet d'établir un point de repère pour un équipement en bon état de fonctionnement dans des conditions normales de fonctionnement. L'établissement d'une ligne de fonctionnement normal ou désiré permet d'établir une signature de référence avec laquelle comparer les futures images obtenues. Cette signature de référence est souvent uniforme ou liée à la structure inhérente de l'objet visualisé. Une fois

un moteur installé et opérationnel, par exemple, la moindre différence au niveau de la signature thermique sera indiquée sur le thermogramme. Voir Figure 7-2.

Thermographie de référence



Figure 7-2. Les inspections thermiques qui s'en suivront mettront en lumière de nombreuses différences au niveau de la signature thermique du moteur.

TENDANCES THERMIQUES

Autre méthode d'inspection thermique : l'établissement de tendances thermiques. Ces *tendances thermiques* permettent aux thermographes de comparer la répartition de température d'un même composant dans la durée. Ce processus largement utilisé permet en particulier d'inspecter l'équipement mécanique pouvant présenter des signatures thermiques complexes en temps normal ou lorsque celles-ci mettent longtemps à indiquer un problème. L'établissement de tendances thermiques peut, par exemple, servir au suivi dans la durée des performances de l'isolation réfractaire (haute température) d'un wagon de chemin de fer en vue d'établir un calendrier d'entretien optimal. Voir Figure 7-3.

Un thermographe doit être capable de comprendre toutes les variables de l'équipement étudié, ainsi que les principes de fonctionnement des différents systèmes, et de développer ses compétences en matière de dépannage. Une collecte de données rigoureuse et une bonne compréhension des variations sont le gage de méthodes fiables et très précises qui vous permettront de déterminer des tendances de fonctionnement de l'équipement. Ne pas oublier toutefois que les tendances ne reflètent qu'une tendance logique et qu'elles ne constituent en rien des prévisions.

Tendances thermiques

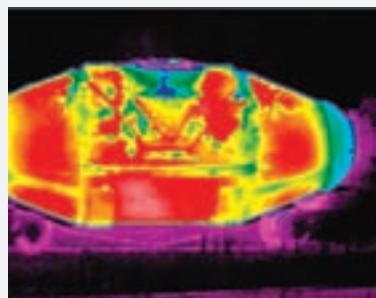


Figure 7-3. L'établissement de tendances thermiques permet d'inspecter les équipements haute température, tels que cette voiture Torpedo remplie de métal en fusion, pouvant présenter en temps normal des signatures thermiques très complexes, et indiquer ni plus ni moins qu'une dégradation de l'isolation au fil du temps.

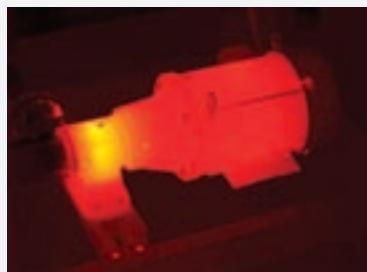
Palettes

Palettes

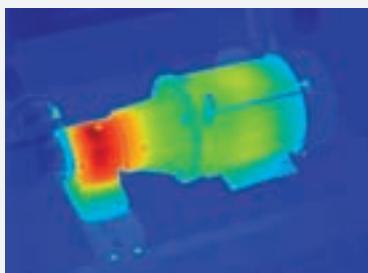
Une *palette* est un éventail de couleurs permettant d'indiquer les variations et les modèles thermiques sur un thermogramme. Qu'il s'agisse d'une inspection ou d'une analyse, l'objectif est d'opter pour la palette la plus à même d'identifier et de signaler le problème. Dans l'idéal, un thermographe devrait opter pour une caméra infrarouge lui offrant un choix de palettes au niveau de l'appareil en soi, comme du logiciel. Certaines applications gagnent par exemple à être visualisées et analysées sur une palette monochromatique de type nuances de gris ou ambre. Dans d'autres cas, une palette de couleurs de type acier, bleu-rouge ou présentant un haut contraste faciliterait l'analyse et les explications. Le thermographe ayant à sa disposition tout un choix de palettes profite d'une plus grande flexibilité pour la réalisation de ses inspections thermiques, de ses analyses et de ses rapports.



