

Télédétection et cartographie : des outils au service de la thermographie aérienne

■ Matthieu LEFEBVRE

■ MOTS-CLÉS

Economie d'énergie,
déperditions thermiques,
thermographie aérienne,
cartographie.

Dans le cadre des engagements de la France pour la réduction de ses dépenses énergétiques, le chauffage des bâtiments représente un fort potentiel en raison des déperditions thermiques importantes dont il est la cause. La thermographie aérienne se propose alors d'être un outil adapté au diagnostic énergétique global d'ensembles de bâtiments à l'échelle d'une ville, d'un département ou d'une région. Elle s'appuie sur les lois physiques de la thermodynamique pour mesurer à distance les températures de surface. L'analyse menée sur ces températures a pour objectif d'extraire des indicateurs permettant de connaître le niveau de déperdition thermique des bâtiments. Cette information doit néanmoins faire l'objet d'une diffusion large et adaptée à travers différents canaux pour sensibiliser les habitants concernés à la consommation énergétique de leur logement et les conseiller le cas échéant sur les moyens d'amélioration de la performance thermique par des travaux d'isolation.

Ces dernières années, les problématiques environnementales se sont imposées jusqu'à être aujourd'hui au cœur des préoccupations politiques, techniques et individuelles. Un des enjeux portés notamment lors du Grenelle de l'Environnement d'octobre 2007, concerne la lutte contre les changements climatiques et la maîtrise des dépenses énergétiques [1]. La France s'est ainsi engagée à diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre (GES) entre 2000 et 2050 [2].

Parmi les secteurs concernés par les émissions GES, celui du bâtiment est particulièrement présent. En 2005 il était responsable d'environ 23,7% des émissions toutes consommations confondues (chauffage, climatisation, eau chaude, etc.), la part essentielle étant due au chauffage [3]. En conséquence un des leviers d'action pour la réduction des GES passe par la maîtrise de la consommation d'énergie et l'utilisation des énergies renouvelables pour le chauffage des bâtiments. La France s'est ainsi prononcée en faveur de l'établis-

sement obligatoire d'un diagnostic de performance énergétique lors de toute transaction immobilière qu'elle soit locative ou bien acquisitive, afin de sensibiliser les habitants à la consommation énergétique de leur logement [4]. Ce diagnostic se fait néanmoins au cas par cas, bâtiment par bâtiment, et ne permet donc pas d'analyser rapidement la performance énergétique globale de parcs bâtis complets. Outre ces mesures de sensibilisation, l'Etat a également mis en place des incitations financières et fiscales pour encourager les propriétaires à engager des travaux d'isolation de leurs bâtiments. Les propriétaires peuvent ainsi bénéficier de crédits d'impôt, d'un taux de TVA réduite, de subventions ou encore d'éco-prêts auprès des banques lors de ces travaux. L'intérêt est alors double : il permet d'une part d'apporter une solution au problème des émissions GES, et d'autre part de générer des économies à l'échelle de la collectivité et de l'habitant.

La thermographie aérienne est une des réponses à l'analyse globale de la per-

formance énergétique d'ensembles de bâtiments à l'échelle d'une ville, d'une agglomération ou d'un département. Elle permet d'établir une vue comparative des déperditions thermiques de tous les bâtiments observés. La pertinence technique de cette méthode repose sur des études faites par l'Ademe [5] démontrant que 25% à 30% des déperditions thermiques totales d'un bâtiment passent par sa toiture.

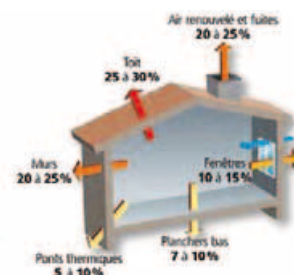


Figure 1.
Illustration
des déperditions
thermiques
d'une maison
individuelle
non isolée.

