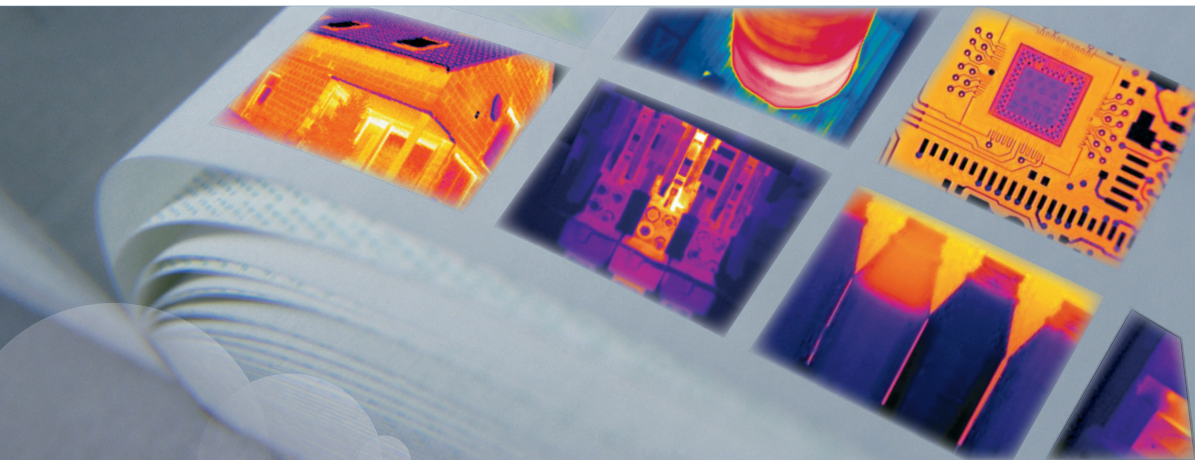




Manuel de l'utilisateur



FLIR BuildIR

Version 2.1 du programme

Publ. No.	T559148
Revision	a429
Language	French (FR)
Issue date	January 27, 2010

FLIR BuildIR

Manuel de l'utilisateur



Clause légale

Tous les produits fabriqués par FLIR Systems sont garantis contre les vices de matériaux et de fabrication pour une période d'un an à compter de la date de livraison du produit original, à condition que ces produits fassent l'objet d'une utilisation, d'une maintenance et d'un conditionnement normaux, en accord avec les instructions de FLIR Systems.

Tous les produits qui ne sont pas fabriqués par FLIR Systems, et qui sont inclus dans les systèmes fournis par FLIR Systems à l'acquéreur initial, sont soumis à la garantie du fournisseur de ces produits, le cas échéant. FLIR Systems décline toute responsabilité envers de tels produits.

La garantie ne s'applique qu'à l'acquéreur initial du produit et n'est pas transmissible. Elle ne s'applique pas aux produits ayant fait l'objet d'une utilisation incorrecte, de négligence, d'accident ou de conditions anormales d'exploitation. Les composants d'extension sont exclus de la garantie.

En cas de défaut d'un produit couvert par cette garantie, il convient d'interrompre son utilisation afin d'éviter tout dommage supplémentaire. L'acquéreur doit, dans les meilleurs délais, signaler à FLIR Systems tous les défauts, faute de quoi la présente garantie ne s'appliquera pas.

FLIR Systems s'engage à réparer ou à remplacer (selon son choix) le produit défectueux, sans frais supplémentaires, si lors de l'inspection il s'avère que le produit présente des vices de matériaux ou de fabrication et à condition qu'il soit retourné à FLIR Systems dans ladite période d'un an.

FLIR Systems refuse toute prise d'obligation ou de responsabilité pour les défauts autres que ceux indiqués ci-dessus.

Aucune autre garantie n'est exprimée ou implicite. FLIR Systems décline toute responsabilité quant aux garanties implicites de qualité marchande ou d'adéquation à un usage particulier.

FLIR Systems ne peut être tenu pour responsable des pertes ou dommages directs, indirects, spéciaux ou occasionnels, qu'ils soient basés sur un contrat, un délit civil ou toute autre théorie juridique.

Règlementations du gouvernement américain

- Les produits décrits dans la documentation utilisateur doivent être contrôlés par le gouvernement des Etats-Unis lors de leur exportation/réexportation. Tout manquement à la loi en vigueur aux Etats-Unis est strictement interdit. Pour recevoir de l'assistance, contactez FLIR Systems.
- En fonction de la licence et des procédures d'exportation, l'objectif peut être fixé de façon permanente à la caméra avant la livraison aux clients situés en dehors des Etats-Unis. Les objectifs interchangeables sont soumis à la juridiction du Ministère des Affaires Etrangères des Etats-Unis.

Copyright

© FLIR Systems, 2010. Tous droits réservés dans le monde. Aucune partie du logiciel, notamment le code source, ne peut être reproduite, transmise, transcrite ou traduite dans aucune langue ou langage informatique sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, électronique, magnétique, optique, manuel ou autre, sans la permission expresse et écrite de FLIR Systems.

Aucune partie de ce manuel ne peut être copiée, photocopiée, reproduite, traduite ou transmise vers aucun support électronique ni sous aucun format lisible par une machine sans le consentement écrit de FLIR Systems.

Les noms et les marques qui apparaissent sur les produits mentionnés dans ce document sont des marques déposées ou des marques de FLIR Systems et/ou de ses filiales. Les autres marques, noms commerciaux et noms de sociétés mentionnés dans ce document et appartenant à d'autres propriétaires, sont utilisés dans un but d'identification uniquement.

Assurance qualité

Le Système de gestion de la qualité utilisé lors du développement et de la fabrication de ces produits a été certifié ISO 9001.

FLIR Systems s'est engagé dans une politique de développement continu. Nous nous réservons par conséquent le droit de modifier et d'améliorer sans préavis les produits décrits dans ce manuel.

Tables des matières

1	Remarques à l'attention des utilisateurs	1
2	Aide clientèle	2
3	Mises à jour de la documentation	3
4	Qu'est-ce que FLIR BuildIR ?	4
5	Remarque sur la formation et les applications	5
6	Installation	6
6.1	Configuration système requise	6
6.2	Installation FLIR BuildIR	7
7	Éléments de l'écran	8
7.1	Onglet Organiser	8
7.2	Onglet Analyse > sous-onglet Éditeur d'images	10
7.3	Onglet Analyse > sous-onglet Panorama	12
7.4	Onglet Analyse > sous-onglet Capteur	14
7.5	Onglet Rapport	16
7.6	Boutons de la barre d'outils dans l'onglet Analyse > sous-onglet Éditeur d'images	18
7.7	Boutons de la barre d'outils dans l'onglet Analyse > sous-onglet Panorama	20
8	Inspection	21
9	Choix et association d'images	22
9.1	Choix d'images et de fichiers à l'aide du volet d'explorateur de fichiers	23
9.2	Choix d'images et de fichiers à l'aide de la Collection rapide	24
9.3	Association d'images	25
10	Utilisation des outils	26
10.1	Définition d'un point de mesure, d'une zone ou d'une ligne	26
10.2	Détection d'un intervalle de température	27
10.3	Détection d'une température inférieure à une température définie	29
10.4	Détection d'une température supérieure à une température définie	30
10.5	Détection d'un défaut d'isolation	31
10.6	Détection d'un problème d'humidité	32
10.7	Analyse des structures de bâtiments à l'aide des outils Paramètres de la grille	33
10.8	Utilisation du capteur	35
10.8.1	Structure du fichier de l'encodeur de données	36
10.9	Zoom avant ou arrière sur les images	37
10.10	Panoramique d'images	38
10.11	Utilisation de l'outil Panorama.	39
11	Création du rapport	40
11.1	Utilisation du modèle de rapport Coûts énergétiques	42
11.1.1	Description du modèle	42
11.1.2	Description de la boîte de dialogue Calculer les coefficients R et K	45
11.1.3	Formules utilisées pour les calculs	46
12	Extraits du livre blanc sur les coefficients R	47
12.1	Auteur	47

12.2	Généralités	47
12.3	Mesure du coefficient R	48
12.4	Calcul de coefficient R et estimation d'économies d'énergie	50
12.5	Marche à suivre pour la mesure d'un coefficient R	50
12.6	Analyse des incertitudes	52
12.7	Résumé et conclusions	52
13	Introduction à la thermographie appliquée au bâtiment	53
13.1	Remarque importante	53
13.2	Analyses de terrain typiques	53
13.2.1	Recommandations	53
13.2.1.1	Directives générales	53
13.2.1.2	Directives relatives à la détection de l'humidité, des moisissures et des dommages causés par l'eau	54
13.2.1.3	Directives relatives à la détection d'infiltrations d'air et de défauts d'isolation	54
13.2.2	A propos de la détection d'humidité	55
13.2.3	Détection de l'humidité (1) : Toits à faible pente	56
13.2.3.1	Informations générales	56
13.2.3.2	Précautions de sécurité	57
13.2.3.3	Observation de structures de bâtiments	57
13.2.3.4	Observation d'images infrarouges	59
13.2.4	Détection de l'humidité (2) : Façades de bâtiments commerciaux et résidentiels	61
13.2.4.1	Informations générales	61
13.2.4.2	Observation de structures de bâtiments	61
13.2.4.3	Observation d'images infrarouges	63
13.2.5	Détection de l'humidité (3) : Terrasses et balcons	64
13.2.5.1	Informations générales	64
13.2.5.2	Observation de structures de bâtiments	65
13.2.5.3	Observation d'images infrarouges	67
13.2.6	Détection de l'humidité (4) : Dégâts et fuites du système de plomberie	67
13.2.6.1	Informations générales	67
13.2.6.2	Observation d'images infrarouges	68
13.2.7	Infiltration d'air	70
13.2.7.1	Informations générales	70
13.2.7.2	Observation de structures de bâtiments	70
13.2.7.3	Observation d'images infrarouges	72
13.2.8	Défauts d'isolation	73
13.2.8.1	Informations générales	73
13.2.8.2	Observation de structures de bâtiments	73
13.2.8.3	Observation d'images infrarouges	75
13.3	Théorie en science du bâtiment	77
13.3.1	Informations générales	77
13.3.2	Répercussions des tests et des contrôles	78
13.3.3	Sources de perturbations en thermographie	80
13.3.4	Température de surface et fuites d'air	81
13.3.4.1	Conditions de pression d'un bâtiment	81
13.3.5	Conditions des mesures et environnement atmosphérique	87
13.3.6	Interprétation des images infrarouges	87
13.3.7	Humidité et point de rosée	89
13.3.7.1	Humidité relative et absolue	89
13.3.7.2	Définition du point de rosée	90

13.3.8	Extrait de la note technique 'Evaluation d'un pont thermique et de la continuité d'isolation' (exemple du Royaume-Uni)	90
13.3.8.1	Auteurs	90
13.3.8.2	Introduction	91
13.3.8.3	Informations préalables	91
13.3.8.4	Jugement quantitatif des anomalies thermiques	92
13.3.8.5	Conditions et équipement	96
13.3.8.6	Analyse	96
13.3.8.7	Rapport	98
13.4	Clause légale	100
13.4.1	Copyright	100
13.4.2	Formation et certification	100
13.4.3	Code national ou régional du bâtiment	100
14	A propos de la société FLIR Systems	101
14.1	Bien plus qu'une simple caméra infrarouge	102
14.2	Communiquer notre savoir	102
14.3	L'assistance clientèle	103
14.4	Nos installations en image	103
15	Glossaire	105
16	Techniques de mesure thermographique	109
16.1	Introduction	109
16.2	Emissivité	109
16.2.1	Obtention de l'émissivité d'un échantillon	110
16.2.1.1	Etape 1 : Détermination de la température apparente réfléchie	110
16.2.1.2	Etape 2 : Détermination de l'émissivité	112
16.3	Température apparente réfléchie	113
16.4	Distance	113
16.5	Humidité relative	113
16.6	Autres paramètres	113
17	Historique de la technologie infrarouge	115
18	Théorie de la thermographie	120
18.1	Introduction	120
18.2	Spectre électromagnétique	120
18.3	Rayonnement d'un corps noir	121
18.3.1	Loi de Planck	122
18.3.2	Loi de déplacement de Wien	124
18.3.3	Loi de Stefan-Boltzmann	125
18.3.4	Emetteurs non noirs	126
18.4	Matériaux infrarouges semi-transparents	128
19	La formule de mesure	130
20	Tables des émissivités	136
20.1	Références	136
20.2	Remarque importante concernant les tables d'émissivité	136
20.3	Tables	137

1 Remarques à l'attention des utilisateurs

Conventions typographiques

Le présent manuel utilise les conventions typographiques suivantes :

- Le noms des menus, des commandes, des désignations et des boutons des boîtes de dialogue sont indiqués en **demi-gras**.
 - Les informations importantes sont indiquées en *italique*.
 - Les exemples de codes sont indiqués par une police Monospace.
 - Les LETTRES MAJUSCULES sont utilisées pour les noms et les boutons.
-

Forums utilisateur à utilisateur

Partagez vos idées, problèmes et solutions infrarouges avec les thermographistes du monde entier via nos forums d'utilisateur à utilisateur. Pour accéder aux forums, rendez-vous sur ce site :

<http://www.infraredtraining.com/community/boards/>

Informations supplémentaires sur la licence

Le logiciel est vendu sous une seule licence. Cette licence permet à l'utilisateur d'installer et de faire fonctionner le logiciel sur tout ordinateur compatible. Le logiciel ne peut être utilisé que sur un ordinateur à la fois. Vous pouvez également faire une copie de sauvegarde du logiciel pour l'archiver.

Règlementations du gouvernement américain

Les produits décrits dans les présentes doivent être contrôlés par le gouvernement des Etats-Unis lors de leur exportation/ réexportation. Tout manquement à la loi en vigueur aux Etats-Unis est strictement interdit. Pour recevoir de l'assistance, contactez FLIR Systems.

Généralités

Pour obtenir de l'aide, accédez au site suivant :

<http://flir.custhelp.com>

Envoi d'une question

Pour envoyer une question à l'aide clientèle, vous devez posséder un compte. Vous pouvez vous inscrire en ligne en quelques minutes. Si vous souhaitez simplement effectuer une recherche dans la base de connaissances, votre inscription n'est pas obligatoire.

Si vous souhaitez envoyer une question, veuillez fournir les informations suivantes :

- Modèle de caméra
 - Numéro de série de la caméra
 - Protocole ou méthode de communication entre la caméra et l'ordinateur (par exemple Ethernet, USB™ ou FireWire™)
 - Système d'exploitation installé sur votre ordinateur
 - Version de Microsoft® Office
 - Nom complet, numéro de publication et numéro de révision du manuel
-

Téléchargements

Sur le site d'aide clientèle, les téléchargements suivants sont disponibles :

- Mises à jour du micrologiciel de la caméra infrarouge
 - Mises à jour du logiciel installé sur l'ordinateur
 - Documentation utilisateur
 - Exemples d'applications
 - Publications techniques
-

Généralités

Nos manuels sont mis à jour plusieurs fois par an et nous publions également régulièrement des notifications de produits essentielles à propos des modifications.

Pour accéder aux derniers manuels et notifications, allez dans l'onglet Download sur :

<http://flir.custhelp.com>

Vous pouvez vous inscrire en ligne en quelques minutes. Dans la zone de téléchargement, vous trouverez également les dernières publications des manuels pour nos autres produits, ainsi que les manuels de nos produits historiques et obsolètes.

4 Qu'est-ce que FLIR BuildIR ?

FLIR BuildIR est un progiciel spécifiquement conçu pour réaliser des analyses avancées des bâtiments.

Vous pouvez utiliser FLIR BuildIR pour analyser des images prises sur le terrain avec votre caméra infrarouge et pour créer des rapports d'inspection reposant sur ces images.

Vous trouverez ci-dessous des exemples d'analyses que vous pouvez réaliser :

- détection de problème d'humidité,
- identification de défauts d'isolation,
- calcul des coefficients R et U (pour plus d'informations, consultez le livre blanc relatif aux coefficients R dans le menu Aide),
- estimation des coûts et économies d'énergie par an,
- identification d'infiltration d'air,
- utilisation des résultats d'encodage des données,
- création simple et pratique de rapports d'inspection d'aspect professionnel,
- analyse des bâtiments, par exemple réalisation d'une analyse quantitative des fixations de panneaux isolants, calcul de la quantité de matériaux de construction nécessaire à la réparation ou quantification des problèmes d'isolation et d'humidité.

5 Remarque sur la formation et les applications

L'inspection infrarouge de la structure de bâtiments (y compris l'acquisition d'images et d'autres données infrarouges, l'analyse, le diagnostic, le pronostic et la production de rapports) est une activité extrêmement pointue. Elle exige des compétences professionnelles dans le domaine de la thermographie comme dans celui du bâtiment et, dans certains pays, elle est soumise à une certification et doit respecter une législation précise.

Nous vous recommandons donc vivement d'acquérir la formation nécessaire avant d'effectuer des inspections. Pour plus d'informations, consultez le site suivant :

<http://www.infraredtraining.com>

La technique présentée dans ce manuel a été appliquée avec succès à des constructions à ossature légère (ossature à montants, note 1) et des études sont actuellement en cours pour en valider l'utilisation sur des constructions SIP (note 2) et sur des constructions en blocs de béton (note 3). Tous les tests ont été effectués dans des circonstances réelles sur une période de 24 heures dans des conditions semi-optimales : absence de vent et de rayonnement solaire direct sur les surfaces murales, température de l'air intérieur aussi constante que possible (selon les possibilités du système de chauffage) et variation de plusieurs degrés de la température de l'air extérieur. Les résultats préliminaires sont prometteurs pour les types de construction testés (notes 2 et 3 ci-dessous). D'autres types de murs n'ont pas encore été étudiés et FLIR Systems ne peut donc pas documenter l'efficacité de cette technique à leur sujet.

- 1 Mur 10 cm à ossature, avec panneaux de fibres de verre et enrobé sec des deux côtés.
- 2 Construction SIP (Structured Insulated Panels, panneaux isolants structurés) 10 cm avec intérieur tenon-mortaise bois 19 mm et extérieur vinyle.
- 3 ICF (Insulated Concrete Form, coffrage isolé de béton) 15 cm avec panneau de mousse 64 mm de chaque côté et enrobé sec à l'intérieur, vinyle à l'extérieur.

6 Installation

6.1 Configuration système requise

Système d'exploitation

- Microsoft® Windows® XP avec Service Pack 2 (SP2)
- Microsoft® Windows® XP avec Service Pack 3 (SP3)
- Microsoft® Windows® Vista® avec Service Pack 1 (SP1)

Remarque : exécutez Windows® Update avant d'installer FLIR BuildIR.

Logiciels

- Microsoft® Office 2003 avec Service Pack 3 (SP3) ou
 - Microsoft® Office 2007 avec Service Pack 1 (SP1)
 - Une version installée de FLIR Reporter 8.2 ou ultérieure
-

Matériel

Microsoft® Windows® XP :

- Ordinateur personnel équipé d'un processeur Intel® Pentium 800 MHz ou d'un processeur AMD® Opteron, AMD® Athlon 64 ou AMD® Athlon XP
- 512 Mo de RAM (au minimum)
- 20 Go d'espace disque disponible
- Lecteur CD-ROM ou DVD-ROM
- Moniteur Super VGA (1024 × 768) ou résolution supérieure
- Accès Internet requis pour les mises à jour à partir du Web
- Clavier et souris Microsoft® ou autre périphérique de pointage compatible

Microsoft® Windows® Vista :

- Ordinateur personnel équipé d'un processeur 1 GHz 32 bits (x86)
 - 1 Go de RAM (au minimum)
 - Disque dur de 40 Go, avec au minimum 15 Go d'espace disque disponible
 - Lecteur DVD-ROM
 - Prise en charge des graphiques DirectX® 9 :
 - Pilote WDDM
 - 128 Mo de mémoire graphique (minimum)
 - Pixel Shader 2.0
 - 32 bits par pixel
 - Moniteur Super VGA (1024 × 768) ou résolution supérieure
 - Accès Internet (des frais peuvent s'appliquer)
 - Sortie audio
 - Clavier et souris Microsoft® ou autre périphérique de pointage compatible
-

REMARQUE

- Microsoft® Windows® XP 64 bits n'est pas pris en charge.
 - Microsoft® Windows® Vista 64 bits n'est pas pris en charge.
 - Les exigences et fonctionnalités du produit peuvent varier en fonction de votre configuration système.
-

6.2 Installation FLIR BuildIR

REMARQUE

- L'installation peut prendre jusqu'à 90 minutes, en fonction de la configuration de votre ordinateur.
- Les clients faisant l'acquisition séparément de FLIR Reporter Building (c'est-à-dire qu'ils n'achètent pas la suite logicielle FLIR Reporter Building + FLIR Reporter) doivent disposer d'une licence antérieure de ThermoCAM™ Reporter/FLIR Reporter version 8.2 ou ultérieure.
- Exécutez Windows® Update avant d'installer FLIR BuildIR.

Procédure

Procédez comme suit pour installer FLIR BuildIR :

1	Fermez tous les programmes ouverts.
2	Insérez le DVD d'installation de FLIR BuildIR dans le lecteur de DVD-ROM. L'installation démarre automatiquement. Si l'installation ne démarre <i>pas</i> automatiquement, procédez comme suit : 1 Double-cliquez sur l'icône Poste de travail située sur le Bureau. 2 Cliquez avec le bouton droit de la souris sur le lecteur de CD-ROM et sélectionnez Explorer. 3 Recherchez le fichier SETUPEXE et double-cliquez dessus.
3	Suivez les instructions à l'écran.
4	Redémarrez l'ordinateur si vous y êtes invité.
5	Dans certains cas, l'installation continue après le redémarrage de l'ordinateur.

7 Éléments de l'écran

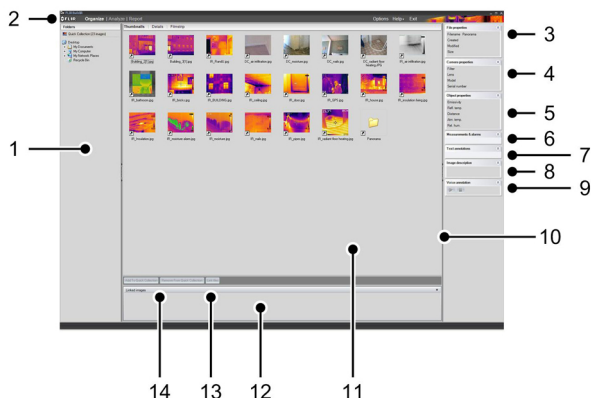
7.1 Onglet Organiser

Généralités

Cette section décrit les éléments de l'écran dans l'onglet **Organiser**.

Figure

T630313.a3



Explication

Ce tableau explique la figure ci-dessus :

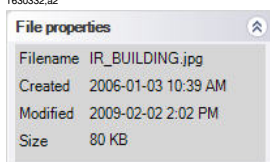
1	Volet de l'explorateur de fichiers.
2	Barre de menu principal.
3	Volet Propriétés du fichier . Dans ce volet vous pouvez vérifier les propriétés d'une image sélectionnée.
4	Volet Propriétés de la caméra . Dans ce volet vous pouvez vérifier les propriétés de la caméra à partir de laquelle l'image a été sélectionnée.
5	Volet Propriétés de l'objet . Dans ce volet vous pouvez vérifier les propriétés de l'objet pour l'image sélectionnée, telles que l'émissivité, la température apparente réfléchie, la distance, etc. Si vous souhaitez modifier les propriétés, accédez à l'onglet Analyse .
6	Volet Mesures et alarmes . Dans ce volet, vous pouvez vérifier les résultats de mesure et d'alarme pour une image sélectionnée. Si vous souhaitez modifier les propriétés, accédez à l'onglet Analyse .

7	Volet Annotations de texte . Dans ce volet vous pouvez vérifier et modifier toutes les annotations de texte d'une image sélectionnée. Si vous souhaitez modifier une annotation, accédez à l'onglet Analyse .
8	Volet Annotations de texte . Dans ce volet vous pouvez vérifier et modifier toutes les annotations de texte d'une image sélectionnée. Si vous souhaitez modifier une annotation, accédez à l'onglet Analyse .
9	Volet Annotations orales . Dans ce volet vous pouvez réécouter toutes les annotations orales d'une image sélectionnée. Si vous souhaitez modifier une annotation, accédez à l'onglet Analyse .
10	Lignes de séparation pour redimensionner les fenêtres et les volets.
11	Vue en miniatures du dossier sélectionné. Vous pouvez également modifier cette vue pour afficher les fichiers en mode Détails ou Film fixe.
12	Volet Images liées . Dans ce volet vous pouvez consulter toutes les images liées à une image sélectionnée.
13	Bouton pour associer des images.
14	Boutons pour ajouter/supprimer des images dans la Collection rapide .

REMARQUE

Vous pouvez développer/réduire les volets droits en cliquant sur les flèches (voir l'image ci-dessous).

T630332:a2



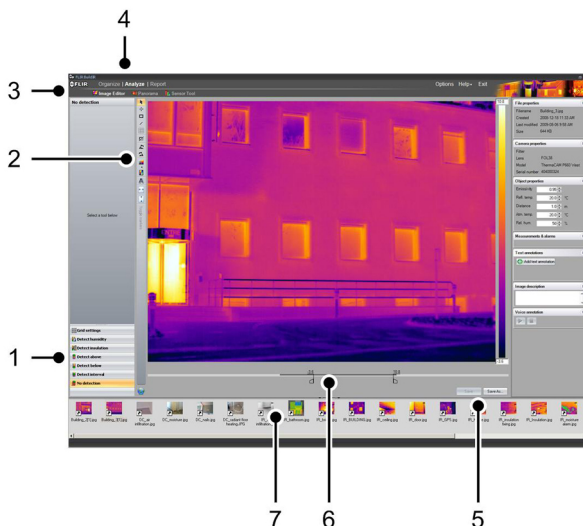
7.2 Onglet Analyse > sous-onglet Éditeur d'images

Généralités

Cette section décrit les éléments de l'écran dans le sous-onglet Éditeur d'images de l'onglet Analyse.

Figure

T630314;a3



Explication

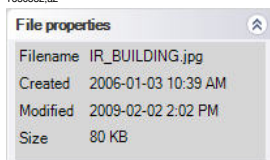
Ce tableau explique la figure ci-dessus :

1	Outils de mesure et d'analyse.
2	Barre d'outils principale.
3	Barre de sous-menu.
4	Barre de menu principal.
5	Bouton pour enregistrer les images après modification.
6	Commandes pour modifier les niveaux de température inférieure et supérieure dans l'image.
7	Volet Images.

REMARQUE

Vous pouvez développer/réduire les volets droits en cliquant sur les flèches (voir l'image ci-dessous).

T630332:a2



7.3

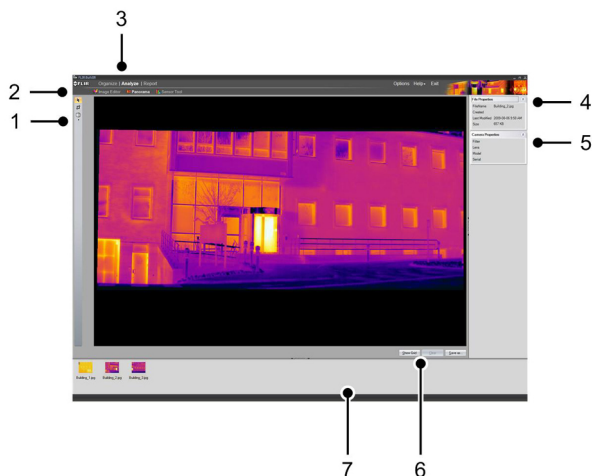
Onglet Analyse > sous-onglet Panorama

Généralités

Cette section décrit les éléments de l'écran dans le sous-onglet **Panorama** de l'onglet **Analyse**.

Figure

T630378;a3



Explication

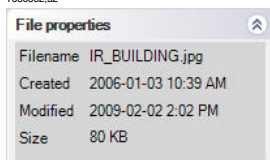
Ce tableau explique la figure ci-dessus :

1	Barre d'outils.
2	Barre de sous-menu.
3	Barre de menu principal.
4	Volet Propriétés du fichier . Dans ce volet, vous pouvez vérifier les propriétés du fichier pour une image sélectionnée.
5	Volet Propriétés de la caméra . Dans ce volet, vous pouvez vérifier les propriétés de la caméra pour une image sélectionnée.
6	Boutons permettant de combiner des images dans une image panoramique. Ces boutons servent également à annuler une action.
7	Volet Images.

REMARQUE

Vous pouvez développer/réduire les volets droits en cliquant sur les flèches (voir l'image ci-dessous).

T630332:a2



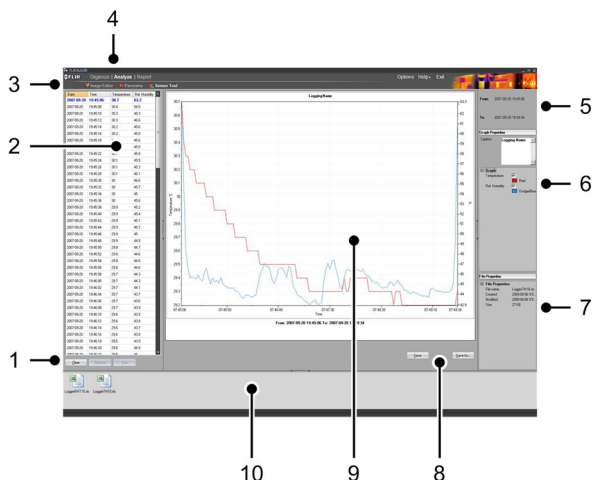
7.4 Onglet Analyse > sous-onglet Capteur

Généralités

Cette section décrit les éléments de l'écran dans le sous-onglet **Capteur** de l'onglet **Analyse**.

Figure

T630315;a3



Explication

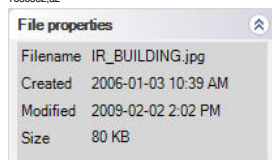
Ce tableau explique la figure ci-dessus :

1	Bouton pour sélectionner la plage à utiliser dans l'encodage des données.
2	Source d'encodage des données.
3	Barre de sous-menu.
4	Barre de menu principal.
5	Plage d'encodage des données.
6	Volet Propriétés du graphique . Dans ce volet, vous pouvez vérifier et modifier les propriétés pour le graphique affiché.
7	Volet Propriétés du fichier . Dans ce volet, vous pouvez vérifier les propriétés pour le fichier de graphique affiché.
8	Bouton pour enregistrer le graphique.
9	Graphique point par point reposant sur la source d'encodage des données.
10	Volet Images . Il vous permet de rechercher des fichiers utilisés pour le graphique point par point.

REMARQUE

Vous pouvez développer/réduire les volets droits en cliquant sur les flèches (voir l'image ci-dessous).

T630332:a2



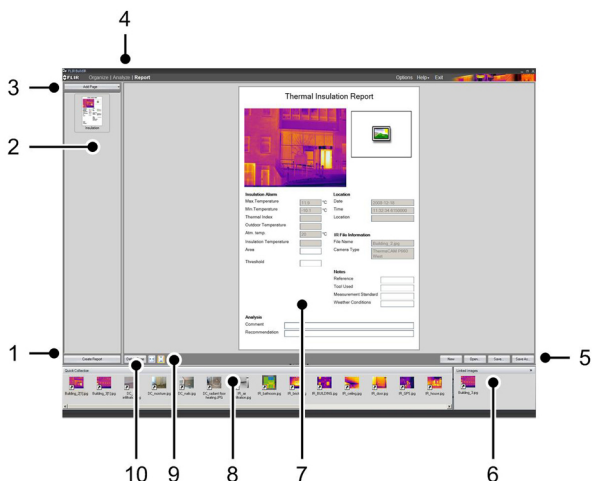
7.5 Onglet Rapport

Généralités

Cette section décrit les éléments de l'écran dans l'onglet Rapport.

Figure

T630316;a3



Explication

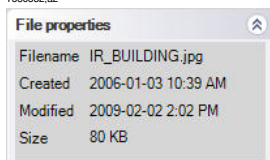
Ce tableau explique la figure ci-dessus :

1	Bouton pour créer un rapport.
2	Vue en miniatures de la page du rapport.
3	Bouton Ajouter la page
4	Barre de menu principal.
5	Boutons pour créer de nouveaux rapports, enregistrer des rapports et ouvrir des rapports existants (*.bsw).
6	Volet Images associées.
7	Vue complète de la page actuelle du rapport.
8	Volet Images.
9	Boutons de la barre d'outils pour la largeur et la hauteur d'installation.
10	Bouton Supprimer la page de la barre d'outils.

REMARQUE

Vous pouvez développer/réduire les volets droits en cliquant sur les flèches (voir l'image ci-dessous).

T630332:a2



7.6 Boutons de la barre d'outils dans l'onglet *Analyse* > sous-onglet *Éditeur d'images*

Explication

Ce tableau décrit les boutons de la barre d'outils dans l'onglet *Analyse* > sous-onglet *Éditeur d'images*.

	Outil Sélectionner Cet outil vous permet de déplacer des points, des zones et des lignes dans une image.
	Point de mesure Cet outil vous permet de créer un point de mesure que vous pouvez placer n'importe où sur l'image. Le point de mesure et la température qu'il affiche sont sauvegardés avec l'image lors de l'enregistrement. Pour déplacer le point de mesure, utilisez l'outil Sélectionner pour sélectionner le point de mesure, puis cliquez et déplacez le point de mesure.
	Outil Zone Cet outil permet de créer une zone dans l'image au moyen de la fonction cliquer-déplacer. Les températures minimale et maximale de la zone s'affichent dans le tableau des résultats de mesure. Pour déplacer la zone, utilisez l'outil Sélectionner pour sélectionner l'outil zone, puis cliquez et déplacez l'outil.
	Outil Ligne Cet outil permet de créer une ligne dans l'image. Les températures minimale et maximale de la ligne s'affichent dans le tableau des résultats de mesure. Pour déplacer la ligne, utilisez l'outil Sélectionner pour sélectionner l'outil ligne, puis cliquez et déplacez l'outil.
	Outil de grille Vous pouvez utiliser cet outil pour créer une grille sur l'image. Vous pouvez définir les propriétés de la grille à l'aide de l'outil Paramètres de la grille. La grille n'est pas stockée avec l'image lors de l'enregistrement. Remarque : l'outil de grille est doté d'une fonction d'activation/de désactivation. Vous devez cliquer sur le bouton de la barre d'outils pour désactiver l'outil.
	Outil Masquer/afficher les graphiques superposés Vous pouvez utiliser cet outil pour afficher et masquer les graphiques superposés associés à l'image de la caméra infrarouge.
	Outil Pivoter dans le sens contre-horaire Cet outil vous permet de faire pivoter une image dans le sens contre-horaire à 90 °.

