

Application de la thermographie infrarouge embarquée en exploitation d'infrastructures

M. Marchetti, M. Moutton, S. Ludwig

CETE de l'Est – LRPC Nancy-ERA 31

L. Ibos, J.-P. Monchau, V. Feuillet

Université Paris Est-CERTES

J. Dumoulin

Université Paris Est-IFSTTAR-MACS division

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Prévention des risques
Développement durable
Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**



CMOI, Lille, 22-24 novembre 2011

Sommaire

- 1- Objectifs
- 2- Mise en oeuvre de la caméra thermique
- 3- Résultats - Estimation du risque hivernal
- 4- Conclusion - Perspectives

1- Objectifs

Contexte :

- Véhicule instrumenté pour établir la susceptibilité au verglas des itinéraires
- Mesures sur une voie circulée à la fois \Rightarrow mesures longues
- Mesures de faible étendue spatiale (*radiomètre avec FOV 20°*)
- Peu/pas d'appréciation de l'environnement radiatif des itinéraires

Objectifs:

- Mettre en oeuvre une caméra infrarouge sur le véhicule,
- Analyser plusieurs voies en simultané,
- Comparer les résultats du radiomètre et de la caméra infrarouge,
- Améliorer la définition du risque hivernal

2- Mise en oeuvre de la caméra thermique

Radiomètre PRT5 (BARNES Pyrometer) (référence):

Détecteur : bolomètre

Bande spectrale : 9.5 - 11.5 μm

Gamme de température : -40°C à + 70°C

Sensibilité : 0.1°C sous 0°C, 0.05°C au-dessus de 0°C

Précision : $\pm 0.5^\circ\text{C}$

FOV : 20°

Temps de réponse : 50 ms

NET : 0.005 pour un temps de réponse de 50 ms sur une corps à 25°C



Caméra infrarouge FLIR S65 :

Détecteur : matrice microbolomètre 320x240 IRFPA non refroidie

Bande spectrale : 7.5 - 13 μm

Gamme de température : -40°C à + 120°C

Sensibilité : 0.08°C

Précision : $\pm 2\%$ de la mesure

FOV: 24°x18° (HxV) (lentille de focale 35 mm)

IFOV : 1,3 mrad



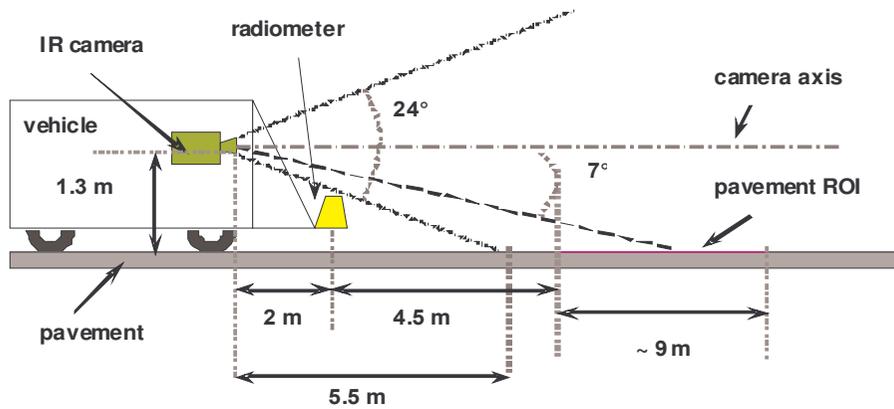
sondes atmosphériques

radiomètre

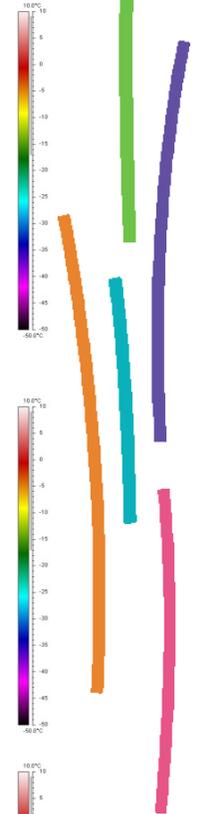
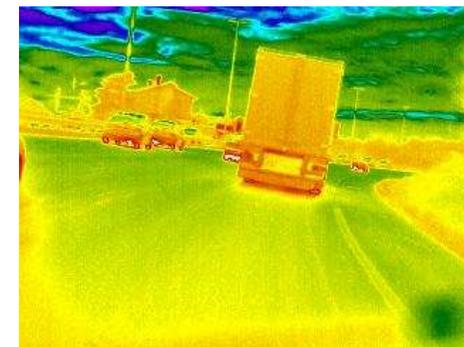
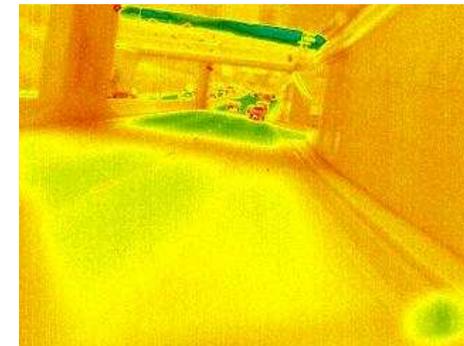
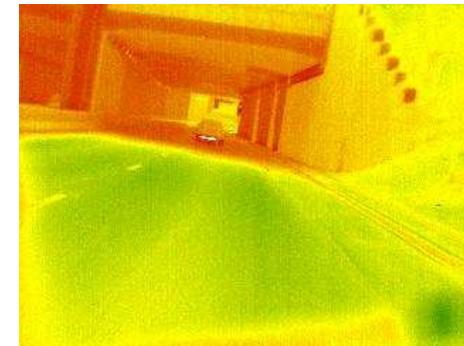