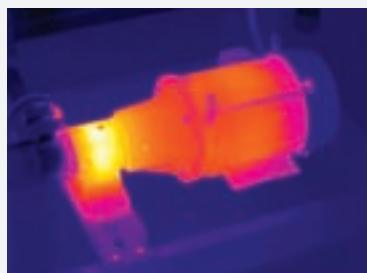
AMBRE



METAL CHAUD



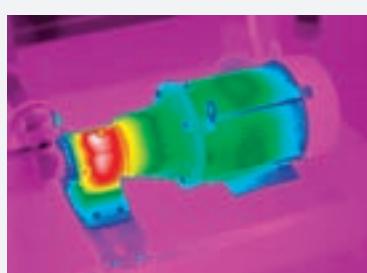
BLEU-ROUGE



ACIER



NUANCES DE GRIS



HAUT CONTRASTE



ANALYSES, GENERATION DE RAPPORTS ET DOCUMENTATION

La tâche d'un thermographe ne se limite pas à la manipulation et à l'utilisation d'une caméra infrarouge. Il doit également être capable d'analyser et de documenter les résultats de l'équipement testé, et de générer des rapports. Des outils d'analyse spéciaux permettant la réalisation de telles tâches ont été développés.

ANALYSES D'INSPECTION

La thermographie dépend véritablement des capacités d'un thermographe à procéder à une inspection correcte, à comprendre les limites de ces travaux, à enregistrer toutes les données pertinentes et à interpréter correctement les résultats. Il sera également confronté à une multitude de variables, toutes aussi diverses que nombreuses. Aussi devra-t-il avoir reçu la formation et disposer des qualifications nécessaires à la réalisation d'inspections thermiques.

Il existe trois niveaux de certification pour les thermographes, allant de I à III selon un ordre croissant. Dans le cadre du déploiement d'un programme de thermographie en bonne et due forme, un thermographe certifié de Niveau I sera homologué pour la collecte de données, mais devra travailler sous la supervision d'un thermographe certifié de Niveau II. Les thermographes de Niveau II sont qualifiés pour l'interprétation des données et la rédaction de rapports. Un programme de thermographie en bonne et due forme exige la mise en place de procédures d'inspections écrites généralement basées sur les normes de l'industrie et développées en collaboration avec un thermographe certifié de Niveau III.

GENERATION DE RAPPORTS ET DOCUMENTATION

L'étude des données thermiques devra peut-être faire l'objet d'un rapport écrit communiquant

les résultats de façon claire. Le processus de génération de rapports peut impliquer une explication permettant au client de comprendre les limites inhérentes de la technologie appliquée à la thermographie et la valeur des inspections thermiques. Le rapport aboutit souvent à des actions préconisées pour la résolution des problèmes mis en lumière par l'inspection thermique.

De manière générale, le thermographe fournira d'autres informations telles que l'emplacement du problème, le diagnostic et les mesures correctives à prendre. Un thermographe extrait et communique les principales informations glanées au cours de l'inspection thermique, qui devront alors être associées à d'autres données obtenues lors d'autres tests ou inspections, au calendrier de maintenance ou d'entretien, ainsi qu'à des analyses de coûts avant de pouvoir en tirer une conclusion probante. Le thermographe sera donc jugé tant pour ses compétences techniques que pour ses qualités de communication.

Quelle que soit sa forme et les données qu'il contient, un rapport doit spécifier les informations suivantes :

- Nom du thermographe
- Marque, modèle et numéro de série de la caméra infrarouge
- Conditions ambiantes pouvant avoir une incidence (vitesse et sens du vent, précipitations, humidité, température ambiante, etc.)

- Conditions de fonctionnement du système (charge, cycle d'utilisation, etc.)
- Identification et emplacement de l'équipement et des composants ayant fait l'objet du diagnostic ou de l'inspection
- Liste des équipements non inspectés ou diagnostiqués, accompagnée d'un motif expliquant l'omission
- Réglage des paramètres des instruments (émissivité, arrière-plan, etc.)
- Thermogrammes et images visuelles correspondant à l'ensemble de l'équipement et des composants inspectés ou diagnostiqués
- Partie exigeant une image infrarouge de suivi afin de documenter la réparation de l'équipement

Les documents doivent également être affichés de sorte à ne pas encombrer le rapport, mais au contraire à mettre en valeur et à appuyer la présentation des informations essentielles de façon claire et efficace. Les meilleurs rapports d'inspection thermographiques s'appuient sur un flux de données naturel venant compléter les thermogrammes et les images visuelles.

Voir Figure 8-1.