A défaut de donner un bilan énergétique complet et exhaustif de chaque bâtiment – les façades, autre source importante de déperdition, sont délaissées dans ce type d'étude – l'analyse des déperditions thermiques des toitures est néanmoins un bon indicateur des besoins en isolation des habitations. Ces études ne sont pourtant efficaces que si elles sont associées à une campagne de communication conséquente autour des résultats produits. Ce type de projet comporte donc généralement un double volet : technique d'abord, afin de cartographier les températures en surface et détecter par là les constructions énergivores, informatif ensuite en publiant via la presse, les salons locaux (habitat, développement durable, etc.), sites web ou autres les résultats de l'étude pour sensibiliser les habitants à la consommation énergétique de leur logement et les conseiller le cas échéant sur les moyens d'en améliorer la performance thermique par des travaux d'isolation.

Avant de détailler ces deux volets de la thermographie aérienne, il paraît utile d'exposer dans un premier temps les bases physiques sur lesquelles cette technique repose.

Bases théoriques fondamentales de la thermographie

Il existe plusieurs types d'échange de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. Ce dernier est connu depuis l'antiquité. C'est par exemple le rayonnement des parois d'un four porté à haute température qui assure la cuisson du pain. Le fait que les parois du four changent de couleur en fonction de sa température intérieure est une observation ancienne. C'est durant la deuxième moitié du XIX^e siècle, après avoir fini par admettre la réalité de la structure atomique de la matière, que les physiciens ont cherché à comprendre les lois de la physique qui gouvernent le rayonnement thermique. En 1859, Kirchhoff établit ainsi l'universalité du rayonnement thermique en prouvant que la lumière émise est indépendante de la nature, de la forme ou encore de la taille de l'objet concerné. En sus du phénomène d'émission, les physiciens observent et établissent qu'un objet réagit au rayonnement incident en absorbant une partie de l'énergie reçue, en réfléchissant une autre partie ou en transmettant une dernière. De ce principe physique fondamental est dérivée la loi de conservation de l'énergie, qui lie les coefficients d'absorption α , de réflexion ρ et de transmission τ .

Loi de conservation de l'énergie

$\alpha + \rho + \tau = 1$ [Sans unité]

Ces coefficients expriment le rapport entre l'énergie respectivement absorbée, réfléchie, transmise et l'énergie incidente à l'objet. Pour aborder l'étude du rayonnement thermique, les physiciens ont alors défini un corps théorique dit "corps noir", c'est-à-dire un corps opaque ($\tau = 0$), non réfléchissant ($\rho = 0$) et donc absorbant tout rayonnement incident ($\alpha = 1$). Un corps noir est aussi par définition un corps à l'équilibre thermodynamique qui réémet sous forme d'ondes électromagnétiques toute l'énergie qu'il reçoit.

C'est en étudiant les propriétés radiatives du corps noir que Planck établit à la fin du XIX^e siècle la loi de distribution spectrale de l'énergie émise pour une température donnée. Cette loi bouleversa le monde de la physique en cela qu'elle valida de façon complètement inattendue mais néanmoins parfaite les premières bases de la mécanique quantique. Elle unifiait en un seul modèle les précédents travaux de Rayleigh-Jeans définis pour les basses fréquences, et ceux de Wien valables aux fréquences très élevées tout en s'accordant parfaitement avec les mesures expérimentales. Elle est aujourd'hui à la base des mesures de température par rayonnement.

Loi de Planck

$$M_b(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Exitance énergétique [$W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$]

λ = Longueur d'onde [m]

T = Température absolue [K]

h = Constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34}$) [J.s]

c = Vitesse de la lumière ($2,998 \cdot 10^8$) [m.s⁻¹]

k = Constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$) [J.K⁻¹]

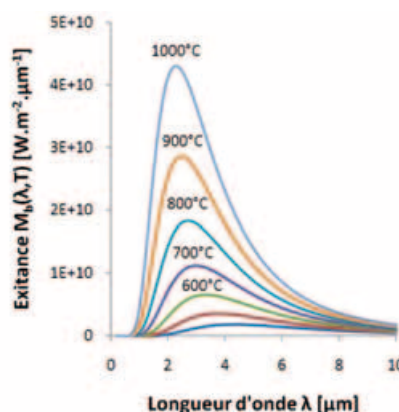


Figure 2. Loi de distribution spectrale de l'énergie émise par un corps noir pour une température donnée.

