

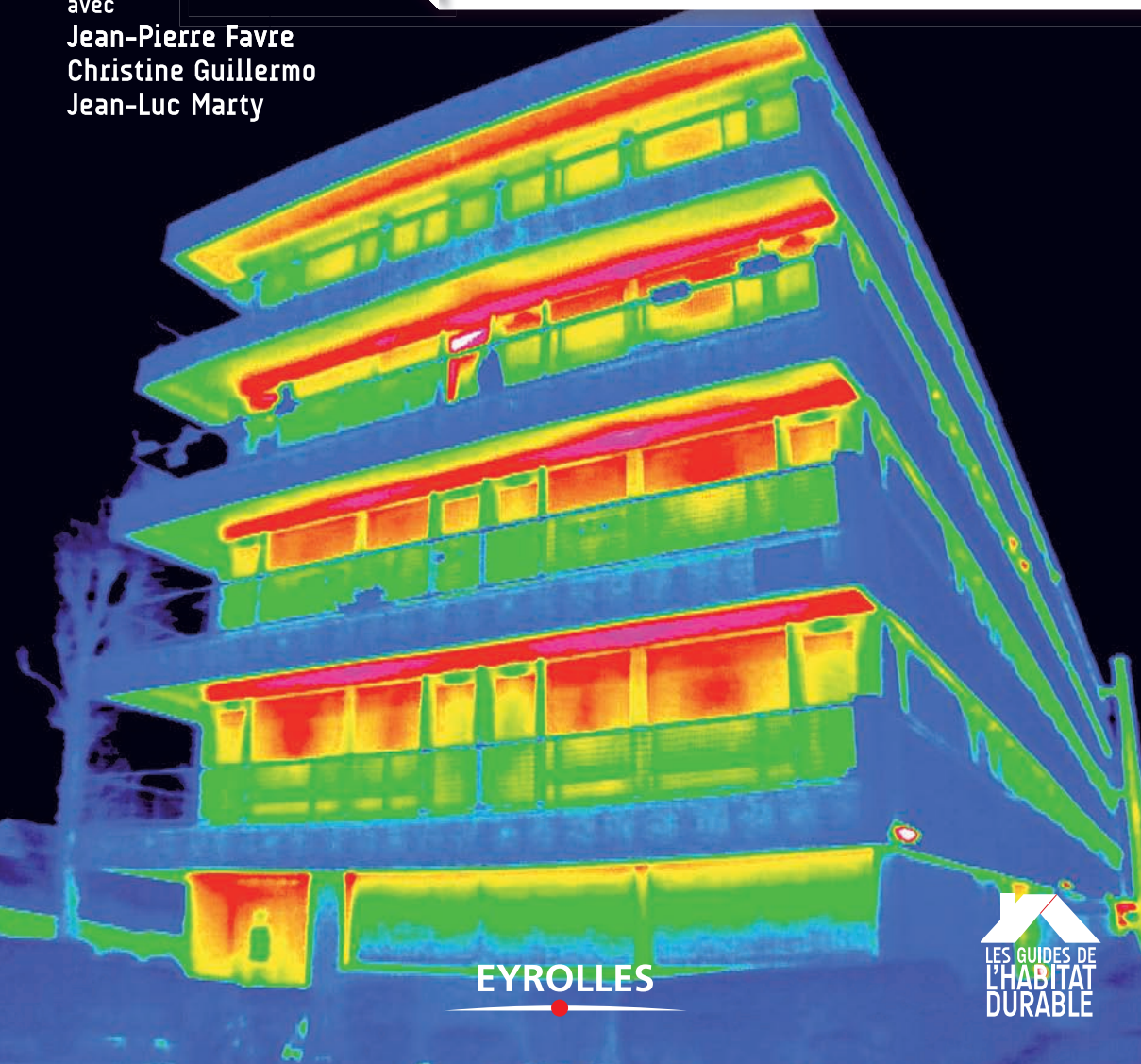
Institut de la
thermographie



GUIDE PRATIQUE DE THERMOGRAPHIE DU BÂTIMENT

Sous la direction de
Dominique Pajani
avec

Jean-Pierre Favre
Christine Guillermo
Jean-Luc Marty



EYROLLES

LES GUIDES DE
L'HABITAT
DURABLE



GUIDE PRATIQUE DE THERMOGRAPHIE DU BÂTIMENT

Devenue une priorité, la performance énergétique du bâtiment est un objectif qui ne peut être approché qu'avec de nouveaux outils dont on sait aujourd'hui que l'un des plus efficaces est la thermographie. Mais au juste, qu'appelle-t-on *thermographie du bâtiment* ?

