



HAL
open science

Caractérisation expérimentale de l'anisotropie directionnelle des mesures dans l'infrarouge thermique sur un milieu urbain en conditions hivernales : premiers résultats obtenus sur Toulouse lors de la campagne CAPITOUL

Jean-Pierre Lagouarde, Mark Rankin M. R. Irvine, Patrick Moreau, Britta Kurz, Grégoire Pigeon, Valéry Masson

► **To cite this version:**

Jean-Pierre Lagouarde, Mark Rankin M. R. Irvine, Patrick Moreau, Britta Kurz, Grégoire Pigeon, et al.. Caractérisation expérimentale de l'anisotropie directionnelle des mesures dans l'infrarouge thermique sur un milieu urbain en conditions hivernales : premiers résultats obtenus sur Toulouse lors de la campagne CAPITOUL. Atelier de Modélisation de l'Atmosphère, Météo-france, Jan 2007, Toulouse, France. 4 p. hal-02818625

HAL Id: hal-02818625

<https://hal.inrae.fr/hal-02818625>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CARACTERISATION EXPERIMENTALE DE L'ANISOTROPIE DIRECTIONNELLE DES MESURES DANS L'INFRAROUGE THERMIQUE SUR UN MILIEU URBAIN EN CONDITIONS HIVERNALES : PREMIERS RESULTATS OBTENUS SUR TOULOUSE LORS DE LA CAMPAGNE CAPITOU

J.-P. Lagouarde ⁽¹⁾, M. Irvine ⁽¹⁾, P. Moreau ⁽¹⁾, B. Kurz ⁽¹⁾, G. Pigeon ⁽²⁾, V. Masson ⁽²⁾

⁽¹⁾ INRA, UR1263 EPHYSE, 71 avenue E. Bourlaux, F-33140 Villenave d'Ornon, France

⁽²⁾ Météo France/CNRS CNRM-GAME, 42 av Coriolis, 31057 Toulouse, France

Lors de l'expérience CAPITOU, des mesures aéroportées de température de surface ont été réalisées à l'aide de caméras IRT embarquées sur le PA 23 de SAFIRE au-dessus de Toulouse, à diverses saisons, à la fois en conditions diurnes et nocturnes. Le protocole de mesure permet de décrire l'anisotropie directionnelle de la température de surface (différence entre visées obliques et verticale) jusqu'à des angles zénithaux de 60° et dans toutes les directions azimutales. Les résultats de la période d'observations intensives (POI) hivernale des 24-25 février 2005 sont présentés ici. En conditions diurnes les résultats complètent ceux obtenus au-dessus de Marseille lors d'ESCOMPTE en les étendant à des conditions de très faible hauteur solaire : ils confirment la présence de 'hot spots' marqués dont l'amplitude peut dépasser 10 K dans le plan principal. De nuit ces effets s'atténuent très fortement et il ne subsiste plus qu'une variation de l'ordre de 1 K avec l'angle zénithal de visée. Un premier exercice de modélisation couplant TEB et une maquette 3D du milieu urbain est décrit.

1 INTRODUCTION

L'infrarouge thermique (IRT) est de façon évidente une source d'information privilégiée dans les études de climatologie urbaine (Arnfield, 2003, Voogt & Oke, 2003) et des îlots de chaleur (Roth et al., 1989, Streukler, 2003). L'attention croissante portée aux problèmes de pollution et de qualité de l'air a conduit au développement d'un grand nombre de modèles simulant le comportement dynamique et thermique de l'atmosphère urbaine dans lequel la température de surface apparaît comme une variable clé (Grimmond & Oke, 2002, Masson et al., 2002, Martilli et al., 2002, Voogt & Grimmond, 2000). Comme pour les couverts végétaux, la structure géométrique de la canopée urbaine et le couplage entre transferts radiatifs et transferts d'énergie au sein de cette même canopée induisent une forte anisotropie directionnelle de la température de surface (Voogt & Oke, 1997 and 1998; Wang et al., 2001, Voogt and Oke, 2003). Des travaux expérimentaux menés lors de l'été 2001 sur Marseille dans le cadre de l'expérience ESCOMPTE (Lagouarde et al., 2004) ont montré l'existence d'effets de 'hot spot' très marqués sur la ville. CAPITOU (<http://medias.cnrs.fr/capitoul/>) a offert l'opportunité d'étendre ces observations : ce papier présente les résultats préliminaires obtenus lors de la période d'observations intensives (POI) hivernale de février 2005 en conditions diurnes et nocturnes.

