

Sommaire

AVANT-PROPOS.....	10
INTRODUCTION À LA THERMOGRAPHIE DU BÂTIMENT	13
PARTIE I	
<hr/>	
LES FONDEMENTS DE LA PRATIQUE.....	23
1 ÉLÉMENTS DE THERMIQUE DU BÂTIMENT	24
2 RAYONNEMENTS ET PROPRIÉTÉS RADIATIVES DES MATÉRIAUX.....	37
3 LA CAMÉRA THERMIQUE : CARACTÉRISTIQUES UTILES ET CONSIDÉRATIONS PRATIQUES.....	56
4 QUE MESURE LA CAMÉRA THERMIQUE ?	69
PARTIE II	
<hr/>	
L'ÉLABORATION DU DIAGNOSTIC THERMOGRAPHIQUE.....	87
5 LE CADRE NORMATIF EN THERMOGRAPHIE	88
6 LE DIAGNOSTIC THERMOGRAPHIQUE.....	93
7 LA SIMULATION THERMIQUE.....	110
PARTIE III	
<hr/>	
CHEMINEMENT : DE L'ANALYSE AU RAPPORT	123
8 LES APPLICATIONS DE LA THERMOGRAPHIE DANS LE BÂTIMENT.....	124
9 DES IRRÉGULARITÉS QUI NE SONT PAS DES DÉFAUTS.....	150
10 L'INTERPRÉTATION DES IMAGES THERMIQUES ET DES THERMOGRAMMES.....	160
11 LES DOCUMENTS DU DIAGNOSTIC THERMOGRAPHIQUE	175
CONCLUSION : L'AVENIR DE LA THERMOGRAPHIE DU BÂTIMENT	191
ANNEXES.....	193

Table des matières

AVANT-PROPOS.....	10
INTRODUCTION À LA THERMOGRAPHIE DU BÂTIMENT	13
PARTIE I	
<hr/>	
LES FONDEMENTS DE LA PRATIQUE.....	23
1 ÉLÉMENTS DE THERMIQUE DU BÂTIMENT	24
INTRODUCTION	24
LA TEMPÉRATURE	24
LES TROIS MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR	25
LA PAROI PLANE HOMOGENE.....	25
LA PAROI PLANE HOMOGENE « RÉELLE ».....	31
LES PONTS THERMIQUES	31
DYNAMIQUE DES BÂTIMENTS	33
2 RAYONNEMENTS ET PROPRIÉTÉS	
 RADIATIVES DES MATÉRIAUX	37
LE SPECTRE DES RAYONNEMENTS.....	37
L'ÉMISSION DU RAYONNEMENT	38
RAYONNEMENT RÉFLÉCHI OU TRANSMIS	41
LES UNITÉS DE RAYONNEMENT	42
BILAN RADIATIF.....	43
ÉMISSIVITÉ	44
FACTEUR DE RÉFLEXION ET TYPE DE RÉFLEXION	47
CONSIDÉRATIONS CROISÉES	52
FACTEUR DE TRANSMISSION	54
3 LA CAMÉRA THERMIQUE : CARACTÉRISTIQUES	
 UTILILES ET CONSIDÉRATIONS PRATIQUES.....	56
DEUX ESPACES DISTINCTS : IMAGE ET MESURE	56
BANDE SPECTRALE.....	58
RÉSOLUTION SPATIALE.....	58
FRÉQUENCE IMAGE	59
COURBE D'ÉTALONNAGE.....	60