	Outil Pivoter dans le sens horaire Cet outil vous permet de faire pivoter une image dans le sens horaire à 90 °.
	Outil Palette Cet outil vous permet de modifier la palette de couleurs dans une image.
	Outil Inverser la palette Vous pouvez utiliser cet outil pour inverser la palette actuellement sélectionnée.
	Outil Réglage automatique Cet outil vous permet de régler automatiquement une image afin d'obtenir une luminosité et un contraste optimaux.
	Outil Largeur d'installation Vous pouvez utiliser cet outil pour redimensionner l'image et la faire correspondre à la largeur de la fenêtre d'image.
	Outil Hauteur d'installation Vous pouvez utiliser cet outil pour redimensionner l'image et la faire correspondre à la largeur de la fenêtre d'image.
	Outil GPS Certaines caméras des FLIR Systems prennent en charge des informations GPS supplémentaires sur les images. Si une image contient de telles informations, une icône s'affichera. En cliquant sur cette icône, les données GPS de l'image sont affichées.

7.7 Boutons de la barre d'outils dans l'onglet **Analyse** > sous-onglet **Panorama**

Explication

Ce tableau décrit les boutons de la barre d'outils dans l'onglet **Analyse** > sous-onglet **Panorama**.

	Sélectionner l'outil Vous pouvez utiliser cet outil pour sélectionner des parties de l'image panoramique.
	Outil de découpage Cet outil sert à découper une image panoramique. En sélectionnant l'outil, vous ferez apparaître une forme à huit bras. En faisant glisser les bras, vous pouvez sélectionner les zones de l'image à supprimer.
	Outil de correction de la perspective. Cet outil sert à corriger la perspective. En cliquant sur l'outil, puis sur le bouton  ou  de la barre d'outils, deux lignes verticales ou horizontales s'afficheront sur l'image. En faisant glisser les bras des lignes, vous pouvez aligner les lignes sur les bords de l'image que vous pensez être parallèles, comme deux portes, deux balcons, etc. La perspective sera ensuite corrigée en fonction de votre alignement des lignes.

8 Inspection

Généralités

Lorsque vous utilisez FLIR BuildIR, vous suivez une méthode standard. Cette méthode est intégrée au progiciel et expliquée dans cette section.

Inspection

Le tableau suivant décrit la méthode d'inspection :

1	Sur le site de l'inspection, effectuez l'inspection infrarouge. Exploitez les fonctions de votre caméra infrarouge comme les outils d'analyse, les annotations de texte, les annotations vocales, etc. A ce stade, vous pouvez également utiliser des outils supplémentaires, tels que des encodeurs de température et d'humidité.
2	Transférez vos images, depuis la caméra vers un emplacement de votre choix sur votre ordinateur, au moyen de la carte mémoire ou d'un câble USB.
3	Démarrez FLIR BuildIR.
4	Dans l'onglet Organiser , choisissez les images que vous souhaitez traiter.
5	Dans l'onglet Analyse , effectuez les analyses de votre choix. Vous pouvez détecter de l'humidité ou des défauts d'isolation, ajouter des points de mesure, des zones, des lignes, etc. Cet onglet vous permet également de mettre des images normales bout à bout pour obtenir des images panoramiques (verticales ou horizontales) plus grandes.
6	Pour préparer votre rapport, choisissez dans l'onglet Rapport parmi des modèles de page variés, puis faites glisser vos images dans le rapport.
7	Dans l'onglet Rapport , cliquez sur Créer un rapport . Un fichier *.docx que vous pourrez ouvrir dans Microsoft® Word sera créé.

VOIR

Pour obtenir de plus amples informations, reportez-vous aux sections suivantes :

- Section 9 – Choix et association d'images à la page 22
 - Section 10 – Utilisation des outils à la page 26
 - 11Création du rapport40
-

Généralités

Vous pouvez choisir des images et des fichiers en utilisant l'une des méthodes différentes ci-dessous :

- Choix d'images et de fichiers à l'aide du volet d'explorateur de fichiers. En utilisant cette méthode, vous pouvez travailler uniquement avec les images et fichiers d'un seul dossier à la fois.
- Choix d'images et de fichiers à l'aide de la **Collection rapide**. En utilisant cette méthode, vous pouvez choisir des images et fichiers provenant de plusieurs emplacements différents dans l'explorateur de fichiers, puis ajouter ces images et fichiers à une collection. Vous travaillez ensuite sur cette collection d'images et de fichiers.

Vous pouvez également associer deux images l'une avec l'autre. Un exemple type est l'association d'une photo numérique avec une image infrarouge.

VOIR

Pour obtenir de plus amples informations, reportez-vous aux sections suivantes :

- Section 9.1 – Choix d'images et de fichiers à l'aide du volet d'explorateur de fichiers à la page 23
 - Section 9.2 – Choix d'images et de fichiers à l'aide de la Collection rapide à la page 24
 - 9.3 Association d'images 25
-

9.1 *Choix d'images et de fichiers à l'aide du volet d'explorateur de fichiers*

Généralités

Cette section décrit comment vous choisissez des images et fichiers à l'aide du volet d'explorateur de fichiers. En utilisant cette méthode, vous pouvez travailler uniquement avec les images et fichiers d'un seul dossier à la fois.

Procédure

Pour choisir des images et fichiers à l'aide du volet d'explorateur de fichiers, procédez comme suit :

1	Dans la barre de menu principal, cliquez sur l'onglet Organiser .
2	Dans le volet d'explorateur de fichiers, sélectionnez le dossier ou le périphérique de stockage contenant vos images et fichiers. Ceux-ci s'affichent alors en miniatures ou dans la vue Détails du volet central.

9.2 Choix d'images et de fichiers à l'aide de la **Collection rapide**

Généralités

Cette section décrit comment choisir des images et fichiers à l'aide de la **Collection rapide**.

Vous pouvez considérer la **Collection rapide** comme un espace de travail temporaire. Les images et fichiers ajoutés à la **Collection rapide** sont essentiellement des raccourcis vers leurs emplacements d'origine, ce qui vous permet d'ajouter des images et fichiers provenant de plusieurs emplacements différents, comme votre disque dur local, des périphériques de stockage externes, etc.

Cela signifie également que si vous supprimez un fichier ou une image de son emplacement d'origine, il/elle est également supprimé(e) de la **Collection rapide**.

Procédure

Pour choisir des images et fichiers à l'aide de la **Collection rapide**, procédez comme suit :

1	Dans la barre de menu principal, cliquez sur l'onglet Organiser .
2	Dans le volet d'explorateur de fichiers, accédez aux dossiers ou périphériques de stockage où vous avez placés vos images et fichiers.
3	Dans le volet central, sélectionnez les images et fichiers à ajouter à votre collection.
4	Cliquez sur Ajouter à la collection rapide pour ajouter les images et fichiers à la collection.
5	Répétez les étapes 2 à 4 pour tous les dossiers et périphériques de stockage contenant des images et fichiers à ajouter à votre collection.

REMARQUE

- Lorsque vous êtes prêt à analyser vos images et vos fichiers, cliquez sur **Collection rapide** en haut du volet d'explorateur de fichiers, avant de cliquer sur l'onglet **Analyse**.
- Pour supprimer des images et fichiers de la **Collection rapide**, cliquez sur **Supprimer de la collection rapide**.
- Les images et fichiers ajoutés à la **Collection rapide** y restent entre deux sessions du programme.

9.3 Association d'images

Généralités

Cette section décrit comment associer deux images. L'association d'images simplifie l'organisation et l'utilisation du glisser-déposer des images sur les pages de rapport.

Procédure

Pour associer deux images, procédez comme suit :

1	Choisissez vos images conformément aux procédures de la section 9.1 – Choix d'images et de fichiers à l'aide du volet d'explorateur de fichiers à la page 23 ou de la section 9.2 – Choix d'images et de fichiers à l'aide de la Collection rapide à la page 24.
3	Sélectionnez deux images et cliquez sur Lier les fichiers. Les images sont désormais associées. Dans l'onglet Rapport, lorsque vous sélectionnez une image à laquelle une autre image est associée, l'image associée s'affiche dans le volet Images associées, au bas de l'écran.

REMARQUE

Certaines caméras infrarouges prennent en charge l'association ; ainsi, les images peuvent déjà être associées lorsqu'elles sont importées à partir de la caméra.

10

Utilisation des outils

10.1

Définition d'un point de mesure, d'une zone ou d'une ligne

Généralités

Cette section décrit comment définir un point de mesure, une zone ou une ligne.

Procédure

Pour définir un point de mesure, une zone ou une ligne, procédez comme suit :

1	Dans la barre du menu principal, cliquez sur Analyse > Éditeur d'images .
2	Au bas du volet Images, cliquez sur l'image que vous souhaitez traiter.
3	Dans la barre d'outils principale, cliquez sur l'un des boutons de la barre d'outils ci-dessous : ■ Bouton Point de mesure :  ■ Bouton Zone :  ■ Bouton Ligne : 
4	Sur l'image, cliquez sur l'emplacement où vous souhaitez placer le point de mesure ; vous pouvez également cliquer-déposer pour définir la zone ou la ligne. Les résultats de mesure s'affichent alors sur la droite du volet Mesures et alarmes .

VOIR

Pour découvrir la thermographie des bâtiments, reportez-vous à la section 13 – Introduction à la thermographie appliquée au bâtiment à la page 53.

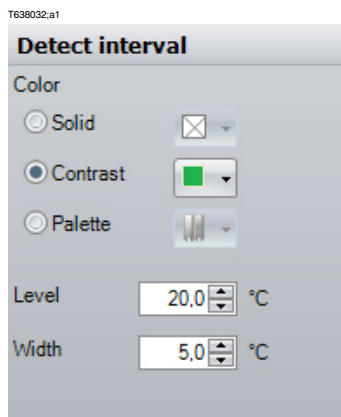
10.2

Détection d'un intervalle de température

Généralités

Cette section décrit comment détecter toutes les zones comprises dans un intervalle de température défini sur une image infrarouge.

Figure



Procédure

Pour détecter toutes les zones comprises dans un intervalle de température défini sur une image infrarouge, procédez comme suit :

1	Dans la barre du menu principal, cliquez sur Analyse .
2	Dans le volet Images, cliquez sur l'image que vous souhaitez traiter.
3	Cliquez sur Détecter l'intervalle .
4	Sélectionnez un niveau de température.
5	Sélectionnez un intervalle de température.
6	Sélectionnez une couleur isotherme. La couleur isotherme recouvre alors toutes les zones dans l'intervalle de température et au-dessus du niveau de température défini. Vous pouvez choisir entre trois différents types de couleurs isothermes : ■ Opaque ■ Contraste ■ Palette Vous devez tester différents réglages pour déterminer le type qui convient le mieux à votre application.

REMARQUE

Lorsque vous modifiez une valeur, vous pouvez également la modifier par un glisser-déposer de l'étiquette de la valeur (voir la figure ci-dessous).

T630333.a1



VOIR

- Pour découvrir la thermographie des bâtiments, reportez-vous à la section 13 – Introduction à la thermographie appliquée au bâtiment à la page 53.
- Pour obtenir une explication sur les isothermes, reportez-vous à la section 15 – Glossaire à la page 105.

10.3 *Détection d'une température inférieure à une température définie*

Généralités

Cette section décrit comment détecter toutes les zones dont la température est inférieure au niveau défini sur une image infrarouge.

Procédure

Pour détecter toutes les zones dont la température est inférieure au niveau défini sur une image infrarouge, procédez comme suit :

1	Dans la barre du menu principal, cliquez sur Analyse .
2	Dans le volet Images, cliquez sur l'image que vous souhaitez traiter.
3	Cliquez sur Détecter au-dessous .
4	Sélectionnez un niveau de température.
5	Sélectionnez une couleur isotherme. La couleur isotherme recouvre alors toutes les zones dont la température est inférieure au niveau défini. Vous pouvez choisir entre trois différents types de couleurs isothermes : ■ Opaque ■ Contraste ■ Palette Vous devez tester différents réglages pour déterminer le type qui convient le mieux à votre application.

REMARQUE

Lorsque vous modifiez une valeur, vous pouvez également la modifier par un glisser-déposer de l'étiquette de la valeur (voir la figure ci-dessous).



VOIR

- Pour découvrir la thermographie des bâtiments, reportez-vous à la section 13 – Introduction à la thermographie appliquée au bâtiment à la page 53.
- Pour obtenir une explication sur les isothermes, reportez-vous à la section 15 – Glossaire à la page 105.

10.4 Détection d'une température supérieure à une température définie

Généralités

Cette section décrit comment détecter toutes les zones dont la température est supérieure au niveau défini sur une image infrarouge.

Procédure

Pour détecter toutes les zones dont la température est supérieure au niveau défini sur une image infrarouge, procédez comme suit :

1	Dans la barre du menu principal, cliquez sur Analyse .
2	Dans le volet Images, cliquez sur l'image que vous souhaitez traiter.
3	Cliquez sur Détecter au-dessus .
4	Sélectionnez un niveau de température.
5	Sélectionnez une couleur isotherme. La couleur isotherme recouvre alors toutes les zones dont la température est supérieure au niveau défini. Vous pouvez choisir entre trois différents types de couleurs isothermes : ■ Opaque ■ Contraste ■ Palette Vous devez tester différents réglages pour déterminer le type qui convient le mieux à votre application.

REMARQUE

Lorsque vous modifiez une valeur, vous pouvez également la modifier par un glisser-déposer de l'étiquette de la valeur (voir la figure ci-dessous).

T630333.a1



VOIR

- Pour découvrir la thermographie des bâtiments, reportez-vous à la section 13 – Introduction à la thermographie appliquée au bâtiment à la page 53.
- Pour obtenir une explication sur les isothermes, reportez-vous à la section 15 – Glossaire à la page 105.

10.5

Détection d'un défaut d'isolation

Généralités

L'outil **Détecter l'isolation** peut détecter les zones risquant de présenter un défaut d'isolation dans le bâtiment. Il se déclenche lorsque l'index thermique descend en dessous de la valeur prédéfinie de perte d'énergie à travers un mur.

Chaque code de bâtiment recommande des valeurs différentes d'index thermique. Toutefois, les valeurs les plus courantes sont comprises entre 60 et 80 % pour les bâtiments neufs. Reportez-vous à votre code national pour plus de précisions.

Procédure

Pour détecter un défaut d'isolation, procédez comme suit :

1	Dans la barre du menu principal, cliquez sur Analyse .
2	Dans le volet Images, cliquez sur l'image que vous souhaitez traiter.
3	Cliquez sur Détecter l'isolation .
4	Sélectionnez une couleur isotherme. Vous pouvez choisir entre trois différents types de couleurs isothermes : ■ Opaque ■ Contraste ■ Palette Vous devez tester différents réglages pour déterminer le type qui convient le mieux à votre application.
5	Sélectionnez des valeurs pour les éléments suivants : ■ la température intérieure (enregistrée au moment de l'inspection), ■ la température extérieure (enregistrée au moment de l'inspection), ■ l'index thermique (voir la discussion ci-dessus ; reportez-vous à votre code de bâtiment national pour plus de précisions). La température d'alarme est alors calculée et la couleur isotherme marque les zones risquant de présenter un défaut d'isolation.

REMARQUE

Lorsque vous modifiez une valeur, vous pouvez également la modifier par un glisser-déposer de l'étiquette de la valeur (voir la figure ci-dessous).

T630333.a1



VOIR

- Pour découvrir la thermographie des bâtiments, reportez-vous à la section 13 – Introduction à la thermographie appliquée au bâtiment à la page 53.
- Pour obtenir une explication sur les isothermes, reportez-vous à la section 15 – Glossaire à la page 105.

10.6 Détection d'un problème d'humidité

Généralités

L'outil **Détecter l'humidité** peut détecter des zones risquant de présenter un problème d'humidité. Si vous utilisez cet outil en définissant le niveau d'humidité relative sur 100 %, vous détectez les zones présentant un risque d'humidité entraînant la condensation de l'eau, soit la température du point de rosée.

Toutefois, en fonction des matériaux de construction et de la présence de matières organiques, des niveaux d'humidité de 70 % seulement peuvent provoquer une humidité suffisante pour engendrer des moisissures. Pour détecter ces zones, définissez un niveau moins élevé d'humidité relative.

Procédure

Pour détecter l'humidité, procédez comme suit :

1	Dans la barre du menu principal, cliquez sur Analyse .
2	Dans le volet Images, cliquez sur l'image que vous souhaitez traiter.
3	Cliquez sur Détecter l'humidité .
4	Sélectionnez une couleur isotherme. Vous pouvez choisir entre trois différents types de couleurs isothermes : ■ Opaque ■ Contraste ■ Palette Vous devez tester différents réglages pour déterminer le type qui convient le mieux à votre application.
5	Sélectionnez des valeurs pour les éléments suivants : ■ l'humidité relative (enregistrée au moment de l'inspection), ■ le niveau d'humidité relative (voir la discussion ci-dessus), ■ la température atmosphérique (enregistrée au moment de l'inspection). La température d'alarme est alors calculée et la couleur isotherme marque les zones risquant de présenter un problème d'humidité.

REMARQUE

Lorsque vous modifiez une valeur, vous pouvez également la modifier par un glisser-déposer de l'étiquette de la valeur (voir la figure ci-dessous).

T630333.a1



VOIR

- Pour découvrir la thermographie des bâtiments, reportez-vous à la section 13 – Introduction à la thermographie appliquée au bâtiment à la page 53.
- Pour obtenir une explication sur les isothermes, reportez-vous à la section 15 – Glossaire à la page 105.

10.7

Analyse des structures de bâtiments à l'aide des outils Paramètres de la grille

Généralités

A l'aide de l'outil **Paramètres de la grille** et en connaissant le champ de vision de l'objectif et la distance par rapport à l'objet qui vous intéresse, vous pouvez définir sur l'image une grille dans laquelle chaque carré représente une zone connue.

Vous pouvez ensuite utiliser l'outil **Paramètres de la grille** pour différentes tâches, comme :

- l'analyse quantitative des fixations de panneaux isolants,
- le calcul de la quantité de matériaux de construction nécessaire à une réparation,
- la quantification des problèmes d'isolation et d'humidité.

Procédure

Pour préparer une analyse de la structure du bâtiment, procédez comme suit :

1	Dans la barre du menu principal, cliquez sur Analyse .
2	Dans le volet Images, cliquez sur l'image que vous souhaitez traiter.
3	Cliquez sur Paramètres de la grille .
4	Effectuez l'une des actions suivantes : ■ Sélectionnez les valeurs de la distance et du champ de vision. ■ Définissez une ligne à l'aide du bouton  de la barre d'outils, puis sélectionnez la ligne dans la boîte Ligne et précisez la longueur de la ligne.
5	Cliquez sur le bouton  de la barre d'outils principale pour activer la grille.
6	Définissez la taille de la grille sur une valeur de votre choix.
7	Sélectionnez le bouton  de la barre d'outils et déplacez la grille dans la position souhaitée, par exemple pour l'aligner avec certaines structures, zones d'intérêt, etc., sur l'image.
8	Sélectionnez Position de la grille de verrouillage pour verrouiller la grille relative aux images.
9	En fonction de votre méthode de travail, vous souhaitez peut-être effectuer les tâches suivantes : ■ laisser la grille en l'état et entamer le compte des fixations, le calcul de la quantité de matériaux de construction nécessaire, etc. ; ■ convertir des zones de la grille en zones de mesure pour quantifier les problèmes d'isolation et d'humidité. Pour ce faire, cliquez sur la zone de votre choix dans la grille, puis sur le bouton  de la barre d'outils. Dans le volet droit, vous pouvez alors voir qu'une zone de mesure a été créée.

REMARQUE

- Pour obtenir un calcul précis, il est primordial d'enregistrer la bonne distance par rapport à l'objet au moment de l'inspection. Vous pouvez le faire sur la caméra ou le noter sur un papier.
- Pour obtenir un calcul précis, il est primordial de prendre l'image avec un angle de 90° par rapport à l'objet (par exemple, le mur).
- Lorsque vous modifiez une valeur, vous pouvez également la modifier par un glisser-déposer de l'étiquette de la valeur (voir la figure ci-dessous).



VOIR

Pour découvrir la thermographie des bâtiments, reportez-vous à la section 13 – Introduction à la thermographie appliquée au bâtiment à la page 53.

10.8

Utilisation du capteur

Généralités

Vous pouvez inclure dans votre rapport des données provenant d'encodeurs de données.

Le scénario utilisateur suggère l'utilisation d'un encodeur USB d'humidité et de température Extech RHT10 ou d'un encodeur USB de température Extech TH10, mais vous pouvez utiliser d'autres encodeurs capables de fournir les mêmes données au format Microsoft® Excel (pour plus d'informations, reportez-vous à la section 10.8.1 – Structure du fichier de l'encodeur de données à la page 36).

Procédure

Pour créer un graphique reposant sur les données d'encodage, procédez comme suit :

1	Ajoutez le fichier Microsoft® Excel à votre collection en suivant la procédure décrite à la section 9.2 – Choix d'images et de fichiers à l'aide de la Collection rapide à la page 24.
2	Dans la barre de menu principal, cliquez sur Analyse , puis sur Capteur .
3	Déplacez le fichier Microsoft® Excel du volet Images vers le volet gauche à l'aide de la fonction glisser-déposer. Ainsi, les données s'affichent sous forme de tableau. Un graphique des données s'affiche dans le volet central.
4	Si vous le souhaitez, vous pouvez limiter les données en cliquant sur le tableau et en faisant glisser celui-ci vers le haut ou le bas. Sur le graphique, une flèche indique les données retranchées.
5	Si vous le souhaitez, vous pouvez vérifier ou modifier les propriétés du graphique et du fichier dans le volet droit.
6	Pour enregistrer le graphique comme une image, cliquez sur Enregistrer et enregistrez l'image à l'emplacement de votre choix.
7	Désormais, vous pouvez inclure le graphique comme une image dans votre rapport en suivant la procédure décrite à la section 11 – Création du rapport à la page 40.

VOIR

Pour découvrir la thermographie des bâtiments, reportez-vous à la section 13 – Introduction à la thermographie appliquée au bâtiment à la page 53.

10.8.1 Structure du fichier de l'encodeur de données

Figure

Cette figure illustre la structure du fichier de l'encodeur de données provenant d'un encodeur USB d'humidité et de température Extech RHT10 et d'un encodeur USB de température Extech TH10 :

T630331.a1

	A	B	C	D	E	F	G
1	>>Logging Name:Logging Name						
2	>>FROM:09-20-2007 19:45:06 TO:09-20-2007 19:49:34						
3	>>Sample Points:135						
4	>>Sample Rate:2 sec.						
5	>>Temperature Unit:Celsius						
6	>>Temperature(LowAlarm:20.0-HighAlarm:22.0) Relative Humidity(LowAlarm:30.0-Hig						
7	-----						
8	NO.	DATE	TIME	TEMPERATURE	RELATIVE	DEW-POINT	
9	1	2007-09-20	19:45:06	1.00	63.2	22.7	
10	2	2007-09-20	19:45:08	2.00	54.5	20.1	
11	3	2007-09-20	19:45:10	3.00	48.3	18.1	
12	4	2007-09-20	19:45:12	4.00	46.6	17.5	
13	5	2007-09-20	19:45:14	5.00	45.6	17.1	
14	6	2007-09-20	19:45:16	6.00	45.8	17.2	
15	7	2007-09-20	19:45:18	7.00	45.6	17.1	
16	8	2007-09-20	19:45:20	8.00	45.5	17	
17	9	2007-09-20	19:45:22	9.00	45.9	17.1	
18	10	2007-09-20	19:45:24	10.00	45.5	17	
19	11	2007-09-20	19:45:26	11.00	45.3	16.9	
20	12	2007-09-20	19:45:28	12.00	46.1	17.2	
21	13	2007-09-20	19:45:30	13.00	46.6	17.3	
22	14	2007-09-20	19:45:32	14.00	45.7	17	
23	15	2007-09-20	19:45:34	15.00	45	16.7	
24	16	2007-09-20	19:45:36	16.00	45.6	16.9	
25	17	2007-09-20	19:45:38	17.00	45.2	16.7	
26	18	2007-09-20	19:45:40	18.00	45.4	16.8	
27	19	2007-09-20	19:45:42	19.00	45.1	16.7	
28	20	2007-09-20	19:45:44	20.00	45.7	16.9	
29							

10.9 *Zoom avant ou arrière sur les images*

Généralités

Vous pouvez effectuer un zoom avant ou arrière sur les images dans l'onglet **Analyse**.

Procédure

- Pour zoomer une image, appuyez sur ALT et sur le bouton gauche de la souris et maintenez-les enfoncés. Un curseur s'affichera vous permettant de dessiner une zone de zoom dans l'image.
- Pour réinitialiser le facteur de zoom, procédez de l'une des manières suivantes :
 - Cliquez sur le bouton  de la barre d'outils.
 - Cliquez sur le bouton  de la barre d'outils.
 - Appuyez et maintenez enfoncée la touche ALT pendant que vous cliquez sur l'image.

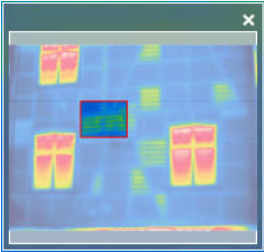
10.10 *Panoramique d'images*

Généralités

Vous pouvez effectuer un panoramique d'images à l'aide du navigateur d'images.

Procédure

Pour effectuer un panoramique des images, procédez comme suit :

1	Dans l'onglet Analyse, cliquez sur  le bouton de la barre d'outils, dans le coin inférieur droit de l'image. Ce bouton est normalement masqué, mais il s'affiche lorsque vous passez dessus avec le curseur. Un navigateur d'images s'affiche sous la forme suivante : 
2	Dans le navigateur d'images, cliquez-déplacez la zone agrandie pour effectuer un panoramique de l'image.

10.11

*Utilisation de l'outil Panorama.***Généralités**

Certaines caméras de FLIR Systems prennent en charge la prise de plusieurs petites images qui peuvent ensuite être mises bout à bout pour former une image plus grande.

Cette fonction s'appelle **Panorama**. FLIR BuildIR est l'un des programmes dans lequel vous pouvez effectuer cette combinaison d'images. La procédure ci-dessous vous indique la marche à suivre.

Procédure

Procédez comme suit :

1	Dans l'onglet Organiser , accédez au dossier où vous conservez les images que vous souhaitez combiner en une image plus grande.
2	(Facultatif :) ajoutez les images à la collection rapide.
3	Accédez à l'onglet Analyse , puis sélectionnez Panorama .
4	Dans la vue de la bande du film, sélectionnez l'une des images balisées, puis attendez que toutes les images associées soient affichées dans la fenêtre d'image. La fenêtre d'image affiche alors toutes les images associées dans la séquence prise par la caméra (horizontalement ou verticalement selon la prise effectuée).
5	Cliquez sur le bouton Combine pour mettre les images bout à bout et former une image plus grande.
6	(Facultatif :) Procédez comme suit : ■ Cliquez sur le bouton  de la barre d'outils pour découper l'image. Vous afficherez ainsi une forme à huit bras. En faisant glisser les bras, vous pouvez décider des zones de l'image à supprimer. ■ Cliquez sur le bouton  de la barre d'outils, puis sur le bouton  ou  de la barre d'outils pour corriger la perspective. Deux lignes verticales ou horizontales s'afficheront sur l'image. En faisant glisser les bras de la ligne, vous pouvez aligner la ligne sur les bords de l'image que vous pensez être parallèles, comme deux portes, deux balcons, etc. La perspective sera ensuite corrigée en fonction de votre alignement des lignes.
7	Une fois l'opération terminée, vous pouvez enregistrer l'image ainsi formée à l'emplacement de votre choix en cliquant sur Enregistrer . Pour voir séparément les images qui la composent, déplacez le curseur de la souris sur l'image panoramique.
8	Pour poursuivre votre analyse de l'image, accédez à l'onglet Analyse > onglet Éditeur d'images .

Généralités

Une fois les analyses de vos images terminées, vous pouvez créer le rapport. Cette section décrit la création du rapport à partir d'un ou de plusieurs modèles de page de rapport prédéfinis.

REMARQUE

Vous pouvez, jusqu'à une certaine mesure, personnaliser votre rapport. Pour ce faire, modifiez les paramètres de la boîte de dialogue **Personnaliser le rapport** dans **Options**.

Figure

La figure suivante présente les modèles de page de rapport prédéfinis :



Procédure

Procédez comme suit pour créer un rapport :

1	Dans la barre de menu principal, cliquez sur Rapport .
2	Au sommet du volet gauche, cliquez sur Ajouter la page et sélectionnez l'un des modèles de page de rapport prédéfinis. Choisissez parmi les types de page suivants : ■ Généralités ■ Pages Étanchéité à l'air ■ Pages Humidité ■ Pages Isolation Une vue des miniatures de vos pages de rapport s'affiche dans le volet gauche.
3	Dans le volet gauche, cliquez sur la miniature de la page de rapport que vous souhaitez utiliser. La page de rapport correspondante s'affiche alors dans le volet central.

4	Faites glisser vers la page du rapport les images contenues dans le volet Images situé au bas de l'écran. Certains champs sur la page du rapport sont renseignés automatiquement par les informations stockées dans les fichiers image. Pour renseigner les autres champs, il vous suffit d'y saisir du texte. Sur certaines pages du rapport, vous pouvez également modifier les valeurs en entrée pour mettre à jour les valeurs calculées en sortie.
5	Répétez les étapes 2 à 4 pour ajouter toutes les pages et images du rapport souhaitées. Pour modifier l'ordre des pages, déplacez les pages de rapport dans le volet gauche.
6	Effectuez l'une des actions suivantes : ■ Pour créer un rapport immédiatement, cliquez sur Créer un rapport. Un fichier *.docx que vous pourrez ouvrir dans Microsoft® Word sera créé. ■ Pour enregistrer le rapport à un format intermédiaire (*.bsw), cliquez sur Enregistrer sous et enregistrez le rapport à l'emplacement de votre choix. Vous pouvez ensuite ouvrir ultérieurement ce fichier de rapport intermédiaire et continuer de le modifier.

11.1 Utilisation du modèle de rapport Coûts énergétiques

11.1.1 Description du modèle

Généralités

Lorsque vous souhaitez comparer deux zones de mur dont la qualité de l'isolation est différente, utilisez le modèle **Coûts énergétiques**.

En comparant une zone moins isolée qu'une autre, vous pouvez évaluer les économies annuelles engendrées par l'installation d'une nouvelle isolation sur l'ensemble du mur.

REMARQUE

Les valeurs calculées sont des estimations et ne peuvent par conséquent pas être considérées comme fiables à 100 %. Pour obtenir plus d'informations, consultez le White paper on R values dans le menu Aide.

Figure

T630393.a2

The form is titled "Energy Cost Comparison Estimate". It is divided into two main columns for "Current Wall Type" and "Preferred Wall Type".

Current Wall Type (Left Column):

- 1: Points to the "Current Wall Type" header.
- 2: Points to a thermal image of a wall with a red square highlighting a specific area.
- 3: Points to the "Input Values" section.
- 4: Points to "Selected Area" (AR01).
- 5: Points to "Atm. temp." (20 °C).
- 6: Points to "Reflected Temperature" (22 °C).
- 7: Points to "Outdoor Temperature" (8.1 °C).
- 8: Points to "Emissivity" (0.95).
- 9: Points to "Ar1 Average Temperature" (16.8 °C).
- 10: Points to "Input Energy Cost Calculations" section.
- 11: Points to "Heating Degree Days" (3600).
- 12: Points to "Cooling Degree Days" (600).
- 13: Points to "Total Current Wall Area" (150 m²).

Preferred Wall Type (Right Column):

- 14: Points to the "Preferred Wall Type" header.
- 15: Points to a thermal image of a wall with a red square highlighting a different area.
- 16: Points to the "Input Values" section.
- 17: Points to "Selected Area" (AR01).
- 18: Points to "Atm. temp." (20 °C).
- 19: Points to "Reflected Temperature" (22 °C).
- 20: Points to "Outdoor Temperature" (8.1 °C).
- 21: Points to "Emissivity" (0.95).
- 22: Points to "Ar1 Average Temperature" (16.8 °C).
- 23: Points to the "Energy Cost" section.
- 24: Points to "Energy Type" (Electric Heat Pump).
- 25: Points to "Raw Cost" (0.16).
- 26: Points to "Efficiency" (1.5).
- 27: Points to "Heating Power" (0).
- 28: Points to "Cost/Unit" (31).

Summary and Analysis (Bottom):

- 29: Points to the "Calculate Annual Cost" button.
- 30: Points to the "Calculate R & U Values" button.
- Below the buttons, "Annual Cost" is shown as 4687 for both wall types.
- "Cost Savings Potential" is shown as 0.
- An "Analysis" section with a "Comment" field is at the bottom.

Explication

Ce tableau explique la figure ci-dessus :

1	Le type de mur actuel. L'image peut être la même que pour le type de mur préférentiel, mais vous devez sélectionner des zones différentes.
---	--

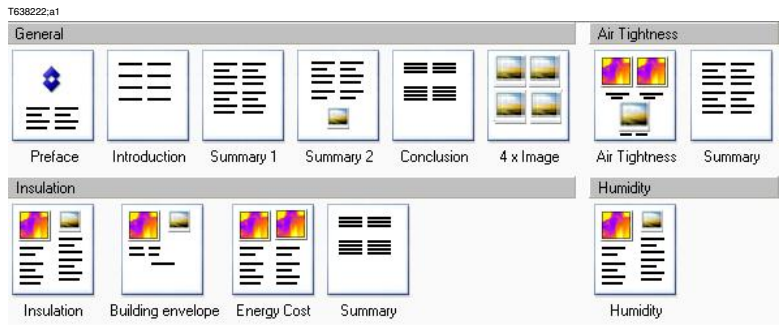
2	La zone la moins isolée dans le type de mur actuel.
3	Menu déroulant permettant de sélectionner la zone sur laquelle se base le calcul. Sélectionnez la zone la moins isolée ici.
4	Temp. atm. : température de l'atmosphère entre la caméra et la cible.
5	Température réfléchie. Ce paramètre permet de compenser le rayonnement réfléchi par l'objet. Si l'émissivité est faible et la température de l'objet relativement éloignée de la température réfléchie, il est important de définir et de compenser correctement la température apparente réfléchie.
6	Température extérieure : température à l'extérieur du bâtiment.
7	Émissivité : l'émissivité étant le paramètre le plus important, elle doit être définie avec précision. Elle représente la mesure du rayonnement émis par un objet par rapport à celui émis par un corps noir parfait de même température.
8	Température moyenne : température moyenne de la zone définie à la légende 1 ci-dessus.
9	Degrés-jours de chauffage : index quantitatif conçu pour exprimer la demande en énergie nécessaire au chauffage d'un domicile ou d'un bureau. Pour plus d'informations, consultez la page http://en.wikipedia.org/wiki/Heating_degree_day .
10	Degrés-jours de refroidissement : index quantitatif conçu pour exprimer la demande en énergie nécessaire à la climatisation d'un domicile ou d'un bureau. Pour plus d'informations, consultez la page http://en.wikipedia.org/wiki/Heating_degree_day .
11	Zone de mur actuelle totale : surface totale du mur présentant la même structure que la zone sélectionnée dans l'image infrarouge. La surface totale du mur ne présente pas la même structure.
12	Bouton permettant de calculer le coût annuel dans l'exemple le moins bien isolé.
13	Coût annuel : coût annuel du type d'énergie sélectionnée. Pour plus d'informations, voir le White paper on R values dans le menu Aide.
14	Le type de mur préférentiel. L'image peut être la même que pour le type de mur actuel, mais vous devez sélectionner des zones différentes.
15	La zone la moins isolée dans le type de mur préférentiel.
16	Menu déroulant permettant de sélectionner la zone sur laquelle se base le calcul. Sélectionnez la zone la mieux isolée ici.
17	Voir #4 ci-dessus.