2 EXPERIMENTATION

2.1 Protocole des mesures

Les mesures ont été réalisées à l'aide de deux caméras IRT embarquées à bord d'un avion (bimoteur PA23 de l'équipe SAFIRE, <http://www.safire.fr/>). Les deux caméras M740

INFRAMETRICS et SC2000 FLIR étaient équipées d'objectifs de 76° et 24° respectivement et inclinées vers l'arrière de 10 et 50°, la zone de superposition entre les champs des 2 instruments permettant de réaliser une intercalibration en vol. La vitesse de l'avion est de 70 ms⁻¹ et l'altitude de vol d'environ 500 m au-dessus du sol.; les résolutions spatiales vont de 2.5 m (nadir) à 6.2 m (50° d'angle zénithal de visée) pour la M740 et 1.5 à 3.0 m pour la SC2000 (pour des angles de visée de 48 et 62°).

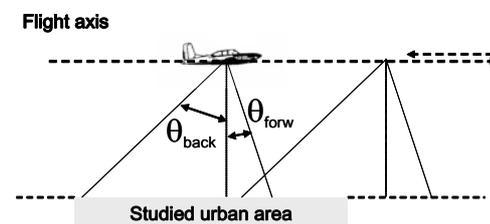


Figure 1. Principe des mesures directionnelles. Un point au sol est vu sous des angles différents selon le déplacement de l'avion.

Le protocole de mesure consiste à parcourir plusieurs axes de vol se croisant au centre de la zone d'étude. La caméra M740 permet des observations sous des angles zénithaux de visées de $\pm 50^\circ$ le long de la trace. La combinaison avec les données SC2000 permet d'étendre cette gamme jusqu'à $\pm 62^\circ$. Dans le cadre de cet article seules les données angulaires de la M740 ont été exploitées. Pour les mesures de jour la direction des axes de vol est imposée à position du soleil (c. à d. l'heure). Pour les mesures en conditions nocturnes les axes sont systématiquement orientés N \leftrightarrow S, W \leftrightarrow E, NW \leftrightarrow SE et NE \leftrightarrow SW. Ce protocole permet de caractériser l'anisotropie directionnelle dans toutes les directions azimutales et jusqu'à des angles

zénithaux de visée de 50° (pour plus de détails, voir Lagouarde et al., 2000 and 2004).

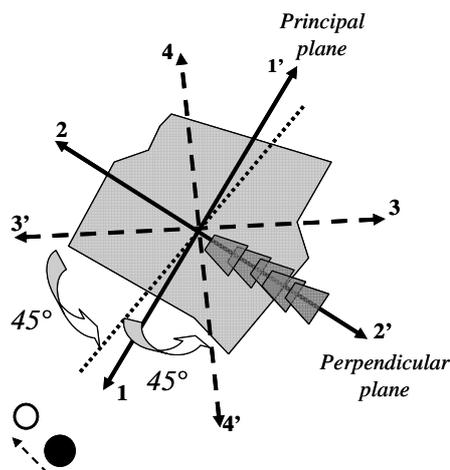


Figure 2. Protocole de mesure: les axes de vol au-dessus de la zone d'étude (grisé). 1 and 1' (plan principal) sont parcourus, le premier (1) face au soleil (cercle noir). Ils sont suivis par les axes dans le plan perpendiculaire (2, 2'). Les 2 axes (3, 3') et (4, 4') sont ensuite parcourus dans une direction intermédiaire (à 45°) réajustée pour tenir compte du déplacement du soleil (cercle) au cours de la séquence d'acquisition.