EXACTITUDE ET COMPENSATION DE DÉRIVE.....	60
BESOINS EN RÉVISION ET RÉÉTALONNAGE	61
RÉSOLUTION THERMIQUE, OU NETD	61
UNIFORMITÉ DE RÉPONSE	62
CADRAGE THERMIQUE : RANGE & LEVEL	62
GRANDEURS D'INFLUENCE.....	65
ENREGISTREMENT DU FICHER-IMAGE	65
COMPLÉMENTS DE LA CAMÉRA	66
SYNTHÈSE SUR LE CHOIX DE LA CAMÉRA THERMIQUE	67
CHOIX DE LA PALETTE DE COULEURS.....	67
4 QUE MESURE LA CAMÉRA THERMIQUE ?.....	69
GÉNÉRALITÉS	69
LA TRANSCRIPTION EN TEMPÉRATURE	69
DÉPERDITIONS ÉNERGÉTIQUES : GÉNÉRALITÉS	72
LA DÉPERDITION RADIATIVE	74
LE Δ DÉPERDITION RADIATIVE.....	75
LE NOMBRE SEID	76
LA MESURE DU « U » D'UNE PAROI	79
LE FACTEUR DE TEMPÉRATURE F_{RSI}	82
CONCLUSIONS.....	83
EXERCICES	84
PARTIE II	
L'ÉLABORATION DU DIAGNOSTIC THERMOGRAPHIQUE...	87
5 LE CADRE NORMATIF EN THERMOGRAPHIE	88
LES NORMES.....	88
LA CERTIFICATION	89
LA NORME APPLICATIVE NF EN 13187.....	90
6 LE DIAGNOSTIC THERMOGRAPHIQUE.....	93
LES CONDITIONS DE L'INTERVENTION	93
LA BOÎTE À OUTILS DU THERMOGRAPHE	96
RECOMMANDATIONS AU DÉBUTANT	98
MESURE ÉVENTUELLE DES « TROIS TEMPÉRATURES »	103
EXAMEN DEPUIS L'INTÉRIEUR	104
EXAMEN DEPUIS L'EXTÉRIEUR.....	108
SAUVEGARDE DES DONNÉES	109
INTERPRÉTATION DES IMAGES THERMIQUES.....	109

7 LA SIMULATION THERMIQUE.....	110
À QUEL THERMOGRAMME S'ATTENDRE ?.....	110
UN EXEMPLE : LE DÉFAUT D'ISOLATION THERMIQUE	111
LIMITE DE DÉTECTION D'UN DÉFAUT D'ISOLATION	112
SIMULATION D'UN PONT THERMIQUE MATÉRIEL	113
SIMULATION D'UN PONT THERMIQUE GÉOMÉTRIQUE.....	115
SIMULATION D'UN TABLEAU D'OUVERTURE	119
PROBLÈMES GÉNÉRÉS PAR L'ITE	119
SIMULATION DE LA CONVECTION NATURELLE	120

PARTIE III

CHEMINEMENT : DE L'ANALYSE AU RAPPORT.....	123
--	-----

8 LES APPLICATIONS DE LA THERMOGRAPHIE	
DANS LE BÂTIMENT	124
L'ISOLATION THERMIQUE.....	124
LES PONTS THERMIQUES	130
LES PROBLÈMES LIÉS À L'AIR.....	130
LES PROBLÈMES LIÉS À L'EAU	134
LE CONFORT THERMIQUE	136
THERMOGRAPHIE DES MENUISERIES	138
CLASSIFICATION DES DÉPERDITIONS : THERMOGRAPHIE COMPARATIVE.....	142
9 DES IRRÉGULARITÉS QUI NE SONT PAS DES DÉFAUTS	150
VARIATION DU COEFFICIENT D'ÉCHANGE SUPERFICIEL RADIATIF.....	151
VARIATION DU COEFFICIENT D'ÉCHANGE SUPERFICIEL CONVECTIF	152
VARIATION DE LA TAMB DE LA PAROI	154
VARIATION DE LA TER DE LA PAROI.....	155
VARIATION DE LA TEMPÉRATURE INTÉRIEURE DU BÂTI	155
VARIATION DE TYPE DE RÉFLEXION DES PAROIS	156
VARIATION DES CONDITIONS MÉTÉO ET INERTIE DES STRUCTURES.....	158
10 L'INTERPRÉTATION DES IMAGES THERMIQUES	
ET DES THERMOGRAMMES.....	160
PRÉAMBULE.....	160
L'INTERPRÉTATION THERMOGRAPHIQUE.....	160
L'INTERPRÉTATION THERMIQUE	162
EXEMPLE D'INTERPRÉTATION.....	166