L'accès à tout un éventail de modèles de rapports peut être très utile. Un modèle de rapport tout simple peut être utilisé pour documenter les réparations réalisées sur l'équipement inspecté ou diagnostiqué au moyen d'outils thermographiques. Des modèles de rapport spécialisés peuvent être utilisés pour certains types d'inspection thermique.

Des copies de chaque rapport thermographique doivent être remises au personnel concerné sous forme imprimée ou électronique. Les rapports électroniques devront être enregistrés et verrouillés (au format PDF, par exemple) avant d'être envoyés afin d'empêcher toute falsification des analyses d'inspection et de diagnostic.

Un suivi des problèmes de façon catégorique et spécifique permet souvent d'optimiser les opérations de diagnostic et inspection thermiques.

Les informations concernant des problèmes touchant une certaine marque de matériel ou un certain processus peuvent ainsi, par exemple, être identifiées et enregistrées. Elles pourront alors être récupérées ultérieurement afin d'établir des tendances propres à un certain type de matériel en vue de prévenir et d'assister les futurs utilisateurs.

Un bon thermographe devra non seulement savoir manipuler et utiliser correctement une caméra thermique, mais il devra également être capable d'analyser et de documenter les résultats, qu'il présentera sous la forme d'un rapport bien structuré. De telles compétences sont nécessaires à l'établissement et à la préservation d'une bonne réputation en matière de travaux de haute qualité. La génération de rapport permet de procéder au mieux à des recommandations quant aux mesures à adopter suite à l'inspection.

Génération de rapports thermiques et documentation



IMAGE VISIBLE



THERMOGRAMME

Figure 8-1. Les rapports d'inspection thermographiques contiennent généralement des thermogrammes et des images visuelles correspondantes fournies à titre de référence.



RESSOURCES EN MATERIE DE THERMOGRAPHIE

Mises à jour d'équipement, mises en garde, séminaires de formation, outils didacticiels, organismes de normalisation, organisations professionnelles, ... autant de moyens permettant d'obtenir des informations supplémentaires sur la thermographie et les caméras infrarouges. Ces ressources sont disponibles sous des formats électroniques ou sous la forme de documents imprimés.

RESSOURCES

La plupart des intéressés peuvent avoir accès à une quantité inimaginable d'informations pertinentes concernant la thermographie et les caméras infrarouges et ce, auprès de tout un éventail de ressources. Voilà plus de 40 ans maintenant que cette technologie est déployée au sein d'applications industrielles, commerciales et du BTP. Et pourtant de nombreux techniciens de maintenance, électriques et bien d'autres professionnels n'en sont encore qu'au stade de découverte des principes de la thermographie, des caméras infrarouges et de tous les avantages que présente une telle technologie.



De nombreuses ressources sont disponibles, notamment toute une documentation écrite proposée par différents organismes de normalisation.

Parallèlement au développement de nouvelles informations, la thermographie a vu son application décupler à une vitesse vertigineuse au cours de ces dernières années. Veuillez noter que certaines informations concernant la thermographie, tout particulièrement lorsqu'elles sont publiées sur le net, pourraient manquer de précision et ne pas s'appuyer sur des données concrètes. Il est donc fortement conseillé d'acquérir des bases auprès de sources telles que le présent document ou celles citées ci-dessous. Une analyse et une étude critique sont également importantes pour déterminer la qualité des sources inconnues. Nous avons recensé pour vous les principaux types de ressources qui vous sont proposés : les ressources en ligne, les ouvrages et publications spécialisées, ainsi que les organisations professionnelles.

Normes

Une *norme* est une référence ou une pratique développée et reconnue par les professionnels de l'industrie. Les normes définissent tout un ensemble de critères permettant d'établir un cadre de travail. Même si elles ne sont en aucun cas obligatoires, l'adoption de normes reconnues et approuvées est considérée comme une bonne pratique commerciale. Ces normes sont publiées par différentes organisations. Voir Figure 9-1. Développées avec le concours de différents experts de l'industrie, elles peuvent constituer une véritable mine d'informations détaillées sur les différents aspects de la thermographie.

Ressources en ligne

Une *ressource en ligne* est un type de ressource mise à la disposition de tous sur Internet, et uniquement sur ce support. De telles ressources permettent aux étudiants, thermographes et techniciens d'accéder à un matériel didactique très varié. Des informations complémentaires et d'ordre plus complexe sont généralement disponibles auprès des fabricants d'équipement, d'organismes de normalisation, d'organisations professionnelles, ou encore d'ouvrages de formation. Un forum en direct peut, par exemple, venir compléter une ressource en ligne pour permettre aux représentants expérimentés des fabricants d'équipement de venir discuter avec des utilisateurs de l'importance du dépannage ou de leur fournir des conseils concernant leur matériel.