trigger de distance

véhicule de Thermal Mapping



Schéme de la caméra sur le véhicule



images IR ($-50^{\circ}\text{C} < T < +10^{\circ}\text{C}$)

Itinéraire

- 30 km de long
- routes départementales, nationales et autoroutes

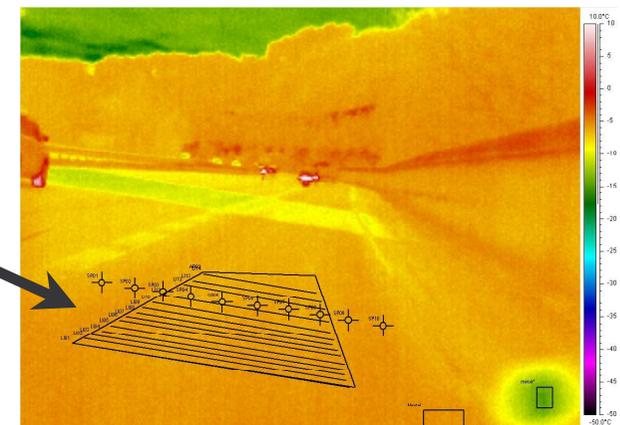
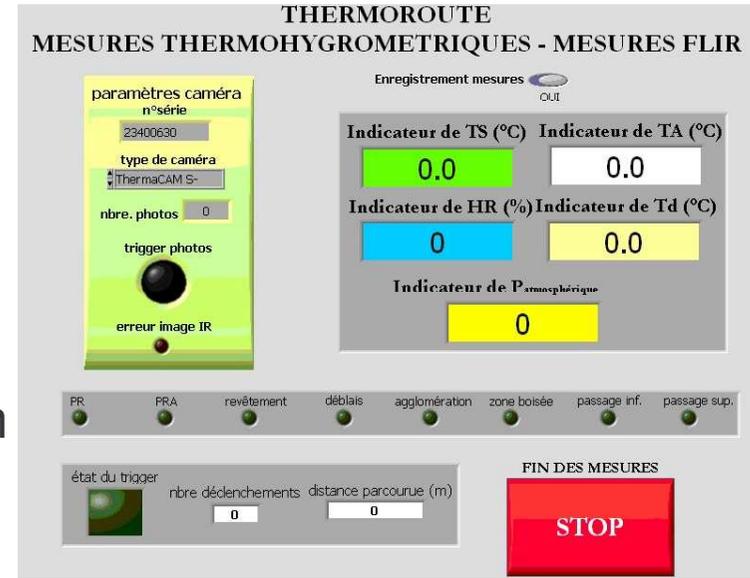
Acquisition de données

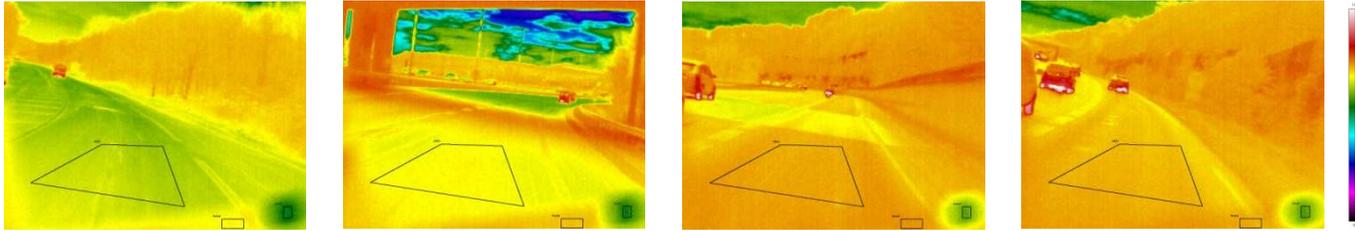
- paramètres atmosphériques tous les 3 m
- images thermiques tous les 12 m
(*format natif*)
- vitesse maximale 70 km/h
- interface LabVIEW®

Choix de zones appropriées d'analyse de données

(*non affectées par le trafic*)