18	Voir #5 ci-dessus.
19	Voir #6 ci-dessus.
20	Voir #7 ci-dessus.
21	Voir #8 ci-dessus.
22	Type d'énergie : mode de chauffage du bâtiment. Options possibles : ■ Pompe à chaleur électrique ■ Résistance thermique électrique ■ Fioul ■ Bois dur ■ Gaz naturel ■ Propane
23	Coût brut : coût brut du type d'énergie sélectionnée. Pour plus d'informations, voir le White paper on R values dans le menu Aide .
24	Efficacité : efficacité du type d'énergie sélectionnée. Pour plus d'informations, voir le White paper on R values dans le menu Aide .
25	Puissance de chauffage : pour plus d'informations, voir le White paper on R values dans le menu Aide .
26	Coût/Unité : coût unitaire du type d'énergie sélectionnée. Pour plus d'informations, voir le White paper on R values dans le menu Aide .
27	Affichage des paramètres R et K : bouton permettant de mettre à jour le calcul lorsque des données d'entrée ont été modifiées. Il affichera une nouvelle boîte de dialogue présentant le calcul des coefficients. Dans cette boîte de dialogue vous pouvez choisir d'inclure ou non les coefficients au rapport final.
28	Coût annuel : coût annuel du type d'énergie sélectionnée. Pour plus d'informations, voir le White paper on R values dans le menu Aide .
29	Potentiel d'économies à l'année si la zone totale du mur reportée dans #11 était améliorée comme pour la zone de mur préférentielle.

11.1.2

Description de la boîte de dialogue Calculer les coefficients R et K

Figure



Explication

Ce tableau détaille l'image ci-dessus :

- **Coeff. R estimé** : le résultat du calcul sous forme d'une estimation de coefficient R.
- **Coeff. U estimé** : résultat du calcul sous forme de coefficient U estimé.
- **Index thermique** : niveau d'isolation du mur. Chaque code de bâtiment recommande des valeurs différentes pour l'index thermique. Toutefois, les valeurs les plus courantes sont comprises entre 0,6 et 0,8 pour les bâtiments neufs. Reportez-vous à votre code national pour plus de précisions.
- **Convection** : valeur calculée estimant le transfert de chaleur par convection.
- **Rayonnement** : valeur calculée estimant le transfert de chaleur par rayonnement.
- **Transfert de chaleur total** : transfert total de chaleur, par convection et par rayonnement.

11.1.3 Formules utilisées pour les calculs

Généralités Ce tableau énumère les formules utilisées dans le modèle.

Formules

Coeff. R estimé: ■ $EstRValue = (IndoorTemperature - OutdoorTemperature) / (RadiativeLossEstimate + ConvectiveLossEstimate)$ ■ $AmericanEstRValue: 5.678269 \times MetricEstRValue$
Coeff. U estimé: ■ $1 / EstRValue$
Index thermique: ■ $ThermalIndex = (WallSurfaceTemperature - OutdoorTemperature) / (IndoorTemperature - OutdoorTemperature)$
Convection: ■ Calculée conformément à Eq. 2 dans le White paper on R values du menu Aide.
Rayonnement: ■ Calculée conformément à Eq. 3 dans le White paper on R values du menu Aide.
Coût/Unité: ■ $CostPerUnit = RawCost / (Efficiency \times HeatingPower)$
Coût annuel: ■ $AnnualCost = CostPerUnit \times EnergyConsumption$ (où <i>EnergyConsumption</i> est calculé à l'aide d'Eq. 5 et 6 dans le White paper on R values).

12 Extraits du livre blanc sur les coefficients R

Remarque : le livre blanc complet est disponible à partir du menu Aide de FLIR BuildIR.

© 2009, Robert P. Madding, Director, ITC, FLIR Systems, Inc.

12.1 *Auteur*

Robert P. Madding, Directeur, ITC, FLIR Systems, Inc.

Bob est diplômé de physique de l'université du Missouri (licence) et de l'université de Wisconsin-Madison (master et doctorat). Il a commencé le premier séminaire de thermographie infrarouge à l'UWEX (University of Wisconsin Extension) en 1978. Au sein de l'UWEX, il a développé avec ses collègues les premiers programmes et cours d'audit énergétique de bâtiments résidentiels et professionnels. En 2000, il a fondé l'Inframation Conference, la conférence annuelle la plus importante dans le domaine de l'infrarouge pour les thermographistes. Il a publié de nombreux articles techniques sur les applications de la thermographie infrarouge et a écrit certains chapitres de manuels comme Applied Thermal Design (Conception thermique appliquée) et l'Encyclopedia of Optical Engineering (Encyclopédie de l'ingénierie optique). Bob compte plus de 25 années d'expérience dans les applications de thermographie infrarouge et dans la formation à ce domaine.

12.2 *Généralités*

Le calcul du coefficient R d'une portion de mur extérieur revient à estimer le flux thermique entre l'intérieur d'une pièce et la surface intérieure du mur. Dans des conditions de transfert de chaleur en régime établi, toute la chaleur qui atteint le mur le traverse. La quantification du flux thermique au travers du "film d'air" à proximité de la surface du mur est donc un simple calcul de rayonnement et de convection. Il est nécessaire de connaître les températures intérieure, extérieure, de surface du mur et réfléchie, ainsi que l'émissivité du mur. Il est inutile de connaître la structure du mur. Le défi à relever, toutefois, provient de la faible différence entre la température de la pièce et la température de surface du mur, en particulier pour les murs bien isolés. Cette différence peut atteindre un degré ou deux seulement et même parfois moins. Or, les calculs basés sur de petits delta-T peuvent produire des résultats complètement erronés.

Pour des conditions de régime établi et une mesure correcte, le coefficient R devrait rester constant. Afin de déterminer les incertitudes de mesure, le rapport écart type/valeur moyenne a été utilisé pour différentes techniques de mesure et différentes conditions météorologiques.

Les isolations a posteriori sont coûteuses et il est légitime de s'interroger sur le rapport coût/bénéfice d'une telle intervention. A cet effet, l'auteur a développé un algorithme permettant d'estimer le coefficient R d'une section de mur, puis d'estimer les économies possibles en coût d'énergie par l'amélioration du niveau d'isolation. L'utilisateur peut contrôler les variables en entrée, notamment les coefficients R, les coûts énergétiques, les efficacités, la surface concernée et les degrés-jours. Comme les incertitudes sont généralisées, les estimations ne sont pas précises à un euro près mais elles constituent une indication raisonnable. L'algorithme concerne uniquement l'isolation a posteriori. Il ne couvre pas les effets d'infiltration/exfiltration d'air qui peuvent constituer 30 à 70 % de la perte de chaleur, les effets liés au mode de vie, aux conditions météorologiques extrêmes dépassant les moyennes historiques enregistrées, etc.

12.3 *Mesure du coefficient R*

Le coefficient R est la résistance au flux thermique d'un élément de bâtiment. Aux Etats-Unis et dans d'autres pays, les matériaux d'isolation sont classés selon leur coefficient R. Plus ce coefficient est élevé, plus le matériau est isolant. De nombreux pays utilisent également l'inverse du coefficient R, appelé le coefficient U. $U = 1 / R$. En régime établi de flux de thermique conductif à travers une surface comme décrit à la figure 1, le coefficient R est calculé par l'équation 1 où A est la surface traversée par la chaleur Q en raison de la différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur, ΔT_{io} (Eq. 1) :

$$R - Value = \frac{A \Delta T_{io}}{Q}$$

Un flux thermique en régime établi au travers du film d'air interne a lieu par convection et par rayonnement. L'équation classique de transfert de chaleur par radiation de Stefan-Boltzmann varie en fonction de la quatrième puissance de la température supérieure moins la quatrième puissance de la température inférieure ($T_{hi}^4 - T_{lo}^4$). Toutefois, dans notre cas et à des fins d'approximation, cette équation peut être simplifiée par un calcul où l'émissivité ϵ , la constante de Stefan-Boltzmann σ et le cube de la température moyenne absolue T_m^3 multiplient ΔT_r , la différence entre la température de surface du mur (température inférieure pendant la saison de chauffe) et la température de surface de l'intérieur de la pièce également appelée température apparente réfléchie (température supérieure pendant la saison de chauffe) (Eq. 2) :

$$Q_{rad} = 4\varepsilon\sigma AT_m^3\Delta T_r$$

Nous supposons une unité de facteur de forme, c'est-à-dire que la zone considérée "voit" de façon égale toutes les autres surfaces à la température T_{rat} , la température apparente réfléchie. Il s'agit d'une bonne approximation pour les mesures à l'intérieur car la plupart des surfaces qui entourent un mur extérieur sont environ à la même température. Pour l'extérieur, un scénario différent doit être utilisé car un ciel clair peut atteindre -50 °C, si bien que l'approximation d'un facteur de forme égal à 1 est inexacte. Pour cette raison, l'auteur recommande vivement d'effectuer les mesures depuis l'intérieur pendant la saison de chauffe, ce qui permet également une meilleure accessibilité et un meilleur contrôle d'autres paramètres environnementaux.

Le transfert de chaleur par convection est calculé par (Eq. 3) :

$$Q_{conv} = h_c A \Delta T_a$$

où h_c est le coefficient convectif et ΔT_a la différence entre la température de surface du mur et la température globale de l'air intérieur. La valeur de h_c dépend de plusieurs facteurs, notamment la hauteur des murs et la température de l'air intérieur. En cas de murs élevés et de ΔT_a élevée, un flux turbulent peut se produire dont le h_c est différent de celui d'un flux laminaire. Il existe plusieurs valeurs de h_c indiquées par des références variées. Les unités de Q sont le Watt (ou le BTU/hr). Par substitution dans l'Eq. 1, on obtient une équation de constantes connues et de variables mesurables (Eq. 4) :

$$R - Value = \frac{\Delta T_{io}}{4\varepsilon\sigma T_m^3\Delta T_r + h_c\Delta T_a}$$

Il est nécessaire de connaître la différence entre la température de surface du mur et la température de l'air intérieur ΔT_a , entre la température de surface du mur et la température apparente réfléchie ΔT_r et entre la température de l'air intérieur et extérieur ΔT_{io} . La température moyenne T_m est également nécessaire, ainsi qu'une longueur caractéristique pour déterminer h_c . La caméra infrarouge joue ici un rôle déterminant car l'uniformité thermique des surfaces murales n'est pas atteinte dans de nombreux cas. Des exemples le montrent clairement.

Les différences de température ΔT_a et ΔT_r peuvent être réduites à 0,3 °C pour des murs bien isolés et un ΔT_{io} faible, et dépasser 5 °C pour des murs mal isolés et un ΔT_{io} élevé. Comment espérer obtenir des mesures acceptables avec des différences de température aussi faibles au moyen de caméras infrarouges d'une précision de ± 2 °C ? Cela est possible car les différences de température sont les mesures primaires. Les spécifications de la précision d'une caméra infrarouge comprennent à la

fois une erreur aléatoire et une erreur systématique pour une mesure de température absolue. En mesurant toutes les différences de température avec le même appareil (la caméra infrarouge) au même moment et sur la même image, l'erreur systématique est évitée et il est possible de se concentrer sur l'erreur aléatoire.

L'erreur aléatoire des caméras infrarouges est associée à la résolution thermique de mesure NETD (noise equivalent temperature difference), en général fournie par les spécifications de la caméra infrarouge. Un NETD de 40 mK (millikelvins) est excellent, 100 mK moyen et 200 mK médiocre. La section sur l'analyse des incertitudes indique qu'un très bon NETD est nécessaire pour obtenir des mesures adéquates sur des zones bien isolées, même avec un ΔT_{io} modéré.

12.4 *Calcul de coefficient R et estimation d'économies d'énergie*

Les utilisateurs de cet estimateur doivent se familiariser avec les précautions d'utilisation des systèmes et bénéficier de solides connaissances en matière de COP, EER et SEER (coefficient de performance, taux de rendement énergétique et taux de rendement énergétique saisonnier).

La feuille de calcul produit le coût énergétique par million de BTU, l'utilisation énergétique avant et après, ainsi qu'une estimation des économies possibles sur la base de ces valeurs. Seule la déperdition de chaleur au travers du mur par conduction est prise en considération. Il n'est pas tenu compte des fuites d'air qui sont souvent considérablement réduites par l'ajout d'une isolation.

Les propriétaires d'un bâtiment doivent observer de nombreuses variables ; bien que l'estimateur d'énergie produise une indication raisonnable d'économies potentielles, de nombreux facteurs supplémentaires entrent en compte pour obtenir des économies réelles.

Le calculateur d'économies d'énergie associe directement les observations de la caméra infrarouge et le calcul du coefficient R avec des économies potentielles, qui pourraient être réalisées par des actions d'isolation a posteriori précisément adaptées à l'environnement et aux conditions du propriétaire concerné. Il s'agit là de la caractéristique principale de ce calculateur, ce qui en fait un outil très utile pour le spécialiste en thermographie infrarouge appliquée au bâtiment.

12.5 *Marche à suivre pour la mesure d'un coefficient R*

- 1 Le mur à mesurer doit être un mur extérieur. Il vaut mieux effectuer les mesures depuis l'intérieur. La procédure est basée sur ces conditions.
- 2 Le mur doit être exempt de tableaux, de meubles, de pendules et de tout autre objet qui empêche une vue directe de la surface du mur. Ces éléments doivent être ôtés, le cas échéant, entre 2 et 4 heures avant la mesure. Évitez de mesurer

des surfaces murales directement exposées à un flux d'air climatisé. Evitez de mesurer des murs exposés au rayonnement solaire. Mesurez ceux-ci avant que le soleil ne les atteigne ou attendez plusieurs heures après la fin de l'exposition. Evitez les conditions pluvieuses ou venteuses.

- 3 La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur doit atteindre au moins 10 °C, davantage pour des murs bien isolés.
- 4 Des conditions de régime établi sont fortement recommandées. La différence entre la température intérieure et la température extérieure doit rester raisonnablement constante pendant au moins 3 ou 4 heures avant la mesure. Etudiez les relevés des figures 3 et 4 pour constater comment le calcul du coefficient R varie selon les écarts de température. Lors de calculs effectués dans des conditions réelles (figure 3 et tableau 1), une variation d'environ 4 °C produit une incertitude de 12 %. Un intervalle de temps présentant une variation moindre de moitié augmente considérablement l'incertitude. Notez que le delta-T extérieur est d'environ 17 °C. Lors de vos propres mesures, vous n'obtenez qu'un seul nombre et vous ne pouvez pas bénéficier d'une analyse de données intensive comme celle effectuée ici. Toutefois, vous pouvez utiliser celle-ci comme indication.
- 5 Pour obtenir la valeur Trelect, froissez une feuille d'aluminium d'une surface suffisamment étendue pour être résolue par votre caméra infrarouge. Défroissez cette feuille d'aluminium et fixez-la à une feuille de papier ou de carton mince. Pour la plupart des caméras infrarouges, une feuille de papier de taille standard à demi couverte d'aluminium convient.
- 6 Placez cette cible sur un support à une distance d'environ 30 à 45 cm de la surface à mesurer et laissez-là s'équilibrer thermiquement avec l'air ambiant. Pour ce faire, quelques minutes suffisent en général. Une personne pourrait même tenir cette feuille, mais il vaut mieux réduire le plus possible le nombre de sources de chaleur sur le site.
- 7 Prenez une image infrarouge de la surface du mur cible incluant votre cible de référence. Continuez jusqu'à ce que toutes les zones souhaitées soient couvertes. Veillez à ce que votre cible de référence papier/aluminium soit présente dans toutes les images. Pour éviter toute réflexion de chaleur humaine sur l'aluminium, visez avec la caméra infrarouge à un angle. En fait, si vous disposez d'une caméra infrarouge munie d'une fonction d'enregistrement séquentiel, nous vous recommandons de placer votre caméra infrarouge sur un trépied et d'utiliser cette fonction. Définissez la période sur 30 secondes environ et laissez la caméra infrarouge prendre 2 ou 3 images en l'absence de toute personne dans la pièce.
- 8 Enfin, sortez et prenez encore une image infrarouge de votre cible de référence, une fois qu'elle a atteint l'équilibre thermique avec l'air extérieur.

- 9 Pour T_{reflect} , définissez l'émissivité de votre caméra infrarouge sur 1,0 et prenez une moyenne de températures d'une zone de la cible d'aluminium pour chaque surface murale mesurée (conformément aux normes ASTM 1862-97 et ISO 18434-1). Saisissez également cette valeur pour obtenir les températures du papier (air intérieur) et du mur (surface murale).
- 10 Une fois la valeur T_{reflect} (également appelée T_{rat} ou $T_{\text{background}}$) obtenue à l'étape 10 et l'émissivité correctement définies, obtenez les températures des autres zones souhaitées.
- 11 D'après l'analyse des incertitudes ci-dessous, les variables les plus sensibles sont l'émissivité et la différence de température entre T_{reflect} et T_{wall} . Procédez avec la plus grande précaution pour obtenir ces valeurs. En général, l'émissivité du papier et du carton est de 0,95 pour les caméras infrarouges ondes longues. La plupart des surfaces murales présentent également une émissivité de 0,95, sauf si elles ont été soumises à un traitement spécial.
- 12 Utilisez la feuille de calcul Excel développée par l'Infrared Training Center pour calculer le coefficient R.

12.6 *Analyse des incertitudes*

Les variables de température les plus importantes sont les différences entre la température intérieure et extérieure, entre la température intérieure et celle du mur et entre la température apparente réfléchie et la température du mur. La température absolue est également d'importance. L'émissivité et la longueur caractéristique complètent les variables.

La variable la plus sensible est la différence entre la température apparente réfléchie et la température du mur.

Viennent ensuite l'émissivité et la longueur caractéristique L , la différence entre les températures intérieure et extérieure étant la valeur la moins sensible.

Plus le coefficient R est élevé, plus le delta-T doit être élevé pour maintenir l'incertitude à un niveau raisonnable. Le delta-T de 10 °C utilisé par de nombreuses normes convient pour des coefficients R modérés, mais pour des coefficients plus élevés que R-11, un delta-T de 17 ou même de 23 °C est préférable.

12.7 *Résumé et conclusions*

La mesure d'un coefficient R exige des conditions proches de celles d'un régime établi et le respect d'une procédure correcte pour obtenir des résultats significatifs. Toutefois, les erreurs les plus importantes ne proviennent pas nécessairement de mauvaises conditions. L'exemple en conditions réelles montre que l'absence d'un régime établi permet tout de même d'obtenir de bons résultats. L'utilisation de la même caméra infrarouge, de haute qualité, pour toutes les mesures de température est un facteur extrêmement important.

13 Introduction à la thermographie appliquée au bâtiment

13.1 Remarque importante

Certaines fonctions et fonctionnalités de la caméra décrites dans cette section peuvent ne pas être prises en charge par la configuration de votre caméra.

13.2 Analyses de terrain typiques

13.2.1 Recommandations

Les sections ci-dessous contiennent des directives générales. Nous recommandons à l'utilisateur d'en tenir compte pour effectuer des analyses et des captures thermographiques dans le domaine du bâtiment. La présente section récapitule ces directives.

13.2.1.1 Directives générales

- L'émissivité de la plupart des matériaux de construction se situe entre 0,85 et 0,95. La définition de la valeur d'émissivité de la caméra sur 0,90 peut être considérée comme un bon point de départ.
- Une seule analyse infrarouge ne permet pas de prendre une décision pertinente pour la suite des opérations. Vérifiez toujours les hypothèses et les conclusions à l'aide d'autres méthodes, par exemple des plans d'exécution, un humidimètre, un appareil d'enregistrement de l'humidité et de la température, des tests par gaz traqueur, etc.
- Modifiez le niveau et le gain pour ajuster l'image infrarouge thermiquement et révéler davantage de détails. La figure ci-dessous montre la différence entre une image infrarouge non ajustée thermiquement et une image ajustée thermiquement.

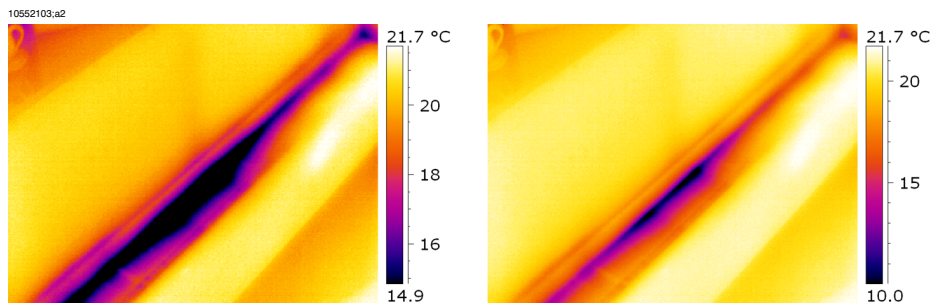


Figure 13.1 A GAUCHE : Image non ajustée thermiquement ; A DROITE : Image ajustée thermiquement ; après modification de la luminosité et du contraste.

13.2.1.2 *Directives relatives à la détection de l'humidité, des moisissures et des dommages causés par l'eau*

- Il est possible que les défauts des bâtiments liés à l'humidité et aux dégâts des eaux apparaissent uniquement lorsque la surface est exposée à une source de chaleur (par ex. la chaleur du soleil).
- La présence d'eau modifie la conductivité thermique et la masse thermique des matériaux du bâtiment. De plus, l'évaporation de l'eau peut faire baisser la température en surface des matériaux de construction. La conductivité thermique est la capacité d'un matériau à conduire la chaleur, tandis que la masse thermique est la capacité à stocker la chaleur.
- L'inspection infrarouge ne permet pas de détecter directement la présence de moisissure, mais elle peut être utilisée pour rechercher de l'humidité dans les endroits où la moisissure est susceptible de se développer ou s'est déjà développée. Pour se développer la moisissure requiert un environnement humide dont la température oscille entre +4 et +38 °C et dans lequel elle peut trouver des substances nutritives. Un niveau d'humidité supérieur à 50 % est suffisant pour permettre le développement de moisissures.

10556003;a1

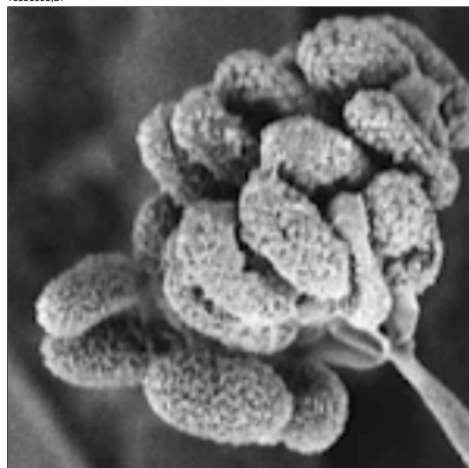


Figure 13.2 Vue au microscope d'un spore de moisissure

13.2.1.3 *Directives relatives à la détection d'infiltrations d'air et de défauts d'isolation*

- Pour obtenir des mesures très précises avec la caméra, relevez la température et entrez cette valeur dans la caméra.
- Une différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment est préférable. Cela facilite l'analyse des images infrarouges et révèle les défauts qui autrement ne sont pas visibles. Nous recommandons une pression négative comprise entre

10 et 50 Pa, mais des analyses sous une pression négative inférieure sont possibles. Pour cela, fermez toutes les fenêtres, les portes et les conduits d'aération, puis faites tourner le ventilateur d'extraction de la cuisine durant le temps nécessaire à atteindre une pression négative de 5 à 10 Pa (applicable aux maisons résidentielles uniquement).

- Une différence de température de 10 à 15 °C entre l'intérieur et l'extérieur est recommandée. Les inspections peuvent être effectuées dans des conditions présentant une différence de température moindre, mais l'analyse des images infrarouges peut s'avérer plus délicate.
- Evitez la lumière solaire directe sur une partie du bâtiment à analyser de l'intérieur, par exemple, une façade. Si la façade est chauffée par le soleil, elle peut atteindre la même température que l'intérieur, ce qui peut masquer les défauts de la structure du bâtiment. Ce risque d'erreur est plus élevé au printemps, lorsque la différence de température est importante entre la nuit (± 0 °C) et la journée (+ 14 °C).

13.2.2 A propos de la détection d'humidité

L'apparition de moisissure dans un bâtiment peut être causée par différents facteurs, par ex. :

- Les fuites externes, notamment des inondations, des fuites au niveau des bouches à incendie, etc.
- Fuites internes provenant de canalisations de distribution ou d'évacuation d'eau, etc.
- La condensation, qui correspond à l'humidité présente dans l'air se transformant en eau au contact de surfaces froides.
- L'humidité du bâtiment, formée par l'humidité présente dans le matériau avant la construction du bâtiment.
- La présence d'eau suite à une intervention des pompiers.

La détection par caméra infrarouge est une méthode non-destructrice qui présente de nombreux avantages sur les autres méthodes mais aussi quelques inconvénients :

Avantage	Inconvénient
■ C'est une méthode rapide. ■ Cette méthode constitue un moyen d'investigation non-intrusif. ■ Elle ne requiert pas l'évacuation des occupants du bâtiment. ■ Elle permet d'obtenir une représentation visuelle claire des informations détectées. ■ Elle confirme les failles et la progression de l'humidité.	■ Cette méthode permet de détecter les variations de température de surface, mais ne permet pas de voir à travers les murs. ■ Elle ne permet pas de détecter les dégâts se trouvant sous la surface, par exemple la moisissure ou l'état de la structure.

13.2.3 Détection de l'humidité (1) : Toits à faible pente

13.2.3.1 Informations générales

Les toits à faible pente sont très répandus dans les bâtiments industriels, comme les entrepôts, les usines, les ateliers de construction, etc. Leur principal avantage par rapport aux toits en pente réside dans leur faible coût de fabrication et d'assemblage. Cependant, leur conception ne permet pas à la neige ou à la glace de s'évacuer par elle-même (comme c'est le cas pour la plupart des toits en pente). Par conséquent, les toits à faible pente doivent être construits de façon robuste pour supporter à la fois le poids de la structure même du toit et de la neige, de la glace ou de la pluie qui s'y accumule.

Même si des connaissances de base en matière de construction de toits à faible pente est souhaitable pour effectuer l'inspection thermographique d'un toit, il n'est pas nécessaire d'acquérir des connaissances approfondies dans ce domaine. Il existe différents principes de conception de toits à faible pente, aussi bien en ce qui concerne les matériaux utilisés que le design. Il paraît évident qu'une personne effectuant une inspection infrarouge ne peut pas tous les connaître. Si des informations supplémentaires sont requises sur un certain type de toit, contactez l'architecte ou l'entrepreneur ayant réalisé le bâtiment.

Le tableau ci-dessous répertorie les causes courantes des défauts des toitures (repris et adapté de l'ouvrage SPIE Thermosense Proceedings Vol. 371 (1982), p. 177).

Cause	%
Malfaçon	47,6
Circulation sur la toiture	2,6
Conception de mauvaise qualité	16,7
Humidité piégée	7,8
Matériaux	8,0
Ancienneté et intempéries	8,4

Les fuites peuvent se trouver aux endroits suivants :

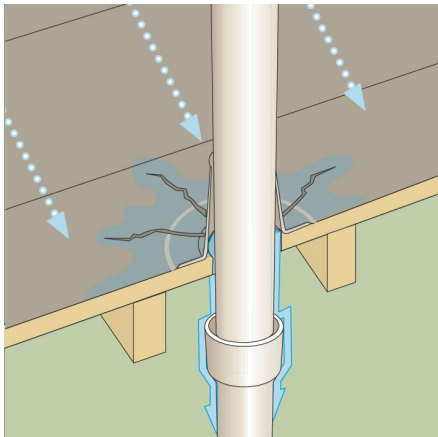
- Solin
- Avaloirs
- Ouvertures
- Joints
- Boursouflures

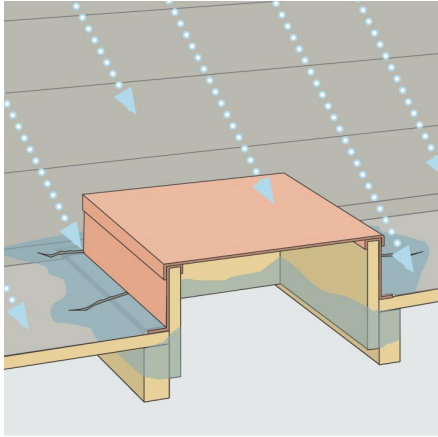
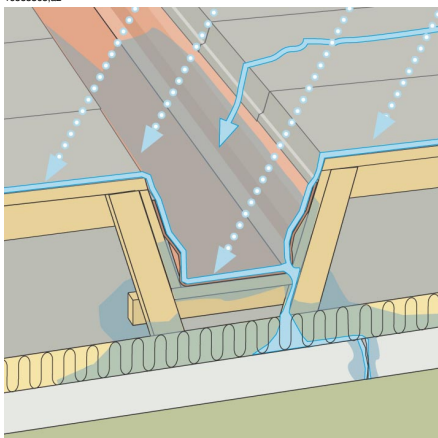
13.2.3.2 Précautions de sécurité

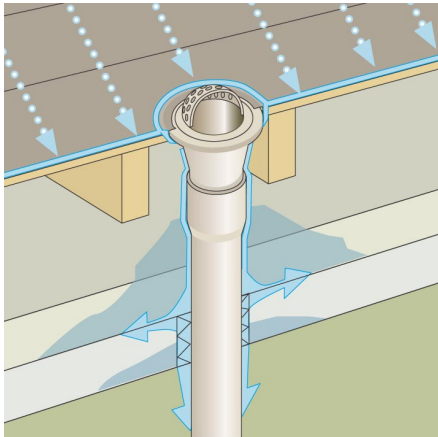
- Nous vous conseillons d'effectuer les inspections sur les toits par équipe de deux, trois ou plus.
- Inspectez au préalable la structure du toit pour contrôler son intégrité avant de marcher dessus.
- Evitez de marcher sur les coupoles, fréquentes sur les toits fabriqués en bitume et en gravier.
- Munissez-vous d'un téléphone portable ou d'une radio CB pour prévenir les secours en cas d'urgence.
- Informez la police locale et le service de sécurité de l'usine avant d'effectuer une inspection du toit de nuit.

13.2.3.3 Observation de structures de bâtiments

Cette section comprend quelques exemples courants de problèmes d'humidité des toits à faible pente.

Dessin technique de bâtiment	Commentaire
10553603.a2 	Etanchéité inadéquate de la membrane de la toiture autour des canalisations ou des conduits de ventilation, entraînant une fuite locale autour de la canalisation ou du conduit.

Dessin technique de bâtiment	Commentaire
10553703;a2  This technical drawing shows a cross-section of a roof access hatch. The hatch is represented by an orange rectangular block. It is installed on a roof structure with grey tiles. Blue dashed arrows indicate the direction of water flow. The drawing highlights a gap between the hatch's membrane and the roof tiles, showing water seeping through. The hatch is supported by wooden beams.	Jointure non étanche entre la membrane de la toiture et la trappe d'accès.
10553803;a2  This technical drawing shows a cross-section of a roof gutter. The gutter is a brown channel installed on a roof with grey tiles. Blue dashed arrows show water flow. The gutter is positioned too high, and the roof tiles above it are not properly integrated. Water is shown pooling in the gutter. Below the gutter, a green wavy line represents the insulation or structure of the roof. The gutter is supported by wooden beams.	Chéneaux placés trop haut et insuffisamment inclinés. De l'eau reste dans le chéneau après la pluie, ce qui peut provoquer une fuite locale autour du chéneau.

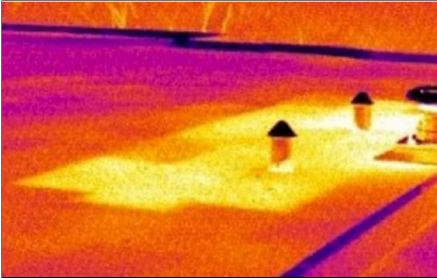
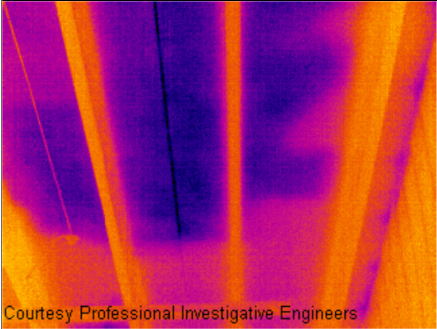
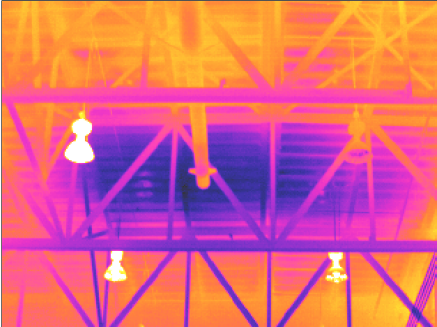
Dessin technique de bâtiment	Commentaire
10553903; a2 	Etanchéité incorrecte entre la membrane et l'exutoire de toiture, entraînant une fuite locale autour de l'exutoire.

13.2.3.4 Observation d'images infrarouges

Comment détecter une isolation humide sous la surface du toit ? Lorsque la surface est sèche, y compris les graviers ou le ballast, une journée ensoleillée permet de réchauffer l'ensemble du toit. En début de soirée, si le ciel est dégagé, le toit commence à refroidir par rayonnement. En raison de sa capacité thermique supérieure, l'isolation humide restera chaude plus longtemps que les parties sèches et apparaîtra sur la caméra infrarouge (voir photos ci-dessous). Cette technique est particulièrement efficace sur les toits dont l'isolation est absorbante—comme la fibre de bois, la fibre de verre et la perlite—et pour lesquels le profil thermique est en corrélation quasi-parfaite avec l'humidité.

Les analyses infrarouges de toitures munies d'isolants non absorbants (très courantes dans les constructions unicouche) sont plus difficiles à analyser car les motifs sont plus diffus.

Cette section présente des images infrarouges de problèmes d'humidité caractéristiques sur les toitures commerciales à faible pente :

Images infrarouges	Commentaire
10554003.a1 	Détection d'humidité sur une toiture, enregistré le soir. Comme le matériau de construction affecté par l'humidité présente une masse thermique plus élevée, sa température décroît plus lentement que celle des zones environnantes.
10554103.a1  Courtesy Professional Investigative Engineers	Composants et isolants de la toiture endommagés par l'eau : détection par analyse infrarouge effectuée depuis la partie interne de la toiture multi-couche d'une terrasse en béton. Les zones affectées sont plus froides que les zones saines environnantes, à cause de l'effet capacitif thermique et/ou conducteur.
10554203.a1 	Analyse de jour d'une toiture commerciale à faible pente. Les zones affectées sont plus froides que les zones sèches environnantes, à cause de l'effet capacitif thermique et/ou conducteur.