Ouvrages et autres publications spécialisées

Les ouvrages et autres publications désignent toute la documentation imprimée pouvant servir de référence technique. Ceux-ci ont pour objet de venir renforcer les connaissances de toute personne ayant recours à des techniques de thermographie ainsi qu'à la technologie infrarouge à des fins de diagnostic et d'inspection. Un certain nombre d'ouvrages et de publications a été rédigé sur ce sujet.

Organisations professionnelles

Une *organisation professionnelle* est un organisme mettant à disposition des informations et des connaissances relatives à la thermographie par le biais de publications, de formations et d'une participation à différents événements organisés sur le sujet. Les thermographes et les techniciens sont fortement encouragés à adhérer de façon active à différentes organisations professionnelles. Une telle adhésion leur permet ainsi de rester au fait des dernières tendances en matière de technologie et de l'évolution opérée au sein de l'industrie. En participant aux activités de ces organisations, ils

peuvent ainsi bénéficier de nouvelles opportunités et accéder à une mine d'informations concernant les processus de thermographie, les nouveautés en matière d'équipement, ainsi que les toutes dernières techniques d'inspection/de diagnostic.

Organismes de normalisation	
American Society for Nondestructive Testing (ASNT)	
1711 Arlingate Lane PO Box 28518 Columbus, OH 43228 614-274-6003	www.asnt.org
ASTM International (ASTM)	
100 Barr Harbor Drive PO Box C700 West Conshohocken, PA 19428 610-832-9598	www.astm.org
Canadian Standards Association (CSA)	
5060 Spectrum Way Suite 100 Mississauga, ON L4W 5N6	www.csa.ca
Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)	
1828 L Street NW Suite 1202 Washington, DC 20036 202-785-0017	www.ieee.org
International Electrotechnical Commission (IEC)	
3, rue de Varembe' PO Box 131 CH-121 Genève 20 Suisse	www.iec.ch
International Organization for Standardization (ISO)	
1, ch. de la Voie-Creuse Case postale 56 CH-1211 Genève 20, Suisse +41 22 749 01 11	www.iso.org
National Fire Protection Association (NFPA)	
1 Batterymarch Park Quincy, MA 02169 617-770-3000	www.nfpa.org

Figure 9-1. Les normes sont des références reconnues ou des pratiques développées par des professionnels de l'industrie et sont disponibles auprès d'organismes divers.



AUTRES TECHNOLOGIES CONNEXES

La thermographie n'est pas la seule technique d'analyse utilisée pour l'inspection et le dépannage de l'équipement et des composants commerciaux et industriels. Parmi les autres méthodes employées, on recense l'inspection visuelle et auditive et différents types d'analyse (électrique, ultrasonique, vibrations, huile de graissage, particules d'usure). Celles-ci peuvent être déployées seules en vue de procéder au dépannage de l'équipement ou suite à l'utilisation de caméras infrarouges, pour vérifier les résultats des tests obtenus.

INSPECTION VISUELLE ET SONORE

L'inspection visuelle et sonore consiste à analyser l'aspect des problèmes et les bruits émis par l'équipement en cours d'utilisation en vue d'identifier les composants pouvant nécessiter une maintenance ou une réparation. Voir Figure 10-1. L'inspection visuelle et sonore ne nécessite aucun outil ou équipement particulier. Il s'agit là de la procédure de maintenance prédictive la plus simple pouvant être réalisée au sein d'une installation. Elle est particulièrement efficace lorsque le technicien de maintenance formé et expérimenté est déjà familiarisé avec le problème éventuel. Les caractéristiques de fonctionnement anormales sont alors notées et la maintenance de l'équipement est organisée.

L'inspection visuelle peut être complétée, par exemple, par des contrôles par ressauage qui permettront de détecter d'éventuelles microfractures à la surface des métaux. Le métal est intégralement nettoyé et pulvérisé d'un colorant qui vient s'accumuler dans ces fractures et les cuvettes infimes présentes sur la surface du métal. Les excès de colorant sont ensuite éliminés, faisant ainsi apparaître toutes ces petites aspérités présentes sous la surface.