CONCLUSION.....	172
RÉCAPITULATIF DES PRINCIPALES ERREURS D'INTERPRÉTATION.....	172
11 LES DOCUMENTS DU DIAGNOSTIC THERMOGRAPHIQUE	175
LA PROPOSITION TECHNIQUE ET COMMERCIALE.....	175
LE RAPPORT D'INTERVENTION.....	184
CONCLUSION: L'AVENIR DE LA THERMOGRAPHIE DU BÂTIMENT.....	191
ANNEXES	193
ANNEXE 1 - QUELQUES EXERCICES ÉLÉMENTAIRES DE THERMIQUE	194
ANNEXE 2 - MESURE DE L'ÉMISSIVITÉ DES MATÉRIAUX DU BÂTIMENT	196
ANNEXE 3 - PROGRAMME DE CALCUL DE LA COURBE D'ÉTALONNAGE D'UNE CAMÉRA LW.....	198
ANNEXE 4 - RAYONNEMENT REÇU PAR LA CAMÉRA ET ENVIRONNEMENT RADIATIF	200
ANNEXE 5 - CALCUL DU SEID: COMPARAISON AVEC LE CALCUL DE THERMIQUE CLASSIQUE.....	204
ANNEXE 6 - SIMULATION DE LA CONVECTION NATURELLE.....	206
ANNEXE 7 - DIAGRAMME DE MOLLIER: LE POINT DE ROSÉE	208
ANNEXE 8 - MESURER LA TEMPÉRATURE DU VERRE.....	210
INDEX.....	213

Avant-propos

Stimulée par la prise de conscience mondiale du réchauffement climatique et de la fin inéluctable des énergies fossiles, la performance énergétique du bâtiment est devenue un enjeu majeur désormais incontournable. La consommation énergétique pour le chauffage, inutilement élevée, constitue un fabuleux gisement d'économies à exploiter, cependant qu'améliorer et contrôler la qualité de la construction, dans le respect de normes de plus en plus rigoureuses, est un nouveau défi que les métiers du bâtiment se sont engagés à relever. Deux excellents outils se distinguent actuellement pour contribuer à la performance et assurer son expertise : l'infiltrométrie et la thermographie. La première est exigée par la réglementation thermique RT 2012. La seconde poursuit les formalisation et professionnalisation nécessaires.

Lors d'une réunion au ministère du Développement durable fin 2008, j'ai été interpellé par une question de mon interlocuteur : « L'infiltrométrie a son chiffre. Quel est celui de votre thermographie ? » Outre que, à l'évidence, cette personne n'était pas totalement au fait de la puissante technique qui constitue mon engagement quotidien et le fond permanent de mes réflexions depuis trente ans, la question posée n'était pas de la plus haute pertinence : elle visait à réduire la thermographie à un chiffre sec. La notion même de « graphie », comme dans le mot « photographie », comporte, au contraire, une richesse informative à la fois énergétique (chaleur ou température) et spatiale (image ou carte). Disons maintenant que les lettres de noblesse de la thermographie, dans

son application au bâtiment, seront enfin signées le jour où le législateur aura consacré le parallélisme opérationnel entre thermographie et infiltrométrie. Voilà ce qui sommeille dans des projets encore diffus, naturellement freinés à la fois par la liberté d'entreprendre dont les amateurs tirent un fort profit – et cet ouvrage tentera de rehausser leur niveau, s'ils veulent bien y consacrer quelque effort – et par la réticence au contrôle, bien ordinaire chez chacun de nous. Néanmoins, la remise en cause est une condition nécessaire à la concrétisation des engagements chiffrés.