La matière émet un rayonnement parfois visible mais le plus souvent invisible. Dû à la *température*, il est appelé *rayonnement thermique*. Avec la *caméra thermique*, le thermographe cartographie et mesure les rayonnements : il obtient une *image thermique* et un *thermogramme* dont il déduira les *dépenses radiatives*, lesquelles mettent en évidence les défauts de l'enveloppe.

Consacré à l'apprentissage qu'exige une bonne interprétation des images, indispensable à l'exactitude du diagnostic, ce petit livre contient *le nécessaire du thermographe*.

Abondamment illustré de photos et de schémas en couleurs, les auteurs y délivrent les bases de ce qu'il faut savoir.

Au programme...

Principes physiques, objectifs et chantiers de la thermographie • Le rayonnement (température ; spectre ; luminance). Les quatre types de matériaux du bâtiment • Les bonnes conditions du diagnostic thermographique. Les outils. L'intervention. L'interprétation. Le rapport • L'isolation thermique. Les ponts thermiques. L'étanchéité à l'air. L'eau. Le confort thermique. Le cas des menuiseries. Les risques d'erreurs • Rapport d'intervention simplifié. Index. Bibliographie

Ingénieur de l'École centrale de Lyon, fondateur et président de l'Institut de la thermographie, **Dominique Pajani** s'est entouré de trois autres thermographes professionnels pour rédiger le manuel d'initiation attendu par tous ceux qui, dans le cadre de la RT 2012, veulent améliorer la performance énergétique du bâti existant, en contrôler la rénovation et, dans le neuf, valider les solutions constructives et les mises en œuvre.

Photos en couverture © Institut de la thermographie
Sauf photo de fond en 4^e de couverture © Alena Brozova / Shutterstock

Institut de la thermographie

GUIDE PRATIQUE

DE THERMOGRAPHIE

DU BÂTIMENT

Sous la direction de

Dominique Pajani

avec Jean-Pierre Favre,
Christine Guillermo et Jean-Luc Marty
membres de l'Institut de la thermographie

© Groupe Eyrolles, 2012, ISBN : 978-2-212-13581-7

EYROLLES



SOMMAIRE

INTRODUCTION	7	LES CONDITIONS ADÉQUATES	53
GÉNÉRALITÉS	8	LES PARAMÈTRES INTÉRIEURS	53
LES CHANTIERS	10	LES PARAMÈTRES EXTÉRIEURS	54
PROGRESSION DE L'OUVRAGE	13	CRÉNEAU HORAIRE	55
LES BASES DE LA PRATIQUE	14	DÉROULEMENT DU DIAGNOSTIC	56
<hr/>		EXAMEN DEPUIS L'INTÉRIEUR	56
LA THERMIQUE ET LES DÉPERDITIONS	16	EXAMEN DEPUIS L'EXTÉRIEUR	61
LA TEMPÉRATURE	16	INTERPRÉTATION DES THERMOGRAPHIES	61
LES DÉPERDITIONS DU BÂTIMENT	18	APPLICATIONS	64
LA THERMOGRAPHIE POSSIBLE	20	<hr/>	
LE RAYONNEMENT	21	L'ISOLATION THERMIQUE	66
L'ÉMISSION D'UN CORPS PARFAIT	22	DÉPERDITION ÉNERGÉTIQUE	66
LA LUMINANCE	23	PRINCIPAUX DÉFAUTS D'ISOLATION	67
LES TYPES DE MATÉRIAU	25	LIMITE ET OPTIMISATION	69
RAYONNEMENT DES CORPS RÉELS	25	DE LA DÉTECTION	69
L'ÉMISSIVITÉ	27	LES PONTS THERMIQUES	71
LA TEMPÉRATURE APPARENTE	28	DÉPERDITION ÉNERGÉTIQUE	71
LA RÉFLEXION	28	PRINCIPAUX PONTS THERMIQUES	71
CONSÉQUENCES	33	L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR	75
LES DIFFÉRENTS TYPES DE MATÉRIAUX	34	LES FUITES D'AIR	75
DU BÂTIMENT	34	EXFILTRATION D'AIR CHAUD	75
LE DIAGNOSTIC		INFILTRATION D'AIR FROID	76
THERMOGRAPHIQUE	36	PROBLÈMES LIÉS À L'EAU	80
<hr/>		LE POINT DE ROSÉE ET LE RISQUE	
LA BOÎTE À OUTILS	38	DE CONDENSATION	80
LA CAMÉRA THERMIQUE	38	PRINCIPAUX PROBLÈMES LIÉS À L'EAU	82
L'APPAREIL PHOTO	40	LES FUITES D'EAU	83
AUTRES MATÉRIELS UTILES	40	LE CONFORT THERMIQUE	84
CONSEILS POUR UN DÉBUTANT	42	LA CONDUCTION AU SOL	84
		LE GRADIENT THERMIQUE VERTICAL	85
		LA SENSATION DE PAROI FROIDE	85