2.2 Site expérimental et acquisition des données

La zone d'étude est le centre ville de Toulouse (environ 2×3 km, Figure 3), densément construit et présentant des rues dans toutes les directions. Les axes se croisaient au-dessus du site central de l'expérience CAPITOU à proximité de la place du Capitole, où les principales caractéristiques du bâti sont : hauteur des façades ~ 15 m, ratios ramenés à la surface totale de 0.54 pour les toits, 0.38 pour les rues, 0.08 pour la végétation, et 1.3 pour les façades.



Figure 3. Extrait ($\sim 3500 \times 4400$ m) d'une photographie aérienne du centre de Toulouse (photo IGN de 24 juin 1998). Les axes de vol en conditions nocturnes sont figurés en pointillés. En blanc la zone d'étude considérée.

Nous nous intéressons ici plus particulièrement à la POI de février 2005 pour laquelle les effets anthropogéniques (chauffage des bâtiments en particulier) ont un impact important (Pigeon et al., 2006). 4 vols ont été effectués, 2 en conditions diurnes (matin et après-midi), 2 en conditions nocturnes (Tableau I).

N° vol	heure (TU)	
0509	09:06 – 09:52	matin
0510	21:45 – 22:42	nuit
0511	13:52 – 14:27	après-midi
0512	21:56 – 22:50	nuit

Table I. Récapitulatif des vols de la POI de février 2005

2.3 Traitement des données

Plusieurs étalonnages de la camera FLIR SC2000 (par visée d'un bain thermostaté) réalisés à plusieurs mois d'intervalle ont permis de vérifier la qualité de la réponse et la stabilité temporelle de l'instrument. La caméra M740 a été inter-étalonnée lors de chaque vol par rapport à la SC2000 en mettant à profit la zone de chevauchement de leurs champs de visée (Fig. 4). Les effets atmosphériques ont été corrigés à l'aide du code LOWTRAN 7 (en se fixant arbitrairement une émissivité de 0.95) et des radiosondages réalisés en simultanéité avec les vols. Les déformations géométriques (déformation en barillet liée à l'utilisation d'un objectif grand angle) et les distorsions radiométriques (non homogénéité dans le champ) ont été analysées et corrigées.

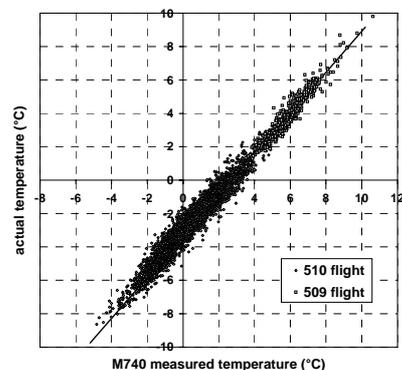


Figure 4. Exemple d'intercalibration de la camera infra-rouge M740 par rapport à la SC2000 (24 février 2005)

Le lecteur trouvera tous les détails sur le calcul des angles zénithaux (θ_v) et azimutaux (ϕ_v) de visée, et sur la caractérisation de l'anisotropie dans les publications précitées (Lagouarde et al., 2000 et 2004). Les résultats d'anisotropie (différence entre températures en visée oblique et nadir) sont présentés sous forme de diagrammes polaires dans lesquels les rayons et les cercles concentriques correspondent respectivement aux angles azimutaux ϕ_v et zénithaux θ_v de visée.