- pour corrections d'émissivité
- pour évaluation du risque hivernal transversal





IR images ($-50^{\circ}\text{C} < T < +10^{\circ}\text{C}$)

Utilisation de plusieurs zones d'intérêt (ROI):

- ROI dédiée à la route
- Introduction d'un "miroir" pour les corrections radiatives ($\varepsilon=0.063$)
- Introduction de Nextel Velvet 811-21 avec une émissivité stable ($\varepsilon=0.97$)

Décalage de distance entre les mesures radiomètre et celles de la caméra (offset ≈ 12 m)

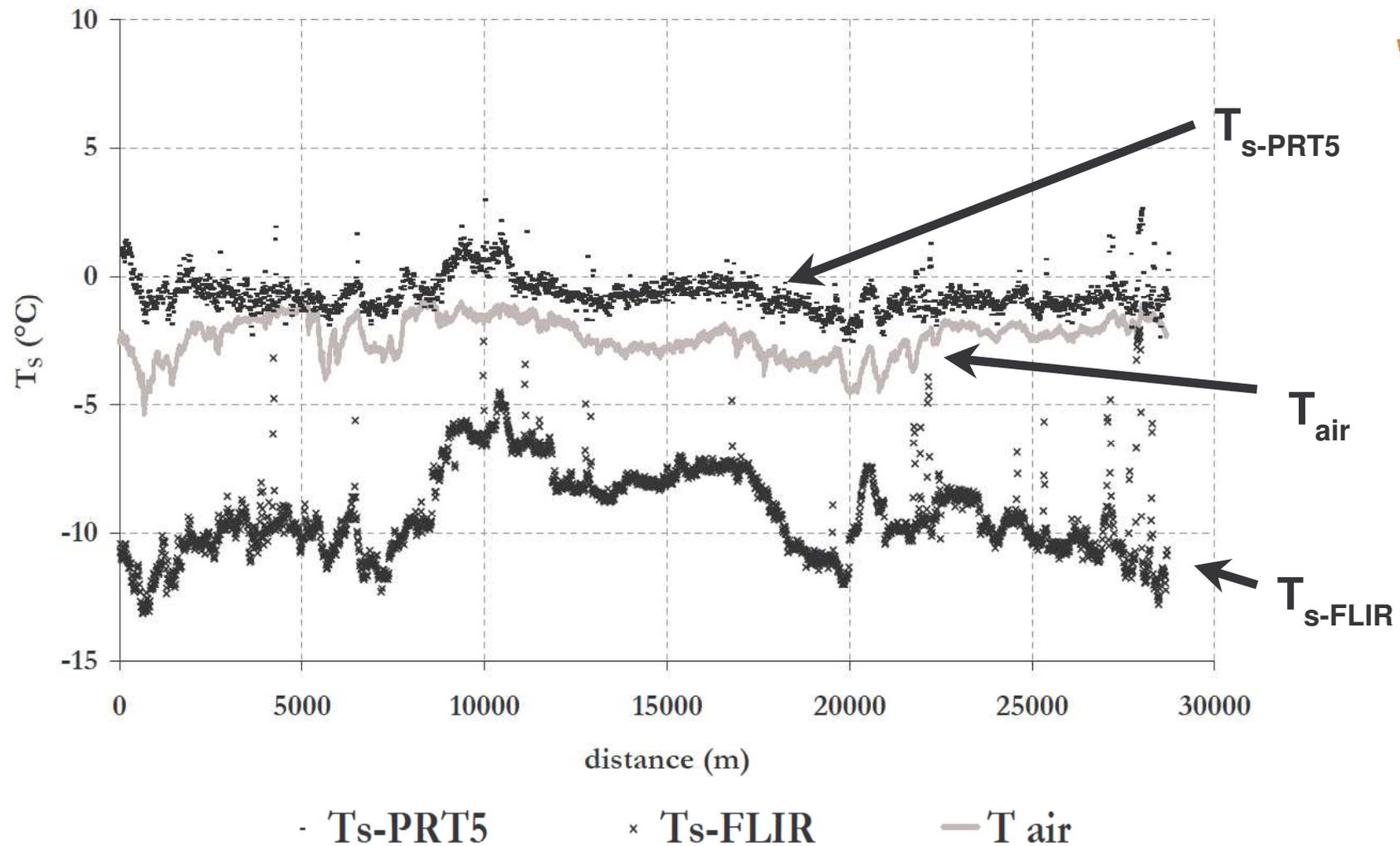
Images thermiques prises en mode "snapshot" tous les 12 m

- temps d'intégration de quelques ms \Rightarrow léger effet de traînée sur 2 pixels
- compensation liée à la taille des ROIs \gg taille de l'effet de traînée