Je vais dire cependant, pour faire plaisir à mon interlocuteur que, à force de réflexions et de formalisations, j'ai maintenant une réponse positive à apporter à sa question : le chiffre de la thermographie, ce peut être le Seid, lequel définit quantitativement l'importance d'une irrégularité ou d'un défaut, chiffre que nous introduirons dans cet ouvrage. C'est une avancée importante ; il ne reste aux instances qu'à s'en emparer, à y travailler et à l'officialiser. Nous en déduisons une surprenante méthode de mesure du U d'une paroi, en cours de validation expérimentale.

Tout au long de l'ouvrage, et déjà à ce stade, j'insisterai très souvent sur le risque d'erreur d'interprétation. Parmi toutes les applications que j'ai abordées, la thermographie du bâtiment est clairement celle qui est la plus captivante, donc la plus piégeante. L'attrait vertigineux exercé par l'image de la caméra magique (elle voit l'invisible !) exacerbe aussi le pouvoir de cette image :

elle décide alors, à notre insu. Certains sont à la parade, tels des paons, devant leurs donneurs d'ordre, alors qu'ils n'ont fait qu'appuyer sur le bouton de leur boîte de Pandore. Il peut en sortir le meilleur comme le pire, le juste comme le faux.

La thermographie est très simple à mettre en œuvre. Et, dans la plupart des observations du bâtiment, on trouve des images thermiques très aisées à comprendre puis à interpréter. Mais, dans tous les cas, il existe, également et immanquablement, des images thermiques dont la compréhension et l'interprétation nécessitent des connaissances spécifiques que dispensent les formateurs expérimentés. Attention donc : en thermographie, il y a vérité et apparence, et il en est de même pour les centres de formation. La lecture de cet ouvrage prendra corps par la participation à un stage de niveau identique.

Il est absolument fondamental, pour le thermographe, de comprendre les rayonnements avant de s'aventurer à parler de flux de chaleur ou de températures et surtout avant de tenter toute interprétation. La synthèse entre thermographie et interprétation thermique pourra alors se réaliser, loin de la confusion, source d'égarement.

La thermographie est un outil passionnant, puisqu'il combine les avantages de l'image et ceux du mesurage. Il en conjugue aussi les difficultés, en particulier le risque d'une autre confusion : entre ce qui est vu et ce qui est mesuré. Nous soulignerons ce point qui est à l'origine, surtout dans l'application au bâtiment, d'un danger récurrent, dont il est difficile de se débarrasser : l'opérateur se berne lui-même en réglant le cadrage thermique de sa caméra de façon à mettre en évidence ce qu'il croit être essentiel, mais qui se révèle sans importance.

Cet ouvrage est un abrégé consistant. Le lecteur attentif en sortira bien informé, mais ni indemne ni spécialiste de thermographie du bâtiment. Pour les nouveaux venus, l'apprentissage représentera une certaine difficulté et remettra en cause des représentations distordues, voire erronées, dispensées par ailleurs.

Un mot à l'attention des thermographes expérimentés dans d'autres applications et, en particulier, en contrôle des installations électriques : la thermographie du bâtiment est un monde autrement plus vaste, divers et risqué. Ce n'est pas dire que la thermographie du bâtiment soit complexe, comme on le revendiquerait par corporatisme, c'est dire qu'elle est bien spécifique, mais sans rien d'étrange ni de mystérieux. Cette technique s'apprend et donc s'enseigne – j'apporte ici une pierre à cet édifice en construction. Attention, donc ! Oui, maîtriser la thermographie sur les installations électriques ou en maintenance industrielle confère une certaine prédisposition à la thermographie du bâtiment, mais laisse la porte ouverte à l'incohérence des interprétations. C'est vraiment un autre monde où la modestie nécessaire le sera encore davantage.

Et un autre mot à ceux qui appartiennent aux métiers du bâtiment : la thermographie du bâtiment est d'abord et avant tout... de la thermographie, ce qui est en soi également spécifique. Connaître la construction est excellent pour aborder la thermographie de cette construction ; employer la terminologie du bâtiment est important pour parler aux personnes du bâtiment, et « parler la thermographie », aussi couramment que possible, est également un atout, tout autant qu'une preuve de compétence professionnelle. Le métier le plus en concordance avec l'outil thermographique est thermicien du bâtiment, à partir d'un niveau de technicien supérieur.