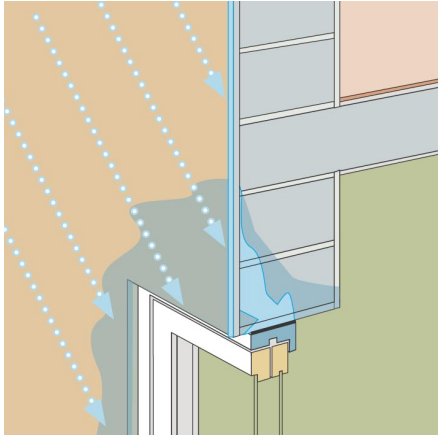
13.2.4 Détection de l'humidité (2) : Façades de bâtiments commerciaux et résidentiels

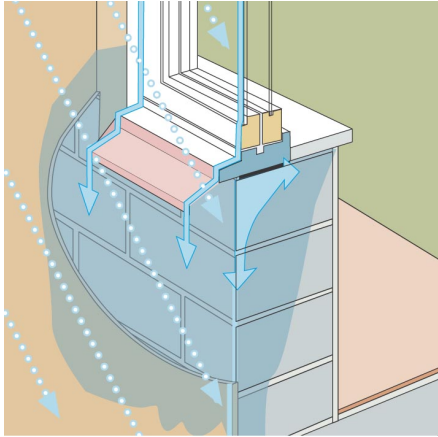
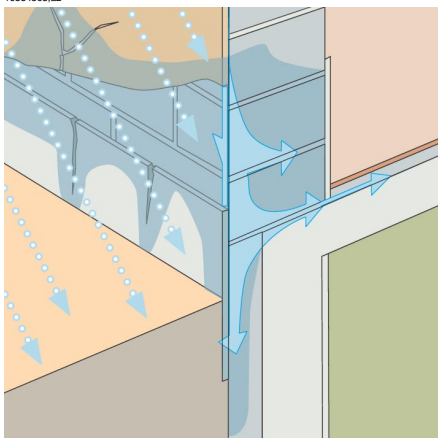
13.2.4.1 Informations générales

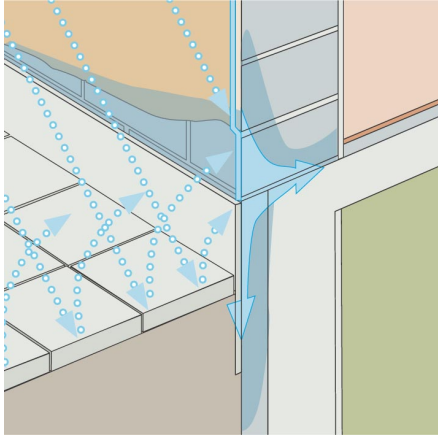
La thermographie s'est avérée être un élément primordial dans l'évaluation de l'infiltration d'humidité dans les façades commerciales et résidentielles. Le fait de fournir une illustration physique de l'évolution de l'humidité est plus parlant que de prélever des échantillons à l'aide d'un humidimètre et moins onéreux que des tests intrusifs plus importants.

13.2.4.2 Observation de structures de bâtiments

Cette section comprend quelques exemples de problèmes d'humidité sur des façades de bâtiments commerciaux et résidentiels.

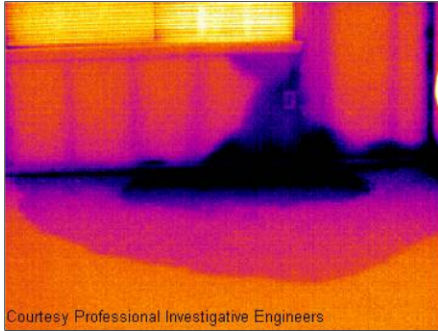
Dessin technique de bâtiment	Commentaire
10554303.a2 	La pluie battante pénètre dans la façade à cause de joints horizontaux mal réalisés. L'humidité s'accumule dans la maçonnerie au-dessus de la fenêtre.

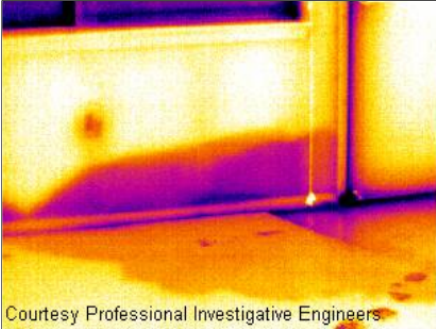
Dessin technique de bâtiment	Commentaire
10554403;a2 	La pluie battante s'abat sur un angle de la fenêtre. La majorité de la pluie est évacuée du solin de la fenêtre, mais une partie s'introduit dans la maçonnerie au niveau de la jonction entre le plâtre et la partie inférieure du solin.
10554503;a2 	La pluie s'abat sur un angle de la façade et pénètre dans le plâtre par les fissures. L'eau s'introduit dans le plâtre et le gel provoque ensuite l'érosion.

Dessin technique de bâtiment	Commentaire
10554603.a2 	La pluie éclabousse la façade et pénètre dans le plâtre et la maçonnerie par absorption, puis le gel finit par provoquer l'érosion.

13.2.4.3 Observation d'images infrarouges

Cette section comprend quelques images infrarouges typiques de problèmes d'humidité sur des façades de bâtiments commerciaux et résidentiels.

Images infrarouges	Commentaire
10554703.a1  Courtesy Professional Investigative Engineers	L'étanchéité incorrecte de la pierre plaquée sur le cadre en bois de la fenêtre et l'absence de solin a entraîné l'infiltration d'humidité dans la cavité murale et à l'intérieur de la pièce.

Images infrarouges	Commentaire
10554803.a1  Courtesy Professional Investigative Engineers	Migration de l'humidité dans la cloison sèche par capillarité ainsi que dans les éléments de finition intérieurs à cause d'un espacement inadéquat et d'un terrain en pente, sur la façade en vinyle d'un complexe d'appartements.

13.2.5 Détection de l'humidité (3) : Terrasses et balcons

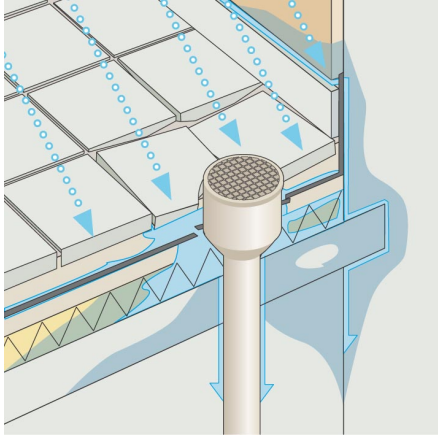
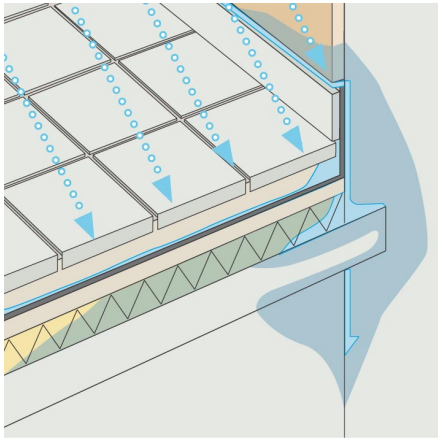
13.2.5.1 Informations générales

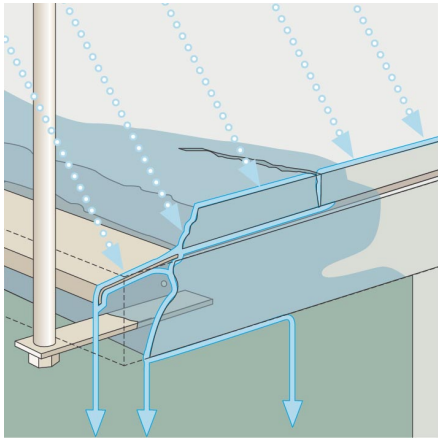
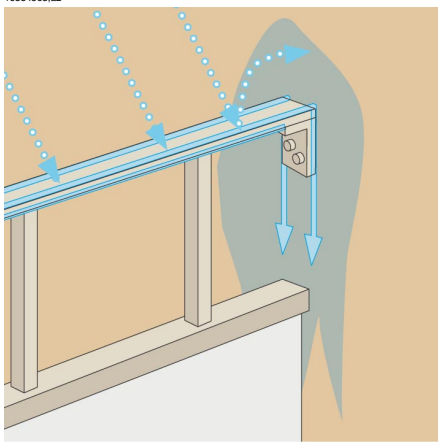
Bien qu'il existe des différences au niveau de la conception, des matériaux et de la construction, les terrasses et terrasses couvertes, les cours, etc., connaissent les mêmes problèmes d'humidité et de fuites que les toits à pente faible. Des problèmes d'étanchéité, des membranes incorrectement scellées et un drainage insuffisant peuvent entraîner des dégâts importants des structures inférieures du bâtiment.

Les balcons, bien que de taille inférieure, requièrent le même soin au niveau de la conception, du choix des matériaux et de la construction, que tout autre élément de structure de bâtiment. Comme les balcons sont en général soutenus par un seul côté, l'humidité qui entraîne la corrosion des supports et de l'armature en béton peut entraîner des problèmes et conduire à des situations dangereuses.

13.2.5.2 Observation de structures de bâtiments

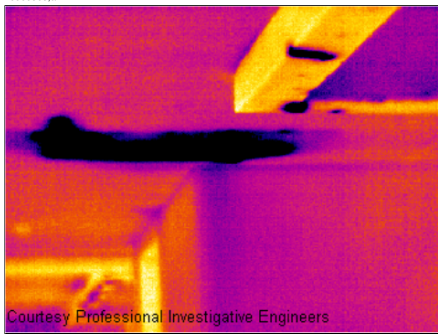
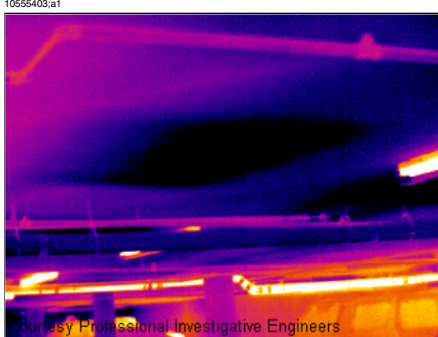
Cette section comprend quelques exemples de problèmes d'humidité sur des terrasses et balcons.

Dessin technique de bâtiment	Commentaire
10555203;a2 	Etanchéité incorrecte entre l'évent et le revêtement de la toiture et la membrane de la toiture, ce qui entraîne des fuites lors des averses.
10555103;a2 	Absence de solin entre la terrasse et le mur, ce qui entraîne la pénétration de la pluie dans le béton et l'isolant.

Dessin technique de bâtiment	Commentaire
10555003,a2 	L'eau a pénétré dans le béton à cause d'un dimensionnement incorrect du tablier, ce qui a entraîné la désintégration du béton et la corrosion de l'armature. DANGER
10554903,a2 	L'eau a pénétré dans le plâtre et dans la maçonnerie sous-jacente à l'endroit où la main courante est fixée au mur. DANGER

13.2.5.3 Observation d'images infrarouges

Cette section comprend quelques exemples d'images infrarouges de problèmes d'humidité sur des terrasses et balcons.

Images infrarouges	Commentaire
10555303,a1  Courtesy Professional Investigative Engineers	Solin inadéquat entre le balcon et le mur et absence de système de drainage périmétrique, entraînant l'intrusion de l'humidité dans la structure porteuse de l'ossature de bois sur un balcon d'un complexe de lofts.
10555403,a1  Courtesy Professional Investigative Engineers	Absence de plan ou de support de drainage composite dans la structure d'une terrasse de parking sous-terrain de centre commercial, entraînant le blocage d'eau entre la terrasse en béton et la couche de surface du centre commercial.

13.2.6 Détection de l'humidité (4) : Dégâts et fuites du système de plomberie

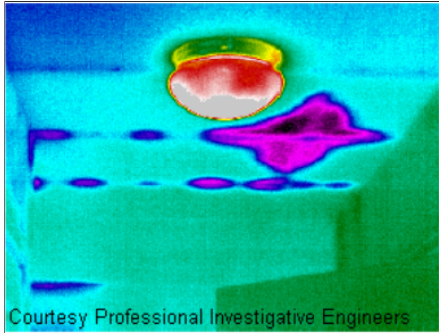
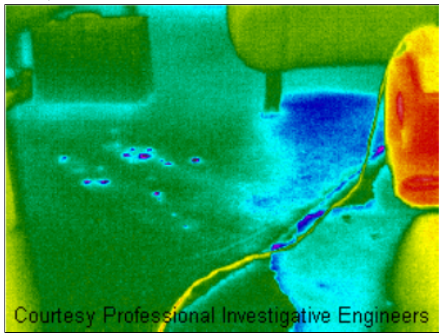
13.2.6.1 Informations générales

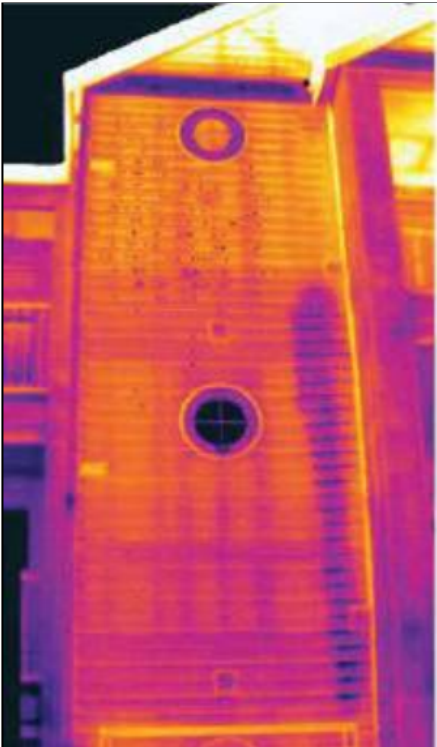
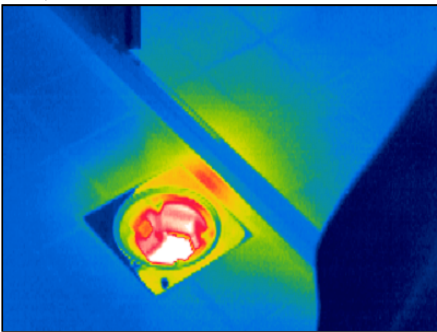
L'eau issue de fuites du système de plomberie peut souvent entraîner des dégâts importants de la structure du bâtiment. Les petites fuites peuvent être difficiles à détecter, mais peuvent, au long des années, pénétrer les murs et les fondations au point de rendre la structure du bâtiment irréparable.

L'utilisation de la thermographie de bâtiment dès la constatation de dégâts et de fuites de systèmes de plomberie permet de réaliser d'importantes économies en matériel et en main-d'œuvre.

13.2.6.2 *Observation d'images infrarouges*

Cette section comprend quelques images infrarouges typiques de fuites ou de dégâts de plomberie.

Images infrarouges	Commentaire
10555503.a1  Courtesy Professional Investigative Engineers	Localisation de la migration de l'humidité le long des poutrelles en acier d'un plafond de maison individuelle, où la canalisation de plomberie a été rompue.
10555603.a1  Courtesy Professional Investigative Engineers	Lors des travaux d'assainissement, par découpe de la moquette et installation de déshumidificateurs, il s'est avéré que la migration de l'eau provenant de la fuite de plomberie s'était étendue au-delà des prévisions de l'entrepreneur.

Images infrarouges	Commentaire
10555703.a1 	L'image infrarouge de cette maison à trois étages avec revêtement en vinyl montre clairement que le cheminement d'une fuite sérieuse entre une machine à laver et le troisième étage est complètement masqué dans les murs.
10555803.a1 	Fuite d'eau causée par une étanchéité incorrecte entre les drains et les dalles d'un sol.

13.2.7 Infiltration d'air

13.2.7.1 Informations générales

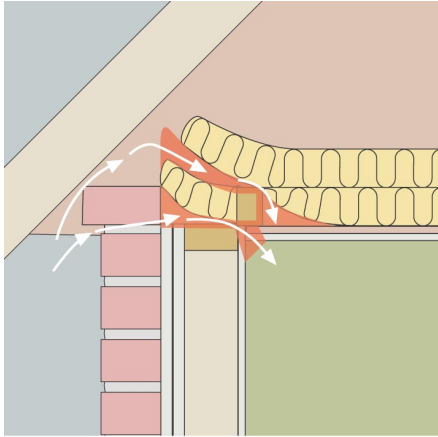
En raison de la poussée du vent sur un bâtiment, des différences de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment et du fait que la plupart des bâtiments utilisent des bouches d'évacuation pour extraire l'air vicié, une pression négative de 2 à 5 Pa peut survenir. Lorsque cette pression négative laisse de l'air froid pénétrer le bâtiment en raison de déficiences d'isolation et ou de calfeutrement, nous avons ce que l'on appelle une *infiltration d'air*. Une infiltration d'air peut survenir au niveau des joints et jonctions du bâtiment.

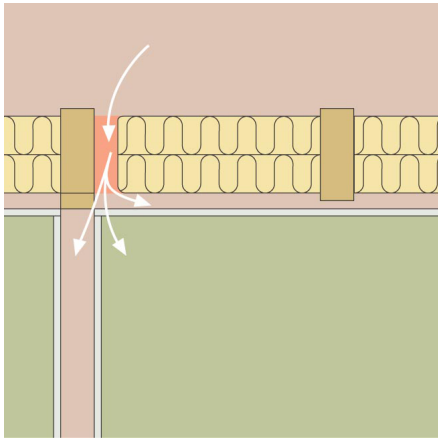
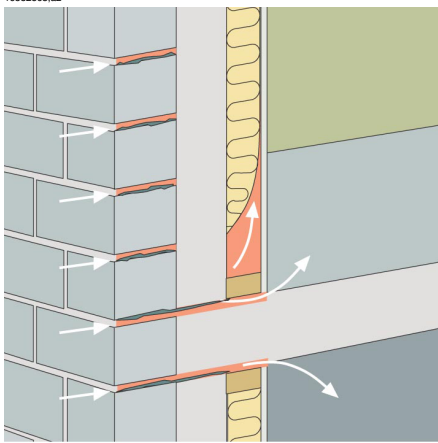
L'infiltration d'air créant un courant d'air frais dans une pièce par exemple, une détérioration sensible du climat intérieur peut survenir. Les habitants remarquent généralement les petits courants d'air d'une taille de 0,15 m/s, alors que ces derniers sont difficiles à détecter à l'aide d'instruments de mesure classiques.

Sur une image infrarouge, une infiltration d'air peut être identifiée grâce à la forme caractéristiques de ses rayons émanant d'un point de fuite dans le bâtiment, par exemple au niveau de la plinthe. En outre, les zones sujettes aux infiltrations d'air affichent généralement une température inférieure aux zones mal isolées. Cela est dû à l'effet courant d'air.

13.2.7.2 Observation de structures de bâtiments

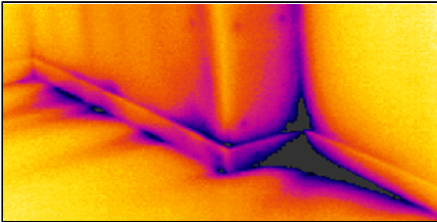
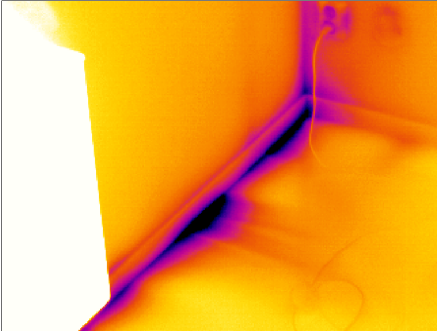
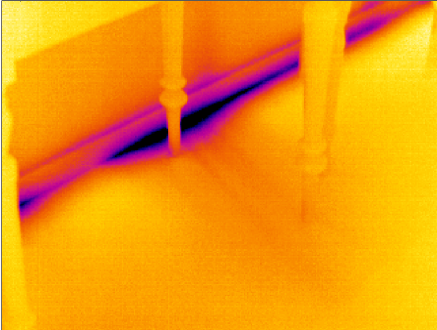
Cette section comprend quelques exemples de détails de bâtiments où des infiltrations d'air peuvent survenir.

Dessin technique de bâtiment	Commentaire
10552503.a2 	Défauts d'isolation au niveau de l'avant-toit d'une maison aux murs de briques, dus à une installation incorrecte des panneaux isolants de fibres de verre. L'infiltration d'air entre dans la pièce au niveau de la corniche.

Dessin technique de bâtiment	Commentaire
10552303,a2 	Isolation insuffisante au niveau d'un étage intermédiaire due à des isolants en fibre de verre mal installés. L'infiltration d'air entre dans la pièce au niveau de la corniche.
10552603,a2 	Infiltration d'air dans un sol en béton situé au-dessus d'un vide sanitaire, due aux fissures dans le mur de briques de la façade. L'infiltration d'air s'introduit dans la pièce à l'arrière d'une plinthe.

13.2.7.3 Observation d'images infrarouges

Cette section comprend quelques exemples d'images infrarouges de détails de bâtiments sujets à des infiltrations d'air.

Images infrarouges	Commentaire
10552703,a1 	Infiltration d'air à l'arrière d'une plinthe. Notez le motif caractéristique en forme de rayon.
10552803,a1 	Infiltration d'air à l'arrière d'une plinthe. Notez le motif caractéristique en forme de rayon. La zone blanche à gauche est un radiateur.
10552803,a1 	Infiltration d'air à l'arrière d'une plinthe. Notez le motif caractéristique en forme de rayon.

13.2.8 Défauts d'isolation

13.2.8.1 Informations générales

Une mauvaise isolation n'entraîne pas forcément des infiltrations d'air. Si les isolants en fibre de verre sont incorrectement installés, des poches d'air vont se former dans la structure du bâtiment. Ces poches d'air ayant une conductivité thermique différente, elles peuvent être détectées lors d'une inspection thermographique du bâtiment.

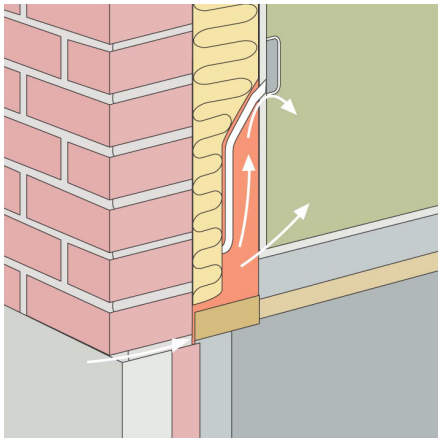
En règle générale, la température des zones présentant des défauts d'isolation est supérieure à celle des zones présentant seulement des infiltrations d'air.

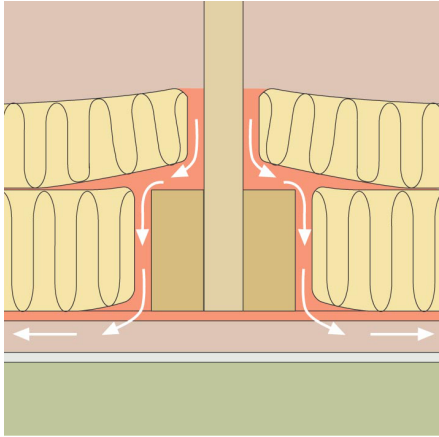
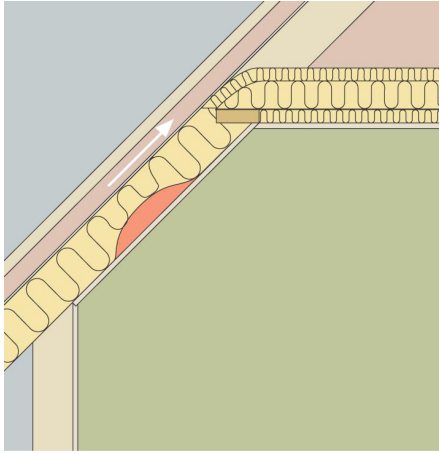
Lorsque vous effectuez une analyse thermographique sur un bâtiment dans le but de détecter des défauts d'insolation, veillez à identifier les éléments de structure ci-dessous qui peuvent ressembler à des défauts d'isolation sur les images infrarouge :

- poutres en bois, poteaux et chevrons
- poutres en acier
- tuyauterie dans les murs, plafonds et sols
- installations électriques dans les murs, plafonds et sols tels que les conduits d'air, les tuyauteries, etc.
- colonnes en béton dans des pans de bois
- conduits de ventilation et d'air

13.2.8.2 Observation de structures de bâtiments

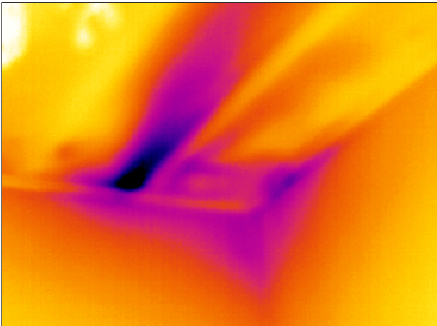
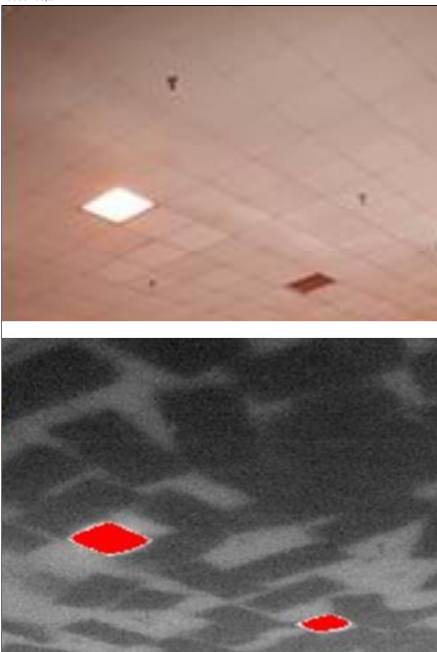
Cette section comprend quelques exemples de détails de bâtiments mal isolés :

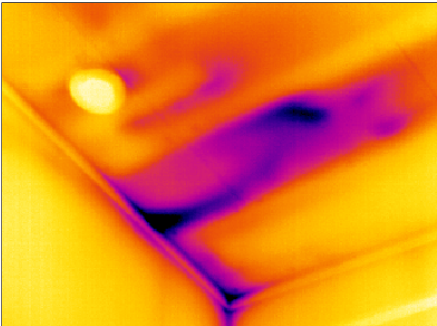
Dessin technique de bâtiment	Commentaire
	Défauts d'isolation (et infiltrations d'air) dus à une installation incorrecte de panneaux isolants autour d'une prise d'alimentation secteur. Sur une image infrarouge, ce type de défaut d'isolation apparaît sous forme de zone sombre.

Dessin technique de bâtiment	Commentaire
10553103,a2  The diagram shows a cross-section of a ceiling assembly. It includes a concrete slab (green), a layer of insulation (yellow wavy lines), and a wooden joist (brown). Red arrows indicate cold air infiltrating from the bottom into the gaps around the joist and between the insulation panels. White arrows at the bottom indicate air circulation.	Défauts d'isolation dus à une installation incorrecte de panneaux isolants autour d'une poutre de faux plancher. L'air froid s'infiltre dans la structure et refroidit la partie interne du plafond. Sur une image infrarouge, ce type de défaut d'isolation apparaît sous forme de zone sombre.
10553003,a2  The diagram shows a corner of a sloped ceiling. It features a concrete slab (green), insulation (yellow wavy lines), and a sloped plaster layer (pink). A red arrow points to a gap where cold air is trapped, creating an air pocket. A white arrow indicates the direction of air flow.	Défauts d'isolation dus à une installation incorrecte des panneaux isolants, créant une poche d'air dans la partie externe d'un plafond incliné. Sur une image infrarouge, ce type de défaut d'isolation apparaît sous forme de zone sombre.

13.2.8.3 Observation d'images infrarouges

Cette section comprend quelques images infrarouges typiques d'une mauvaise isolation.

Images infrarouges	Commentaire
10553303,a1 	Défauts d'isolation dans une structure de plancher intermédiaire. Le défaut peut provenir de l'absence de panneau isolant ou de panneaux isolants incorrectement installés (poches d'air).
10553403,a1 	Panneaux de fibres de verre incorrectement installés dans un plafond suspendu.

Images infrarouges	Commentaire
10553503.a1  An infrared thermal image showing a floor structure. The image displays a color gradient from yellow (warmer) to purple (cooler). A prominent dark purple area, indicating a cold spot, is visible in the center-right, suggesting a lack of insulation or an air pocket. A bright yellow circular spot is visible in the upper left corner. The overall pattern shows a diagonal line of varying temperatures across the frame.	Défauts d'isolation dans une structure de plancher intermédiaire. Le défaut peut provenir de l'absence de panneau isolant ou de panneaux isolants incorrectement installés (poches d'air).

13.3 *Théorie en science du bâtiment*

13.3.1 Informations générales

La demande pour des constructions écologiques n'a cessé de croître ces dernières années. Les progrès effectués dans les domaines de l'énergie, associés à une demande croissante pour un intérieur chaleureux, ont montré l'importance conjuguée d'une étanchéité et d'une isolation thermique et d'un système de chauffage et de ventilation efficace.

Une isolation et une étanchéité défectueuses dans les structures où l'isolation et l'étanchéité à l'air est importante peut entraîner de grandes pertes d'énergie. Les défauts dans l'isolation thermique et l'étanchéité à l'air d'un bâtiment n'impliquent pas seulement des coûts élevés de chauffage et de maintenance : ils affectent également les conditions atmosphériques à l'intérieur des locaux.

Le degré d'isolation d'un bâtiment est en général exprimé par la résistance thermique ou le coefficient de transmission thermique (valeur U) des différentes parties du bâtiment. Cependant, les valeurs de résistance thermique indiquées représentent rarement la valeur réelle des pertes d'énergie d'un bâtiment. Les fuites d'air au niveau des joints et des raccords non étanches à l'air et insuffisamment équipés d'isolant engendrent souvent des écarts considérables entre les valeurs théoriques et les valeurs réelles.

Pour vérifier que les propriétés des différents matériaux et éléments d'un bâtiment sont conformes aux propriétés prévues, des tests en laboratoire sont effectués. Une fois terminés, les bâtiments doivent être contrôlés et inspectés afin de vérifier que leur isolation et leur étanchéité à l'air sont conformes aux objectifs.

Appliquée à l'ingénierie des structures, la thermographie permet d'étudier les variations de température à la surface d'une structure. Les variations de la résistance thermique d'une structure peut, sous certaines conditions, générer des variations de température en surface. Les fuites d'air froid (ou chaud) à travers la structure peuvent également entraîner des variations de température en surface. Cela signifie qu'il est possible de repérer et d'étudier les défauts d'isolation, les ponts thermiques et les fuites d'air dans les éléments porteurs de la structure d'un bâtiment.

La thermographie ne permet pas d'obtenir directement la résistance thermique ou l'étanchéité à l'air d'une structure. Pour quantifier la résistance thermique et l'étanchéité à l'air, des mesures complémentaires sont nécessaires. L'analyse thermographique des bâtiments repose sur un certain nombre de pré-requis liés à la température et à la pression de la structure.

Les détails, les formes et le contraste de l'image thermique peuvent varier avec la modification de ces paramètres. Par conséquent, l'analyse détaillée et l'interprétation des images thermiques requièrent des connaissances approfondies sur les propriétés des structures et des matériaux, les effets de l'environnement et les techniques de mesure récentes. Pour effectuer les mesures et évaluer les résultats, certaines conditions sont requises en termes de compétences et d'expérience, par exemple l'autorisation d'un organisme de normalisation national ou régional.

13.3.2 Répercussions des tests et des contrôles

L'efficacité de l'isolation thermique et de l'étanchéité d'un bâtiment peut être difficile à anticiper. Certains des facteurs nécessaires lors de l'assemblage des différents composants et éléments du bâtiment peuvent avoir un impact considérable sur le résultat final. Les effets du transport, de la manipulation et du stockage sur site ainsi que la manière dont le travail est effectué ne peuvent être calculés à l'avance. Pour garantir que la fonction souhaitée est bien obtenue, des vérifications du bâtiment terminé doivent être effectuées sous forme de tests et de contrôles.

La technologie d'isolation moderne a permis de réduire les besoins théoriques en chaleur. Cela signifie toutefois que des défauts relativement petits, mais situés à des emplacements stratégiques, par exemple des joints non étanches ou une isolation mal installée, peuvent avoir des répercussions considérables sur la chaleur et le confort. Les tests de contrôle, par exemple la thermographie, ont montré leur utilité du point de vue du concepteur, de l'entrepreneur, du développeur, du gestionnaire du bâtiment et de l'utilisateur.

- Pour le concepteur, le plus important est de déterminer la fonction de différents types de structures, afin de concevoir ces structures de façon à prendre en compte les méthodes de travail et les besoins fonctionnels. Le concepteur doit également savoir comment les différents matériaux et les combinaisons de matériaux fonctionnent en pratique. Les essais et les vérifications, ainsi que l'expérience, permettent de réaliser le développement nécessaire dans ce domaine.
- L'entrepreneur doit effectuer davantage de tests et de vérifications afin de garantir que les structures remplissent les fonctions prévues et soient conformes aux exigences définies dans les réglementations établies par les autorités et dans les documents contractuels. L'entrepreneur doit chercher à connaître dès les premières étapes de la construction les modifications qui peuvent être nécessaires pour prévenir les défauts systématiques. Durant la construction d'un projet de construction en série, un contrôle doit donc être effectué sur les premiers appartements achevés. D'autres contrôles similaires doivent être effectués au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Cela permet d'éviter les défauts systématiques, les coûts inutiles ainsi que les problèmes ultérieurs. Ce contrôle est bénéfique à la fois pour les constructeurs et pour les usagers.

- Pour le développeur et le gestionnaire de la propriété, il est essentiel que les bâtiments soient contrôlés en tenant compte de l'économie de chaleur, de la maintenance (dommages causés par l'humidité ou l'infiltration d'humidité) et du confort des occupants (par exemple, surfaces refroidies et mouvements de l'air dans les zones occupées).
- Pour l'usager, le plus important est la conformité du produit fini avec les spécifications définies en termes d'isolation thermique et d'étanchéité à l'air des bâtiments. Pour un particulier, l'achat d'une maison représente un engagement financier considérable, par conséquent il souhaite savoir si des défauts de construction risquent d'entraîner des conséquences financières et des problèmes d'hygiène.

Les tests d'isolation et d'étanchéité d'un bâtiment ont des effets à la fois physiologiques et financiers.

L'évaluation physiologique du climat ambiant au sein d'un bâtiment est très subjective. Elle dépend de l'équilibre de chaleur individuel et de la perception de la température par un individu. Le climat ambiant dépend de la température de l'air dans les locaux et des surfaces environnantes. La vitesse de mouvement et le taux d'humidité de l'air ambiant jouent également un rôle. D'un point de vue physiologique, un courant d'air produit une sensation locale de froid sur un corps. La cause du courant d'air pouvant être :

- un mouvement d'air excessif dans une zone habitée à température normale ;
- un mouvement d'air normal dans une zone habitée à température trop basse ;
- un échange thermique important par rayonnement avec une surface froide.