Paramètres atmosphériques (T_{air} , humidité) as inputs in the IR camera

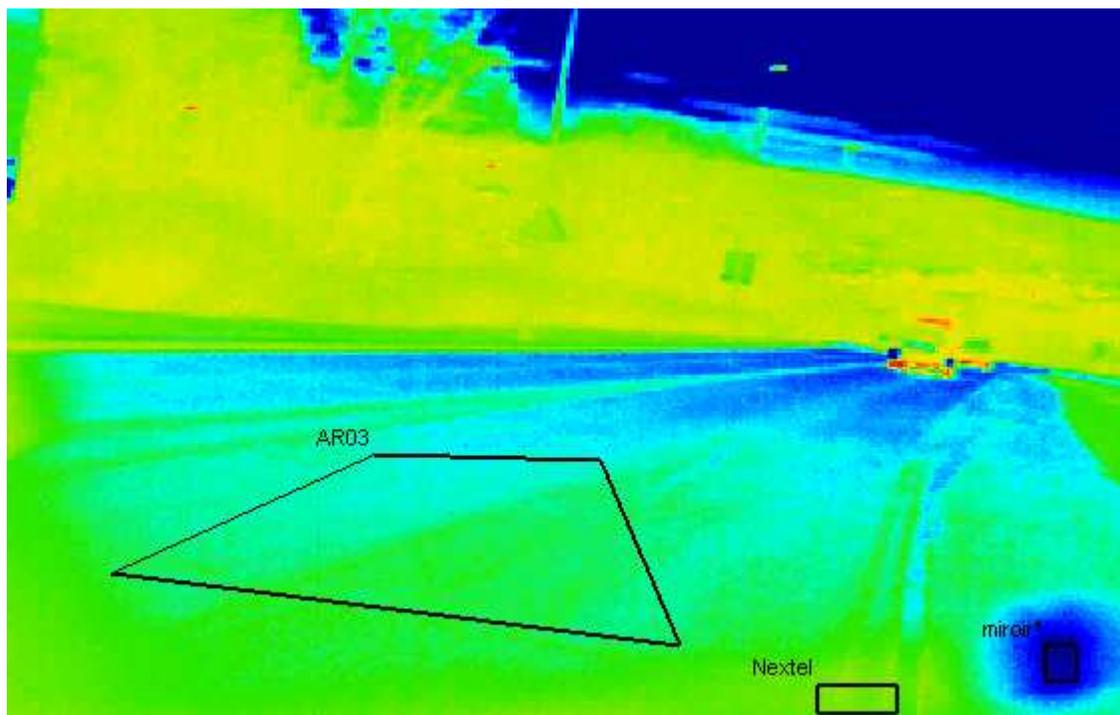
3- Résultats - Estimation du risque hivernal