3 RESULTATS

3.1 Anisotropie directionnelle IRT nocturne

La Figure 5 présente le diagramme d'anisotropie pour la nuit du 24 février. L'anisotropie reste inférieure à 1°C en dessous de 50° d'angle zénithal de visée θ_v et ne présente pas de variations significatives avec l'azimut (les discontinuités qui peuvent apparaître dans le diagramme ne sont en réalité que des artefacts inhérents au protocole et à la précision des données ainsi qu'à leur traitement). Les résultats sont identiques pour la nuit du 25 février comme le montre la Fig. 6 sur laquelle toutes les directions azimutales ont été moyennées.

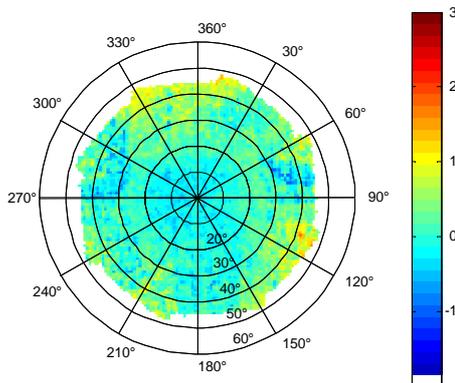


Figure 5. Anisotropie directionnelle IRT pour la nuit du 24 février 2005 (vol 0510).

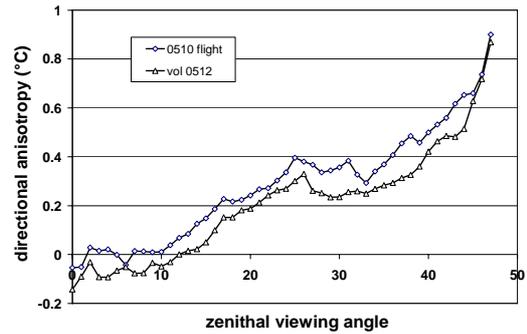


Figure 6. Variation moyenne de l'anisotropie avec l'angle zénithal de visée pour les nuits des 24 et 25 février 2005

3.2 Evolution de l'anisotropie directionnelle IRT au cours du cycle de 24 heures

On trouvera Fig. 7 les diagrammes obtenus les 24 et 25 février -deux journées qui présentent des conditions météorologiques similaires.

- Pour les conditions nocturnes un seul diagramme moyen pour les 2 nuits des 24 et 25 fév. est donné.
- les diagrammes de jour montrent une très forte dépendance avec les angles θ_v et ϕ_v . et confirment les effets de type 'hot spot' observés lors des expériences précédentes sur les milieux urbains (Lagouarde et al., 2004), bien que ceux-ci ne soient pas toujours visibles sur les diagrammes en raison d'angles zénithaux solaires supérieurs à 50° en hiver.