Par suite, Wien dérivait la loi de Planck pour obtenir sa loi de déplacement qui permet d'identifier la longueur d'onde correspondant au maximum de rayonnement d'un corps noir en fonction de sa température, formalisant ainsi les connaissances empiriques anciennes liant la température d'un corps et sa couleur.

Loi de Wien

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T}$$

Longueur d'onde correspondant au maximum d'émission du corps noir pour une température donnée [μm]

Finalement, l'intégration de l'équation de Planck sur l'ensemble du spectre permet de dégager la loi de Stephan-Boltzmann qui exprime l'énergie totale émise par un corps noir en fonction de sa température.

Loi de Stephan-Boltzmann

$$M_b(T) = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4$$

Exitance énergétique du corps noir [$W \cdot m^{-2}$]

σ = Constante de Stephan-Boltzmann ($5,670 \cdot 10^{-8}$) [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]

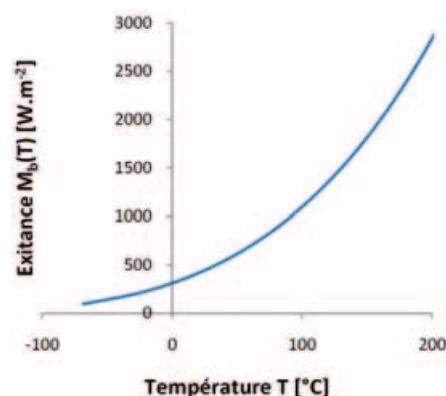


Figure 3. Loi de Stephan-Boltzmann de l'énergie émise en fonction de la température du corps noir.

Toutes ces lois sont établies en s'appuyant sur les propriétés d'un corps noir théorique défini précédemment. Elles ne s'appliquent donc pas en l'état aux objets de notre environnement qui ne seraient pas assimilables à des corps vraiment noirs, c'est-à-dire parfaitement absorbants pour tous les rayonnements reçus.

Les propriétés radiatives de ces objets sont néanmoins décrites par référence avec un corps noir parfait. On définit ainsi l'émissivité d'un objet, qui est le rapport entre l'énergie émise par cet objet et l'énergie émise par un corps noir porté à la même température.



■ Définition de l'émissivité

$$\varepsilon = \frac{M(T)}{M_b(T)}$$

Emissivité d'un objet [Sans unité]

$M(T)$: Exitance énergétique émise par l'objet à une température T [$W.m^{-2}$]

$M_b(T)$: Exitance énergétique émise par un corps noir pour une même température T [$W.m^{-2}$]

L'énergie émise par un objet quelconque est donc toujours inférieure à celle émise par un corps noir porté à la même température. On en déduit par conséquent que ce rapport varie entre 0 et 1 en fonction des objets, l'émissivité du corps noir étant par définition égale à 1. Les objets caractérisés par une émissivité inférieure à 1 sont appelés des "corps gris". La loi de Stephan-Boltzmann peut par ce biais être étendue à tous les objets.

■ Loi de Stephan-Boltzmann étendue

$$M(\varepsilon, T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Exitance énergétique émise par l'objet [$W.m^{-2}$]

ε = Emissivité de l'objet [Sans unité]

La mesure de l'énergie émise par un objet, pourvu qu'elle soit associée à la connaissance de son émissivité, permet par conséquent d'en déterminer sa température en surface. C'est ce principe qu'exploite la thermographie pour mesurer à distance les températures. Il reste toutefois limitée par l'absence de connaissance réelle de l'émissivité exacte de chaque objet. Néanmoins la mesure des températures apparentes s'avère être un excellent outil de travail pour appuyer la recherche des fuites thermiques.