3.1. Température et corrections radiatives



Résultats avant toute correction

Séquence thermique de l'itinéraire



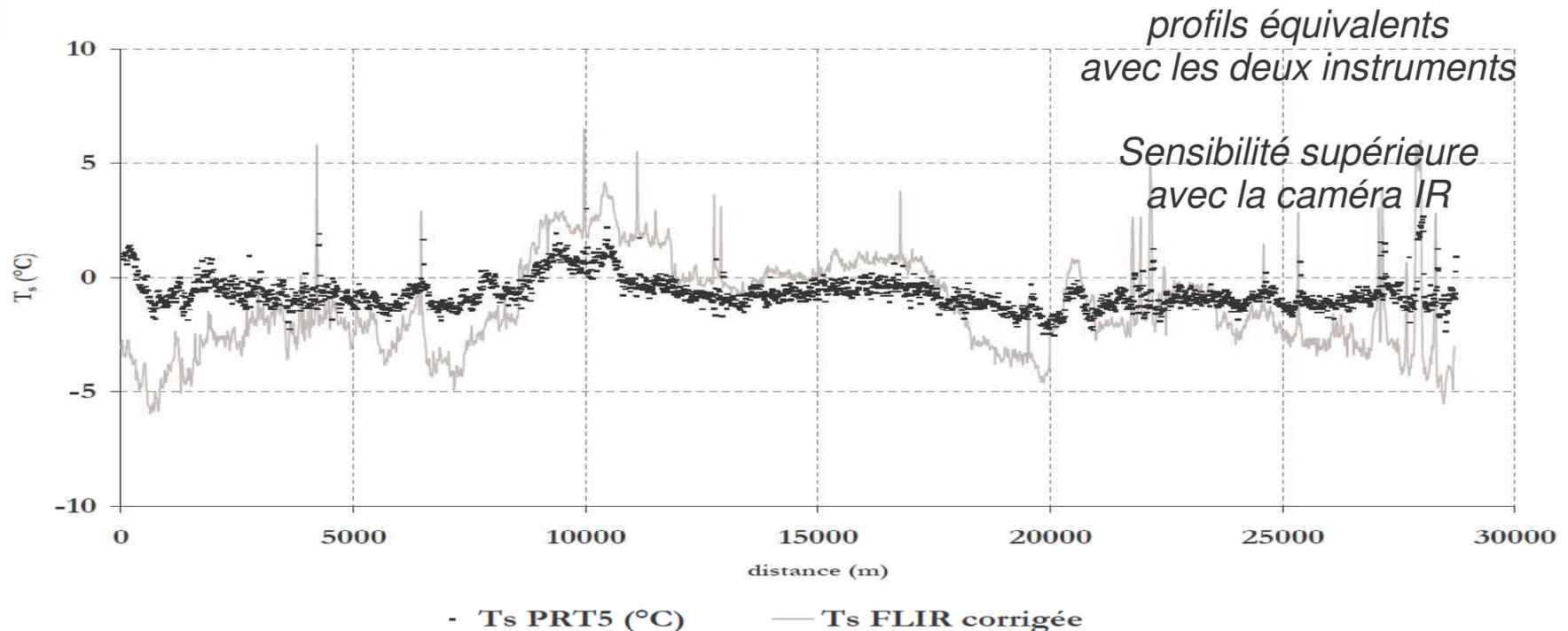
Équilibre radiométrique

$$L_{\text{mesuré}} = \tau_{\text{atmosphère}} \cdot \varepsilon_{\text{route}} \cdot L_{\text{route}} + \tau_{\text{atmosphère}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{route}}) \cdot L_{\text{environnement}} + (1 - \tau_{\text{atmosphère}}) \cdot L_{\text{atmosphère}}$$

Corrections radiatives

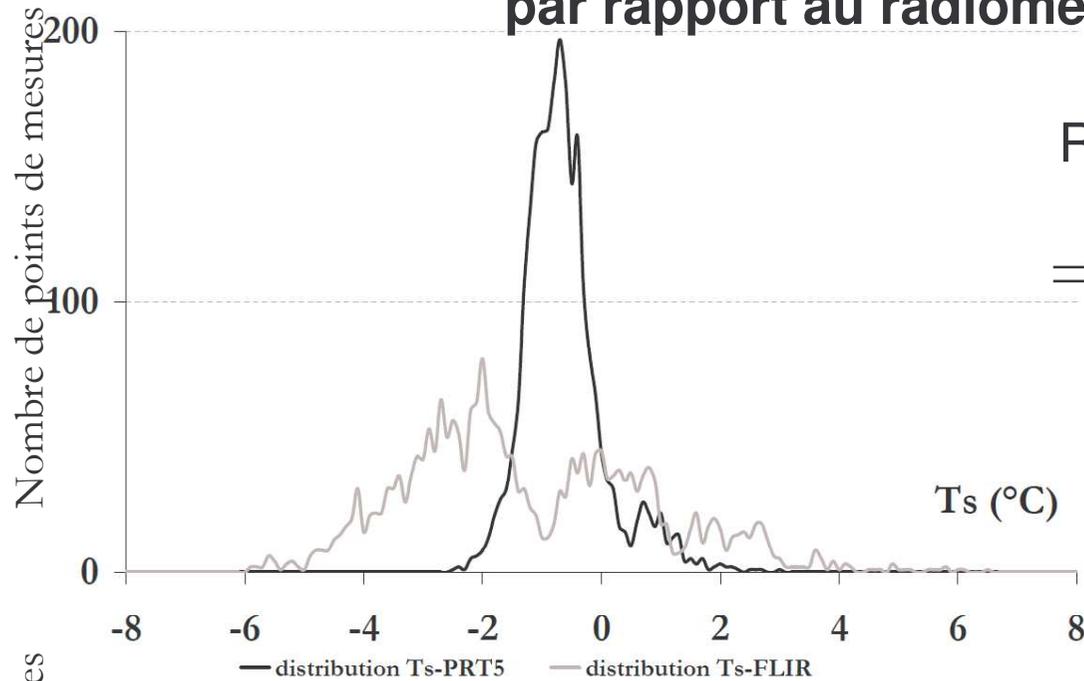
- distance faible et atmosphère dégagée : $\tau_{\text{atmosphère}} \sim 1$
 - absence de spécularité : loi de Stefan $L = \sigma T^4$
 - corrections d'émissivité sur les ROIs de la route
- ⇒ distribution d'émissivité sur les ROIs de la route

$$T_{\text{mesuré}}^4 = \varepsilon_{\text{route}} \cdot T_{\text{route}}^4 + (1 - \varepsilon_{\text{route}}) \cdot T_{\text{environnement}}^4$$