Inspection visuelle et sonore



Figure 10-1. Les techniciens de maintenance procèdent régulièrement à des inspections visuelles et auditives en vue de vérifier l'aspect et le bruit émis par l'équipement.

ANALYSE ÉLECTRIQUE

L'analyse électrique permet d'évaluer à partir d'outils de contrôle électrique la qualité de l'alimentation électrique d'un équipement et les performances de ce dernier. Voir Figure 10-2. Des outils de contrôle électrique peuvent être installés afin de procéder à la mesure des tensions minimale et maximale, des variations de tension de phase à phase et des niveaux d'intensité. Ils permettent également d'évaluer la qualité de l'alimentation de l'équipement électrique le plus sensible.

Les analyses électriques constituent généralement la méthode de choix pour le contrôle des moteurs et des circuits électriques. *L'analyse*

Analyse électrique



Figure 10-2. L'analyse électrique s'appuie sur un équipement de suivi électrique pour évaluer la qualité de l'alimentation fournie à l'équipement.

des circuits de moteur (MCA) est une variante de l'analyse électrique appliquée plus particulièrement aux moteurs et aux circuits. Elle peut être réalisée en ligne (sous tension) ou hors ligne (hors tension). Ces deux méthodes de diagnostic permettent de détecter rapidement et dès leurs prémisses les défaillances ou les pannes au niveau du circuit de distribution électrique des moteurs, des circuits de moteurs et des groupes motopropulseurs.

DETECTION D'ULTRASONS AEROPORTES

La détection des ultrasons aéroportés est une méthode d'analyse de l'équipement basée sur l'amplification des bruits haute fréquence en vue de détecter tout problème potentiel au niveau de l'équipement. Un dispositif de réception ultra-sensible convertit ces sons normalement inaudibles en signaux perceptibles par l'oreille humaine. Ces signaux peuvent indiquer notamment un échauffement abnormal des connexions électriques, les fuites d'air dans les circuits d'air et de vapeur, une friction au niveau des roulements, etc.

ANALYSE DES VIBRATIONS

L'analyse des vibrations consiste à contrôler les caractéristiques de vibration de chaque composant afin de déterminer l'état général de l'équipement. La défaillance des équipements est souvent due à l'usure des pièces. Ces pièces usées génèrent également des vibrations ou un bruit plus importants pouvant être isolés. L'analyse des vibrations est la technique la plus utilisée pour le contrôle des équipements rotatifs.

ANALYSE DE L'HUILE DE GRAISSAGE

L'analyse de l'huile de graissage est une technique de maintenance prédictive qui consiste à détecter la présence d'acide, de saletés ou de particules d'usure dans l'huile de graissage et à examiner toutes ces substances en vue de prévoir la panne ou la défaillance de l'équipement. L'analyse de l'huile de graissage s'effectue selon un calendrier déterminé. Un échantillon d'huile est prélevé sur une machine en vue de déterminer l'état du lubrifiant et des pièces en mouvement. Des échantillons sont généralement envoyés à une société spécialisée dans l'analyse des huiles de graissage.

ANALYSE DES PARTICULES D'USURE

L'analyse des particules d'usure consiste à examiner les particules d'usure présentes dans l'huile de graissage. Contrairement à l'analyse de l'huile de graissage qui se concentre sur l'état de l'huile, l'analyse des particules d'usure se concentre sur la taille, la fréquence, la forme et la composition des particules générées par les pièces usées. L'observation des particules d'usure permet d'évaluer l'état de l'équipement. Le contact entre les différentes pièces produit un phénomène d'usure naturel. L'augmentation de la fréquence et de la taille des particules d'usure dans l'huile de graissage dénote généralement l'usure d'une pièce ou une défaillance imminente.



Présentation des principes de thermographie

INDEX

A

- absorption 23
- ACM 66
- affichage 7
- affichage* 6
- American Society for Nondestructive Testing (ASNT) 14
- American Society of Testing Materials (ASTM) International 16
- analyse de l'huile de graissage 66
- analyse des particules d'usure 66
- analyse des vibrations 66
- analyse du circuit du moteur (ACM) 66
- analyse électrique 65–66, 66
- analyses d'inspection 61
- analyse ultrasonique 66
- applications de contrôle de processus 50–51
- applications de thermographie électrique 45–49
- applications thermographiques
 - applications électriques 45–49
 - applications électromécaniques 49
 - applications mécaniques 49
- arc électrique 14
- ASNT 14
- ASTM 16