Acquisition des données

Les mesures thermographiques sont acquises par voie aéroportée au moyen d'une caméra observant dans le domaine du moyen infrarouge thermique. Cette bande de longueurs d'ondes allant de 3 à 5 μm , a en effet la propriété de représenter le maximum d'émission d'un corps noir porté aux alentours de la température ambiante, tout en bénéficiant d'une excellente propagation dans l'atmosphère, avec une atténuation très réduite.

L'acquisition doit se faire dans des condi-

tions météorologiques bien spécifiques. La température extérieure doit être minimale, typiquement inférieure à 5°C, afin d'observer au mieux la température des bâtiments liée aux systèmes de chauffage. L'eau évaporable à la surface des objets doit également être aussi réduite que possible, et donc il ne doit pas y avoir eu de précipitations dans les 36 heures précédant l'acquisition des mesures. Le vent, qui accélère beaucoup les échanges par convection, doit être nul ou très faible. Enfin, il importe d'éviter la lumière du soleil dont l'absorption par les matériaux de surface influence les mesures en entraînant le réchauffement naturel des objets observés. Toutes ces contraintes réunies ne permettent pas de disposer de nombreuses fenêtres d'acquisition des mesures. Celles-ci se font ainsi l'hiver, de nuit, en début de matinée (entre 6 h et 9 h) ou en fin de soirée (entre 20 h et 23 h), afin d'acquérir les mesures lors des mises en chauffe des habitations. De manière rigoureuse, la fenêtre entre 6 h et 9 h doit être privilégiée afin d'éviter le phénomène d'inertie thermique susceptible d'intervenir le soir suite à l'accumulation de la chaleur dans les matériaux en journée.

D'un point de vue technique, la cartographie des températures sur de grandes surfaces nécessite d'adapter les techniques classiques d'acquisition et de traitement photogrammétriques aux contraintes imposées d'une part par le domaine spectrale observé, le moyen infrarouge thermique, et d'autre part par le capteur employé, la géométrie de ce dernier étant identique aux caméras couramment utilisées en photogram-

Superficie	390 km ²
Focale	50 mm
Hauteur de vol	600 m
Taille de l'image au sol	192x154 m ²
Résolution spatiale	30 cm
Nombre de bandes	182
Longueur de vol	3 100 km
Nombre d'images	22 600
Temps de vol	35 heures
Durée d'acquisition	12 jours

Figure 4. Quelques chiffres détaillant les paramètres de vol pour la thermographie de l'Agglomération de Rouen.

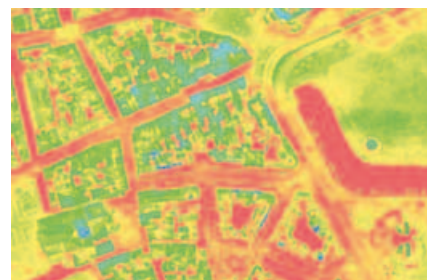


Figure 5. Orthothermoplan en pseudocouleur selon une échelle linéaire continue de température allant de -2,7°C (bleu) à +6,1°C (rouge).

métrie. Aussi, bien que proposant la plus grande matrice disponible sur le marché, la caméra thermique utilisée n'excède pas les 640 x 512 pixels en taille ! La résolution spatiale importante, généralement spécifiée entre 30 et 50 centimètres dans ce type de projet, impose par conséquent de multiplier les images en vue de couvrir de manière exhaustive le territoire concerné. Quelques chiffres sont donnés ici à titre d'exemple pour illustrer les quantités importantes qui peuvent être engagées au moment de l'acquisition des mesures.