L'UNIFORMITÉ DE CHAUFFAGE	86	EXEMPLE	
LES MENUISERIES	88	DE RAPPORT D'INTERVENTION	100
LOCALISATION DES DÉPERDITIONS	88	(VERSION SIMPLIFIÉE)	
PATHOLOGIE DES VITRAGES	90		
LA CONVECTION	91	CONCLUSION	114
DES IRRÉGULARITÉS			
QUI NE SONT PAS DES DÉFAUTS	92	ANNEXES	116
LE COEFFICIENT D'ÉCHANGE			
CONVECTIF OU RADIATIF	92	TEXTES DE RÉFÉRENCE	118
TYPE DE RÉFLEXION DES PAROIS	94		
VARIATION SPATIALE OU TEMPORELLE			
DE L'ENVIRONNEMENT	95	INDEX	119
DISPARITÉ DES TEMPÉRATURES			
À L'INTÉRIEUR DES LOCAUX	97		
L'INERTIE THERMIQUE	98		

CHAPITRE 9**LES PONTS
THERMIQUES****DÉPERDITION
ÉNERGÉTIQUE**

Normalement, les ponts thermiques sont des zones du bâti où la résistance thermique est moindre que le reste de la paroi, ce qui est dû au mode constructif et non à un défaut d'isolation. Ce sont les ponts thermiques *matériels*. Néanmoins, sont aussi nommés ponts thermiques des discontinuités *géométriques* qui génèrent des différences de température. Les ponts thermiques ont essentiellement une allure linéaire ou ponctuelle, par exemple :

- un about de dalle séparant des parois verticales en parpaings (pont linéaire) ;
- un angle à la jonction de deux parois (pont linéaire) ;
- un angle entre une paroi intérieure et une paroi extérieure, un mur de refend (pont linéaire) ;
- des fixations métalliques traversantes d'isolant (pont ponctuel) ;
- des plots de colle ou agrafes de parement (pont ponctuel) ;
- des poutres de béton traversant une isolation intérieure (pont ponctuel).

Ces ponts thermiques, constitutifs du mode de construction, sont normaux, prévus, calculables. Toutefois, puisqu'il est possible de construire sans pont thermique, on peut les considérer comme des défauts de conception du bâti vis-à-vis de la performance énergétique. C'est un problème d'architecture. Peuvent également s'y superposer des problèmes de matière et de mise en œuvre, ou d'autres défauts.

**PRINCIPAUX PONTS
THERMIQUES****PONTS THERMIQUES
MATÉRIELS**

Le thermogramme désormais bien connu dit « des trois pavillons » (voir figure 22) est aisé à interpréter du point de vue qualitatif, puisque les bâtis sont constitués de matériaux de type 1. On notera les ponts thermiques des deux premiers pavillons : l'isolation intérieure du premier est inefficace vis-à-vis des ponts thermiques. Le troisième pavillon, isolé par l'extérieur, manifeste de forts ponts thermiques dus à l'absence d'isolation sur les tableaux, ce qui induit

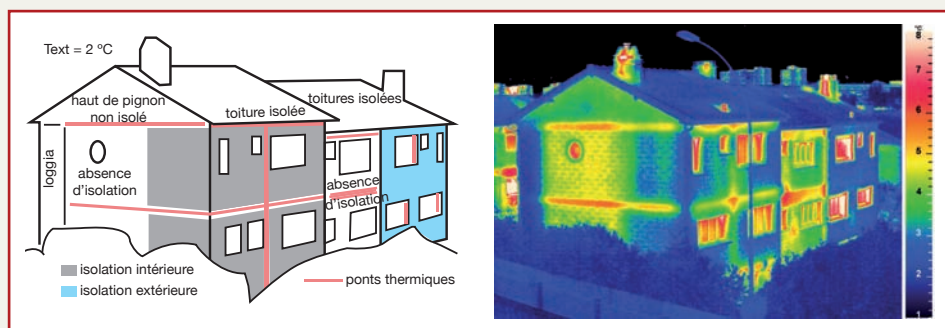


Figure 22 – Le thermogramme dit « des trois pavillons » montrant les effets de l'isolation thermique et les ponts thermiques

des déperditions supérieures à la situation du pavillon sans isolation !