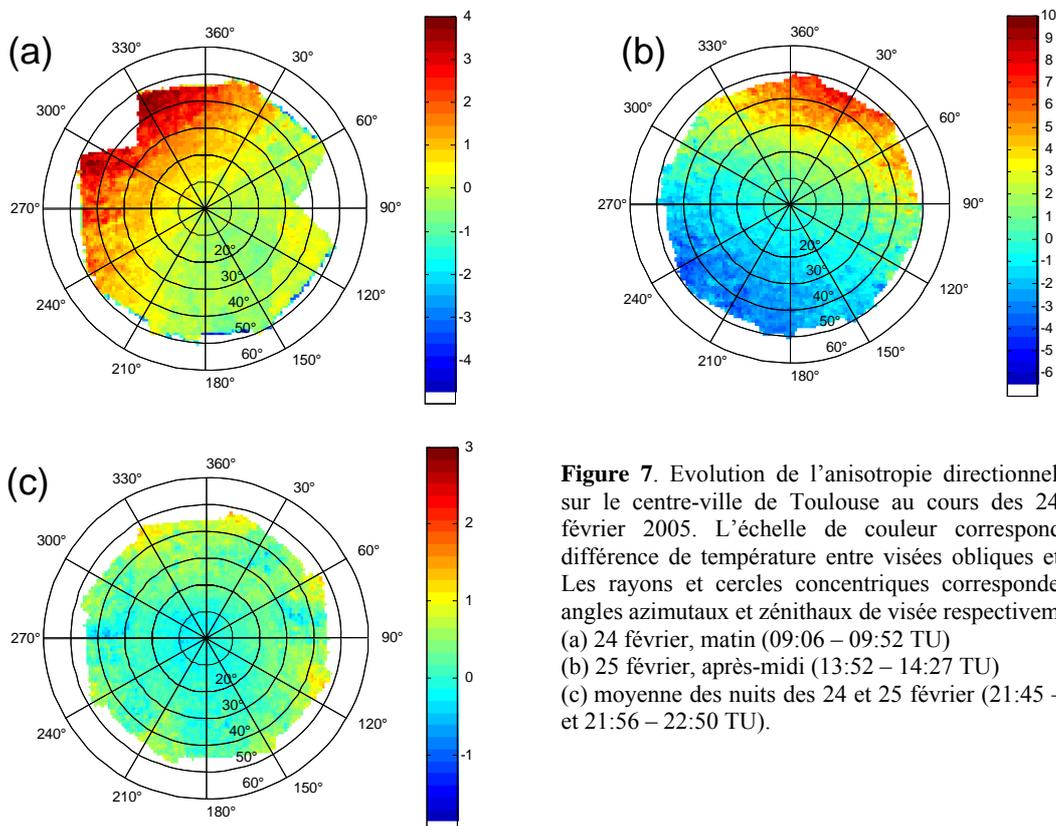


Figure 7. Evolution de l'anisotropie directionnelle IRT sur le centre-ville de Toulouse au cours des 24 et 25 février 2005. L'échelle de couleur correspond à la différence de température entre visées obliques et nadir. Les rayons et cercles concentriques correspondent aux angles azimutaux et zénithaux de visée respectivement.
 (a) 24 février, matin (09:06 – 09:52 TU)
 (b) 25 février, après-midi (13:52 – 14:27 TU)
 (c) moyenne des nuits des 24 et 25 février (21:45 – 22:42 et 21:56 – 22:50 TU).

■ Les effets de nuit sont plus faibles ($\sim 1^{\circ}\text{C}$) que les effets diurnes qui atteignent 5 et 14°C dans le plan principal solaire autour de 10 TU (vol 0509) et 14 TU (vol 0511). Ceci est en lien avec la plus grande variabilité des températures des éléments urbains de jour (contraste entre les zones éclairées et à l'ombre).

■ L'heure d'acquisition des images nocturnes est sans doute trop tardive pour permettre d'observer un effet résiduel de la forte anisotropie de l'après-midi : des données acquises peu après le coucher du soleil révéleraient vraisemblablement une anisotropie en relation avec (i) les contrastes entre les murs faisant face à l'Est (ombre) et à l'Ouest (éclairés) et (ii) l'inertie thermique des bâtiments.

3.3 Modélisation de l'anisotropie nocturne

Un exercice de simulation de l'anisotropie nocturne a été mené à l'aide d'une maquette 3D du milieu urbain. La génération d'images selon diverses directions de visée permet de calculer les pourcentages des éléments toits/sols/façades vus. La pondération des températures de surface simulées par le modèle TEB (Town Energy Budget, Masson, 2000, Fig. 8) pour chacun de ces éléments permet ensuite d'estimer les températures directionnelles résultantes et l'anisotropie. La comparaison entre les températures observées et simulées (Fig. 9) ne dépasse pas 0.4°C et est satisfaisante compte tenu de la précision des mesures d'une part et des hypothèses de TEB (température uniforme pour chaque classe d'éléments en particulier) d'autre part.