Les nombreuses images acquises sont autant de paramètres d'orientation externe à résoudre en vue de corriger la géométrie des images pour les assembler. La résolution de ces orientations se fait au moyen d'une aérotriangulation qui s'appuie sur les données trajectographiques acquises durant le vol pour disposer de valeurs approchées robustes en entrée du système. Ces valeurs approchées sont d'autant plus importantes que l'information thermique présente dans un seul canal de l'image ne facilite pas la tâche des corrélateurs pour la recherche automatique des points de liaison. Au final, les images sont orthorectifiées et mosaïquées pour constituer ce que nous avons baptisé un "orthothermoplan" par analogie avec l'orthophotoplan établi dans le domaine visible.

Correction radiométrique

Le traitement des données acquises passe ensuite par la conversion des mesures issues de la caméra en grandeurs physiques exploitables. Le modèle de calibration utilisé pour cela

est de type linéaire, caractérisé par deux paramètres, un gain et un offset. Ces paramètres font l'objet d'une détermination préalable en laboratoire par le biais d'observations réalisées sur un corps noir étalon, dont la température connue permet d'en établir l'énergie théoriquement émise. La comparaison de l'énergie théorique calculée et des valeurs effectives mesurées par la caméra donne lieu à un problème classique d'optimisation résolu par moindres carrés, et dont est issu le modèle de calibration. Les mesures généralement codées en 24 bits sur le canal unique des caméras thermiques, sont ainsi transformées en valeurs d'exitance énergétique $[W.m^{-2}]$ par l'intermédiaire de ce modèle.

Outre le problème classique de calibration spectrale du capteur, la question centrale est celle de l'interprétation physique de la mesure elle-même. L'énergie mesurée est par principe celle qui est parvenue jusqu'au capteur thermique. Il s'agit donc d'une mesure qui inclut des contributions extérieures ici considérées comme parasites, et qu'il convient de modéliser correctement pour les éliminer, afin d'isoler le terme qui nous intéresse. Pour cela, on considère que l'énergie captée résulte d'une somme de contributions issues de l'objet (C_o), de l'atmosphère (C_a) et de l'environnement (C_e).

■ Contributions à l'éclairement du capteur

$$M_t = C_o + C_a + C_e$$

Exitance énergétique totale mesurée par la caméra $[W.m^{-2}]$

Parmi ces contributions, celle de l'atmosphère ne peut pas être complètement négligée, car elle absorbe une partie de l'énergie incidente provenant de l'objet, tandis que les particules qui la composent en diffusent une autre partie qui est renvoyée dans toutes les directions. Cette atténuation atmosphérique, qui dépend fortement de la longueur d'onde du rayonnement concerné, est ici assez faible, bénéficiant d'une fenêtre de propagation atmosphérique. Cette dernière justifie par conséquent là aussi le choix du moyen infrarouge thermique situé entre 3 et 5 microns comme domaine

observé par le capteur. Cette atténuation n'y est toutefois que limitée et non totalement éliminée. Il faut donc en tenir compte dans le modèle destiné à corriger les mesures. Le terme de contribution de l'objet prend par conséquent la forme suivante.

■ Contribution de l'objet

$$C_o = \varepsilon_o \cdot \tau_a \cdot M_b(T_o)$$

Contribution énergétique de l'objet $[W.m^{-2}]$

ε_o = Emissivité de l'objet [Sans unité]

τ_a = Transmittance de l'atmosphère [Sans unité]

$M_b(T_o)$ = Exitance énergétique émise par un corps noir à une température T_o équivalente à l'objet $[W.m^{-2}]$

En plus de ne pas être un transmetteur parfait, l'atmosphère se comporte également comme une source d'émission indépendante susceptible de contribuer en conséquence à l'énergie totale mesurée par le capteur de la caméra. Aussi, le terme de contribution de l'atmosphère est déterminé par l'équation suivante.

■ Contribution de l'atmosphère

$$C_a = (1 - \tau_a) \cdot M_b(T_a)$$

Contribution énergétique de l'atmosphère $[W.m^{-2}]$

$1 - \tau_a$ = Emissivité de l'atmosphère [Sans unité]

$M_b(T_a)$ = Exitance énergétique émise par un corps noir à une température T_a équivalente à l'atmosphère $[W.m^{-2}]$

Enfin, l'environnement de l'objet observé ne doit également pas être négligé en tant que contributeur dans la mesure. Il émet en effet une énergie qui est ensuite réfléchiée par ce dernier, apportant là aussi une contribution parasite car ne trouvant pas son origine dans l'émission propre de l'objet.