Il est difficile d'évaluer les effets quantitatifs des tests et contrôles de l'isolation thermique d'un bâtiment.

Les enquêtes ont montré que les problèmes détectés au niveau de l'isolation thermique et de l'étanchéité d'un bâtiment créent des pertes de chaleur 20 à 30 % supérieures à ce qui était prévu. Le contrôle de la consommation d'énergie avant et après la mise en place de mesures correctives dans de vastes lotissements pavillonnaires et dans des résidences l'a également prouvé. Les chiffres cités ne sont probablement pas représentatifs des bâtiments en général, car les données ne sont pas applicables à tous les lotissements. Néanmoins, une analyse méticuleuse de l'isolation thermique et de l'étanchéité d'un bâtiment peut réduire la consommation d'énergie de 10 %.

La recherche a également démontré qu'une augmentation de la consommation d'énergie associée aux défauts pousse souvent les occupants à augmenter la température de l'habitation d'un ou plusieurs degrés au-dessus de la température normale, afin de compenser les effets désagréables du rayonnement thermique vers les surfaces refroidies et la sensation de mouvements d'air dans une pièce.

13.3.3 Sources de perturbations en thermographie

Lors d'une analyse thermographique, il est peu probable de confondre, en conditions normales, les variations de température causées par des problèmes d'isolation avec celles associées à des variations naturelles des coefficients U opérant sur les surfaces chaudes d'une structure.

Les variations de la température associées aux variations de la valeur U sont en général graduelles et symétriquement réparties sur la surface. Bien entendu, les variations de ce type peuvent se produire aux angles formés par les toitures et les planchers ainsi que dans les coins des murs.

Dans la plupart des cas, les variations de la température liées aux fuites d'air et aux défauts d'isolation sont représentées avec des contours aux formes caractéristiques et sont donc facilement repérables. Le motif de la température est en général asymétrique.

Lors d'une analyse thermographique, la comparaison des images obtenues avec d'autres images infrarouges peut faciliter l'interprétation.

Les principaux effets parasites pouvant survenir au cours de la thermographie sont :

- l'effet du soleil sur la surface thermographiée (rayon du soleil à travers une fenêtre) ;
- les radiateurs chauds tuyautés ;
- les lumières dirigées vers, ou placées à proximité d'une surface en cours de mesure ;
- les courants d'air (par exemple entrées d'air) dirigés vers la surface ;
- l'effet de la moisissure sur la surface.

Aucune thermographie ne doit être entreprise sur des surfaces ayant été exposées aux rayons du soleil. Pour éviter qu'une surface ne soit exposée aux rayons du soleil, couvrez les fenêtres en fermant les stores. Toutefois, les défauts des bâtiments liés à l'humidité ou les problèmes (généralement de moisissure) n'apparaissent que lorsqu'une source de chaleur est appliquée sur la surface (par ex. du soleil).

Pour obtenir des informations sur la détection de la moisissure, reportez-vous à la section 13.2.2 – A propos de la détection d'humidité à la page 55.

Sur une image infrarouge, un radiateur chaud apparaît sous forme de surface claire et brillante. Le radiateur fait monter la température de la surface du mur sur lequel il est installé, ce qui peut masquer certains défauts.

Pour éviter au maximum les effets parasites dus aux radiateurs chauds, éteignez-les un peu avant d'effectuer les mesures. Cependant, selon le type de construction (masse faible ou élevée), il peut être nécessaire de les éteindre quelques heures avant l'analyse thermographique. La température de l'air ambiant doit rester plus ou

moins constante pour ne pas affecter la température répartie sur la surface des structures. La temporisation des radiateurs électriques étant très courte, ils refroidissent assez rapidement une fois éteints (20 à 30 minutes).

Eteignez les lumières placées contre un mur avant de capturer une image infrarouge.

Durant une analyse thermographique, évitez la présence de courants d'air susceptibles d'affecter les surfaces analysées (par exemple, fenêtre ouverte, robinet ouvert ou ventilateur directement dirigé vers la surface mesurée).

Toute surface humide, par exemple suite à une condensation, provoque un effet important sur le transfert de chaleur à la surface et sur la température en surface. Lorsque l'humidité est présente sur une surface, il se produit une évaporation qui évacue la chaleur et fait baisser la température de la surface de plusieurs degrés. La plupart des ponts thermiques et des défauts d'isolation présentent un risque de condensation en surface.

Les types de perturbation décrits ici peuvent en principe être détectés et éliminés avant la mesure.

Si au cours de l'analyse thermographique, vous ne pouvez pas éliminer les facteurs de perturbation des surfaces mesurées, vous devez tenir compte de ces facteurs lors de l'interprétation et l'évaluation des résultats. Pour chaque mesure effectuée, notez en détail les conditions de l'analyse thermographique.

13.3.4 Température de surface et fuites d'air

Les défauts d'étanchéité à l'air dus à la présence de petits interstices dans la structure peuvent être détectés en mesurant la température de surface. En cas de pression négative dans le bâtiment en cours d'analyse, l'air s'introduit dans les locaux par ces interstices. La circulation d'air froid par les interstices d'un mur fait en général baisser la température des zones adjacentes. Il en résulte la formation d'une zone refroidie à la surface interne du mur, présentant une forme caractéristique. La thermographie peut permettre de détecter les zones refroidies. Les mouvements d'air à la surface des murs sont mesurables à l'aide d'un anémomètre (instrument de mesure de la vitesse de l'air). Si la pression est positive à l'intérieur du bâtiment, l'air chaud de la pièce est évacué par les interstices du mur, ce qui génère des zones chaudes en surface autour des fuites.

L'importance de la fuite d'air dépend en partie des interstices et en partie de la différence de pression créée par la structure.

13.3.4.1 Conditions de pression d'un bâtiment

Les causes principales de différence de pression dans la structure d'un bâtiment sont

- les conditions de vent autour d'un bâtiment ;

- les effets du système de ventilation ;
- les différences de température entre l'intérieur et l'extérieur (différence de pression thermique).

Les conditions réelles de pression à l'intérieur d'un bâtiment sont en général constituées par la combinaison de ces deux facteurs.

Le gradient de pression résultant à travers les différents éléments structurels est illustré par la figure de la page 83. Les effets irréguliers du vent sur un bâtiment font qu'en pratique, les conditions de pression peuvent être relativement variables et complexes.

Pour un vent constant, la loi de Bernoulli est appliquée :

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{constant}$$

où :

ρ	Densité de l'air en kg/m ³
v	Vitesse du vent en m/s
p	Pression statique en Pa

et où :

$$\frac{\rho v^2}{2}$$

désigne la pression dynamique et p la pression statique. Le total de ces pressions donne la pression totale.

La charge du vent contre une surface, soit une pression dynamique à la base, devient une pression statique au contact de la surface. L'amplitude de cette pression statique est notamment déterminée par la forme de la surface et son angle par rapport à la direction du vent.

La proportion de pression dynamique transformée en pression statique sur la surface (p_{stat}) est déterminée par ce que l'on appelle le facteur de concentration de contraintes :

$$C = \frac{p_{\text{stat}}}{\frac{\rho v^2}{2}}$$

Si $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$ (densité de l'air à $+15 \text{ }^\circ\text{C}$), il en résulte les pressions locales du vent suivantes :

$$p_{stat} = C \times \frac{\rho v^2}{2} = C \times \frac{v^2}{1.63} \text{ Pa}$$

10551803.a1

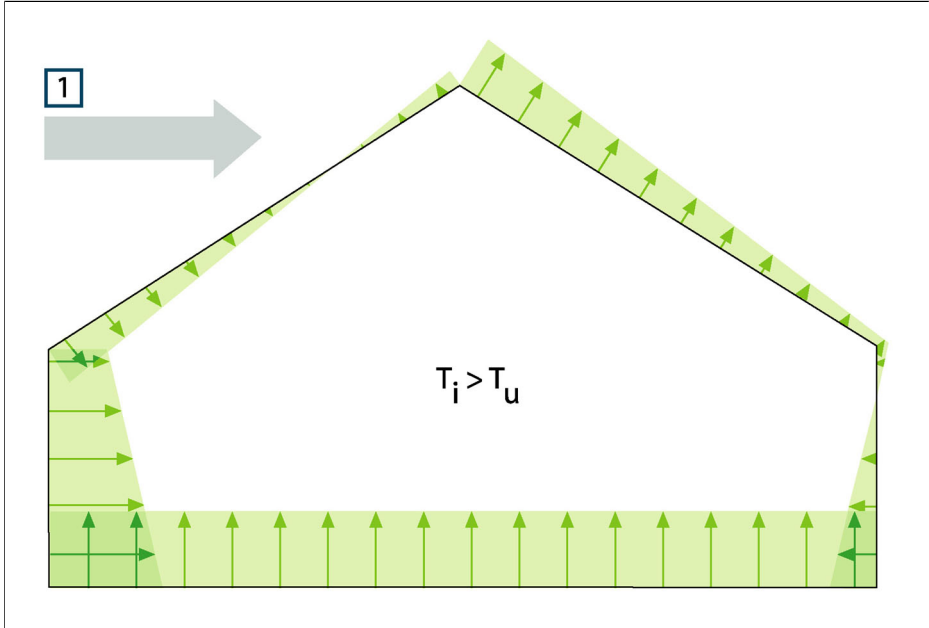


Figure 13.3 La répartition des pressions résultantes sur les surfaces porteuses d'un bâtiment dépend des effets du vent, de la ventilation et de la différence entre les températures internes et externes. 1: direction du vent ; T_u : température thermodynamique de l'air à l'extérieur, en K ; T_i : température thermodynamique de l'air à l'intérieur, en K.

Si la pression dynamique devient statique, alors $C = 1$. Vous trouverez des exemples de répartitions de facteurs de concentration des contraintes pour un établissement avec plusieurs directions de vent à la page 84.

Le vent provoque une pression négative interne sur le côté exposé au vent et une pression positive interne sur le côté à l'abri du vent. La pression de l'air à l'intérieur du bâtiment dépend des conditions de vent, des fuites du bâtiment et de leur répartition en fonction de la direction du vent. Si les fuites du bâtiment sont régulièrement réparties, la pression interne peut varier de $\pm 0.2 p_{stat}$. Si la plupart des fuites se trouvent sur le côté exposé au vent, la pression interne augmente un peu. Dans le cas contraire, si la plupart des fuites se trouvent sur le côté à l'abri du vent, la pression interne diminue.

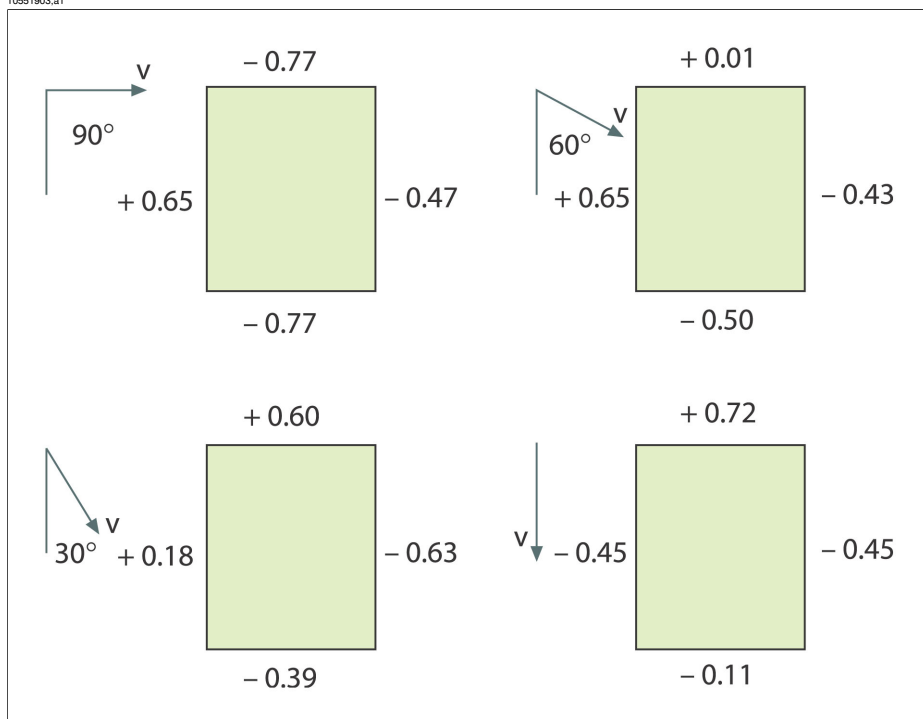


Figure 13.4 Répartition des valeurs du facteur de concentration des contraintes (C) sur un bâtiment, en fonction de la direction du vent et de la vitesse du vent (v).

Les conditions de vent peuvent considérablement varier au cours du temps ainsi qu'entre deux emplacements assez proches. Ce type de variations peut avoir des conséquences importantes sur les résultats des mesures thermographiques.

Des essais ont montré que la différence de pression sur une façade exposée à un vent de force moyenne d'environ 5 m/s est de 10 Pa.

La ventilation mécanique génère une pression positive ou négative constante à l'intérieur du bâtiment (selon la direction de la ventilation). Des recherches ont démontré que la pression négative générée par l'extraction mécanique (ventilateurs de cuisine) dans les petites maisons est généralement comprise entre 5 et 10 Pa. Au cours d'une extraction mécanique de l'air de ventilation, par exemple dans les blocs de plusieurs habitations, la pression négative est un peu plus élevée (10 à 50 Pa). Lorsque la ventilation est équilibrée (par contrôle mécanique de l'apport et de l'extraction d'air), le dispositif est en principe réglé de façon à générer une pression légèrement négative à l'intérieur du bâtiment (3 à 5 Pa).

La différence de pression provoquée par des différences de températures, appelée effet cheminé (différences d'étanchéité de l'air à des températures différentes), signifie qu'il existe une pression négative dans la partie la plus basse du bâtiment et une pression positive dans la partie la plus haute. En atteignant une certaine hauteur, une zone neutre contient des pressions identiques à l'intérieur et à l'extérieur. Reportez-vous à la figure page 86. Cette différence de pressions peut être décrite par le rapport suivant :

$$\Delta p = g \times \rho_u \times h \left(1 - \frac{T_u}{T_i} \right) \text{ Pa}$$

Δp	Différence de la pression de l'air au sein du bâtiment en Pa.
g	9,81 m/s ²
ρ_u	Densité de l'air en kg/m ³
T_u	Température thermodynamique de l'air à l'extérieur, en K.
T_i	Température thermodynamique de l'air à l'intérieur, en K
h	Distance depuis la zone neutre en mètres

Si $\rho_u = 1,29 \text{ kg/m}^3$ (densité de l'air à une température de 273 K et $\sim 100 \text{ kPa}$), il en résulte :

$$\Delta p \approx 13 \times h \left(1 - \frac{T_u}{T_i} \right)$$

Une différence de +25 °C entre les températures ambiantes intérieures et extérieures, génère une différence de pression à l'intérieur de la structure d'environ 1 Pa par mètre en hauteur.

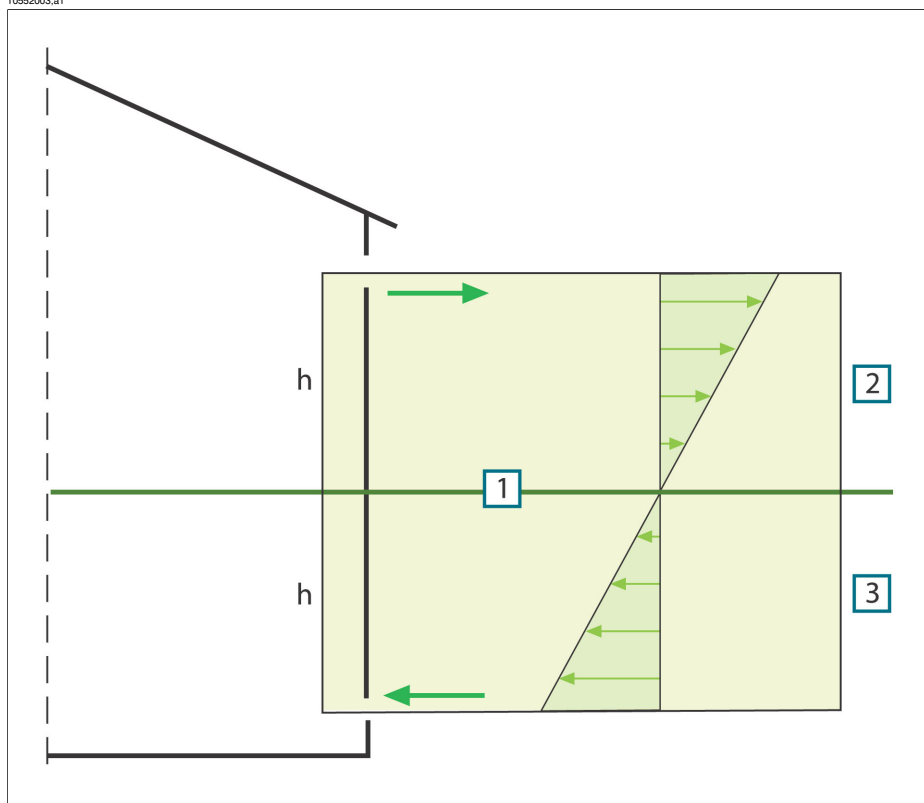


Figure 13.5 Répartition des pressions sur un bâtiment avec deux ouvertures et où la température extérieure est inférieure à la température intérieure. 1: Zone neutre ; 2: Pression positive ; 3: Pression négative ; h: Distance de la zone neutre en mètres.

La position de la zone neutre peut varier en fonction des fuites du bâtiment. Si les fuites sont régulièrement réparties verticalement, cette zone sera située à mi hauteur environ du bâtiment. Si la plupart des fuites se trouvent dans la partie inférieure du bâtiment, la zone neutre sera située plus bas. Si la plupart des fuites se trouvent dans la partie supérieure, la zone neutre sera située plus haut. La présence d'une cheminée sur le toit modifie considérablement la position de la zone neutre et peut même entraîner une pression négative sur l'ensemble du bâtiment. Cette situation se produit plutôt dans les petites structures.

Dans une construction de grande taille, par exemple de type industriel, étant donné les fuites au niveau des portes et des fenêtres dans la partie inférieure du bâtiment, la zone neutre est située à environ un tiers de la hauteur du bâtiment.

13.3.5 Conditions des mesures et environnement atmosphérique

Résumé des conditions de mesure lors de la prise de thermogrammes dans le domaine du bâtiment.

L'imagerie thermographique doit être réalisée de façon à réduire au maximum les effets des perturbations des facteurs climatiques externes. L'imagerie doit donc être réalisée à l'intérieur du bâtiment, c'est-à-dire à l'endroit où le bâtiment est chaud, afin d'analyser les surfaces chaudes de la structure.

La thermographie en extérieur permet d'obtenir des mesures de référence de la surface des grandes façades. Dans certains cas, par exemple lorsque l'isolation est de très mauvaise qualité ou lorsque la pression interne est positive, les mesures en extérieur peuvent être utiles. Même lorsque l'analyse concerne des installations situées à l'intérieur de l'enveloppe atmosphérique d'un bâtiment, l'imagerie thermographique à l'extérieur du bâtiment peut s'avérer utile.

Les conditions d'analyse recommandées sont les suivantes :

- La différence de température de l'air dans la partie souhaité du bâtiment doit atteindre au moins +10 °C pendant plusieurs heures avant la prise d'images thermographiques et doit durer pendant toute la durée de procédure. Pendant la même période, la différence de température ambiante ne doit pas varier de plus de ± 30 % de la différence relevée lorsque l'imagerie thermographique commence. Lors de l'imagerie thermographique, la température ambiante intérieure ne doit pas varier de plus de ± 2 °C.
- Durant plusieurs heures avant l'imagerie thermographique et durant celle-ci, évitez toute lumière solaire sur la partie du bâtiment à analyser.
- Pression négative au sein du bâtiment entre 10 et 50 Pa environ.
- Lorsque vous effectuez des images thermographiques pour situer des fuites d'air dans l'enceinte du bâtiment, les exigences en terme de conditions de mesure peuvent être moins strictes. Une différence de 5 °C entre les températures ambiantes intérieures et extérieures est suffisante pour détecter de tels défauts. Pour détecter des fuites d'air, certaines conditions doivent pourtant être respectées en matière de pression différentielle. Une différence de 10 Pa environ devrait être suffisante.

13.3.6 Interprétation des images infrarouges

L'objectif principal de la thermographie est de localiser les erreurs et défauts d'isolation thermique dans les murs extérieurs et les sols pour déterminer leur nature et leur étendue. Le but de la thermographie est de confirmer si le mur examiné dispose bien des caractéristiques d'isolation et d'étanchéité promises. Les caractéristiques escomptées d'isolation thermique du mur, déterminées par sa conception, peuvent être converties en une répartition probable de la température de surface pour la surface analysée si les conditions de mesure au moment de l'analyse sont connues.

Dans la pratique, la méthode repose sur les éléments suivants :

Les essais en laboratoire ou sur le terrain permettent de définir la répartition des températures attendues des structures de murs courantes, sous forme d'images infrarouges caractéristiques de comparaison incluant à la fois des structures sans défaut et des structures présentant des défauts.

Vous trouverez des exemples d'images infrarouges caractéristiques dans la section 13.2 – Analyses de terrain typiques à la page 53.

Si les images infrarouges d'éléments de structure capturées lors de mesures sur le terrain sont destinées à servir de support de comparaison, il est indispensable de décrire en détail la composition de la structure, la manière dont elle a été construite et les conditions de mesure au moment de la capture des images infrarouges.

Au cours de l'analyse thermographique, afin de pouvoir établir des observations sur les causes des écarts par rapport aux résultats attendus, des pré-requis en physique, métrologie et ingénierie des structures sont également indispensables.

Voici très brièvement les principes de l'interprétation des images infrarouges capturées au cours de mesures sur le terrain :

Sélectionnez une image infrarouge de comparaison représentant une structure exempte de défaut, en fonction de la structure du mur analysé et des conditions de la mesure effectuée. Comparez ensuite cette image à une image infrarouge capturée sur le bâtiment analysé. Notez tout écart (qui ne puisse pas être justifié par la conception ou la structure ou par les conditions des mesures) comme défaut d'isolation possible. La nature et l'étendue des défauts peuvent en général être déterminés à l'aide des images infrarouges de comparaison présentant plusieurs défauts.

Si aucune image infrarouge de comparaison n'est appropriée, vous devrez effectuer l'évaluation et l'interprétation à partir de votre expérience. Cette méthode d'analyse requiert davantage de précision de raisonnement.

Lors de l'interprétation d'une image infrarouge, vous devez rechercher les éléments suivants :

- Uniformité de la luminosité sur les images infrarouges des surfaces exemptes de pont thermique
- Régularité et occurrences des surfaces froides, par exemples poteaux et coins
- Contours et formes caractéristiques de la surface froide
- Différences de température mesurées entre la température normale de la surface de la structure et la zone refroidie sélectionnée
- Continuité et uniformité de la courbe isotherme à la surface de la structure. Dans le logiciel de la caméra, la fonction isotherme est appelée **Isotherme** ou **Alarme couleur**, selon le modèle de caméra.

Les écarts et les irrégularités dans l'apparence de l'image infrarouge indiquent souvent des défauts d'isolation. L'apparence des images infrarouges de structures contenant des défauts d'isolation peut varier énormément. Certains types de défaut d'isolation présentent une forme caractéristique sur l'image infrarouge.

La section 13.2 – Analyses de terrain typiques à la page 53 montre des exemples d'interprétations d'images infrarouges.

Lorsque vous capturez des images infrarouges dans le même bâtiment, conservez les mêmes paramètres de la caméra infrarouge pour toutes les images réalisées dans les différentes zones, car cela facilite la comparaison des différentes zones.

13.3.7 Humidité et point de rosée

13.3.7.1 Humidité relative et absolue

L'humidité peut être exprimée de deux façons différentes, soit en tant qu'*humidité relative*, soit en tant qu'*humidité absolue*. L'humidité relative est exprimée en pourcentage et représente la quantité d'eau qu'un certain volume d'air peut contenir à une certaine température. L'humidité absolue, quant à elle, est exprimée en pourcentage et représente la quantité d'eau par unité de volume du matériau. La deuxième façon d'exprimer l'humidité est généralement utilisée pour mesurer le degré d'humidité du bois ou des autres matériaux de construction.

Plus la température de l'air est élevée, plus la quantité d'eau que peut contenir un certain volume d'air est élevée. Le tableau suivant définit les quantités maximales d'eau dans l'air à différentes températures.

Figure 13.6 A : Température en degrés Celsius ; **B** : Quantité maximale d'eau exprimée en g/m³ (au niveau de la mer)

A	B	A	B	A	B	A	B
30,0	30,44	20,0	17,33	10,0	9,42	0,0	4,86
29,0	28,83	19,0	16,34	9,0	8,84	-1,0	4,49
28,0	27,29	18,0	15,40	8,0	8,29	-2,0	4,15
27,0	25,83	17,0	14,51	7,0	7,77	-3,0	3,83
26,0	24,43	16,0	13,66	6,0	7,28	-4,0	3,53
25,0	23,10	15,0	12,86	5,0	6,81	-5,0	3,26
24,0	21,83	14,0	12,09	4,0	6,38	-6,0	3,00
23,0	20,62	13,0	11,37	3,0	5,96	-7,0	2,76
22,0	19,47	12,0	10,69	2,0	5,57	-8,0	2,54
21,0	18,38	11,0	10,04	1,0	5,21	-9,0	2,34

Figure 13.7 A : Température en degrés Fahrenheit ; **B** : Quantité maximale d'eau en grains/pieds³ (au niveau de la mer)

A	B	A	B	A	B	A	B
86,0	13,30	68,0	7,58	50,0	4,12	32,0	2,12
84,2	12,60	66,2	7,14	48,2	3,86	30,2	1,96
82,4	11,93	64,4	6,73	46,4	3,62	28,4	1,81
80,6	11,29	62,6	6,34	44,6	3,40	26,6	1,67
78,8	10,68	60,8	5,97	42,8	3,18	24,8	1,54
77,0	10,10	59,0	5,62	41,0	2,98	23,0	1,42
75,2	9,54	57,2	5,29	39,2	2,79	21,2	1,31
73,4	9,01	55,4	4,97	37,4	2,61	19,4	1,21
71,6	8,51	53,6	4,67	35,6	2,44	17,6	1,11
69,8	8,03	51,8	4,39	33,8	2,28	15,8	1,02

Exemple :

L'humidité relative d'un certain volume d'air à une température de 30 °C est de 40 % d'humidité relative. La quantité d'eau dans 1 m³ d'air à 30 °C = 30,44 × humidité relative = 30,44 × 0,40 = 12,18 g.

13.3.7.2 Définition du point de rosée

Le point de rosée correspond à la température à laquelle se produit la condensation de l'humidité contenue dans un certain volume d'air.

Exemple :

L'humidité relative d'un certain volume d'air à une température de 30 °C est de 40 % d'humidité relative. La quantité d'eau dans 1 m³ d'air à 30 °C = 30,44 × humidité relative = 30,44 × 0,40 = 12,18 g. Dans le tableau ci-dessus, recherchez la température à laquelle la quantité d'eau dans l'air est la plus proche de 12,18 g. La réponse est +14 °C ce qui correspond à peu près au point de rosée.

13.3.8 Extrait de la note technique 'Evaluation d'un pont thermique et de la continuité d'isolation' (exemple du Royaume-Uni)

13.3.8.1 Auteurs

La présente note technique a été rédigée par un groupe de travail, composé de thermographistes spécialistes et de consultants en recherche, qui ont pu bénéficier de conseils de tiers. Le présent document a ainsi pu recevoir un accueil très favorable de l'ensemble des secteurs industriels.

La reproduction du contenu de la présente note technique a été réalisée avec l'aimable autorisation de UKTA (United Kingdom Thermography Association).

UK Thermography Association
c/o British Institute of Nondestructive Testing
1 Spencer Parade
Northampton NN1 5AA
Royaume-Uni

Tél. : +44 (0)1604 630124

Télécopie : +44 (0)1604 231489

13.3.8.2 *Introduction*

Au cours de ces dernières années, les équipements, les applications, les logiciels et les connaissances liés à la thermographie se sont considérablement développés. La technologie a progressivement été intégrée aux pratiques courantes, ce qui a entraîné des demandes plus importantes dans la constitution de manuels d'application, l'établissement de normes et les besoins de formation.

L'UKTA publie la présente note pour quantifier de manière cohérente les résultats de l'étude « Continuité de l'isolation thermique ». Le présent document doit pouvoir servir de guide de référence pour répondre aux exigences de la réglementation en matière de construction et permettre au thermographiste de créer un rapport de validation ou de refus.

13.3.8.3 *Informations préalables*

La thermographie permet de détecter les variations de température en surface à 0,1 K près. Des images graphiques peuvent ensuite illustrer la répartition de la température sur la surface d'un bâtiment.

Les variations des propriétés thermiques des bâtiments, défaut ou absence d'isolation par exemple, entraînent des variations de température de surface des deux côtés de la structure. Ces écarts sont ainsi visibles pour le thermographiste. Cependant, d'autres facteurs (sources locales de chaleur, réflexions ou fuite d'air) peuvent être à l'origine de ces variations.

Le jugement d'un professionnel est souvent nécessaire afin de déterminer si la variation de température est due à de réelles défaillances d'isolation ou à d'autres facteurs. Les thermographistes sont de plus en plus sollicités. Pourtant, sans soutien adéquat, la définition de niveaux de variations acceptables ou non peut se révéler difficile.

La norme actuelle concernant l'imagerie thermique de bâtiment au Royaume-Uni est BS EN 13187:1999 (BS EN 13187:1999, Thermal Performance of Buildings—Qualitative detection of thermal properties in building envelopes—Infrared method (ISO 6781:1983 modifiée)). Toutefois, le thermographiste doit interpréter l'image et la frontière entre

les variations acceptables ou non est plutôt floue. Vous trouverez des conseils sur certaines anomalies thermiques dans les manuels du BINDT à la section Imagerie thermique (Infrared Thermography Handbook; Volume 1, Principles and Practise, Norman Walker, ISBN 0903132338, Volume 2, Applications, A. N. Nowicki, ISBN 090313232X, BINDT, 2005).

13.3.8.3.1 Conditions préalables

Une analyse thermographique visant à démontrer la continuité de l'isolation, les zones de ponts thermiques et la conformité aux réglementations en matière de construction doit comporter les éléments suivants :

- Anomalies thermiques.
- Différencier les anomalies thermiques effectives, où les différences de température sont causées par des défauts d'isolation thermique, de celles causées par différents facteurs (courant d'air localisé, réflexion et émissivité).
- Dénombrer les zones affectées par rapport au nombre de zones isolées.
- Juger si les anomalies et l'isolation thermique générale du bâtiment sont acceptables.

13.3.8.4 Jugement quantitatif des anomalies thermiques

Une analyse thermographique peut montrer des différences de températures apparentes pour les zones contenues dans le champ de vision. Cependant, pour qu'une analyse soit exploitable, toutes les défaillances apparentes doivent être systématiquement détectées. Vous devez les évaluer en fonction d'un ensemble de critères pré-établis et résoudre les anomalies qui ne proviennent pas de défaillances réelles. Évaluez les réelles défaillances et communiquez les résultats au client sous forme de rapport.

13.3.8.4.1 Sélection du paramètre de température critique

La feuille d'informations du BRE (British Research Establishment) IP17/01 (Information Paper IP17/01, Assessing the Effects of Thermal Bridging at Junctions and Around Openings. Tim Ward, BRE, 2001) aborde la question des températures minimales internes de surface de niveau acceptable, ainsi que les valeurs du facteur de température de surface critique, f_{CRsi} . L'utilisation d'un facteur de température de surface permet d'effectuer des analyses dans n'importe quelle condition thermique et de montrer les zones qui présentent un risque de condensation ou de moisissure dans certaines circonstances.

La température de surface dépend en grande partie des températures intérieures et extérieures au moment de l'analyse, mais un « Facteur de température de surface » (f_{Rsi}) permet de ne pas dépendre des conditions absolues. Ce facteur correspond au rapport de la baisse de température dans le matériau du bâtiment par la baisse totale de la température entre l'air intérieur et extérieur.

Pour des analyses internes : $f_{Rsi} = (T_{si} - T_e)/(T_i - T_e)$

T_{si} = température de surface interne

T_i = température de l'air interne

T_e = température de l'air externe

Pour f_{CRsi} , 0,75 est la valeur de référence pour les nouveaux bâtiments. En effet, l'utilisation optimale n'entre pas en ligne de compte lors des tests de « continuité d'isolation » ou de « pont thermique ». Toutefois, pour les bâtiments rénovés ou prolongés, des piscines par exemple, les analyses internes peuvent être utiles dans des circonstances exceptionnelles.

13.3.8.4.2 Méthode alternative : utilisation des températures de surface uniquement

De nombreuses raisons portent à croire que les analyses basées uniquement sur les températures de surface, c'est-à-dire sans prendre en compte la température de l'air, peuvent être tout à fait fiables.

- Les différentes couches de matériaux contenues dans un bâtiment rendent difficile la mesure des températures de l'air interne : est-ce la température moyenne de l'air, un niveau faible, un niveau élevé ou la température du niveau de l'anomalie ? A quelle distance d'un mur la mesure doit-elle être effectuée ?
- Les effets des rayonnements, comme ceux du ciel en pleine nuit, rendent difficile l'exploitation de la température de l'air externe. Il est courant que la température de surface extérieure d'un bâtiment soit inférieure à celle de la température de l'air. Ce phénomène est causé par les faibles rayonnements qui peuvent descendre jusqu'à -50 °C (-58 °F). Ces résultats peuvent être constatés à l'oeil nu : il est fréquent de voir de la rosée ou du givre sur les surfaces de bâtiments, même lorsque la température de l'air ne descend pas en dessous du point de rosée.
- Le concept des valeurs U repose sur les « températures environnementales » de chaque côté de la structure. Beaucoup d'analystes ont tendance à négliger cet aspect.
- Les deux températures associées au transfert de chaleur à travers le matériau du bâtiment (et tout autre solide) sont les températures de surface de chaque côté d'un bâtiment.
- Par conséquent, les températures de surface permettent plus facilement d'effectuer plusieurs fois l'analyse.
- Les températures de surface utilisées sont les températures de surface moyennes relevées sur le même type de matériau, à l'intérieur et à l'extérieur, et à proximité de l'anomalie. La température de l'anomalie, ainsi qu'un niveau seuil sont définis en fonction de ces températures avec le facteur de température de surface critique.
- Toutefois, le thermographe doit faire attention aux réflexions d'objets à des températures inhabituelles provenant d'éléments faisant face aux surfaces du bâtiment.