On remarquera également que l'arête de l'angle saillant, la paroi de la loggia du premier pavillon et les toitures sont plus froides, avec une température proche de la température extérieure. La température de ces zones est, de plus, inférieure aux températures des parois déperditrices. Ces zones/structures, du fait de leur plus faible inertie et de leur

température plus basse, sont des indicateurs de la pertinence de l'intervention du point de vue de la météo !

PONTS THERMIQUES GÉOMÉTRIQUES

Pour voir des ponts thermiques d'angle rentrant et d'angle saillant, se reporter par exemple à l'arête des angles rentrants de la figure 19 (voir p. 67) et de la figure 34 (voir p. 83).

Document APUR

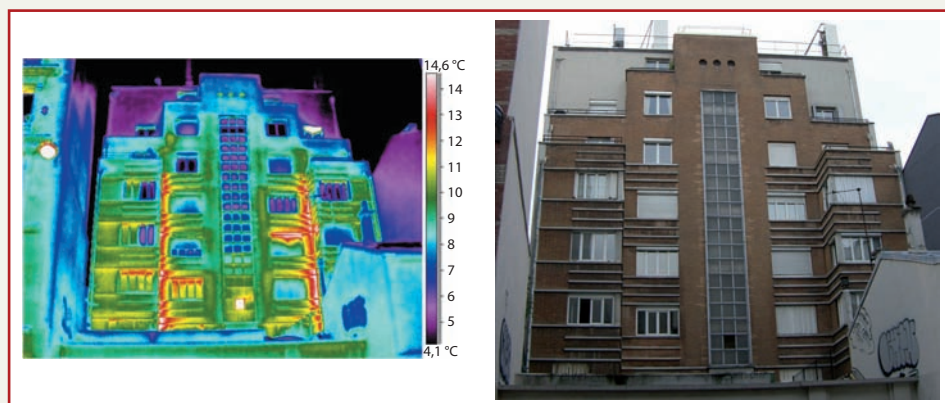


Figure 23 – Immeuble parisien de 1930. On constate deux « colonnes » d'angle rentrant avec cheminée de convection verticale déviée par les modénatures de façades, mais ces phénomènes sont parfaitement normaux pour ce bâtiment non isolé.

L'échauffement constaté dans un angle rentrant vu depuis l'extérieur (comme sur la figure 23), ainsi que le refroidissement dans un angle rentrant vu depuis l'intérieur (voir figures 19 et 34), sont, en principe, parfaitement normaux. Ils donnent cependant lieu à nombre d'interprétations hasardeuses comme un manque d'isolant ou une exfiltration/infiltration d'air. En effet, si la paroi est isolée, le phénomène est réduit mais existe toujours, même si c'est là que l'isolant est le plus épais.

Naturellement, il est toujours possible que, en plus de cette *irrégularité* normale (selon la norme applicative NF EN 13187), il y ait une incorrection de mise en œuvre, donc un affaiblissement de l'isolation, c'est-à-dire un *défaut*. Toute la difficulté est de faire la part des choses, ce qui n'est possible qu'avec de l'expérience, basée sur une approche quantitative par simulation numérique. Il y a donc encore beaucoup de formalisation à réaliser en matière de thermographie des ponts thermiques : si le thermographe a dénoncé une singularité de paroi comme étant un défaut et que, à la vérification, le donneur d'ordre découvre que tout va bien, la situation est désagréable. À l'inverse, il est important également que le donneur d'ordre ne voie pas des défauts partout et, au vu de la thermographie, ne demande pas à l'artisan de corriger des mises en œuvre impeccables ! Voir aussi des irrégularités qui ne sont pas des défauts (voir chapitre 14).

Exemple de simulation numérique

Sans isolation, un pont thermique existe à l'angle rentrant d'un tableau entre la maçonnerie et la menuiserie, ce que met en évidence sur la figure 24 le profil thermique tracé suivant la ligne brisée en pointillés. Ce pont thermique est le plus souvent interprété comme une exfiltration d'air, ce qui est généralement une erreur. L'isolation par l'intérieur fait presque disparaître le phénomène.