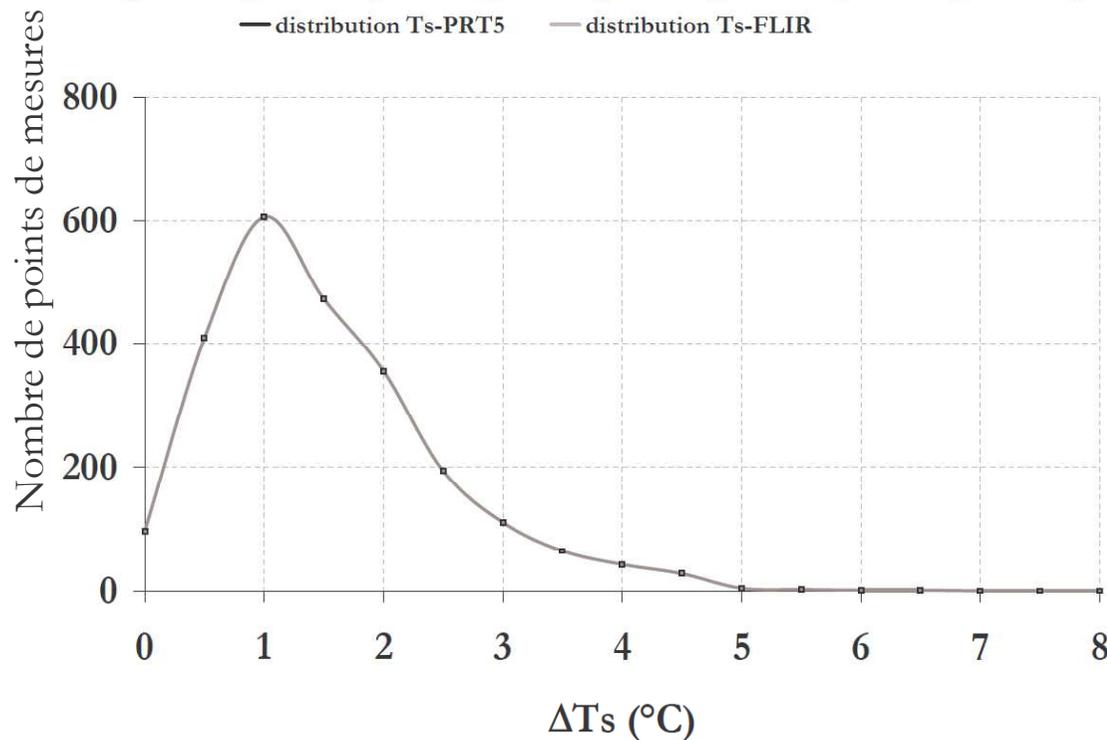


Résultats après corrections radiatives

Dispersion des mesures sur la ROI route de la caméra IR par rapport au radiomètre PRT5

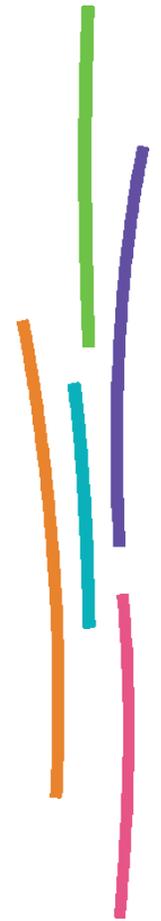
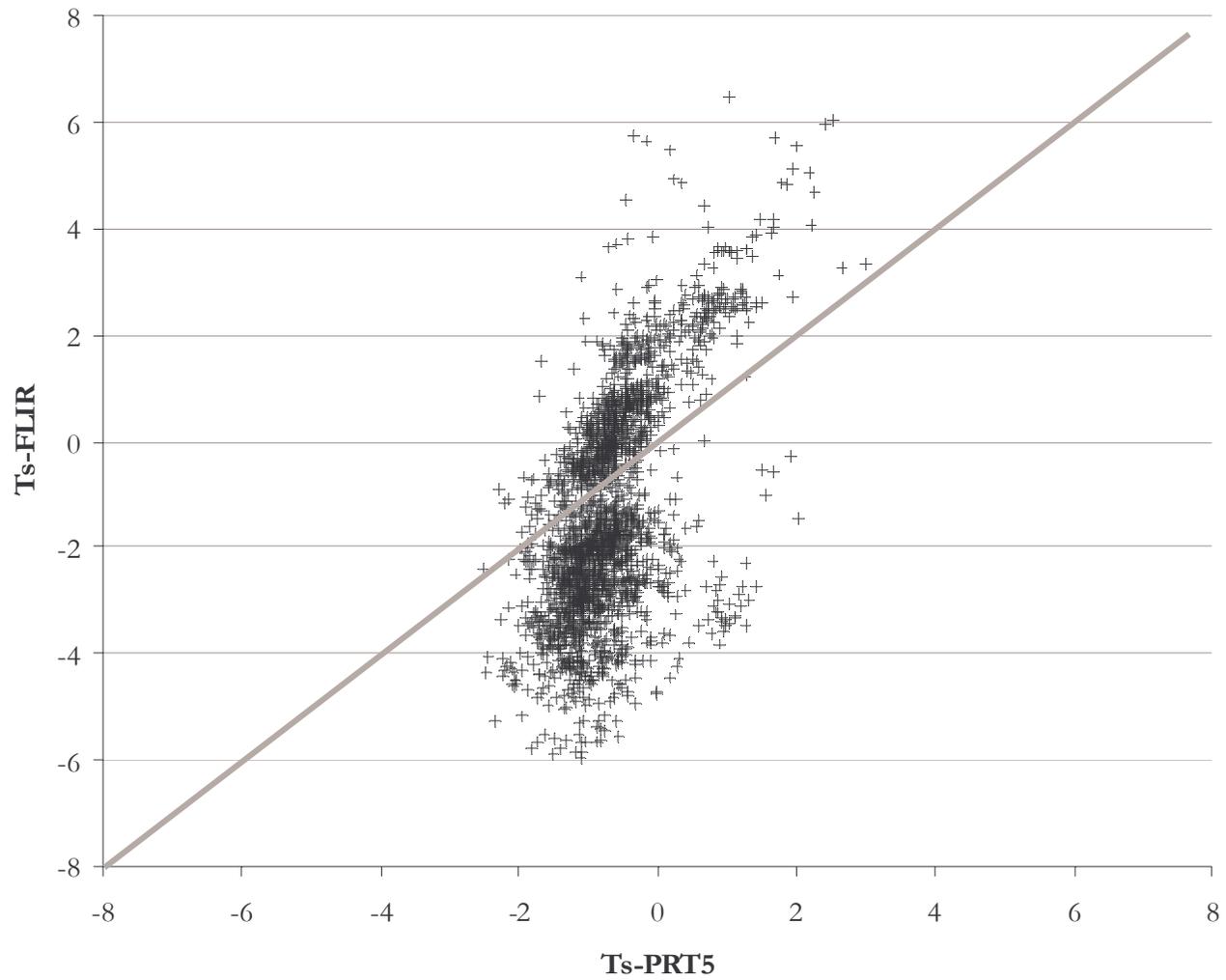