- Le thermographiste doit également comparer les différentes façades extérieures dirigées vers différentes directions pour savoir si une chaleur résiduelle due aux rayonnements solaires pourrait jouer sur les températures des surfaces extérieures.
- Les analyses en extérieur ne doivent pas être effectuées sur une surface dont la valeur du $T_{si} - T_{so}$ est supérieure de plus de 10 % à la valeur du $T_{si} - T_{so}$ du côté nord ou du côté le plus proche du Nord.
- Pour une défaillance entraînant une valeur inférieure à 0,75, valeur de référence du IP17/01, les facteurs de surface critiques seront de 0,78 pour la surface interne et de 0,93 pour la surface externe.

Le tableau ci-dessous répertorie les températures de surface externes et internes au niveau d'une anomalie qui entraînerait une défaillance selon IP17/01. Le tableau rend également compte du niveau de détérioration de l'isolation thermique nécessaire pour causer ce type d'anomalie.

Exemple de revêtement léger mal isolé	Zone bien isolée	Zone mal isolée
Température extérieure en °C	0	0
Température de surface intérieure en °C	19,1	15,0
Température de surface extérieure en °C	0,3	1,5
Facteur de surface selon IP17/01	0,95	0,75
Facteur de température de surface extérieure critique, d'après IP17/01		0,92
Epaisseur du matériau d'isolation à fournir pour atteindre ce résultat, en mm	80	5,1
Valeur U locale W/m²K	0,35	1,92
Facteur de surface UKTA TN1		0,78
Facteur de surface UKTA TN1 en extérieur		0,93

Remarques à propos du tableau

1 Valeurs des résistances de surface prises à partir de ADL2 2001 :

- Surface interne 0,13 m²K/W
- Surface externe 0,04 m²K/W

Source : BS EN ISO 6946 (BN EN ISO 6946:1997 Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method).

2 L'isolation thermique utilisée dans ce cas précis possède une conductivité de 0,03 W/m K.

3 La différence de température entre une anomalie et les zones bien isolées est de 1,2 degrés à l'extérieur et de 4,1 degrés à l'intérieur.

- 4 Le facteur de température de surface UKTA TN1 pour les analyses internes est de :

$$F_{si} = (T_{sia} - T_{so}) / (T_{si} - T_{so})$$

où :

T_{sia} = température de surface interne sur une anomalie

T_{so} = température de surface externe (zone bien isolée)

T_{si} = température de surface interne (zone bien isolée)

- 5 Le facteur de température de surface UKTA TN1 pour les analyses externes est de :

$$F_{so} = (T_{soa} - T_{si}) / (T_{so} - T_{si})$$

avec T_{soa} = température de surface externe au niveau de l'anomalie

13.3.8.4.3 *Sélection d'une zone maximale de défaillance*

La zone maximale de défaillance est une question relevant du contrôle de qualité. On peut avancer qu'aucune zone présentant un fort risque de condensation, de moisissure ou une isolation défaillante ne devrait être tolérée et que toute anomalie de ce type devrait être signalée dans un rapport. Cependant, on tolère généralement une marge de 0,1 % pour les surfaces exposées. Cette valeur correspond à la zone maximale de défaillance acceptée ; elle reste conforme à la réglementation en matière de construction et représente un mètre carré pour mille.

13.3.8.4.4 *Mesure d'une température de surface*

La mesure d'une température de surface est la fonction même du système d'imagerie infrarouge. Une fois formé, le thermographiste saura reconnaître, argumenter et créer un rapport sur la variation d'émissivité et le pouvoir de réflexion des surfaces étudiées.

13.3.8.4.5 *Mesure d'une zone de défaillances*

La mesure d'une zone de défaillance peut être effectuée de deux manières : par un comptage des pixels grâce au logiciel d'analyse thermique ou à la plupart des logiciels de feuilles de calculs. Conditions requises :

- la distance entre la caméra et l'objet doit être précisément mesurée à l'aide d'un outil de mesure laser,
- la distance de la cible doit être mesurée en prenant en compte le champ de vision instantané du système d'imagerie,
- la modification de l'angle perpendiculaire entre la caméra et la surface de l'objet doit être justifiée.

Les bâtiments sont constitués de multiples caractéristiques de construction (fenêtres, baies vitrées, luminaires, émetteurs de chaleur, équipement de refroidissement, canalisations et conducteurs électriques), peu propices à la conduite d'une série d'analyses. Toutefois, il est important de considérer les joints et les connexions utilisés pour ces types de construction au cours d'une analyse.

13.3.8.5 Conditions et équipement

Pour conduire la meilleure analyse d'isolation thermique qui soit, il est important de prendre également en compte les conditions ambiantes et d'opter pour la technique thermographique la plus adaptée.

Les anomalies thermiques ne seront détectables qu'aux endroits subissant effectivement des différences de température et où les phénomènes environnementaux sont pris en compte. Voici les conditions minimales pour répondre à ces exigences :

- Les différences de température au sein du bâtiment doivent être supérieures à 10 °C.
- La différence de température entre l'air à l'intérieur et l'air ambiant doit être supérieure à 5 °C durant les dernières vingt-quatre heures précédant l'analyse.
- La température de l'air externe doit être d'environ ± 3 °C le temps de l'analyse, ainsi qu'une heure avant l'analyse.
- La température de l'air externe doit être d'environ ± 10 °C durant les dernières vingt-quatre heures qui précèdent l'analyse.

De plus, les analyses externes doivent être conformes aux critères suivants :

- Les surfaces ne doivent pas être exposées au rayonnement solaire ni aux effets résiduels d'un rayonnement solaire. Pour s'en assurer, le thermographiste doit comparer les températures de surface des côtés opposés d'un bâtiment.
- L'analyse ne doit pas être effectuée lorsqu'il pleut ou lorsqu'il vient de pleuvoir.
- Les surfaces du bâtiment à inspecter doivent être parfaitement sèches.
- La vitesse du vent ne doit pas dépasser 10 mètres par seconde.

La température n'est pas la seule condition à prendre en compte lors de la planification de l'analyse thermographique d'un bâtiment. Par exemple, des inspections externes peuvent être influencées par des émissions et des réflexions de rayonnements provenant de bâtiments adjacents ou d'un ciel sans nuage. La chaleur directe du soleil est un facteur encore plus significatif.

En outre, lorsque les températures d'arrière-plan diffèrent de plus de 5 K par rapport à celles de l'air, qu'elles soient relevées en intérieur ou en extérieur, elles doivent être mesurées sur toutes les surfaces affectées afin de permettre une parfaite exactitude du résultat de la température de surface à mesurer.

13.3.8.6 Analyse

Voici quelques conseils destinés au thermographiste.

L'analyse doit pouvoir rassembler assez d'informations sur les conditions thermiques et démontrer que toutes les surfaces ont été inspectées et s'assurer ainsi que toutes les anomalies thermiques ont fait l'objet d'un rapport et d'une évaluation.

Avant de commencer une analyse thermique, toutes les données environnementales doivent d'abord être collectées :

- Température interne dans la zone de l'anomalie.
- Température externe dans la zone de l'anomalie.
- Emissivité de la surface.
- Température de l'arrière-plan.
- Distance de la surface.

Par interpolation, déterminez la température seuil à utiliser.

- Pour les analyses internes, la température de surface seuil (T_{sia}) est de $T_{sia} = f_{si}(T_{si} - T_{so}) + T_{so}$. Vous devrez alors localiser les zones où la température de surface est inférieure à ce seuil.
- Pour les analyses externes, la température seuil (T_{soa}) est de $T_{soa} = f_{so}(T_{so} - T_{si}) + T_{si}$. Vous devrez alors localiser les zones où la température de surface est supérieure à ce seuil.

Les images des anomalies doivent être exploitables :

- L'image doit respecter la géométrie du mur ou du toit.
- L'angle de vision doit être pratiquement perpendiculaire à la surface photographiée. Les sources d'interférence d'origine infrarouge (lumières, émetteurs de chaleur, conducteurs électriques, éléments réfléchissants) sont ainsi minimisées.

La méthode d'analyse dépend, il est vrai, du logiciel utilisé, mais les étapes principales sont les suivantes :

Obtenir une image de chaque anomalie ou groupe d'anomalies.

- Utiliser un logiciel d'analyse pour insérer la zone d'anomalie dans l'image, en prenant garde de ne pas inclure de détails de construction qui ne concernent pas l'étude.
- Calculer la zone inférieure à la température seuil (pour les analyses internes) ou supérieure à la température seuil (pour les analyses externes). Cette zone constituera la zone de défaillance. Certaines anomalies qui apparaissent lors de l'analyse peuvent ne pas s'afficher à ce stade de l'étude.

- Ajouter les zones de défaillance de toutes les images $\sum A_d$.
- Calculer la surface totale exposée du bâtiment. Cette surface correspond à tous les murs et au toit. On utilise généralement la surface externe. Pour un bâtiment conventionnel, on calcule cette surface à partir de la largeur, de la longueur et de la hauteur totales.

$$A_t = (2h(L + w)) + (Lw)$$

- Identifier la zone de défaillance critique A_c . Dans un premier temps, cette valeur est définie à un millième (soit 0,1 %) de la surface totale.

$$A_c = A_t/1000$$

- Si $\sum A_d < A_c$, on considère que l'intégralité du bâtiment possède une isolation « raisonnablement continue ».

13.3.8.7 Rapport

Les rapports doivent certifier une acceptation ou un refus, être conformes aux exigences du client et inclure au minimum les informations requises et édictées par la norme BEN 13187. Les données suivantes sont obligatoires et permettent de réitérer l'analyse en cas de besoin.

- Énoncé de l'objectif et des principes du test.
- Emplacement, orientation, date et heure de l'analyse.
- Référence d'identification unique.
- Nom et qualifications du thermographe.
- Type de construction.
- Conditions météorologiques, vitesse et direction du vent, date de la dernière précipitation, ensoleillement, degré de nébulosité.
- Températures ambiantes à l'intérieur et à l'extérieur avant l'analyse, au début de l'analyse et à chaque capture d'image. La température de l'air, ainsi que la température énergétique doivent également être relevées.
- Signalement de toute modification par rapport aux critères du test.
- Équipement utilisé, date du dernier étalonnage, défaillances connues.
- Nom, affiliation et qualifications de l'opérateur.
- Type, ampleur et situation de chaque défaillance observée.
- Résultats des mesures et recherches complémentaires, le cas échéant.
- Indexation et archivage des rapports par le thermographe.

13.3.8.7.1 Considérations et limites

Le choix d'effectuer des analyses internes ou externes repose sur plusieurs facteurs :

- Rendez-vous sur les lieux. Les bâtiments dont les surfaces internes et externes sont peu exposées (faux plafonds, matériels superposés sur les murs, etc.) peuvent ne pas être adaptés à ce type d'analyse.
- Emplacement de l'isolation thermique. Les analyses donnent généralement de meilleurs résultats sur le côté le plus proche de l'isolation thermique.
- Emplacement de matériels lourds. Les analyses donnent généralement de moins bons résultats sur le côté le plus proche du matériel lourd.
- Objectif de l'analyse. Si l'analyse est effectuée dans le but de montrer des risques de condensation et de moisissure, elle doit être interne.
- Emplacement de verre, métal brut et autres matériels hautement réfléchissants. Les analyses donnent généralement de moins bons résultats sur des surfaces hautement réfléchissantes.

- Les défaillances produisent généralement une différence de température moins importante sur la face extérieure d'un mur, exposé aux courants d'air. En revanche, une isolation défailante ou totalement absente au niveau d'une surface externe sera plus facilement détectable depuis l'extérieur.

13.4 *Clause légale*

13.4.1 **Copyright**

Certaines sections et/ou images qui apparaissent dans ce chapitre sont protégées par des droits d'auteur des sociétés ou entreprises suivantes :

- FORMAS—The Swedish Research Council for Environment, Agricultural Sciences and Spatial Planning, Stockholm, Sweden
- ITC—Infrared Training Center, Boston, MA, United States
- Stockton Infrared Thermographic Services, Inc., Randleman, NC, United States
- Professional Investigative Engineers, Westminster, CO, United States
- United Kingdom Thermography Association (UKTA)

13.4.2 **Formation et certification**

Les inspections thermographiques des bâtiments nécessitent une formation et une expérience importantes et éventuellement une certification d'un comité national ou régional de normalisation. Cette section est constituée uniquement une introduction à la thermographie du bâtiment. Nous recommandons fortement à l'utilisateur de suivre les formations appropriées.

Pour obtenir des informations sur une formation à la technique infrarouge, veuillez accéder au site Web suivant :

<http://www.infraredtraining.com>

13.4.3 **Code national ou régional du bâtiment**

Les structures des bâtiments commentées dans ce chapitre peuvent différer d'un pays à l'autre du point de vue de la construction. Pour de plus amples informations sur les détails de construction et les procédures normalisées, consultez toujours les codes de bâtiment nationaux ou régionaux.

14 A propos de la société FLIR Systems

FLIR Systems a été fondée en 1978 comme pionnier du développement de systèmes d'imagerie infrarouge haute performance et est aujourd'hui leader mondial dans le domaine de la conception, de la fabrication et de la commercialisation de systèmes d'imagerie thermique destinés à un vaste champ d'applications commerciales, industrielles et gouvernementales. Aujourd'hui, FLIR Systems inclut l'historique de quatre grandes sociétés jalonné de réalisations exceptionnelles dans le domaine de la technologie infrarouge depuis 1965 — la société suédoise AGEMA Infrared Systems (auparavant nommée AGA Infrared Systems), et les trois sociétés américaines Indigo Systems, FSI et Inframetrics.

10722703.a2



Figure 14.1 A GAUCHE : Thermovision® modèle 661 de 1969. La caméra pesait environ 25 kg, l'oscilloscope 20 kg et le trépied 15 kg. L'opérateur a également utilisé un groupe électrogène de 220 V CA et un récipient de 10 l d'azote liquide. A gauche de l'oscilloscope, on distingue le Polaroid (6 kg). **A DROITE :** FLIR i5 de 2008. Poids : 0,34 kg, batterie comprise.

La société a vendu plus de 40 000 caméras infrarouges dans le monde, destinées à des applications telles que la maintenance conditionnelle, la recherche et le développement, les essais non destructifs, la surveillance et l'automatisation, la vision industrielle, etc.

FLIR Systems possède trois sites de fabrication implantés aux Etats-Unis (Portland, OR, Boston, MA, Santa Barbara, CA) et un en Suède (Stockholm). La société possède également des antennes commerciales en Allemagne, en Belgique, au Brésil, en

Chine, aux Etats-Unis, en France, en Grande-Bretagne, à Hong Kong, en Italie, au Japon et en Suède, dotées d'un réseau mondial d'agents et de distributeurs, qui permettent de servir nos clients partout dans le monde.

FLIR Systems fait preuve d'une innovation leader dans le secteur des caméras infrarouges. Nous anticipons la demande du marché en améliorant les caméras déjà proposées et en développant de nouveaux modèles. La société fut la première à développer une caméra portable fonctionnant sur batterie et destinée aux inspections industrielles, ainsi qu'une caméra infrarouge non refroidie, pour ne mentionner qu'elles.

FLIR Systems gère elle-même la fabrication de tous les composants électroniques et mécaniques de ses caméras. De la conception et de la fabrication du détecteur jusqu'au tests finaux et à l'étalonnage, en passant par les objectifs et les systèmes électroniques, toutes les étapes de la production s'effectuent sur site et sont supervisées par nos propres ingénieurs. Nos spécialistes ont une parfaite maîtrise de la technologie infrarouge, ce qui permet de garantir une précision et une fiabilité totales de tous les principaux composants qu'abrite une caméra infrarouge.

14.1 *Bien plus qu'une simple caméra infrarouge*

Chez FLIR Systems, nous savons que notre travail ne s'arrête pas à la fabrication de systèmes de caméras infrarouges, aussi performants soient-ils. L'intégration d'un logiciel au système de caméra infrarouge permet de stimuler la productivité de leurs détenteurs. Des logiciels spécialement conçus pour la maintenance conditionnelle, la recherche et le développement et la surveillance ont été développés par nos ingénieurs. La plupart des logiciels sont disponibles en plusieurs langues.

Nos caméras infrarouges sont fournies avec des accessoires pour que votre équipement puisse s'adapter aux applications infrarouges les plus pointues.

14.2 *Communiquer notre savoir*

Nos caméras sont conçues pour offrir un maximum de convivialité à leurs utilisateurs. Malgré tout, la thermographie est plus complexe que la simple manipulation d'une caméra. C'est pourquoi, FLIR Systems a créé l'ITC (Infrared Training Center), un service de l'entreprise qui dispense une formation certifiée. En participant à nos cours de formation, vous pourrez réellement améliorer vos connaissances.

L'équipe de l'ITC se met également à votre disposition pour vous assister lorsque vous passez de la théorie à la pratique.

14.3 L'assistance clientèle

FLIR Systems gère un réseau international de services pour garantir le fonctionnement de votre caméra. En cas de problème, le centre de services le plus proche mobilisera toutes ses ressources matérielles et intellectuelles pour résoudre l'incident le plus vite possible. Nul besoin de renvoyer votre caméra à l'autre bout du monde ou d'essayer de résoudre votre problème avec quelqu'un qui ne parle pas votre langue.

14.4 Nos installations en image

10401303;a1

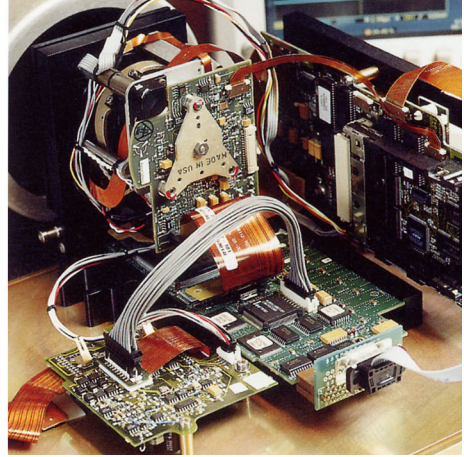
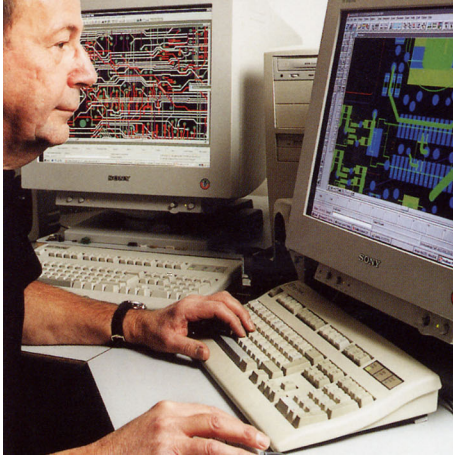


Figure 14.2 GAUCHE : Développement de systèmes électroniques ; **DROITE :** Test d'un détecteur FPA

10401403;a1

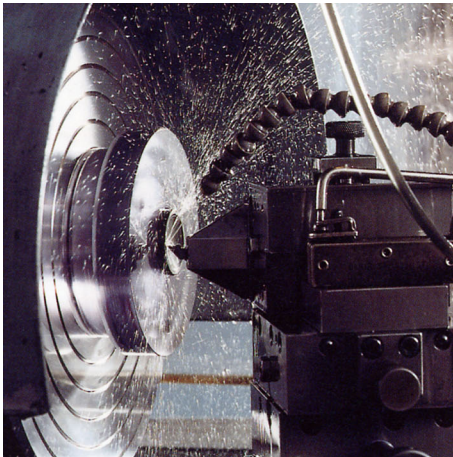


Figure 14.3 GAUCHE : Machine avec outil diamanté ; **DROITE :** Polissage de lentilles

10401503.a1



Figure 14.4 GAUCHE : Test de caméras infrarouge en chambre climatique ; **DROITE :** Robot utilisé pour le test et l'étalonnage des caméras

15 Glossaire

Terme ou expression	Signification
Absorption (facteur d'absorption)	Quantité de rayonnement absorbé par un objet par rapport à la quantité de rayonnement reçu. La valeur est comprise entre 0 et 1.
Atmosphère	Gaz situés entre l'objet mesuré et la caméra, en principe de l'air.
Bruit	Petite perturbation non désirée dans l'image infrarouge.
Cavité isotherme	Radiateur en forme de bouteille avec une température uniforme vue par un goulot.
Cavité rayonnante	Radiateur en forme de bouteille dont l'intérieur, accessible par un goulot, est absorbant.
Champ de vision horizontal	Champ de vision (Field Of View) : angle horizontal pouvant être visualisé à travers un objectif infrarouge.
Conduction	Processus permettant à la chaleur de se diffuser dans la matière.
Convection	La convection est un mode de transfert de chaleur pour lequel un fluide est mis en mouvement, par le biais de la gravité ou d'une autre force, transférant ainsi la chaleur d'un lieu à un autre.
Corps gris	Objet émettant une fraction fixe de la quantité d'énergie d'un corps noir pour chaque longueur d'onde.
Corps noir	Objet non réfléchissant. Tout le rayonnement qu'il émet provient de sa propre température.
Correction de l'image (interne ou externe)	Moyen permettant de compenser les différences de sensibilité dans différentes parties d'images en direct et permettant également de stabiliser la caméra.
Couleur de saturation	Les zones dont la température est située en dehors des paramètres de niveau/de sensibilité sont colorées avec les couleurs de saturation. Les couleurs de saturation contiennent une couleur 'excédentaire' et une couleur 'déficitaire'. Il existe également une troisième couleur de saturation rouge qui marque tout ce qui est saturé par le détecteur, ce qui signifie que la plage doit probablement être modifiée.
différence de température.	Valeur résultant de la soustraction de deux valeurs de température.
Echelle de température	Façon dont une image infrarouge est actuellement affichée. Exprimée par deux valeurs de température délimitant les couleurs.

Terme ou expression	Signification
Emissivité (facteur d'émissivité)	Quantité de rayonnement provenant d'un objet, comparé à celui d'un corps noir. La valeur est comprise entre 0 et 1.
environnement	Objets et gaz émettant des rayonnements vers l'objet mesuré.
Exitance	Quantité d'énergie émise par un objet par unité de temps et de surface (W/m^2).
Exitance énergétique (spectrale)	Quantité d'énergie émise par un objet par unité de temps, de surface et de longueur d'onde ($W/m^2/\mu m$).
Facteur de transmission	Les gaz et les matériaux peuvent être plus ou moins transparents. La transmission est la quantité de rayonnement Infrarouge les traversant. La valeur est comprise entre 0 et 1.
Filtre	Matériau qui est transparent pour certaines longueurs d'ondes infrarouges.
FPA	Matrice à plan focal : type de détecteur infrarouge.
Gain	Intervalle de l'échelle de température, généralement exprimée comme valeur de signal.
Humidité relative	L'humidité relative représente le rapport entre la masse actuelle de la vapeur d'eau dans l'air et la valeur maximale pouvant être contenue dans l'air en cas de saturation.
IFOV	Champ de vision instantané : mesure de la résolution géométrique d'une caméra infrarouge.
Infrarouge	Rayonnement invisible, ayant une longueur d'onde comprise entre 2 et 13 μm .
IR	Infrarouge
Isotherme	Fonction permettant de mettre en valeur des parties de l'image se situant au-dessus, en dessous d'un ou entre plusieurs intervalles de température.
Isotherme double	Isotherme possédant deux bandes de couleur au lieu d'une.
Isotherme transparent	Isotherme indiquant une répartition linéaire des couleurs au lieu de couvrir les parties mises en valeur de l'image.
Laser LocatIR	Source lumineuse alimentée électriquement sur la caméra émettant un rayonnement laser sous forme de faisceau fin et concentré pour pointer sur certaines parties de l'objet se trouvant devant la caméra.
Luminance énergétique	Quantité d'énergie émise par un objet par unité de temps, de surface et d'angle ($W/m^2/sr$).

Terme ou expression	Signification
NETD (résolution thermique)	Résolution thermique de mesure (Noise equivalent temperature difference). Mesure de la résolution thermique de mesure d'une caméra infrarouge.
Niveau	Valeur centrale de l'échelle de température, généralement exprimée comme valeur de signal.
Optique externe	Lentilles, filtres, écrans thermiques supplémentaires pouvant être placés entre la caméra et l'objet mesuré.
Palette	Palette de couleurs utilisée pour afficher une image infrarouge.
Palette automatique	L'image infrarouge est affichée avec une répartition non linéaire des couleurs permettant de faire mieux ressortir simultanément les objets froids et chauds.
Paramètres objet	Ensemble de valeurs décrivant les conditions dans lesquelles un objet a été mesuré et décrivant l'objet lui-même (telles que l'émissivité, la température apparente réfléchie, la distance, etc.).
Pixel	Signifie <i>élément d'image (pictural élément)</i> . Point sur une image.
Plage	Limites de la mesure de température générale d'une caméra de thermographie infrarouge. Les caméras disposent de plusieurs plages. Exprimée par deux valeurs de température de corps noir délimitant l'étalonnage en cours.
Plage de températures	Limites de la mesure de température générale d'une caméra de thermographie infrarouge. Les caméras disposent de plusieurs plages. Exprimée par deux valeurs de température de corps noir délimitant l'étalonnage en cours.
Pointeur laser	Source lumineuse alimentée électriquement sur la caméra émettant un rayonnement laser sous forme de faisceau fin et concentré pour pointer sur certaines parties de l'objet se trouvant devant la caméra.
Puissance rayonnante	Quantité d'énergie émise par un objet par unité de temps (W).
Radiateur	Équipement infrarouge rayonnant.
Radiateur (corps noir)	Équipement de rayonnement infrarouge avec les propriétés d'un corps noir, permettant d'étalonner les caméras de thermographie infrarouge.
Rayonnement	Processus par lequel de l'énergie électromagnétique est émise par un objet ou un gaz.
Réflexion	Quantité de rayonnement reflété par un objet par rapport à la quantité de rayonnement reçu. La valeur est comprise entre 0 et 1.

Terme ou expression	Signification
Réglage automatique	Fonction permettant à la caméra d'effectuer une correction interne de l'image.
Réglage continu	Fonction réglant l'image. Cette fonction est toujours activée et règle en continu le contraste et la luminosité selon le contenu de l'image.
Réglage manuel	Moyen permettant de régler l'image en modifiant certains paramètres manuellement.
Signal d'un objet	Valeur non étalonnée se rapportant à la quantité de rayonnement émis par l'objet et reçu par la caméra.
Température de couleur	Température à laquelle la couleur d'un corps noir correspond à une couleur spécifique.
Température de référence	Température à laquelle les valeurs normalement mesurées peuvent être comparées.
Thermogramme	Image infrarouge
Transmission atmosphérique calculée	Valeur de transmission calculée en fonction de la température, de l'humidité relative de l'air et de la distance jusqu'à l'objet.
Transmission atmosphérique estimée	Valeur de transmission fournie par un utilisateur, remplaçant une valeur calculée.
TV	Relatif au mode vidéo d'une caméra de thermographie infrarouge, par opposition au mode thermographique normal. Lorsque la caméra est en mode TV, elle capture des images vidéo, au lieu des images thermographiques capturées en mode IR (infrarouge).

16 Techniques de mesure thermographique

16.1 *Introduction*

La caméra infrarouge mesure et visualise le rayonnement infrarouge d'un objet. La caméra peut calculer et afficher cette température, car le rayonnement est une fonction de la température de surface des objets.

Cependant, le rayonnement mesuré par la caméra dépend non seulement de la température de l'objet, mais également de l'émissivité. Le rayonnement provenant du milieu environnant est également réfléchi dans l'objet. Le rayonnement émanant de l'objet et le rayonnement réfléchi sont également influencés par l'absorption de l'atmosphère.

Pour mesurer la température avec précision, il est donc nécessaire de compenser les effets des différentes sources de rayonnement. Cela est effectué automatiquement en ligne par la caméra. Les paramètres suivants relatifs à l'objet doivent cependant être fournis à la caméra :

- Emissivité de l'objet
- Température apparente réfléchie
- Distance entre l'objet et la caméra
- Humidité relative
- Température de l'atmosphère

16.2 *Emissivité*

L'émissivité étant le paramètre le plus important, elle doit être définie avec précision. Elle représente la mesure du rayonnement émis par un objet par rapport à celui émis par un corps noir parfait de même température.

Normalement, l'émissivité des matériaux des objets et des traitements de surface est comprise approximativement entre 0,1 et 0,95. Une surface très polie (miroir) a une émissivité inférieure à 0,1, alors qu'une surface oxydée ou peinte a une émissivité plus élevée. Les peintures à base d'huile, quelle que soit leur couleur dans le spectre visible, ont une émissivité supérieure à 0,9 dans l'infrarouge. La peau humaine a une émissivité comprise entre 0,97 et 0,98.

Les métaux non oxydés représentent un cas extrême d'opacité parfaite et de réflectivité élevée qui ne varient pas beaucoup avec la longueur d'onde. Par conséquent, l'émissivité des métaux est faible : elle n'augmente qu'avec la température. L'émissivité des objets non métalliques tend à être élevée et diminue avec la température.

16.2.1 Obtention de l'émissivité d'un échantillon

16.2.1.1 Etape 1 : Détermination de la température apparente réfléchie

L'une des deux méthodes suivantes permet de déterminer la température apparente réfléchie :

16.2.1.1.1 Méthode 1 : Méthode directe

- 1 Rechercher des sources de réflexion possibles en tenant compte du fait que angle d'incidence = angle de réflexion ($a = b$).

10588903;a1

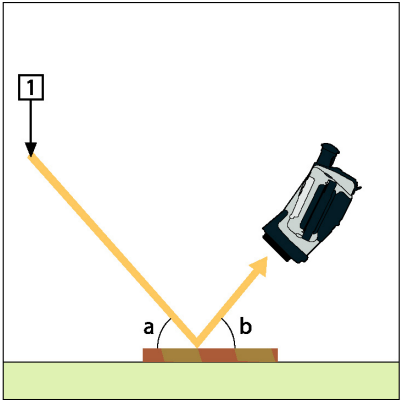


Figure 16.1 1 = Source de réflexion

- 2 Si la source de réflexion est un point, modifiez la source en l'obstruant avec une pièce de carton.

10589103;a2

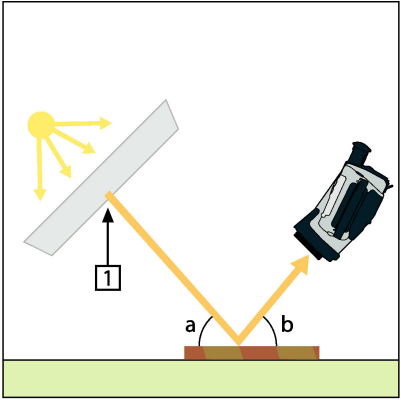


Figure 16.2 1 = Source de réflexion

- 3** Mesurez l'intensité de radiation (= température apparente) à partir de la source de réflexion en utilisant les paramètres suivants :

- Emissivité : 1,0
- D_{obj} : 0

Vous pouvez mesurer l'intensité de radiation à l'aide d'une des deux méthodes suivantes :

10589003.a2

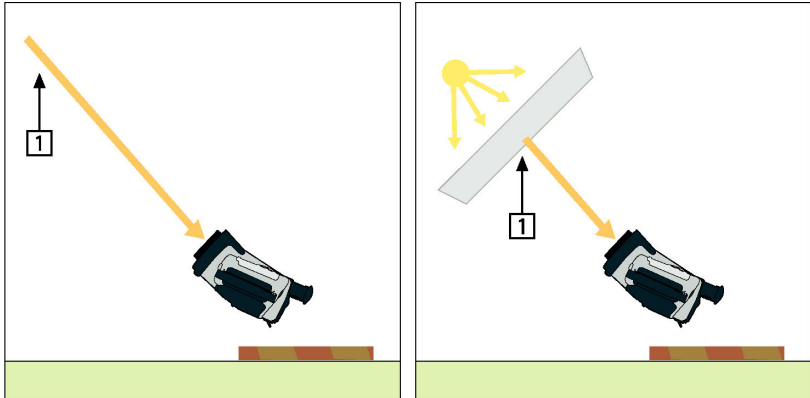


Figure 16.3 1 = Source de réflexion

Remarque : l'utilisation d'un thermocouple pour mesurer la température apparente réfléchie n'est pas recommandée pour deux raisons :

- Un thermocouple ne mesure pas l'intensité de radiation.
- Un thermocouple nécessite un excellent contact thermique avec la surface, souvent par collage ou couverture du capteur avec un isolant thermique.

16.2.1.1.2 *Méthode 2 : Méthode par réflexion*

1	Froissez un grand morceau de papier aluminium.
2	Défroissez-le et fixez-le à un morceau de carton de même taille.
3	Placez ce morceau de carton en face de l'objet dont vous souhaitez mesurer la température. Assurez-vous que le côté couvert d'aluminium est bien orienté vers la caméra.
4	Définissez l'émissivité à 1,0.

5 Mesurez la température apparente de la feuille d'aluminium et consignez-la.

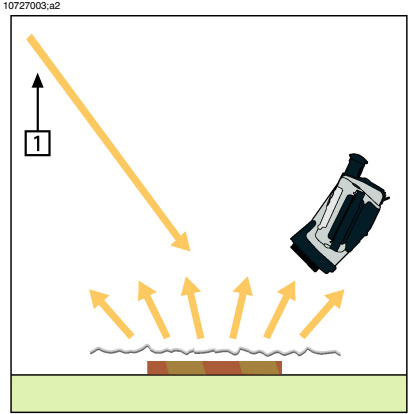


Figure 16.4 Mesure de la température apparente de la feuille d'aluminium

16.2.1.2 *Etape 2 : Détermination de l'émissivité*

1	Sélectionnez un emplacement pour l'échantillon.
2	Déterminez et définissez la température apparente réfléchie en fonction de la procédure précédente.
3	Fixez de la bande adhésive isolante à haute émissivité sur l'échantillon.
4	Chauffez l'échantillon à au moins 20 K au dessus de la température ambiante. Le chauffage doit être relativement homogène.
5	Effectuez la mise au point et ajustez automatiquement la caméra, puis figez l'image.
6	Ajustez le niveau et le gain pour une meilleure luminosité et un meilleur contraste au niveau des images.
7	Définissez l'émissivité de façon à ce qu'elle soit identique à celle de la bande adhésive (généralement 0,97).
8	Mesurez la température de la bande adhésive en utilisant l'une des fonctions de mesures suivantes : ■ Isotherme (vous permet de déterminer la température et l'homogénéité du chauffage de l'échantillon) ■ Point (plus simple) ■ Boîte Moy (adapté aux surfaces ayant une émissivité variable)
9	Notez la température.
10	Déplacez votre fonction de mesure vers la surface de l'échantillon.
11	Modifiez le paramètre d'émissivité jusqu'à ce que la température soit la même que celle obtenue lors de la précédente mesure.

12	Notez l'émissivité.
----	---------------------

Remarque :

- Il faut éviter la convection forcée.
- Recherchez un environnement thermiquement stable qui ne génère pas de réflexion de points.
- Utilisez de la bande adhésive de haute qualité non transparent et à haute émissivité.
- Cette méthode part du principe que la température de votre bande adhésive et de la surface de l'échantillon sont identiques. Dans le cas contraire, vos mesures d'émissivité seront faussées.

16.3 *Température apparente réfléchie*

Ce paramètre permet de compenser le rayonnement réfléchi dans l'objet. Si l'émissivité est faible et la température de l'objet relativement éloignée de la température réfléchie, il est important de définir et de compenser correctement la température apparente réfléchie.