De toute évidence, la liaison entre la paroi parpaing et la porte en chêne induit une interrogation sur la qualité de l'étanchéité de la liaison. Et il se peut

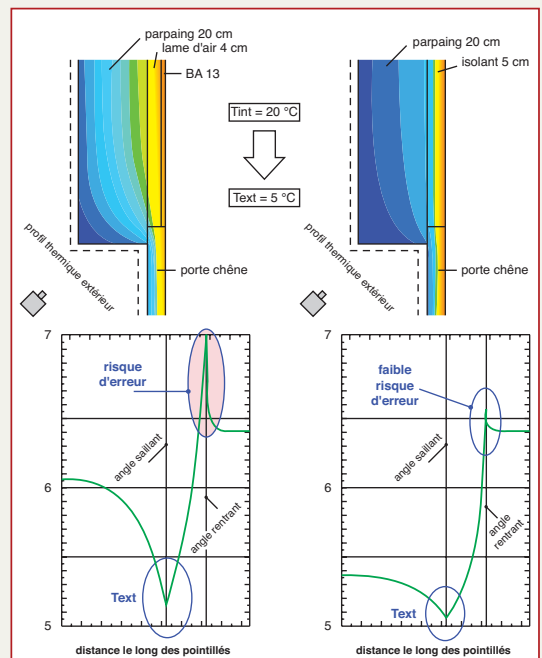


Figure 24 – Exemple de simulation numérique d'un pont thermique à la liaison d'une paroi et d'une porte, pour $T_{int} = 20\text{ °C}$ et $T_{ext} = 5\text{ °C}$

Coupe d'une paroi en parpaings avec porte en chêne en applique, à gauche sans isolation, à droite avec 5 cm d'isolant

donc qu'à l'irrégularité normale (prévue par la simulation) se superpose un défaut d'exfiltration d'air chaud. Le thermographe averti va alors considérer l'aspect de la *régularité verticale de l'irrégularité* ainsi que l'*évasement régulier de l'irrégularité* sous le linteau de l'ouverture, avant de conclure à la présence ou non d'une exfiltration d'air chaud, laquelle conclusion ne sera justifiée que si l'exfiltration est *verticalement irrégulière* !

PONTS THERMIQUES PONCTUELS

Sur la figure 25, la paroi d'une salle de classe dans une école est doublée. La

conduction par les plots de colle provoque un mouchetage dû à des écarts de 4 °C avec le reste de la paroi (la Text est d'environ 0 °C).

On comparera ici deux palettes – à gauche la palette « fer » et à droite la palette noir et blanc – donnant le même résultat visuel avec le même cadrage thermique.

Parfois, comme sur la figure 26, le cadrage thermique doit être adapté en fonction de la palette utilisée – à gauche la palette « arc-en-ciel » et à droite la palette noir et blanc (Text environ 0 °C).

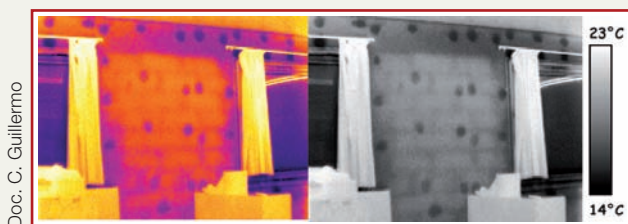


Figure 25 – Ponts thermiques ponctuels aux plots de colle d'un doublage sans isolation thermique

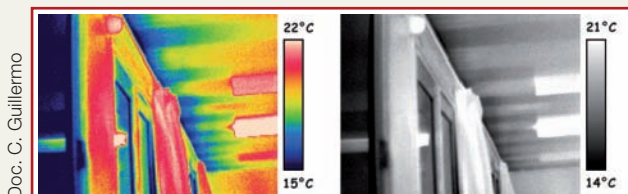


Figure 26 – Série de ponts thermiques ponctuels apparaissant aux extrémités des poutres béton du plancher haut (sans rupteur de ponts thermiques)

CHAPITRE 10

L'ÉTANCHÉITÉ
À L'AIR

LES FUITES D'AIR

La caméra thermique ne voit pas l'air ; elle est conçue pour ne pas être gênée par l'atmosphère. Elle ne mesure donc pas la température de l'air.