■ Contribution de l'environnement

$$C_e = (1 - \varepsilon_o) \cdot \tau_a \cdot M_b(T_e)$$

Contribution énergétique de l'environnement $[W.m^{-2}]$

$1 - \varepsilon_o$ = Réflectance de l'objet observé [Sans unité]

$M_b(T_e)$ = Exitance énergétique émise par un corps noir à une température T_e équivalente à l'environnement $[W.m^{-2}]$

Finalement, la détermination de tous ces termes permet de dégager un modèle général de correction des mesures acquises pour calculer la température apparente de l'objet observé, et donc sa température absolue dès que l'on connaît son émissivité.

■ Modèle de correction des températures

$$T_o = \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_o \cdot \tau_a} \cdot \left[\frac{M_t}{\sigma} - (1 - \tau_a) \cdot T_a^4 - (1 - \varepsilon_o) \cdot \tau_a \cdot T_e^4 \right]}$$

Température absolue de l'objet observé [K]

T_a = Température de l'atmosphère [K]

T_e = Température ambiante au sol [K]

L'utilisation d'un tel modèle nécessite donc de connaître l'émissivité (ε_o) de l'objet observé, la transmittance (τ_a) et la température (T_a) de l'atmosphère, ainsi que la température ambiante au sol (T_e). En fonction des circonstances et des données disponibles, ces paramètres peuvent être issus soit de mesures, soit de recueils d'abaques ou bien déterminés via des modèles adaptés. A titre d'exemple, la transmission atmosphérique est bien souvent estimée au moyen d'un modèle basé sur des mesures d'humidité et de température de l'atmosphère.

Interprétation des données

L'interprétation des données a pour objectif d'établir des indicateurs permettant de caractériser les déperditions des habitations à partir des mesures de températures. Ce sont ces indicateurs simples qui auront vocation à communiquer les résultats de la thermographie aérienne au grand public. Une telle analyse s'appuie pour cela sur l'hypothèse que tous les bâtiments sont chauffés dans des conditions identiques (distribution, température et durée du chauffage identiques) au moment de l'acquisition des mesures. Bien évidemment, l'absence de chauffage dans une habitation au moment de la mesure induira une différence de température de surface au niveau du toit faible par rapport au milieu naturel. A l'inverse, une maison de retraite chauffée sans arrêt et à un degré élevé présentera très certainement une température de surface

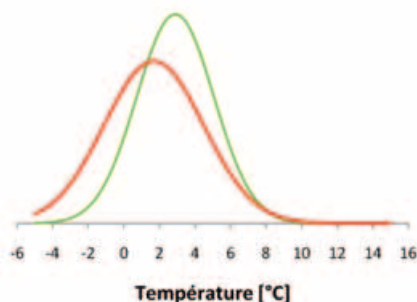


Figure 6. Distribution des mesures selon une loi normale (modèle Gaussien). Températures du sol (vert). Températures des bâtiments (rouge).



élevée si elle est mal isolée. Dans les deux cas, la comparaison de ces températures avec les autres habitations sera biaisée du fait de conditions de chauffage différentes. D'un point de vue statistique, les températures de surface des toits des habitations peuvent présenter des différences allant jusqu'à 14°C. Outre ces extrêmes, un examen approfondi des mêmes températures montre qu'elles se distribuent selon une loi voisine de la loi normale. Celle-ci constitue par conséquent le modèle statistique théorique appliqué aux mesures sur lequel s'appuie l'analyse menée pour caractériser les indicateurs de déperdition.