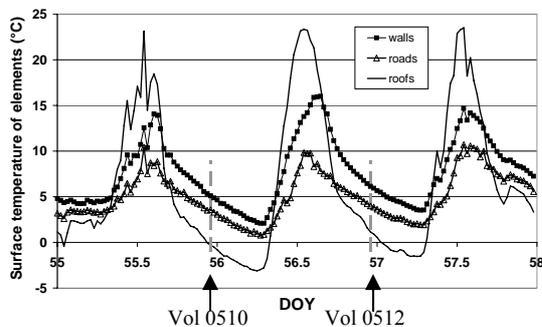


Figure 8. Simulation TEB (24-25 février 2005)

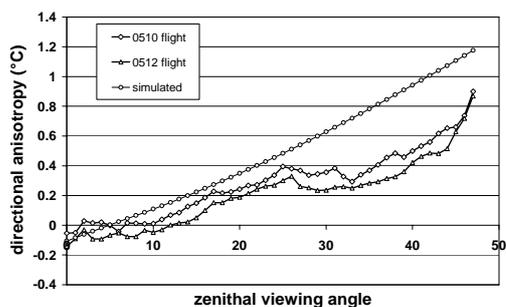


Figure 9. Evolution mesurée et simulée de l'anisotropie directionnelle IRT avec l'angle zénithal de visée

4. CONCLUSION

Les mesures réalisées dans l'IRT lors de CAPITOUL confirment l'importance des effets d'anisotropie directionnelle en conditions diurnes et leur caractère limité en conditions nocturnes bien établies. La possibilité d'observer des effets significatifs peu après le coucher du soleil reste cependant à vérifier. Une caractérisation plus complète de ces effets est attendue des données de la caméra SC2000. Le traitement du jeu complet de données acquis sur Toulouse permettra de plus de caractériser ces effets sur des zones péri-urbaines (pavillonnaires, commerciales, industrielles...) et à d'autres saisons. L'exercice préliminaire de simulation de l'anisotropie nocturne confirme les résultats expérimentaux obtenus et illustre l'intérêt d'approches basées sur la mise en oeuvre de maquettes 3D de la canopée urbaine.

5. REFERENCES

- Arnfield A.J. (2003). *Int. J. Climatology*, 23, 1, 1-26.
- Grimmond, C.S.B. & Oke, T.R. (2002). *J. Appl. Meteor.*, 41, 792-810.
- Lagouarde J-P., Ballans H., Moreau P., Guyon D. & Coraboeuf D. (2000). *Remote Sens. Environ.*, 72, 17-34.
- Lagouarde J-P., Moreau P., Irvine M., Bonnefond J-M., Voogt J., Sollicec F. (2004). *Remote Sensing Environ.*, 93 (4), 443-462.
- Martilli A., Clappier A. & Rotach M.W. (2002). *Boundary-Layer Meteorol.*, 104, 2, 261-304.
- Masson, V. (2000). *Boundary Layer Meteorol.*, 98, 357-397.
- Masson, V., Grimmond, C.S.B. & Oke, T.R., (2002). *J. Applied Meteorol.*, 41, 1011-1026.
- Pigeon G., Legain D., Durand P. and V. Masson. 2006. Anthropogenic heat release in an old European city (Toulouse, France). Submitted to International Journal of Climatology.
- Roth M., Oke T.R. & Emery W.J., (1989). *Int. J. Remote Sens.*, 10, 11, 1699-1720.
- Streukler D.R. (2003). *Remote Sens. Environ.*, 85, 3, 282-289.
- Voogt J.A. & Oke T.R. (1997). *J. Appl. Meteor.*, 36, 1117-1132.
- Voogt J.A. & Oke T.R. (1998). *Int. J. Remote Sens.*, 19, 5, 895-920.
- Voogt J.A. & Grimmond C.S.B. (2000). *J. Appl. Meteor.*, 39, 10, 1679-1699.
- Voogt J.A. & Oke T.R. (2003). *Remote Sens. Environ.*, 86, 370-384.
- Wang Z., Peng Q., Lu Y. & Jiang Z. (2001). *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves*, 22, 8, 1193-1208.

Remerciements : les auteurs remercient l'équipe SAFIRE pour la réalisation des campagnes aéroportées IRT.