La caméra voit les effets des fuites (infiltrations et exfiltrations) sur les matériaux. Ainsi, les fuites d'air sont identifiées par la température atteinte par les structures, leur forme irrégulière et disparate, en fonction du débit et de la température de l'air intérieur ou extérieur.

Elle ne peut en aucun cas quantifier les débits d'air. Il s'agit d'une application de pure imagerie thermique qui ne présente pas de spécificité technique.

© L'INFILTROMÉTRIE
ET LA PORTE SOUFFLANTE

L'infiltrométrie en France est désormais sous le contrôle de Qualibat (www.qualibat.fr) et donne lieu à obligation réglementaire depuis la RT 2012.

Le contexte réglementaire est défini par la norme NF EN 13829 de février 2001 intitulée « Performance thermique des bâtiments.

Détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments. Méthode de pressurisation par ventilateur ».

Cette norme traite de la façon de déterminer la perméabilité à l'air d'un bâtiment par une méthode n'impliquant pas la thermographie (le test dit de « la porte soufflante »). La thermographie peut être utilisée lors des tests d'étanchéité à l'air d'un bâtiment, afin de déterminer où les fuites ont lieu, ce qui permet de les corriger préalablement à la mesure finale.

On comprend que, sans la porte soufflante, la thermographie ne peut pas être exhaustive, les pressions s'établissant au hasard des pressions extérieures et intérieures.

EXFILTRATION
D'AIR CHAUD

La toiture du supermarché étudié sur les figures 27 et 28 est en bac acier presque à plat. L'air chaud longe le dessous des bacs acier et sort en bas des couvertines métalliques, le long des bardages verticaux peints.

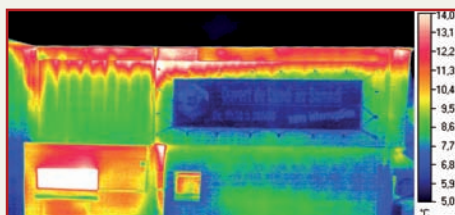


Figure 27 – Exfiltrations de la toiture d'un supermarché

En bas à gauche du même thermogramme, on observe l'énergie perdue sortant du poste TGBT du magasin.

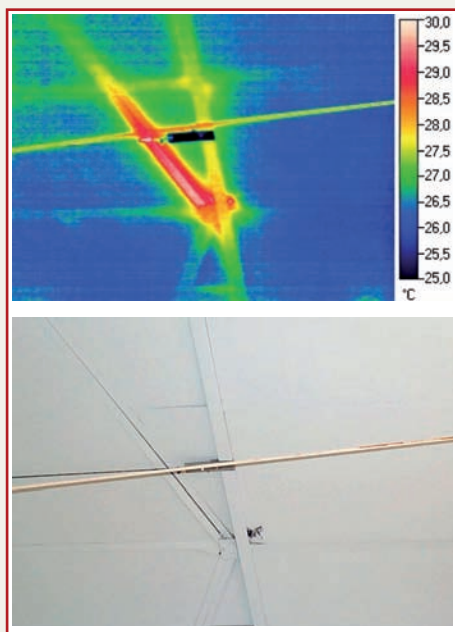


Figure 28 – Exfiltrations par le plafond du même supermarché

Quand on thermographie cette même toiture depuis l'intérieur et par le dessous (figure 28), on constate que l'air chaud s'engouffre dans les jonctions entre les plaques isolantes (laine de verre 5 cm rigide sur support alumi-

nium peint) et chauffe les isolants dans la masse à ses jonctions. L'isolant est ainsi contourné. La solution est d'assurer l'étanchéité à l'air de l'enveloppe et de gérer l'air du magasin.

INFILTRATION D'AIR FROID

ABSENCE DE GESTION DE L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR SUR UNE PAROI

Sur la figure 29, une puissante infiltration d'air froid se manifeste tout le



Figure 29 – Infiltrations le long d'une plinthe dans un appartement dont le permis de construire engage la RT 2000, mais commercialisé neuf en 2011

long de la plinthe et correspond à une absence de traitement de l'étanchéité à l'air (appartement dont la date du permis de construire engage l'application de la RT 2000, mais vendu neuf en 2011).

On notera l'utilisation de la palette noir et blanc avec isotherme permettant de localiser précisément l'entrée d'air froid, encore que, sur cette thermographie, le doute sur la localisation n'est pas possible.