16.4 *Distance*

La distance correspond à la distance entre l'objet et l'objectif avant de la caméra. Ce paramètre permet de compenser les deux faits suivants :

- Le rayonnement de la cible est absorbé par l'atmosphère entre l'objet et la caméra.
- Le rayonnement de l'atmosphère elle-même vient s'ajouter aux rayonnements détectés par la caméra.

16.5 *Humidité relative*

La caméra peut également compenser la légère variation du facteur de transmission résultant de l'humidité relative de l'atmosphère. Pour permettre cette compensation, attribuez une valeur correcte à l'humidité relative. Pour les courtes distances et l'humidité normale, la valeur par défaut de l'humidité relative peut être conservée, soit 50 %.

16.6 *Autres paramètres*

En outre, certaines caméras et programmes d'analyse de FLIR Systems permettent de compenser les paramètres suivants :

- Température atmosphérique (température moyenne de l'atmosphère entre la caméra et la cible).
- Température optique externe, *c'est-à-dire* la température des objectifs ou fenêtres externes utilisé(e)s devant la caméra.

- Transmission d'optique externe – *c'est-à-dire* la transmission des objectifs ou fenêtres externes utilisé(e)s devant la caméra

17 Historique de la technologie infrarouge

Avant l'année 1800, l'existence de la partie infrarouge du spectre électromagnétique était totalement inconnue. Le spectre infrarouge, ou plus simplement « l'infrarouge », défini à l'origine comme une forme de rayonnement thermique est certainement moins abstrait aujourd'hui qu'à l'époque de sa découverte par Herschel en 1800.

10398703.a1

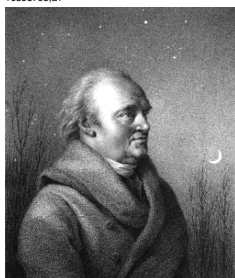


Figure 17.1 Sir William Herschel (1738–1822)

Cette découverte a été faite par hasard lors de recherches sur un nouveau matériel optique. Sir William Herschel (astronome auprès du Roi d'Angleterre Georges III et également célèbre pour avoir découvert la planète Uranus) était à la recherche d'un filtre optique permettant de réduire la luminosité produite par le soleil dans les télescopes lors d'observations solaires. Alors qu'il procédait à divers essais avec des échantillons de verre permettant d'obtenir une réduction de luminosité similaire, il fut intrigué par le fait que certains échantillons laissaient passer peu de chaleur solaire tandis que d'autres en laissaient passer tellement que des dommages oculaires pouvaient se produire après seulement quelques secondes d'observation.

Herschel fut rapidement convaincu de la nécessité de mettre en place une expérience méthodique, susceptible de mettre en évidence le matériau permettant d'obtenir la réduction de luminosité voulue ainsi qu'une réduction maximale de la chaleur. Il basa d'abord son expérience sur celle du prisme de Newton, mais en se concentrant plus sur l'effet de la chaleur que sur la diffusion visuelle de l'intensité au sein du spectre. Il noircit le tube d'un thermomètre au mercure avec de l'encre pour l'utiliser en tant que détecteur de rayonnement et procéda ainsi à des tests sur les effets de la chaleur produits sur une table par les diverses couleurs du spectre en laissant passer les rayons du soleil par un prisme de verre. D'autres thermomètres placés en dehors des rayons du soleil servaient de contrôle.

Lorsqu'il déplaçait lentement le thermomètre noirci le long des couleurs du spectre, la température indiquait une augmentation constante de l'extrémité violette à l'extrémité rouge. Ce qui n'était pas totalement inattendu puisque le chercheur italien, Landriani observa le même effet lors d'une expérience similaire en 1777. Ce fut pourtant Herschel qui mit le premier en évidence l'existence supposée d'un point auquel la production de chaleur est au maximum, mais les mesures confinées à la partie visible du spectre ne permettaient pas de localiser celui-ci.

10398903; a1



Figure 17.2 Marsilio Landriani (1746–1815)

En déplaçant le thermomètre dans la région sombre située après l'extrémité rouge, Herschel constata encore une augmentation de chaleur. Le point maximum, une fois découvert, se situait bien après l'extrémité rouge : dans ce qui est aujourd'hui connu sous le nom de « longueur d'onde infrarouge ».

Lorsque Herschel révéla cette découverte, il fit mention de « spectre thermométrique » pour parler de cette nouvelle portion du spectre électromagnétique. Il se référait au rayonnement en lui-même en l'appelant parfois « chaleur noire », ou plus simplement « rayons invisibles ». Ironiquement, et contrairement à la croyance populaire, ce n'est pas Herschel qui est à l'origine du terme « infrarouge ». Ce terme n'est apparu dans les écrits que 75 ans plus tard, et son auteur n'est toujours pas clairement déterminé aujourd'hui.

Le fait qu'Herschel utilise du verre dans le prisme souleva rapidement des controverses chez ses contemporains qui mirent en doute la réelle existence de la longueur d'onde infrarouge. Divers experts utilisèrent plusieurs types de verre pour tenter de confirmer le travail d'Herschel et obtenaient d'autres transparences dans l'infrarouge. Grâce à ses anciennes expériences, Herschel connaissait la transparence limitée du verre par rapport au rayonnement thermique fraîchement découvert, et fut bien obligé d'en conclure que les dispositifs optiques pour l'infrarouge seraient probablement réservés exclusivement aux éléments réfléchissants (par exemple, miroirs plan ou courbe). Fort heureusement, cela ne s'avéra vrai que jusqu'en 1830. C'est à cette époque que le chercheur italien découvrit que le chlorure de sodium naturel (NaCl), présent dans

un nombre suffisant de cristaux naturels pour pouvoir en faire des lentilles et des prismes, était remarquablement transparent à l'infrarouge. Le chlorure de sodium devint de ce fait le principal matériau utilisé dans l'optique infrarouge durant tout le siècle qui suivit et ne fut détrôné que dans les années 30 par les cristaux synthétiques dont on maîtrisait de mieux en mieux la croissance.

10399103; a1



Figure 17.3 Macedonio Melloni (1798–1854)

Les thermomètres restèrent l'instrument de détection du rayonnement par excellence jusqu'en 1829, année lors de laquelle Nobili inventa le thermocouple. Le thermomètre de Herschel pouvait indiquer des variations de température allant jusqu'à 0,2 °C (0,36 °F), et les modèles ultérieurs pouvaient indiquer des variations allant jusqu'à 0,05 °C (0,09 °F). Un palier majeur fut franchi lorsque Melloni brancha plusieurs thermocouples en série pour former la première pile thermoélectrique. Ce nouvel appareil était au moins 40 fois plus sensible que les meilleurs thermomètres de l'époque destinés à la détection du rayonnement calorifique et était en mesure de détecter la chaleur émise par une personne dans un rayon de trois mètres.

La première image thermique a pu être prise en 1840, suite aux recherches de Sir John Herschel, fils de l'inventeur de l'infrarouge et lui-même célèbre astronome. Basé sur l'évaporation différentielle d'une fine pellicule d'huile exposée à une forme de chaleur concentrée sur celle-ci, l'image thermique est rendue visible par la réflexion de la lumière à l'endroit où les effets d'interférence de la pellicule d'huile permettent à l'oeil humain de distinguer une image. Sir John tenta également d'obtenir le premier enregistrement d'une image thermique sur papier, ce qu'il appela un « thermographe ».

10399003; a2



Figure 17.4 Samuel P. Langley (1834–1906)

Peu d'améliorations furent apportées à la sensibilité des détecteurs infrarouges. Un autre palier décisif fut franchi par Langley en 1880, avec l'invention du bolomètre. Celui-ci est formé par un mince ruban de platine noir branché au connecteur d'un pont de Wheatstone sur lequel le rayonnement infrarouge est concentré et un galvanomètre sensible branché sur l'autre connecteur. Cet instrument était sensé détecter le rayonnement émis par une vache dans un rayon de 400 mètres.

Un scientifique anglais, Sir James Dewar, fut le premier à utiliser les gaz liquéfiés comme agents refroidissant (comme par exemple, l'azote liquide avec une température de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-320,8\text{ }^{\circ}\text{F}$)) dans le domaine de la recherche sur les basses températures. En 1892, il inventa un récipient isolant unique dans lequel il était possible de stocker des gaz liquéfiés pendant des jours. Notre « bouteille thermos », utilisée pour stocker des boissons chaudes ou froides, est fondée sur le principe de cette invention.

Entre 1900 et 1920, les inventeurs du monde entier « découvrent » l'infrarouge. De nombreux brevets furent déposés pour des appareils permettant de détecter les personnes, l'artillerie, les avions, les bateaux et même les icebergs. Les premiers systèmes opérationnels, au sens moderne du terme, furent développés durant la guerre 1914–18, lorsque les programmes de recherche des belligérants étaient concentrés sur l'exploitation militaire de l'infrarouge. Ces programmes comprenaient des systèmes expérimentaux pour la détection d'intrusions ennemies, l'analyse de la température à distance, la protection des transmissions et le guidage de roquettes. Un système de recherche infrarouge testé durant cette période était en mesure de détecter un avion à une distance de 1,5 km (0,94 miles) et une personne à plus de 300 mètres (984 pieds).

Les systèmes les plus sensibles de l'époque étaient tous basés sur diverses variantes du bolomètre, mais la période de l'entre-deux-guerres vit le développement de deux nouveaux détecteurs infrarouges révolutionnaires : le convertisseur d'images et le détecteur photoélectrique. Dans un premier temps, le convertisseur d'images retint

l'attention des militaires car il permettait pour la première fois à un observateur de voir littéralement dans le noir. Cependant, la sensibilité du convertisseur d'images était limitée aux ondes infrarouges proches, et les cibles militaires les plus intéressantes (par exemple, des soldats ennemis) devaient être éclairées par des faisceaux de recherche infrarouges. Cette dernière opération induisant le risque de donner la position de l'observateur à un poste d'observation ennemi équipé de façon similaire, il est fort compréhensible que l'intérêt des militaires pour le convertisseur d'images ait pu fléchir.

Les désavantages militaires tactiques liés à l'utilisation des systèmes d'imagerie thermique dits « actifs » (notamment équipés de faisceaux de recherche) donnèrent naissance après la guerre 1939–45 à un élan d'intensifs programmes de recherche militaires secrets autour de l'infrarouge afin de développer des systèmes « passifs » (sans faisceaux de recherche) autour du détecteur photoélectrique extrêmement sensible. Durant cette période les prescriptions en matière de secret militaire empêchèrent totalement la divulgation de l'état de développement de la technologie d'imagerie infrarouge. Ce secret ne fut levé qu'au milieu des années 50. A partir de cette époque, les appareils d'imagerie thermique appropriés purent enfin être exploités par la science et l'industrie civile.

18 Théorie de la thermographie

18.1 Introduction

Le domaine du rayonnement infrarouge et les techniques de thermographie associées sont souvent méconnus des nouveaux utilisateurs de caméra infrarouge. Cette section aborde la théorie de la thermographie.

18.2 Spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est divisé arbitrairement en plusieurs zones de longueurs d'onde, appelées *bandes*, identifiées par les méthodes utilisées pour produire et détecter le rayonnement. Il n'existe aucune différence fondamentale entre le rayonnement des différentes bandes du spectre électromagnétique. Elles sont toutes régies par les mêmes lois et la seule différence réside dans la longueur d'onde.

10067803.a1

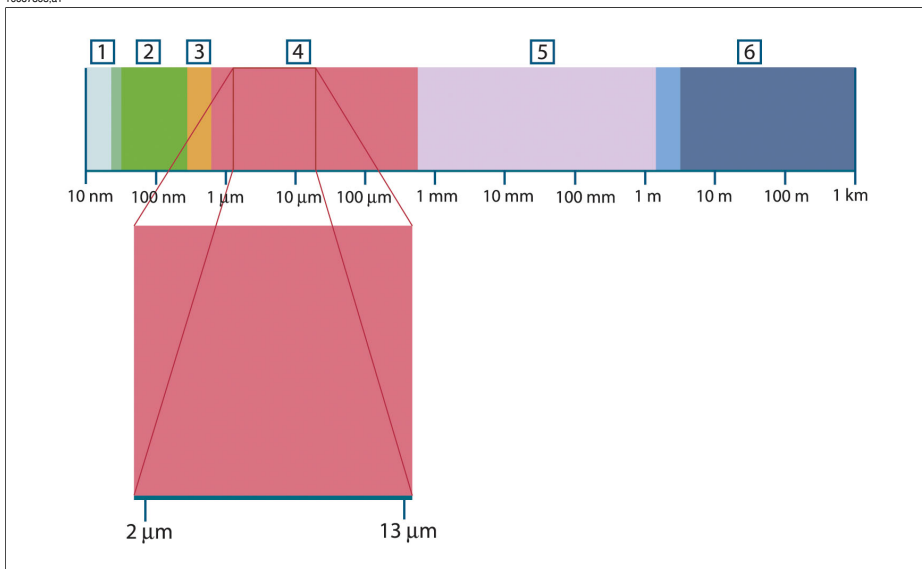


Figure 18.1 Spectre électromagnétique. 1 : rayons X ; 2 : UV ; 3 : Visible ; 4 : IR ; 5 : Micro-ondes ; 6 : Ondes radio.

La thermographie utilise la bande spectrale infrarouge. A l'extrémité gauche de la longueur d'onde courte, la limite correspond à celle de la perception visuelle, dans le rouge intense. A l'extrémité droite de la longueur d'onde longue, cette limite fusionne avec les longueurs d'onde radio à micro-ondes, dans la plage des millimètres.

La bande infrarouge est elle-même divisée en quatre petites bandes, également délimitées de façon arbitraire. Elle inclut : le *proche infrarouge* (0,75 - 3 μm), l'*infrarouge central* (3 - 6 μm), l'*infrarouge lointain* (6 - 15 μm) et l'*infrarouge extrême* (15 - 100 μm). Bien que les longueurs d'onde soient indiquées en μm (micromètres), d'autres unités sont souvent utilisées pour mesurer la longueur d'onde dans cette zone spectrale, *par exemple* le nanomètre (nm) et l'Ångström (Å).

Voici la correspondance entre les différentes mesures de longueur d'onde :

$$10\,000\text{ Å} = 1\,000\text{ nm} = 1\text{ }\mu = 1\text{ }\mu\text{m}$$

18.3 Rayonnement d'un corps noir

Un corps noir désigne un objet qui absorbe le rayonnement qu'il reçoit, quelle que soit la longueur d'onde et l'angle d'incidence. L'appellation *noir* associée à un objet qui émet un rayonnement est expliqué par la loi de Kirchhoff (de *Gustav Robert Kirchhoff*, 1824–1887), selon laquelle un corps capable d'absorber le rayonnement à n'importe quelle longueur d'onde est également capable d'émettre un rayonnement de la même façon.

10398903,a1

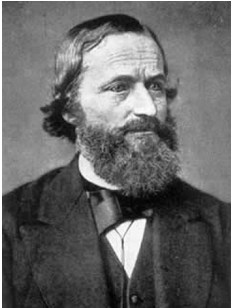


Figure 18.2 Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887)

La conception d'une source de corps noir est en principe très simple. Les caractéristiques du rayonnement d'un trou dans une cavité isotherme constituée d'un matériau absorbant opaque représentent presque exactement les propriétés d'un corps noir. Une application pratique du principe de construction d'un absorbeur parfait de rayonnement est une boîte étanche à la lumière qui comporte une petite ouverture sur l'un des côtés. Le rayonnement qui passe par cette ouverture est alors diffusé et absorbé par des réflexions répétées. Par conséquent, seule une fraction infinitésimale peut éventuellement s'échapper. La « noirceur » obtenue à l'ouverture est presque identique à celle d'un corps noir et quasiment parfaite pour toutes les longueurs d'onde.

En chauffant cette boîte isotherme de manière adéquate, celle-ci devient alors une *cavité rayonnante*. Une cavité isotherme chauffée avec une température uniforme génère un rayonnement de corps noir, dont les caractéristiques sont déterminées uniquement par sa température. Ce type de cavité rayonnante est couramment utilisé comme source de rayonnement de référence dans les laboratoires d'étalonnage des instruments de thermographie, tels que les caméras FLIR Systems.

Si la température du rayonnement d'un corps noir dépasse 525 °C, la source commence à être visible de telle sorte qu'elle n'apparaît plus noire à l'œil. Il s'agit de la couleur rouge correspondant à la chaleur initiale du radiateur, qui devient ensuite orange ou jaune au fur et à mesure que la température augmente. En fait, la définition de la *température de couleur* d'un objet est la température à laquelle un corps noir devrait être chauffé pour avoir la même apparence dans le spectre visible.

Considérons maintenant trois expressions qui décrivent le rayonnement émis par un corps noir.

18.3.1 Loi de Planck



Figure 18.3 Max Planck (1858–1947)

Max Planck (1858–1947) a déterminé la distribution spectrale du rayonnement d'un corps noir à l'aide de la formule suivante :

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \times 10^{-6} [Watt / m^2, \mu m]$$

où :

$W_{\lambda b}$	Exitance énergétique spectrale du corps noir à la longueur d'onde λ .
-----------------	---

c	Vitesse de la lumière = 3×10^8 m/s
h	Constante de Planck = $6,6 \times 10^{-34}$ Joule s
k	Constante de Boltzmann = $1,4 \times 10^{-23}$ Joule/K
T	Température absolue (K) d'un corps noir
λ	Longueur d'onde (μm)

☛ Le facteur 10^{-6} est utilisé car l'émissivité spectrale dans les courbes est exprimé en Watt/m², μm .

La formule de Planck, lorsqu'elle est représentée sous forme graphique pour différentes températures, génère une famille de courbes. Suivant une courbe de Planck particulière, l'exitance spectrale est égale à zéro à $\lambda = 0$, puis elle atteint rapidement un maximum à une longueur d'onde λ_{max} et après l'avoir dépassée, elle s'approche à nouveau de zéro sur les longueurs d'onde très longues. Plus la température est élevée, plus la longueur d'onde où le maximum sera atteint est courte.

10327103;a4

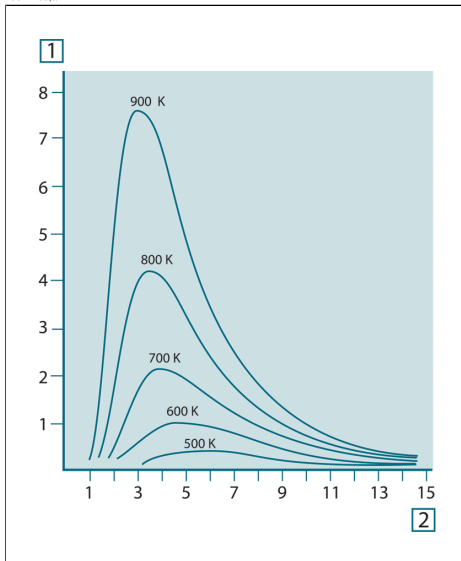


Figure 18.4 Exitance énergétique spectrale du corps noir selon la loi de Planck, représentée pour différentes températures absolues. **1** : Exitance énergétique spectrale ($\text{W/cm}^2 \times 10^3(\mu\text{m})$) ; **2** : Longueur d'onde (μm)

18.3.2 Loi de déplacement de Wien

En différenciant la formule de Planck par rapport à λ et en cherchant le maximum, nous obtenons :

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} [\mu m]$$

Il s'agit de la formule de Wien (*Wilhelm Wien*, 1864–1928). Elle exprime sous forme mathématique l'observation courante selon laquelle la couleur visible d'un corps rayonnant passe du rouge à l'orange ou au jaune au fur et à mesure que sa température augmente. La longueur d'onde de la couleur est identique à celle calculée pour $\lambda_{\max}$. Une bonne approximation de la valeur de $\lambda_{\max}$ pour la température d'un corps noir est obtenue en appliquant la méthode empirique de $3\,000/T \mu m$. Ainsi, une étoile très chaude telle que Sirius (11 000 K), qui émet une lumière blanc-argenté, rayonne avec le pic de l'exitance énergétique dans le spectre ultraviolet invisible, à une longueur d'onde de $0,27 \mu m$.

10399403.a1

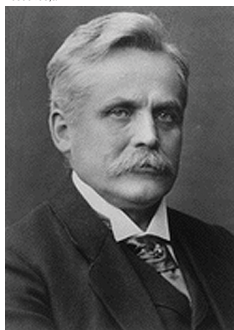


Figure 18.5 Wilhelm Wien (1864–1928)

Le soleil (environ 6000 K) émet une lumière jaune, dont le pic est d'environ $0,5 \mu m$ au milieu du spectre de lumière visible.

A la température ambiante (300 K), le pic de l'exitance énergétique est de $9,7 \mu m$, dans l'infrarouge lointain, alors qu'à la température de l'azote liquide (77 K) le maximum de la quantité presque insignifiante de l'exitance énergétique se produit à $38 \mu m$ dans l'infrarouge extrême.

10327203,a4

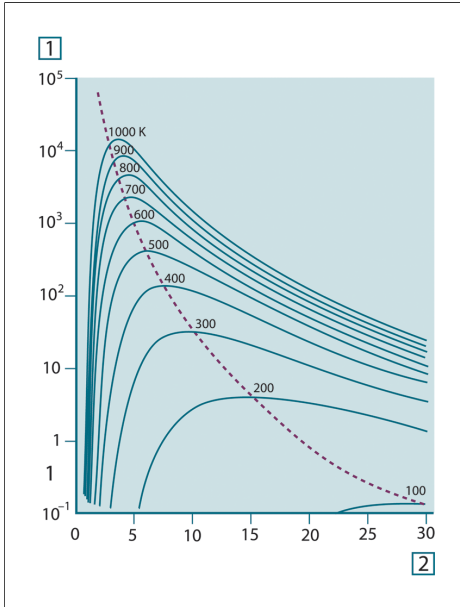


Figure 18.6 Courbes de Planck représentées sur des échelles semi-logarithmiques de 100 K à 1000 K. La ligne en pointillés relie les maxima des courbes comme l'indique la loi de déplacement de Wien. **1** : Exitance énergétique spectrale ($\text{W}/\text{cm}^2 (\mu\text{m})$) ; **2** : Longueur d'onde (μm).

18.3.3 Loi de Stefan-Boltzmann

En intégrant la formule de Planck de $\lambda = 0$ à $\lambda = \infty$, nous obtenons l'exitance énergétique totale (W_b) d'un corps noir :

$$W_b = \sigma T^4 \quad [\text{Watt}/\text{m}^2]$$

Il s'agit de la formule de Stefan-Boltzmann (*Josef Stefan*, 1835–1893 et *Ludwig Boltzmann*, 1844–1906). Elle indique que le pouvoir émissif total d'un corps noir est proportionnel à sa température absolue à la puissance quatre. Du point de vue graphique, W_b représente la zone située en dessous de la courbe de Planck pour une température particulière. Il est possible de démontrer que l'exitance énergétique de l'intervalle $\lambda = 0$ à λ_{max} n'est égale qu'à 25 % du total, ce qui représente le rayonnement solaire qui se trouve dans le spectre de la lumière visible.



Figure 18.7 Josef Stefan (1835–1893) et Ludwig Boltzmann (1844–1906)

Si nous calculons la puissance rayonnée par le corps humain à l'aide de la formule de Stefan-Boltzmann, à une température de 300 K et sur une surface externe d'environ 2 m², nous obtenons 1 kW. Cette perte de puissance ne pourrait pas être supportée par un humain si elle n'était pas compensée a) par l'absorption de rayonnement des surfaces environnantes, à des températures ambiantes qui ne sont pas trop différentes de la température du corps, b) par l'ajout de vêtement.

18.3.4 Emetteurs non noirs

Jusqu'à présent, nous avons abordé uniquement le rayonnement des corps noirs. Cependant, dans la plupart des cas, les objets réels ne sont pas compatibles avec ces concepts dans une région de longueur d'onde étendue, même s'ils peuvent s'en approcher dans certains intervalles spectraux réduits. Par exemple, la peinture blanche semble parfaitement *blanche* dans le spectre de la lumière visible, mais elle devient distinctement *grise* à environ 2 μm, et au-delà de 3 μm, elle est presque *noire*.

Trois processus peuvent empêcher un objet réel d'agir comme un corps noir : une fraction du rayonnement incident α peut être absorbée, une fraction ρ peut être réfléchie et une fraction τ peut être transmise. Etant donné que tous ces facteurs dépendent plus ou moins de la longueur d'onde, l'indice λ est utilisé pour impliquer la dépendance spectrale de leur définition. Par conséquent :

- Le facteur spectral d'absorption α_λ = le rapport de la puissance énergétique spectrale absorbée par un objet par rapport à son incident.
- Le facteur spectral de réflexion ρ_λ = le rapport de la puissance énergétique réfléchie par un objet par rapport à son incident.
- Le facteur spectral de transmission τ_λ = le rapport de la puissance énergétique transmise par un objet par rapport à son incident.

La somme de ces trois facteurs est toujours égale à 1, quelle que soit la longueur d'onde. Ainsi, nous obtenons la relation :

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

Pour les matériaux opaques $\tau_\lambda = 0$ et la relation est simplifiée à :

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$$

Un autre facteur, appelé émissivité, est requis pour décrire la fraction ε de l'exitance énergétique d'un corps noir produit par un objet à une température spécifique. Par conséquent, nous avons la définition :

Le facteur spectral d'émissivité ε_λ = le rapport de la puissance énergétique d'un objet à la même température et la même longueur d'onde.

Exprimé sous forme mathématique, ce rapport peut être écrit comme celui du facteur spectral d'émissivité de l'objet sur celui d'un corps noir comme suit :

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_{\lambda o}}{W_{\lambda b}}$$

Généralement, il existe trois types de source de rayonnement, distingués par les façons dont le facteur spectral d'émissivité de chacun varie avec la longueur d'onde.

- Un corps noir, pour lequel $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$
- Un corps gris, pour lequel $\varepsilon_\lambda = \varepsilon =$ constante inférieure à 1
- Un radiateur sélectif, pour lequel ε varie avec la longueur d'onde

Selon la loi de Kirchhoff, pour n'importe quel matériau, les facteurs d'émissivité et d'absorption spectrales d'un corps sont égaux aux températures et longueurs d'onde définies. C'est-à-dire :

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$$

Nous obtenons pour un matériau opaque (puisque $\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$) :

$$\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1$$

Pour les matériaux très polis ε_λ est proche de zéro, de sorte que pour un matériau parfaitement réfléchissant (*par exemple* un miroir parfait) nous obtenons :

$$\rho_\lambda = 1$$

Pour un corps gris, la formule de Stefan-Boltzmann devient :

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \text{ [Watt/m}^2\text{]}$$

Cela signifie que la puissance émissive totale d'un corps gris est identique à celle d'un corps noir à la même température réduite proportionnellement à la valeur ε du corps gris.

10401203,a2

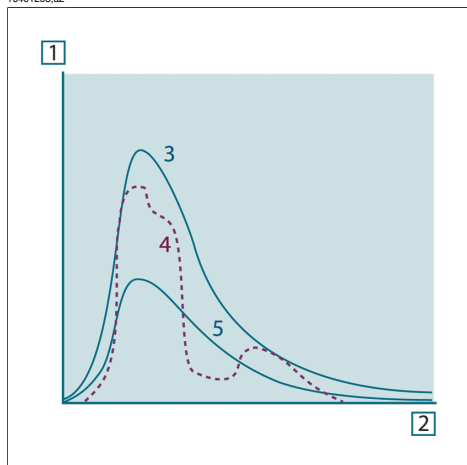


Figure 18.8 Exitance énergétique et facteur spectral d'émissivité de trois types de radiateur. 1 : Exitance énergétique spectrale ; 2 : Longueur d'onde ; 3 : Corps noir ; 4 : Radiateur sélectif ; 5 : Corps gris.

10327303,a4

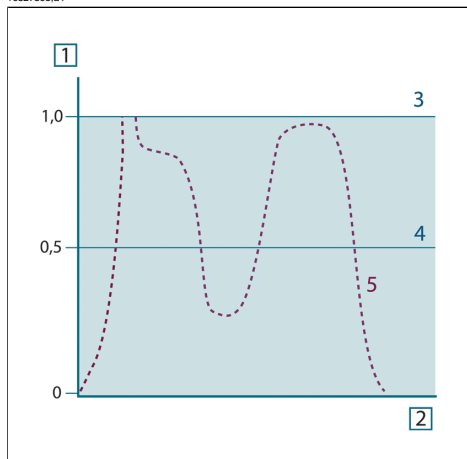


Figure 18.9 Facteur spectral d'émissivité de trois types de radiateur. 1 : Facteur spectral d'émissivité ; 2 : Longueur d'onde ; 3 : Corps noir ; 4 : Corps gris ; 5 : Radiateur sélectif.

18.4 Matériaux infrarouges semi-transparents

Considérons maintenant un corps non métallique et semi-transparent, par exemple une plaque en plastique épaisse. Lorsque la plaque est chauffée, le rayonnement généré dans son volume doit se diriger vers les surfaces par l'intermédiaire du matériau dans lequel il est partiellement absorbé. De plus, lorsqu'il arrive à la surface, une partie est réfléchi à l'intérieur. Le rayonnement réfléchi à l'intérieur est de nouveau

partiellement absorbé, mais une partie arrive à l'autre surface, par laquelle la plus grande partie s'échappe ; une partie du rayonnement est de nouveau réfléchi. Bien que les réflexions progressives soient de plus en plus faibles, elles doivent être additionnées lorsque l'émissivité totale de la plaque est calculée. Lorsque la série géométrique résultante est obtenue, le facteur d'émissivité réel d'un matériau semi-transparent est obtenu par la formule suivante :

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{(1 - \rho_{\lambda})(1 - \tau_{\lambda})}{1 - \rho_{\lambda}\tau_{\lambda}}$$

Lorsque la plaque devient opaque, la formule est réduite à :

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda}$$

Cette dernière relation est particulièrement utile car il est souvent plus facile de mesurer la réflexion que de mesurer directement l'émissivité.

19 La formule de mesure

Comme cela a été dit précédemment, lorsque la caméra visualise un objet, elle reçoit également des rayonnements autres que ceux propres à l'objet. Elle perçoit également des rayonnements provenant du milieu environnant réfléchis par la surface de l'objet. Ces deux types de rayonnements sont quelque peu atténués par l'atmosphère du chemin de mesure. Un troisième type de rayonnement vient s'ajouter aux deux précédents : celui de l'atmosphère elle-même.

La description de la situation de mesure illustrée dans la figure ci-dessous, constitue une description des conditions réelles relativement fidèle. Ne sont pas pris en considération, par exemple, la lumière du soleil pénétrant dans l'atmosphère ou les rayonnements parasites provenant de sources de rayonnement intenses extérieures au champ de vision. Il est difficile de quantifier de telles interférences ; toutefois, elles sont généralement suffisamment faibles pour pouvoir être ignorées. Dans le cas où elles seraient trop importantes, la configuration de la mesure serait telle que le risque d'interférence serait manifeste, pour un spécialiste en tout cas. Il lui incombe donc de modifier la situation de la mesure de façon à supprimer toute interférence, par exemple en modifiant la direction du champ de vision, en faisant écran aux sources de rayonnement trop intenses, etc.

En partant de la description ci-dessus, il est possible d'utiliser la figure ci-dessous pour en dériver une formule de calcul de la température de l'objet à partir de la sortie de la caméra étalonnée.

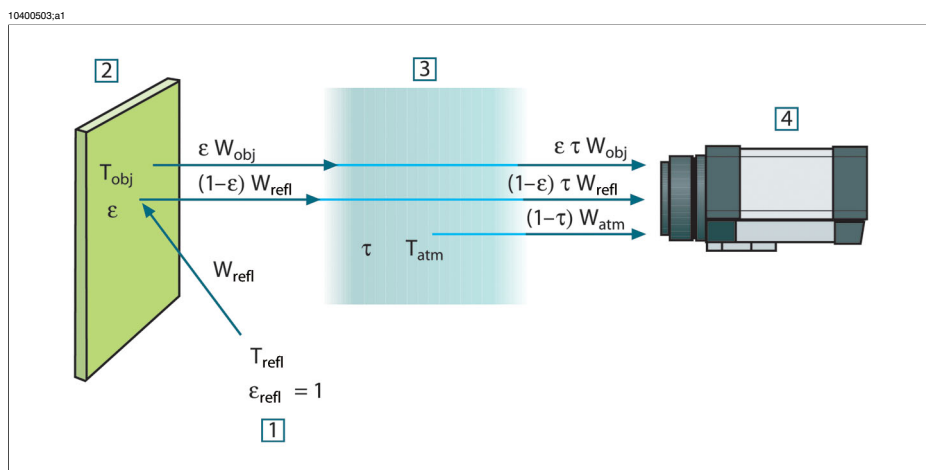


Figure 19.1 Une représentation schématique de la situation de mesure thermographique générale. 1 : Milieu environnant ; 2 : Objet ; 3 : Atmosphère ; 4 : Caméra

Si l'on part du principe que la puissance du rayonnement perçu W provenant de la source d'un corps noir d'une température T_{source} génère sur une courte distance un signal de sortie de caméra U_{source} qui est proportionnel à la puissance d'entrée (caméra à puissance linéaire). On peut alors écrire (Equation 1) :

$$U_{\text{source}} = CW(T_{\text{source}})$$

ou, en notation simplifiée :

$$U_{\text{source}} = CW_{\text{source}}$$

C étant une constante.

Si la source doit être un corps gris avec exittance ε , le rayonnement reçu sera donc la $\varepsilon W_{\text{source}}$.

Nous sommes maintenant en mesure d'énoncer les trois formules de puissance de rayonnement obtenues :

1. – *Emission provenant de l'objet* = $\varepsilon \tau W_{\text{obj}}$, ε l'exittance de l'objet et τ étant le facteur de transmission de l'atmosphère. La température de l'objet est T_{obj} .

2 – *Emission réfléchie provenant de sources ambiantes* = $(1 - \varepsilon) \tau W_{\text{refl}}$, $(1 - \varepsilon)$ étant le facteur de réflexion de l'objet. Les sources ambiantes ont la température T_{refl} .

Nous sommes partis du principe que la température T_{refl} est identique pour toutes les surfaces qui émettent un rayonnement dans une demi-sphère à partir d'un point de la surface de l'objet. Bien sûr, cela correspond parfois une simplification de la réalité. Toutefois, il s'agit d'une simplification nécessaire pour dériver une formule exploitable, et T_{refl} peut, du moins en théorie, se voir attribuer une valeur représentant une température efficace dans un milieu environnant complexe.

Notez également que nous sommes partis du principe que l'exittance du milieu environnant = 1. Ce qui, selon la loi de Kirchhoff est correct : tout rayonnement venant frapper les surfaces des milieux environnants peut être absorbé par ces mêmes surfaces. Ainsi l'exittance = 1. (Notez également que la dernière discussion requiert la prise en compte de la totalité de la sphère autour de l'objet.)

3 – *Emission provenant de l'atmosphère* = $(1 - \tau) \tau W_{\text{atm}}$ $(1 - \tau)$ étant l'exittance de l'atmosphère. La température de l'atmosphère est T_{atm} .