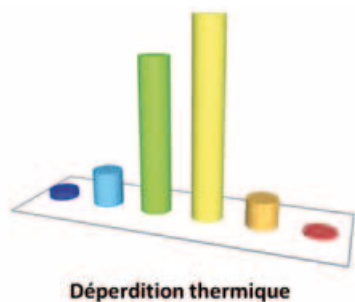


Figure 7. Distribution des déperditions thermiques des bâtiments sur la Ville d'Annecy : excessive (rouge), très forte (orange), forte (jaune), faible (vert), très faible (cyan) et non perceptible / nulle (bleu).

Une propriété remarquable de la loi normale est qu'elle est entièrement déterminée par sa moyenne m et son écart-type σ . L'interprétation est alors basée sur l'hypothèse que la moyenne m est une température représentative d'un bâtiment dit "normal" car elle est la plus présente dans la distribution, et sert donc de référence pour permettre de distinguer les bâtiments présentant

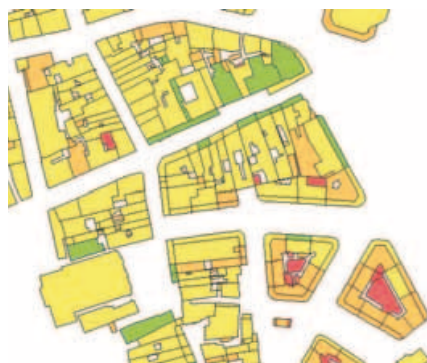


Figure 8. Déperditions thermiques globales des bâtiments sur Annecy (nomenclature identique à la figure 7).

une sur-déperdition thermique (température supérieure à la moyenne), de ceux présentant une sous-déperdition (température apparente inférieure à la moyenne). Mais au-delà de cette simple distinction "binaire", il semble intéressant de mieux exploiter la distribution gaussienne des températures en classifiant les bâtiments dans des intervalles probables plus petits. Les intervalles ainsi définis présentent alors une amplitude égale à l'écart-type σ . Au nombre de six, les classes de déperdition se répartissent par exemple de la manière suivante :

- $[m + 2\sigma ; +\infty]$: Excessive
- $[m + \sigma ; m + 2\sigma]$: Très forte
- $[m ; m + \sigma]$: Forte
- $[m - \sigma ; m]$: Faible
- $[m - 2\sigma ; m - \sigma]$: Très faible
- $[-\infty ; m - 2\sigma]$: Non perceptible/Nulle

L'application de cette nomenclature peut se faire aussi bien sur les températures globales de chaque bâtiment, que sur chaque élément de surface mesuré par la caméra (pixel). Il s'agit alors de procéder à une classification de l'image.



Figure 9. Déperditions thermiques détaillées issues de la classification des températures (nomenclature identique à la figure 7).

Le fait que la valeur de référence permettant de distinguer les différents niveaux de déperdition soit directement extraite de l'échantillon des températures implique que les résultats de différents projets ne peuvent être comparés. En effet, un même bâtiment considéré comme ayant une déperdition forte dans un cas pourrait dans un autre cas se voir attribuer une déperdition faible. Cela dépend non seulement des conditions météorologiques durant lesquelles sont acquises les mesures, mais également de la référence choisie et de ses caractéristiques d'isolation. Cette dernière devrait idéalement être fixée de manière absolue afin de rendre les résultats comparables entre eux, mais il n'existe pour l'heure aucune normalisation nationale.

Communication des résultats

L'intérêt et l'impact d'un tel projet sont très fortement liés à la capacité de communiquer largement les résultats obtenus tout en les expliquant afin de sensibiliser la population concernée aux problèmes d'isolation de leur habitation. Cette diffusion se fait généralement sous la forme de documents cartographiques ou sites web, dans la presse ou lors de salons et manifestations. Il paraît pour cela évident que l'information présentée doit être lisible et compréhensible à tous les utilisateurs auxquels elle s'adresse. A ce titre, l'orthothermoplan ne remplit pas bien ce rôle car il ne fait l'objet d'aucune interprétation spécifique et se contente de donner les températures de surface observées. Aussi, le niveau de déperdition global des bâtiments est communément présenté comme une très bonne première approche des résultats obtenus. Il permet de connaître le diagnostic établi à l'échelle de chaque bâtiment.