POSE INCORRECTE DE MENUISERIE, NON-RESPECT DU DTU

L'exemple de la fenêtre ci-après (voir figure 30) est un cas typique illustrant une mauvaise mise en œuvre, sous prétexte que « on a toujours fait comme ça ». Si les DTU doivent très certainement être améliorés pour mieux prendre en compte la performance énergétique (programme RAGE), il serait aussi impératif que tous les artisans et tous les entrepreneurs appliquent les DTU existants, ce qui réglerait déjà de nombreux problèmes.

Dans le cas présent, il s'agit d'une paroi neuve remplaçant une porte de garage. Or la fenêtre à peine posée, un courant d'air ressenti à 1 m indispose l'occupant. L'entrepreneur met alors en cause la qualité de la fenêtre (joints). La thermographie, à l'aide d'une palette noir et blanc avec isotherme rouge, localise précisément l'entrée d'air, entre la maçonnerie et le dormant. La fenêtre n'est donc pas en cause ; c'est sa pose qui ne respecte pas le DTU applicable. Les autres palettes sont moins explicites.

Pour les ouvertures observées depuis l'intérieur, une convection verticale descendante a lieu le long de la menuiserie et du vitrage. Cette convection provoque des variations régulières de température (c'est une *irrégularité* normale), mais peut laisser place à une mauvaise interprétation, comme infiltration d'air froid (c'est-à-dire un *défaut*). C'est l'aspect irrégulier verticalement qui permet de conclure à l'entrée d'air froid. Toutefois, les deux phénomènes peuvent être simultanément présents (voir figure 42 p. 91).

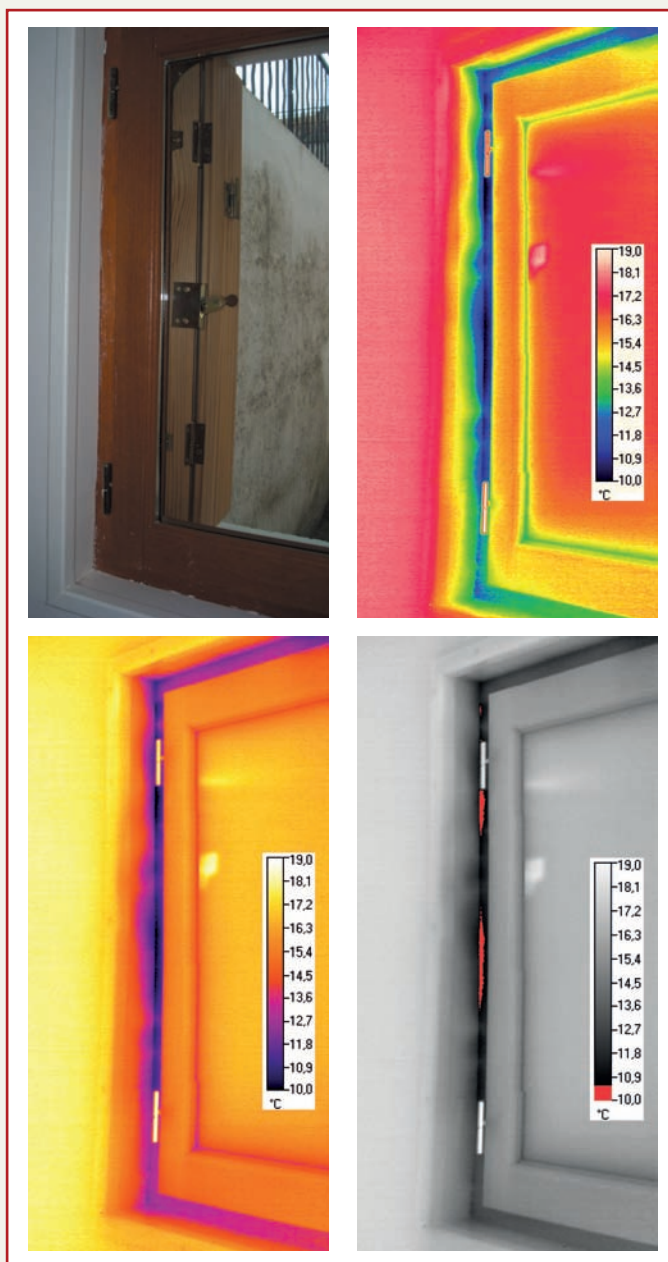


Figure 30 – Fenêtre neuve posée sans bande d'étanchéité (Comtriband®) entre le dormant et la maçonnerie : thermogrammes avec palettes arc-en-ciel, fer, noir et blanc avec isotherme rouge

JOINTS DÉFECTUEUX

Sur la figure 31, il s'agit d'un joint défectueux à remplacer sur un ouvrant de menuiserie en aluminium laqué. La contre-plongée sur le matériau de type 2 (verre) permet d'avoir un environnement radiatif assez uniforme (les nuages dans le ciel) pour ne pas gêner

la mise en évidence des températures des vitrages. On notera la différence de déperdition entre les bandes de vitrages servant de parement à une maçonnerie isolée (bandes bleues) et les bandes de vitrage éclairant les bureaux (double vitrage).