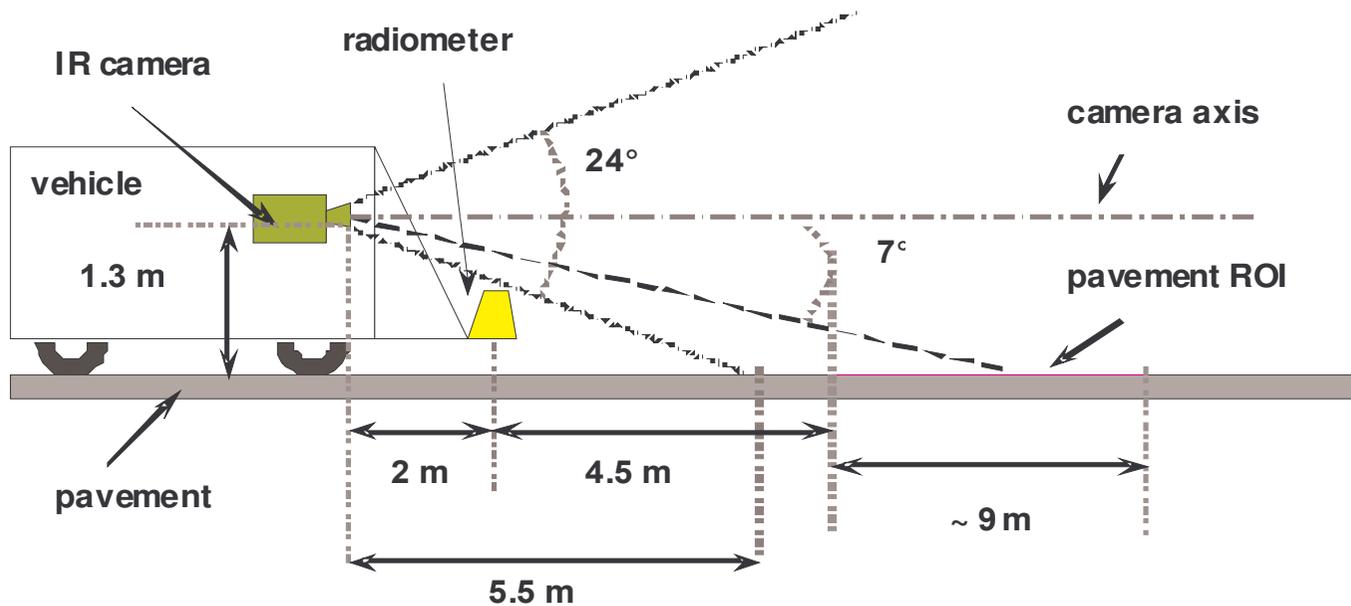
ROI caméra IR plus étendue que celle du radiomètre
⇒ variations plus grandes de température