Dans un deuxième temps, l'utilisateur a la possibilité de consulter la carte thermique des déperditions détaillées pour en connaître leur nature et leur répartition. Ce deuxième niveau offre l'avantage de mettre en avant les points qui dévoilent localement une faiblesse thermique. Il n'est toutefois en aucun cas suffisant pour établir un diagnostic



Figure 11. Carte thermique des déperditions détaillées des bâtiments sur Annecy.



Figure 10. Carte thermique des déperditions globales des bâtiments sur Annecy.

énergétique poussé du bâtiment en raison des nombreuses variables qui interviennent dans une anomalie thermique dont certaines ne peuvent être résolues que par des observations sur le terrain. Au-delà des documents papiers, de plus en plus de collectivités choisissent le web comme canal de diffusion de leurs résultats. A titre d'exemple, la Ville d'Annecy a ordonné une thermographie aérienne de son territoire durant l'hiver 2007-2008 et a choisi de mettre en ligne ses résultats au moyen d'un serveur cartographique pédagogique [6].

Outre la simple communication des résultats de la thermographie aérienne, il s'avère important pour la collectivité de mener une action conjointe dans le domaine des économies d'énergie. Elle doit pour cela vérifier qu'il existe un bon relais après la diffusion au grand public des déperditions thermiques, capable en permanence d'inciter et de soutenir la population dans l'engage-

ment des travaux visant à améliorer la performance énergétique de leur habitation. Cette action se fait généralement au moyen des espaces info énergie (EIE) qui constituent ce relais en mesure d'indiquer les types de travaux à réaliser en fonction de l'état de la toiture, de l'ancienneté du bâtiment, mais encore de renseigner sur les outils disponibles pour aider à financer ces travaux.

Peu de retours d'expérience sont aujourd'hui disponibles. D'abord parce que les opérations menées sont récentes, ensuite parce qu'il est difficile de connaître et de suivre les travaux engagés suite à la réalisation d'une thermographie aérienne. Toutefois la Communauté urbaine de Dunkerque (CUD), pionnière en la matière, a mené une étude cinq ans après la réalisation de sa thermographie aérienne. Il en ressort que 1 euro investi par la collectivité pour cette opération est remboursé après cinq ans à hauteur

de 4,3 euros par le biais de créations d'emplois et de flux financiers (TVA, taxe professionnelle, etc.) [7].

La mise en œuvre de la Thermographie ne peut être qu'encourageante. ●

Contact

Matthieu LEFEBVRE

I2G - Responsable de la production de données
matthieu.lefebvre@i2g.fr

Les expériences citées procèdent d'un travail collectif. L'auteur remercie ses partenaires, les sociétés Aeodata et ITC.

Bibliographie

- [1] <http://www.legrenelle-environnement.fr>
- [2] Loi n°2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique
- [3] Citepa
- [4] Loi n°2004-1343 du 9 décembre 2004 de simplification du droit
- [5] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
- [6] http://www.sig.fr/dynmapv4_maps/annecy_thermo/flash/
- [7] M. DELEBARRE, Assises de l'énergie 2006, Grenoble.

ABSTRACT

Key words: Energy saving, heat loss, aerial thermography, cartography.

Within the framework of French engagements for the reduction of its energy expenditure, the heating of buildings presents a strong potential because of the important heat losses for which it is responsible. Aerial thermography is then an adapted tool for the global energy diagnosis of buildings in a town, department or country area. It is based on the physical laws of thermodynamics to remotely measure surface temperatures. The analysis carried out on these temperatures allows to extract indications about the heat loss level of the buildings. This information must then be the subject of a vast and adapted diffusion through various channels to sensitize the concerned people with the energy consumption of their housing and to advise them if necessary on the means to improve its thermal performance by insulation works.