B

- boîtiers électriques 15

C

- caméra infrarouge 2, 3, 6, 17
 - composants 5–8
 - développement 2–4
 - fonctionnement 4, 5
- caméra infrarouge à ondes longues 4
- caméra infrarouge à ondes moyennes 4
- capacité thermique 20
- Case, Theodore 2
- cécité crépusculaire 16
- champ de visée (FOV) 26, 27
- champ de visée instantané (IFOV) 26–27
- cible 4, 5
- commandes* 7
- conducteur 20
- conduction 20–21
- convection 21–22, 22

D

- détecteur et électronique de traitement 6–7
- détection de l'humidité 55
- détection des fuites d'air 54–55, 55
- deuxième principe de la thermodynamique 19
- diagnostic de bâtiments 51
 - détection des fuites d'air 54–55, 55
 - détection de l'humidité 55
 - inspection de l'isolation 53
 - inspection des bâtiments commerciaux 55
 - inspection des infiltrations d'humidité dans le toit 52–54, 53

E

- effets sur l'environnement 28
- émissions 23, 24
- émissivité 25, 26
- énergie 19
- énergie électromagnétique 22
- enveloppe thermique 54
- EPP* 46
- équation de Stefan-Boltzmann 22
- équipement de protection personnelle (EPP) 46
- exception thermique 45
- explosion électrique 14

F

- FOV 26, 27

G

- génération de rapports et documentation 61–62, 62

H

- Herschel, Sir John 2
- Herschel, Sir William 1–2
- hublot transparent spécial rayons infrarouges* 47

I

- IFOV 26
- image radiométrique 3
- inspection. Voir inspection thermique
- inspection de l'isolation des bâtiments 53
- inspection de l'isolation 53
- inspection de référence 50
- inspection des bâtiments commerciaux 55

68 INTRODUCTION TO THERMOGRAPHY PRINCIPLES

inspection des infiltrations d'humidité dans le toit 52–54, 53
inspection des tendances 50
inspection du moteur 49
inspections électromécaniques 49
inspections mécaniques 49
inspection thermique
 applications de contrôle de processus 50–51
 applications électriques 45–49
 applications électromécaniques 49
 applications mécaniques 49
 diagnostic de bâtiments 51–56
 thermographie de référence 58–59, 59
 inspection visuelle et sonore* 65
inspection visuelle et sonore* 65
International Organization for Standardization (ISO) 14
ISO 14
isolateur 21

L

logiciel 8
logiciel de création de rapports 8
logiciel de traitement 8
logiciel de traitement des données 8

M

matrice à plan focal (MPF) 3–4, 4
Melloni, Macedonio 2
mesure IFOV 27, 28
micron (μm) 4

N

niveau de liquide 50–51, 51
niveau de matériau 50–51, 51
Nobili, Leopoldo 2
normalisation 63
 organismes 64
normes 16–17

O

objectif 5, 6
Occupational Safety and Health Administration (OSHA) 16
organisations professionnelles 64
OSHA 16
ouvrages sur la thermographie 64

P

périmètre de protection contre les arcs électriques 14, 15
périphériques de stockage des données 7–8
personnel qualifié 15
pixel 3–4
précision de la mesure de température 26
 champ de visée instantané (IFOV) 26–27
 effets sur l'environnement 28
 champ de visée (FOV) 26, 27

premier principe de la thermodynamique 19
procédures d'inspection 16–17

Q

qualification du thermographe 13, 13–14

R

radiation 1, 20, 22–23, 24
radiation thermique 22–23
rapports d'inspection 61–62, 62
rapport thermique 48
réflexion 24
ressources 63–64
ressources en ligne 64
ressources en matière de thermographie 63–64

S

sécurité sur le lieu de travail 14–16
Seebeck, Thomas 2
signature thermique 9, 49
spectre électromagnétique 23

T

technicien de maintenance 65
température 19
température de surface 25–26
tendances thermiques* 59
thermodynamique 19
thermogramme 4–5
thermographe
 certification 61
 processus de documentation 61–62
thermographie
 thermographie comparative 57–58, 58
 thermographie qualitative 57
 thermographie quantitative 57
thermographie comparative 57–58, 58
thermographie de référence 58–59, 59
thermographie infrarouge 1
 historique 1–4
thermographie qualitative 57
thermographie quantitative 57
toit peu incliné 52
transfert thermique 19–20
transmission 23, 24

U

ultrasons aéroportés 47

V

vidicon pyroélectrique (VPE) 3