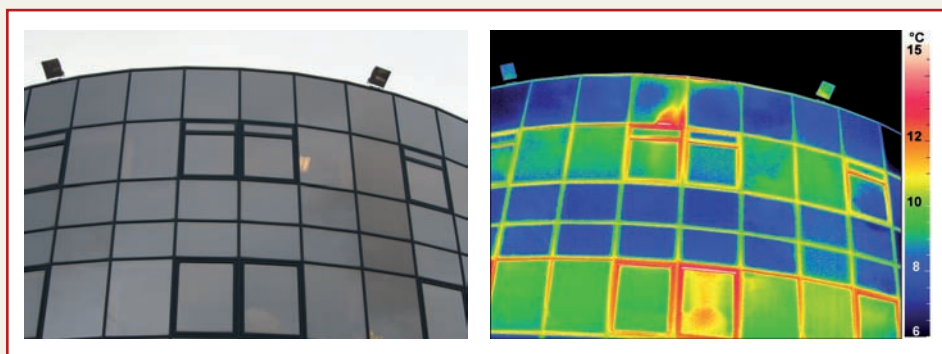


Figure 31 – Exfiltration d'une fenêtre



INDEX

Symboles

8-12 22

A

air 18
aluminium 28, 31, 34, 35, 86

B

bois 95

C

cadrage thermique 44
calibre 43
caméra thermique 8, 9, 38
coefficient de transmission thermique U 17, 92
condensation 80
conduction 16
confort thermique 84
convection 16, 91
corps gris 27
corps lambertien 27
corps noir 24, 26
corps opaque 26
corps réel 25, 27
corps semi-transparent 27
cuivre 28, 34

D

dépense 16, 18, 66, 71
diagnostic thermographique 53, 56
diagramme de l'air humide (ou de Mollier) 80

E

émetteur (corps) 26
émission 16, 22
émissivité 26, 27, 33
étalonnage (courbe d') 24

étanchéité à l'air 75

F

facteur d'absorption 25
facteur de réflexion 25, 28, 32
facteur de température (F_{Rsi}) 51, 82
facteur de transmission 25
fausses couleurs 44
fichier-image
thermographique 39, 46
fuite d'air 75
fuite d'eau 83

G

gamme 44

H

humidité relative (HR) 80

I

image thermique 8
incertitude (caméra) 38
inertie thermique 53, 55, 63, 98
infiltrométrie 75
interprétation des
thermographies 61
isolation thermique 66
isotherme 44, 50

L

longues ondes 22
long waves (LW) 22
luminance 22, 23, 33

M

menuiserie 88
microbolomètre 38

N

NETD 38
niveau 45
norme NF EN 13187 10, 48, 73, 97

P

palette 44
papier 27, 28, 32
peinture 27, 28, 32
Planck (loi et courbe) 22
point de rosée 80
pont thermique 71
précision (caméra) 38
propriété radiative 26

R

rapport d'intervention 48, 49, 102
rayonnement
électromagnétique 16, 21
réflecteur (corps) 26
réflexion diffuse 30, 31
réflexion parasite 29
réflexion spéculaire 29
résistance thermique
superficielle (R_{si} et R_{se}) 16
résolution spatiale (caméra) 38
résolution thermique (caméra) 38

S

Seid 67
sensibilité thermique (caméra) 38
simulation numérique 73
spectre 22

T

température 16
température ambiante 17
température apparente 16, 28
température apparente réfléchie 30
température d'atmosphère 43
température d'environnement radiatif (TER) 17, 18, 30
température extérieure/intérieure 16
température vraie 8, 16, 28, 51
thermique (transfert) 16
thermogramme 8
thermographie 9
thermographie 8, 33
thermographie aérienne 11
thermographie comparative 11
thermographie illustrative 10
transmetteur (corps) 26
type de réflexion 28
types de matériaux 34

V

verre 28, 88

Z

zinc 28, 95