Le total de la puissance de rayonnement reçu peut alors être énoncé comme suit (Equation 2) :

$$W_{\text{tot}} = \varepsilon \tau W_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon) \tau W_{\text{refl}} + (1 - \tau) W_{\text{atm}}$$

On multiplie chaque terme par la constante C de l'Equation 1 et on remplace les produits CW par la valeur U correspondante selon la même équation, et on obtient (Equation 3) :

$$U_{tot} = \varepsilon\tau U_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau U_{refl} + (1 - \tau)U_{atm}$$

Résoudre l'Equation 3 pour U_{obj} (Equation 4) :

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon\tau}U_{tot} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}U_{refl} - \frac{1 - \tau}{\varepsilon\tau}U_{atm}$$

Ceci est la formule de mesure générale utilisée dans tout équipement thermographique de FLIR Systems. Les voltages de la formule sont :

Figure 19.2 Voltages

U_{obj}	Voltage de sortie de la caméra calculé pour un corps noir d'une température T_{obj} , par ex. un voltage pouvant être directement converti en une température d'objet réelle.
U_{tot}	Voltage de sortie de caméra mesuré pour le cas présent.
U_{refl}	En théorie, le voltage de sortie de caméra pour un corps noir d'une température T_{refl} selon l'étalonnage.
U_{atm}	En théorie, le voltage de sortie de caméra pour un corps noir d'une température T_{atm} selon l'étalonnage.

L'utilisateur doit fournir un certain nombre de valeurs de paramètres pour le calcul :

- exitance de l'objet ε ,
- humidité relative,
- T_{atm}
- distance de l'objet (D_{obj}),
- température (réelle) du milieu environnant de l'objet, ou la température ambiante réfléchie T_{refl} , et
- température de l'atmosphère T_{atm} .

Cette tâche peut parfois s'avérer difficile pour l'utilisateur étant donné qu'il n'existe aucun moyen d'obtenir facilement des valeurs précises de l'exitance et du facteur de transmission pour le cas présent. Les deux températures sont normalement moins difficiles à établir, à condition que le milieu environnant ne contienne pas de sources de rayonnement trop intenses ni trop importantes.

Une question se pose alors : Est-il primordial de connaître les valeurs exactes de ces paramètres ? A ce stade, il est intéressant de se pencher sur le problème en se référant aux différents cas de figure et de comparer les magnitudes relatives de trois termes de rayonnement. Vous verrez alors dans quels cas il est important d'utiliser des valeurs correctes pour ces paramètres.

Les figures ci-dessous illustrent les magnitudes relatives dans trois exemples de rayonnement pour trois températures d'objet différentes, deux exitances et deux gammes spectrales : SW et LW. Les autres paramètres ont les valeurs suivantes, lesquelles restent inchangées :

- $\tau = 0,88$
- $T_{\text{refl}} = +20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $T_{\text{atm}} = +20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Il est évident que les mesures de températures d'objet basses posent plus problèmes que les mesures de températures élevées étant donné que les sources de rayonnement « perturbatrices » sont plus importantes dans le premier cas. Si l'exitance de l'objet est basse, la situation s'en trouvera encore plus compliquée.

Il ne nous reste plus qu'à répondre à la question de l'importance d'autoriser la courbe d'étalonnage au delà du point maximum d'étalonnage, ce que nous appelons extrapolation. Supposons que dans un cas de mesure nous obtenions $U_{\text{tot}} = 4,5$ volts. Le point d'étalonnage maximal pour la caméra était de l'ordre de 4,1 volts, une valeur inconnue de l'utilisateur. Ainsi, même si l'objet devait être un corps noir, par ex. $U_{\text{obj}} = U_{\text{tot}}$, en convertissant les 4,5 volts en température, nous procédons en réalité à l'extrapolation de la courbe de l'étalonnage.

Supposons à présent que l'objet ne soit pas noir, mais qu'il ait une exitance de 0,75 et un facteur de transmission de 0,92. Supposons également que les deux seconds termes de l'Equation 4 atteignent environ 0,5 volts à eux-deux. En calculant U_{obj} à l'aide de l'Equation 4, on obtient alors $U_{\text{obj}} = 4,5 / 0,75 / 0,92 - 0,5 = 6,0$. Il s'agit là d'une extrapolation extrême, si l'on considère que l'amplificateur vidéo limite probablement la sortie à 5 volts ! Notez, cependant, que l'application de la courbe d'étalonnage reste un procédé théorique, qui ne fait pas état de limitations électroniques ou autres. Nous pensons que si la caméra ne présente aucune limitation de signal, et si l'étalonnage est largement supérieur à 5 volts, la courbe résultante serait identique à la courbe réelle extrapolée supérieure à 4,1volts, à condition que l'algorithme d'étalonnage soit basé sur la radiophysique, comme l'algorithme de FLIR Systems. Naturellement il doit y avoir une limite à de telles extrapolations.

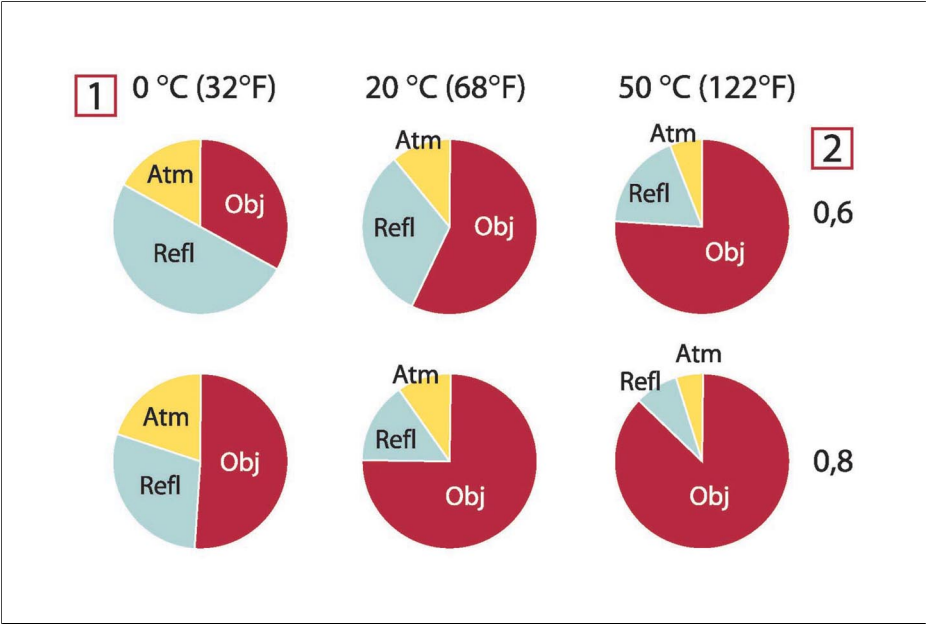


Figure 19.3 Magnitudes relatives de sources de rayonnement sous différentes conditions de mesure (caméra SW). **1** : Température de l'objet ; **2** : Exitance ; **Obj** : Rayonnement d'objet ; **Refl** : Rayonnement réfléchi ; **Atm** : rayonnement de l'atmosphère. Paramètres fixes : $\tau = 0,88$; $T_{\text{refl}} = 20 \text{ °C}$; $T_{\text{atm}} = 20 \text{ °C}$.

10400703,a2

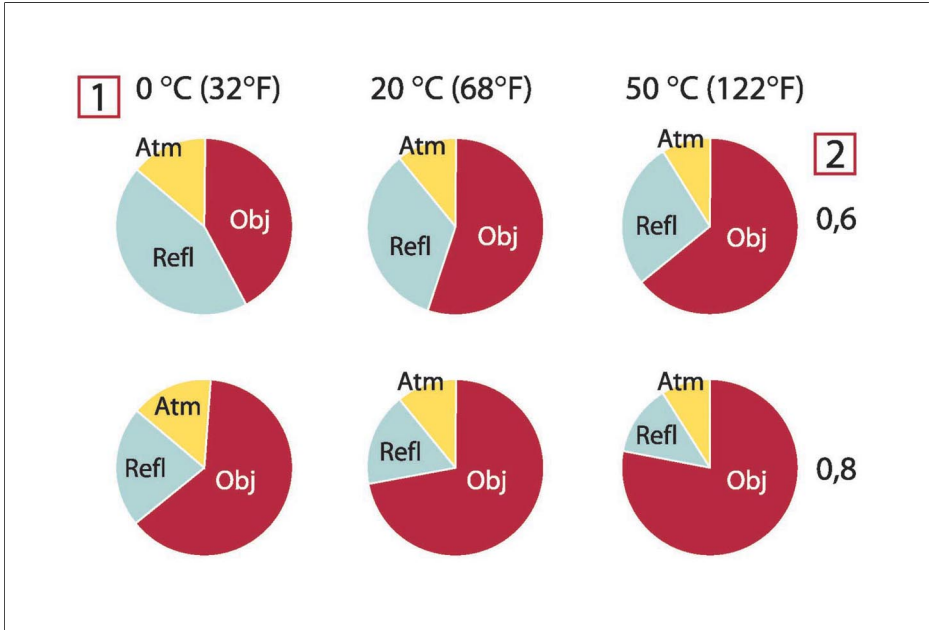


Figure 19.4 Magnitudes relatives de sources de rayonnement sous différentes conditions de mesure (caméra LW). **1** : Température de l'objet ; **2** : Exitance ; **Obj** : Rayonnement d'objet ; **Refl** : Rayonnement réfléchi ; **Atm** : rayonnement de l'atmosphère. Paramètres fixes : $\tau = 0,88$; $T_{\text{refl}} = 20 \text{ °C}$; $T_{\text{atm}} = 20 \text{ °C}$.

20 Tables des émissivités

Cette section rassemble les données d'émissivité issues des publications relatives à l'infrarouge et des mesures issues des systèmes FLIR Systems.

20.1 *Références*

1	Mikaél A. Bramson : <i>Infrared Radiation, A Handbook for Applications</i> . Plenum press, N.Y.
2	William L. Wolfe, George J. Zissis : <i>The Infrared Handbook</i> , Office of Naval Research, Department of Navy. Washington, D.C.
3	Madding, R. P. : <i>Thermographic Instruments and systems</i> . Madison, Wisconsin : University of Wisconsin - Extension, Department of Engineering and Applied Science.
4	William L. Wolfe : <i>Handbook of Military Infrared Technology</i> , Office of Naval Research, Department of Navy. Washington, D.C.
5	Jones, Smith, Probert : <i>External thermography of buildings...</i> Proc. of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, vol. 110, Industrial and Civil Applications of Infrared Technology. London, June 1977.
6	Paljak, Pettersson : <i>Thermography of Buildings</i> . Swedish Building Research Institute. Stockholm, 1972.
7	Vlcek, J : <i>Determination of emissivity with imaging radiometers and some emissivities at $\lambda = 5 \mu\text{m}$</i> . Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
8	Kern : <i>Evaluation of infrared emission of clouds and ground as measured by weather satellites</i> . Defence Documentation Center, AD 617 417.
9	Öhman, Claes : <i>Emittansmätningar med AGEMA E-Box</i> . Teknisk rapport, AGEMA 1999. (Emittance measurements using AGEMA E-Box. Technical report, AGEMA 1999.)
10	Mattei, S., Tang-Kwor, E : <i>Emissivity measurements for Nextel Velvet coating 811-21 between -36°C AND 82°C</i> .
11	Lohrengel & Todtenhaupt (1996)
12	ITC Technical publication 32.
13	ITC Technical publication 29.

20.2 *Remarque importante concernant les tables d'émissivité*

Les valeurs d'émissivité du tableau ci-dessous sont enregistrées à l'aide d'une caméra ondes courtes (SW). Ces valeurs ne sont que des recommandations et sont à utiliser par précaution.

20.3 Tables

Figure 20.1 **T** : Spectre total ; **SW** : 2–5 μm ; **LW** : 8–14 μm ; **LLW** : 6,5–20 μm ; **1** : Matériau ; **2** : Caractéristiques ; **3** : Température en $^{\circ}\text{C}$; **4** : Spectre ; **5** : Emissivité ; **6** : Référence

1	2	3	4	5	6
3M type 35	Ruban adhésif isolant vinyle (plusieurs couleurs)	< 80	LW	Environ 0,96	13
3M type 88	Ruban adhésif isolant vinyle noir	< 105	LW	Environ 0,96	13
3M type 88	Ruban adhésif isolant vinyle noir	< 105	MW	< 0,96	13
3M type Super 33+	Ruban adhésif isolant vinyle noir	< 80	LW	Environ 0,96	13
Acier inoxydable	alliage, 8 % Ni, 18 % Cr	500	T	0,35	1
Acier inoxydable	feuille, polie	70	LW	0,14	9
Acier inoxydable	feuille, polie	70	SW	0,18	9
Acier inoxydable	feuille non traitée, légèrement grattée	70	LW	0,28	9
Acier inoxydable	feuille non traitée, légèrement grattée	70	SW	0,30	9
Acier inoxydable	laminé	700	T	0,45	1
Acier inoxydable	sablé	700	T	0,70	1
Acier inoxydable	type 18–8, poncé	20	T	0,16	2
Acier inoxydable	type 18-8, oxydé à 800 $^{\circ}\text{C}$	60	T	0,85	2
Aluminium	anodisé, gris clair, mat	70	LW	0,97	9
Aluminium	anodisé, gris clair, mat	70	SW	0,61	9
Aluminium	anodisé, noir, mat	70	LW	0,95	9
Aluminium	anodisé, noir, mat	70	SW	0,67	9
Aluminium	déposé sous vide	20	T	0,04	2

1	2	3	4	5	6
Aluminium	feuille	27	3 μm	0,09	3
Aluminium	feuille	27	10 μm	0,04	3
Aluminium	feuille, 4 échantillons grattés de façons différentes	70	LW	0,03–0,06	9
Aluminium	feuille, 4 échantillons grattés de façons différentes	70	SW	0,05–0,08	9
Aluminium	feuille anodisée	100	T	0,55	2
Aluminium	fonte, nettoyée sous pression	70	LW	0,46	9
Aluminium	fonte, nettoyée sous pression	70	SW	0,47	9
Aluminium	fortement patiné	17	SW	0,83–0,94	5
Aluminium	oxydé, fortement	50–500	T	0,2–0,3	1
Aluminium	plaque polie	100	T	0,05	4
Aluminium	poli	50–100	T	0,04–0,06	1
Aluminium	poli, feuille	100	T	0,05	2
Aluminium	rugosifié	27	3 μm	0,28	3
Aluminium	rugosifié	27	10 μm	0,18	3
Aluminium	surface brute	20–50	T	0,06–0,07	1
Aluminium	tel quel, feuille	100	T	0,09	2
Aluminium	tel quel, plaque	100	T	0,09	4
Aluminium	trempe dans du HNO_3 , plaque	100	T	0,05	4
Amiante	ardoise	20	T	0,96	1
Amiante	Carrelage pour sol	35	SW	0,94	7
Amiante	panneau	20	T	0,96	1
Amiante	papier	40–400	T	0,93–0,95	1
Amiante	poudre		T	0,40–0,60	1
Amiante	toile		T	0,78	1

1	2	3	4	5	6
Argent	poli	100	T	0,03	2
Argent	pur, poli	200–600	T	0,02–0,03	1
Argile	cuite	70	T	0,91	1
Asphalte routier		4	LLW	0,967	8
Béton		20	T	0,92	2
Béton	allée	5	LLW	0,974	8
Béton	brut	17	SW	0,97	5
Béton	sec	36	SW	0,95	7
Bois		17	SW	0,98	5
Bois		19	LLW	0,962	8
Bois	blanc, humide	20	T	0,7–0,8	1
Bois	chêne raboté	20	T	0,90	2
Bois	chêne raboté	70	LW	0,88	9
Bois	chêne raboté	70	SW	0,77	9
Bois	contreplaqué, finition lisse, sec	36	SW	0,82	7
Bois	contreplaqué, non traité	20	SW	0,83	6
Bois	pin, 4 échantillons différents	70	LW	0,81–0,89	9
Bois	pin, 4 échantillons différents	70	SW	0,67–0,75	9
Bois	poli		T	0,5–0,7	1
Bois	raboté	20	T	0,8–0,9	1
Brique	alumine	17	SW	0,68	5
Brique	argile réfractaire	20	T	0,85	1
Brique	argile réfractaire	1000	T	0,75	1
Brique	argile réfractaire	1200	T	0,59	1
Brique	brique réfractaire	17	SW	0,68	5
Brique	commune	17	SW	0,86–0,81	5

1	2	3	4	5	6
Brique	hydrofuge	17	SW	0,87	5
Brique	maçonnerie	35	SW	0,94	7
Brique	maçonnerie, plâtrée	20	T	0,94	1
Brique	réfractaire, corindon	1000	T	0,46	1
Brique	réfractaire, faiblement rayonnante	500–1000	T	0,65–0,75	1
Brique	réfractaire, fortement rayonnante	500–1000	T	0,8–0,9	1
Brique	réfractaire, magnésite	1000–1300	T	0,38	1
Brique	rouge, brut	20	T	0,88–0,93	1
Brique	rouge, commune	20	T	0,93	2
Brique	silice, 95 % SiO ₂	1230	T	0,66	1
Brique	silice de dinas, émaillée, brute	1100	T	0,85	1
Brique	silice de dinas, non émaillée, brute	1000	T	0,80	1
Brique	silice de dinas, réfractaire	1000	T	0,66	1
Brique	sillimanite, 33 % SiO ₂ , 64 % Al ₂ O ₃	1500	T	0,29	1
Bronze	bronze de phosphore	70	LW	0,06	9
Bronze	bronze de phosphore	70	SW	0,08	9
Bronze	poli	50	T	0,1	1
Bronze	poreux, brut	50–150	T	0,55	1
Bronze	poudre		T	0,76–0,80	1
Bronze d'aluminium		20	T	0,60	1

1	2	3	4	5	6
Caoutchouc	dur	20	T	0,95	1
Caoutchouc	souple, gris, brut	20	T	0,95	1
Carbone	noir de fumée	20–400	T	0,95–0,97	1
Carbone	poudre de charbon de bois		T	0,96	1
Carbone	poudre de graphite		T	0,97	1
Carbone	suie de bougie	20	T	0,95	2
Carbone	surface graphite, limée	20	T	0,98	2
Chaux			T	0,3–0,4	1
Chrome	poli	50	T	0,10	1
Chrome	poli	500–1000	T	0,28–0,38	1
Ciment		17	SW	0,87	5
Ciment	sec	36	SW	0,94	7
Cuir	tanné		T	0,75–0,80	1
Cuivre	commercial, lustré	20	T	0,07	1
Cuivre	électrolytique, poli	–34	T	0,006	4
Cuivre	électrolytique, soigneusement poli	80	T	0,018	1
Cuivre	en fusion	1100–1300	T	0,13–0,15	1
Cuivre	oxydé	50	T	0,6–0,7	1
Cuivre	oxydé, fortement	20	T	0,78	2
Cuivre	oxydé, noir	27	T	0,78	4
Cuivre	oxydé en noir		T	0,88	1
Cuivre	poli	50–100	T	0,02	1
Cuivre	poli	100	T	0,03	2
Cuivre	poli, commercial	27	T	0,03	4
Cuivre	poli, par moyen mécanique	22	T	0,015	4

1	2	3	4	5	6
Cuivre	pur, surface soigneusement préparée	22	T	0,008	4
Cuivre	raclé	27	T	0,07	4
Cuivre jaune	feuille, laminée	20	T	0,06	1
Cuivre jaune	feuille, poncée avec de la toile émeri	20	T	0,2	1
Cuivre jaune	mat, terni	20–350	T	0,22	1
Cuivre jaune	oxydé	70	SW	0,04–0,09	9
Cuivre jaune	oxydé	70	LW	0,03–0,07	9
Cuivre jaune	oxydé	100	T	0,61	2
Cuivre jaune	oxydé à 600 °C	200–600	T	0,59–0,61	1
Cuivre jaune	poli	200	T	0,03	1
Cuivre jaune	poli, fortement	100	T	0,03	2
Cuivre jaune	poncé avec de la toile émeri grain 80	20	T	0,20	2
Dioxyde de cuivre	poudre		T	0,84	1
Eau	couche de >0,1 mm d'épaisseur	0–100	T	0,95–0,98	1
Eau	cristaux gelés	–10	T	0,98	2
Eau	distillée	20	T	0,96	2
Eau	glace, lisse	–10	T	0,96	2
Eau	glace, lisse	0	T	0,97	1
Eau	glace, recouverte de givre épais	0	T	0,98	1
Eau	neige		T	0,8	1
Eau	neige	–10	T	0,85	2
Ebonite			T	0,89	1
Email		20	T	0,9	1

1	2	3	4	5	6
Email	vernis	20	T	0,85–0,95	1
Eméri	gros grain	80	T	0,85	1
Etain	acier en feuille plaqué d'étain	100	T	0,07	2
Etain	lustré	20–50	T	0,04–0,06	1
Fer, fonte	fonte	50	T	0,81	1
Fer, fonte	lingots	1000	T	0,95	1
Fer, fonte	liquide	1300	T	0,28	1
Fer, fonte	non corroyé	900–1100	T	0,87–0,95	1
Fer, fonte	oxydé	38	T	0,63	4
Fer, fonte	oxydé	100	T	0,64	2
Fer, fonte	oxydé	260	T	0,66	4
Fer, fonte	oxydé	538	T	0,76	4
Fer, fonte	oxydé à 600 °C	200–600	T	0,64–0,78	1
Fer, fonte	poli	38	T	0,21	4
Fer, fonte	poli	40	T	0,21	2
Fer, fonte	poli	200	T	0,21	1
Fer, fonte	usiné	800–1000	T	0,60–0,70	1
Fer et acier	brillant, gravé	150	T	0,16	1
Fer et acier	brut, surface plane	50	T	0,95–0,98	1
Fer et acier	corroyé, poli avec soin	40–250	T	0,28	1
Fer et acier	couche d'oxyde brillante, feuille	20	T	0,82	1
Fer et acier	couvert de rouille rouge	20	T	0,61–0,85	1
Fer et acier	électrolytique	22	T	0,05	4
Fer et acier	électrolytique	100	T	0,05	4
Fer et acier	électrolytique	260	T	0,07	4
Fer et acier	électrolytique, soi- gneusement poli	175–225	T	0,05–0,06	1

1	2	3	4	5	6
Fer et acier	feuille laminée	50	T	0,56	1
Fer et acier	feuille polie	750–1050	T	0,52–0,56	1
Fer et acier	feuille polie	950–1100	T	0,55–0,61	1
Fer et acier	feuille très rouillée	20	T	0,69	2
Fer et acier	fortement oxydé	50	T	0,88	1
Fer et acier	fortement oxydé	500	T	0,98	1
Fer et acier	juste laminé	20	T	0,24	1
Fer et acier	juste poncé avec de la toile émeri	20	T	0,24	1
Fer et acier	laminé à chaud	20	T	0,77	1
Fer et acier	laminé à chaud	130	T	0,60	1
Fer et acier	laminé à froid	70	LW	0,09	9
Fer et acier	laminé à froid	70	SW	0,20	9
Fer et acier	oxydé	100	T	0,74	1
Fer et acier	oxydé	100	T	0,74	4
Fer et acier	oxydé	125–525	T	0,78–0,82	1
Fer et acier	oxydé	200	T	0,79	2
Fer et acier	oxydé	200–600	T	0,80	1
Fer et acier	oxydé	1227	T	0,89	4
Fer et acier	poli	100	T	0,07	2
Fer et acier	poli	400–1000	T	0,14–0,38	1
Fer et acier	rouillé, rouge	20	T	0,69	1
Fer et acier	rouillé (couleur rouge), feuille	22	T	0,69	4
Fer et acier	très rouillé	17	SW	0,96	5
Fer étamé	feuille	24	T	0,064	4
Fer galvanisé	feuille	92	T	0,07	4
Fer galvanisé	feuille, oxydée	20	T	0,28	1
Fer galvanisé	feuille lustrée	30	T	0,23	1

1	2	3	4	5	6
Fer galvanisé	très oxydé	70	LW	0,85	9
Fer galvanisé	très oxydé	70	SW	0,64	9
Glace : voir Eau					
Goudron			T	0,79–0,84	1
Goudron	papier	20	T	0,91–0,93	1
Granite	brut	21	LLW	0,879	8
Granite	brut, 4 échantillons différents	70	LW	0,77–0,87	9
Granite	brut, 4 échantillons différents	70	SW	0,95–0,97	9
Granite	poli	20	LLW	0,849	8
Grès	brut	19	LLW	0,935	8
Grès	poli	19	LLW	0,909	8
Gypse		20	T	0,8–0,9	1
Huile, lubrifiante	film de 0,025 mm	20	T	0,27	2
Huile, lubrifiante	film de 0,050 mm	20	T	0,46	2
Huile, lubrifiante	film de 0,125 mm	20	T	0,72	2
Huile, lubrifiante	film sur base Ni : base Ni uniquement	20	T	0,05	2
Huile, lubrifiante	revêtement épais	20	T	0,82	2
Hydroxyde d'aluminium	poudre		T	0,28	1
Krylon Ultra-flat black 1602	Noire mate	Température ambiante jusqu'à 175	LW	Environ 0,96	12
Krylon Ultra-flat black 1602	Noire mate	Température ambiante jusqu'à 175	MW	Environ 0,97	12
Magnésium		22	T	0,07	4
Magnésium		260	T	0,13	4
Magnésium		538	T	0,18	4
Magnésium	poli	20	T	0,07	2

1	2	3	4	5	6
Magnésium en poudre			T	0,86	1
Minium de plomb		100	T	0,93	4
Minium de plomb, poudre		100	T	0,93	1
Molybdène		600–1000	T	0,08–0,13	1
Molybdène		1500–2200	T	0,19–0,26	1
Molybdène	filament	700–2500	T	0,1–0,3	1
Mosaïque	émaillée	17	SW	0,94	5
Neige : voir Eau					
Nextel Velvet 811-21 Black	Noire mate	–60–150	LW	> 0,97	10 et 11
Nichrome	fil, nettoyé	50	T	0,65	1
Nichrome	fil, nettoyé	500–1000	T	0,71–0,79	1
Nichrome	fil, oxydé	50–500	T	0,95–0,98	1
Nichrome	laminé	700	T	0,25	1
Nichrome	sablé	700	T	0,70	1
Nickel	déposé électrolytiquement, poli	20	T	0,05	2
Nickel	déposé électrolytiquement sur fer, non poli	20	T	0,11–0,40	1
Nickel	déposé électrolytiquement sur fer, non poli	22	T	0,11	4
Nickel	déposé électrolytiquement sur fer, poli	22	T	0,045	4
Nickel	électrolytique	22	T	0,04	4
Nickel	électrolytique	38	T	0,06	4
Nickel	électrolytique	260	T	0,07	4
Nickel	électrolytique	538	T	0,10	4
Nickel	fil	200–1000	T	0,1–0,2	1

1	2	3	4	5	6
Nickel	mat clair	122	T	0,041	4
Nickel	oxydé	200	T	0,37	2
Nickel	oxydé	227	T	0,37	4
Nickel	oxydé	1227	T	0,85	4
Nickel	oxydé à 600 °C	200–600	T	0,37–0,48	1
Nickel	poli	122	T	0,045	4
Nickel	pur (commercial), poli	100	T	0,045	1
Nickel	pur (commercial), poli	200–400	T	0,07–0,09	1
Or	poli	130	T	0,018	1
Or	poli, fortement	100	T	0,02	2
Or	poli, soigneusement	200–600	T	0,02–0,03	1
Oxyde d'aluminium	activé, poudre		T	0,46	1
Oxyde d'aluminium	pur, poudre		T	0,16	1
Oxyde de cuivre	rouge, poudre		T	0,70	1
Oxyde de nickel		500–650	T	0,52–0,59	1
Oxyde de nickel		1000–1250	T	0,75–0,86	1
Panneau de particules	non traité	20	SW	0,90	6
Papier	4 couleurs différentes	70	LW	0,92–0,94	9
Papier	4 couleurs différentes	70	SW	0,68–0,74	9
Papier	à lettres de luxe blanc	20	T	0,93	2
Papier	blanc	20	T	0,7–0,9	1
Papier	blanc, 3 éclats différents	70	LW	0,88–0,90	9

1	2	3	4	5	6
Papier	blanc, 3 éclats différents	70	SW	0,76–0,78	9
Papier	bleu, foncé		T	0,84	1
Papier	jaune		T	0,72	1
Papier	noir		T	0,90	1
Papier	noir, mat		T	0,94	1
Papier	noir, mat	70	LW	0,89	9
Papier	noir, mat	70	SW	0,86	9
Papier	recouvert de vernis noir		T	0,93	1
Papier	rouge		T	0,76	1
Papier	vert		T	0,85	1
Papier peint	motif léger, gris clair	20	SW	0,85	6
Papier peint	motif léger, rouge	20	SW	0,90	6
Peau	humaine	32	T	0,98	2
Peinture	8 différentes couleurs et qualités	70	LW	0,92–0,94	9
Peinture	8 différentes couleurs et qualités	70	SW	0,88–0,96	9
Peinture	à l'huile	17	SW	0,87	5
Peinture	à l'huile, différentes couleurs	100	T	0,92–0,96	1
Peinture	à l'huile, grise, brillante	20	SW	0,96	6
Peinture	à l'huile, grise, mate	20	SW	0,97	6
Peinture	à l'huile, moyenne de 16 couleurs	100	T	0,94	2
Peinture	à l'huile, noire, brillante	20	SW	0,92	6
Peinture	à l'huile, noire, mate	20	SW	0,94	6

1	2	3	4	5	6
Peinture	Aluminium, de différents âges	50–100	T	0,27–0,67	1
Peinture	cadmium jaune		T	0,28–0,33	1
Peinture	chrome vert		T	0,65–0,70	1
Peinture	cobalt bleu		T	0,7–0,8	1
Peinture	plastique, blanche	20	SW	0,84	6
Peinture	plastique, noire	20	SW	0,95	6
Plaque de fibres	aggloméré	70	LW	0,88	9
Plaque de fibres	aggloméré	70	SW	0,75	9
Plaque de fibres	dure, non traitée	20	SW	0,85	6
Plaque de fibres	panneau de particules	70	LW	0,89	9
Plaque de fibres	panneau de particules	70	SW	0,77	9
Plaque de fibres	poreuse, non traitée	20	SW	0,85	6
Plastique	plaque d'isolation en polyuréthane	70	LW	0,55	9
Plastique	plaque d'isolation en polyuréthane	70	SW	0,29	9
Plastique	PVC, sol plastique, mat, structuré	70	LW	0,93	9
Plastique	PVC, sol plastique, mat, structuré	70	SW	0,94	9
Plastique	stratifié en fibre de verre (carte de circuit imprimé)	70	LW	0,91	9
Plastique	stratifié en fibre de verre (carte de circuit imprimé)	70	SW	0,94	9
Platine		17	T	0,016	4
Platine		22	T	0,03	4

1	2	3	4	5	6
Platine		100	T	0,05	4
Platine		260	T	0,06	4
Platine		538	T	0,10	4
Platine		1000–1500	T	0,14–0,18	1
Platine		1094	T	0,18	4
Platine	fil	50–200	T	0,06–0,07	1
Platine	fil	500–1000	T	0,10–0,16	1
Platine	fil	1400	T	0,18	1
Platine	pur, poli	200–600	T	0,05–0,10	1
Platine	ruban	900–1100	T	0,12–0,17	1
Plâtre		17	SW	0,86	5
Plâtre	panneau de plâtre, non traité	20	SW	0,90	6
Plâtre	revêtement brut	20	T	0,91	2
Plomb	brillant	250	T	0,08	1
Plomb	non oxydé, poli	100	T	0,05	4
Plomb	oxydé, gris	20	T	0,28	1
Plomb	oxydé, gris	22	T	0,28	4
Plomb	oxydé à 200 °C	200	T	0,63	1
Polystyrène expansé	isolation	37	SW	0,60	7
Porcelaine	blanche, brillante		T	0,70–0,75	1
Porcelaine	émaillée	20	T	0,92	1
Sable			T	0,60	1
Sable		20	T	0,90	2
Scories	chaudière	0–100	T	0,97–0,93	1
Scories	chaudière	200–500	T	0,89–0,78	1
Scories	chaudière	600–1200	T	0,76–0,70	1
Scories	chaudière	1400–1800	T	0,69–0,67	1

1	2	3	4	5	6
Sol	saturé d'eau	20	T	0,95	2
Sol	sec	20	T	0,92	2
Stuc	brut, chaulé	10–90	T	0,91	1
Tissus	noir	20	T	0,98	1
Titane	oxydé à 540 °C	200	T	0,40	1
Titane	oxydé à 540 °C	500	T	0,50	1
Titane	oxydé à 540 °C	1000	T	0,60	1
Titane	poli	200	T	0,15	1
Titane	poli	500	T	0,20	1
Titane	poli	1000	T	0,36	1
Tungstène		200	T	0,05	1
Tungstène		600–1000	T	0,1–0,16	1
Tungstène		1500–2200	T	0,24–0,31	1
Tungstène	filament	3300	T	0,39	1
Vernis	3 couleurs pulvérisées sur aluminium	70	LW	0,92–0,94	9
Vernis	3 couleurs pulvérisées sur aluminium	70	SW	0,50–0,53	9
Vernis	Aluminium sur une surface brute	20	T	0,4	1
Vernis	bakélite	80	T	0,83	1
Vernis	blanc	40–100	T	0,8–0,95	1
Vernis	blanc	100	T	0,92	2
Vernis	mat	20	SW	0,93	6
Vernis	noir, brillant, pulvérisé sur fer	20	T	0,87	1
Vernis	noir, mat	40–100	T	0,96–0,98	1
Vernis	noir, mat	100	T	0,97	2

1	2	3	4	5	6
Vernis	résistant à la chaleur	100	T	0,92	1
Vernis	sur sol recouvert de parquet en chêne	70	LW	0,90–0,93	9
Vernis	sur sol recouvert de parquet en chêne	70	SW	0,90	9
Zinc	feuille	50	T	0,20	1
Zinc	oxydé à 400 °C	400	T	0,11	1
Zinc	poli	200–300	T	0,04–0,05	1
Zinc	surface oxydée	1000–1200	T	0,50–0,60	1

A note on the technical production of this publication

This publication was produced using XML—the *eXtensible Markup Language*. For more information about XML, please visit <http://www.w3.org/XML/>

A note on the typeface used in this publication

This publication was typeset using Swiss 721, which is Bitstream's pan-European version of the Helvetica™ typeface. Helvetica™ was designed by Max Miedinger (1910–1980).

List of effective files

20235106.xml b18
20235206.xml b10
20235306.xml b11
20236706.xml b22
20237106.xml b12
20238506.xml a8
20238706.xml a9
20250406.xml a15
20254903.xml a59
20257006.xml a21
20275206.xml a12
20287306.xml a4
20290506.xml a2
20290606.xml a1
20290706.xml a3
20290906.xml a2
20291006.xml a2
20291106.xml a2
20291206.xml a2
20291306.xml a1
20291406.xml a2
20291606.xml a1
20292406.xml a1
R116.rcp a8
config.xml a5



www.flir.com