Cet ouvrage s'adresse donc aux bureaux d'études thermiques, aux diagnostiqueurs et experts immobiliers, aux bureaux de contrôle, et plus largement aux architectes, aux donneurs d'ordre techniques, aux conseillers et aux entrepreneurs engagés dans la performance énergétique.

Ce qui nous importe est la compréhension des phénomènes physiques afin d'éviter les erreurs d'interprétation. Il n'y a guère d'effort à faire ici en matière de mathématiques, ce n'est pas le propos. Mais on évitera de fuir cette formalisation d'accès

aisé, source de simplicité : quelques banales équations de base seulement permettent de décrire la réalité, qui devient ainsi d'une grande évidence.

La thermographie du bâtiment est toujours en cours de formalisation technique et scientifique. Les pays froids, très en avance pour l'emploi des caméras thermiques dans cette application, ont produit quelques bases de réflexion, mais sans poursuivre l'approfondissement indispensable pour s'aventurer sans danger dans ce domaine souvent risqué. Par ailleurs, les formations calibrées par des intérêts financiers sont peu propres à assurer l'indépendance du jugement et risquent d'offrir l'insipidité de « recettes de cuisine » incorporant des ingrédients non indispensables, quand ils ne sont pas franchement nocifs. Finalement, un tel ouvrage se doit d'être un aiguillon pour le questionnement, il est générateur de réflexions

et n'apportera pas de solutions toutes faites, valables pour tous les cas. Ce n'est donc pas un « livre de cuisine ». L'opérateur habitué à l'usage de la tablette tactile, indispensable dans d'autres techniques largement formalisées, pourra ressentir de la frustration à s'aventurer dans un domaine non encore consolidé. Mais, interrogé par ce qu'il ne comprendra pas, il risquera soit d'abandonner rapidement la thermographie et de laisser sa caméra sur l'étagère, soit, tout au contraire, d'adopter énergiquement l'attitude alerte du fouineur futé qui ne s'en laisse pas conter par la beauté des images.

Voici donc de quoi vous permettre de démarrer sérieusement en thermographie du bâtiment et d'apporter à votre tour quelques contributions à la diffusion et à l'épanouissement de cette belle technique.

Remerciements

Si les stagiaires qui m'ont écouté (ils ont été environ 3 700 ces vingt dernières années) pouvaient être nommés ici, je les remercierais personnellement de leurs exigeantes interrogations. Ils m'ont toujours imposé, sans le savoir, de ciseler de nouveaux concepts et de créer la pédagogie thermographique au-delà des récits ressassés dans la banalité des chemins rebattus et tristement inefficaces. Ils m'ont corrigé. D'une formation à l'autre, ils ont induit la structure, la formule et le langage de cet ouvrage. Je le leur dédie, avec reconnaissance.

L'Institut de la Thermographie

Créé en 2009 par Dominique Pajani et par vingt thermographes ayant participé à ses stages de thermographie du bâtiment, l'Institut de la Thermographie est l'association des thermographes professionnels. L'une des missions qu'il se donne est d'organiser la profession tout en agissant pour une reconnaissance et une certification officielle dans le contexte d'implication croissante de la thermographie en performance énergétique du bâtiment. Les thermographes de l'association sont inscrits au tableau des thermographes professionnels.

Cet ouvrage contient l'ensemble du programme sur lequel portent les examens de certification Cofrac (Comité français d'accréditation) de thermographe du bâtiment, exécutés suivant le référentiel de l'Institut de la Thermographie.

Bien au-delà de l'objectif indifférent de la caméra, simple capteur d'imagerie thermique et de mesure thermographique, l'œil du thermographe – c'est le logo de l'association – supervise l'ensemble de la technique : la prise de vue dans des conditions adaptées, l'analyse des images thermiques et l'interprétation des résultats. Il s'agit d'ouvrir l'œil et le bon !

www.institut-thermographie.net et thermographie@orange.fr