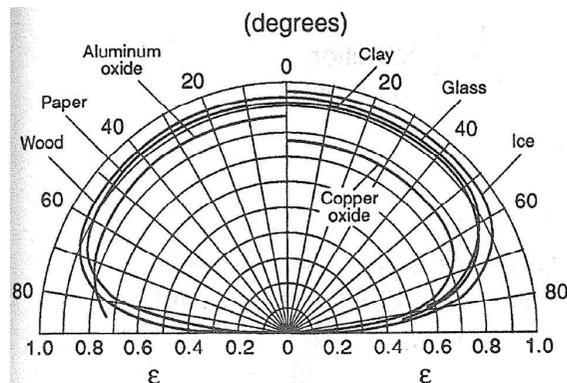
Différences absolues de températures entre les deux instruments

corrélation entre T_{s-FLIR} et T_{s-PRT5}





amélioration de la correction d'émissivité
 ⇒ distribution d'émissivité sur la ROI route



Gaussorgues, 1981

Angle
d'observation :

$$\alpha_{\text{moyen}} \approx 7^\circ$$

$$\alpha_{\text{min}} \approx 4^\circ$$

$$\alpha_{\text{max}} \approx 11^\circ$$

Faible réduction ou augmentation d'angle = modification significative d'émissivité

3.2. Risque hivernal.

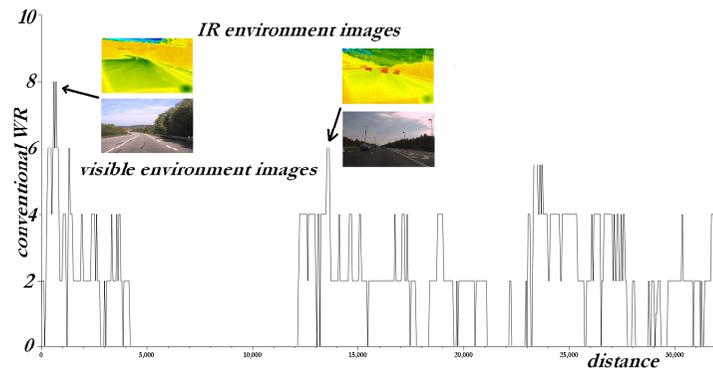
Cohérence avec les saisons et les infrastructures

Approche basée sur la moyenne glissante

$$RH = 2.RH(T_s) + RH(T_d),$$

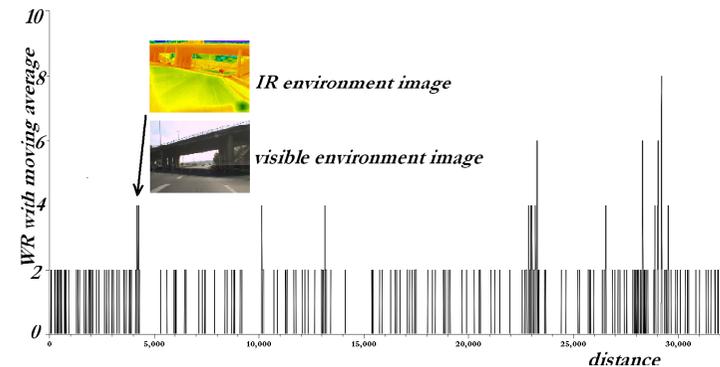
avec $RH(T_s) = 0$ si $0^\circ\text{C} \leq T_{s,\text{moyenne glissante}} - T_s < 0.5^\circ\text{C}$; 1 si $0.5^\circ\text{C} \leq T_{s,\text{moyenne glissante}} - T_s < 1^\circ\text{C}$; ...

et $RH(T_d) = 0$ si $0^\circ\text{C} \leq T_{d,\text{moyenne glissante}} - T_d < 0.5^\circ\text{C}$; 1 si $0.5^\circ\text{C} \leq T_{d,\text{moyenne glissante}} - T_d < 1^\circ\text{C}$; ...



2009-01-31

Risque hivernal traditionnel en fonction de la distance (m)



2009-01-31

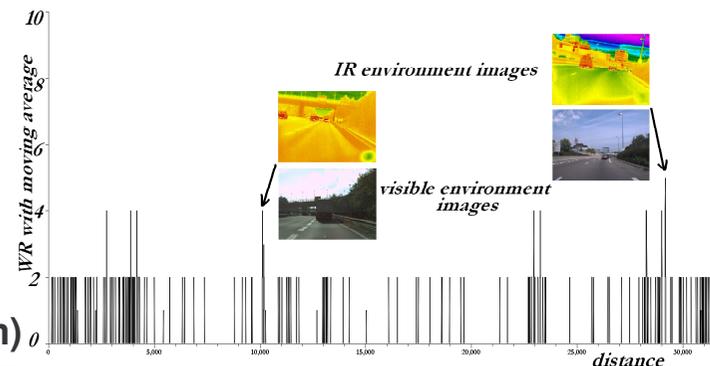
Risque hivernal avec moyenne glissante en fonction de la distance (m)

meilleure cohérence avec l'infrastructure ...

... et les saisons

2009-08-19

Risque hivernal avec moyenne glissante en fonction de la distance (m)

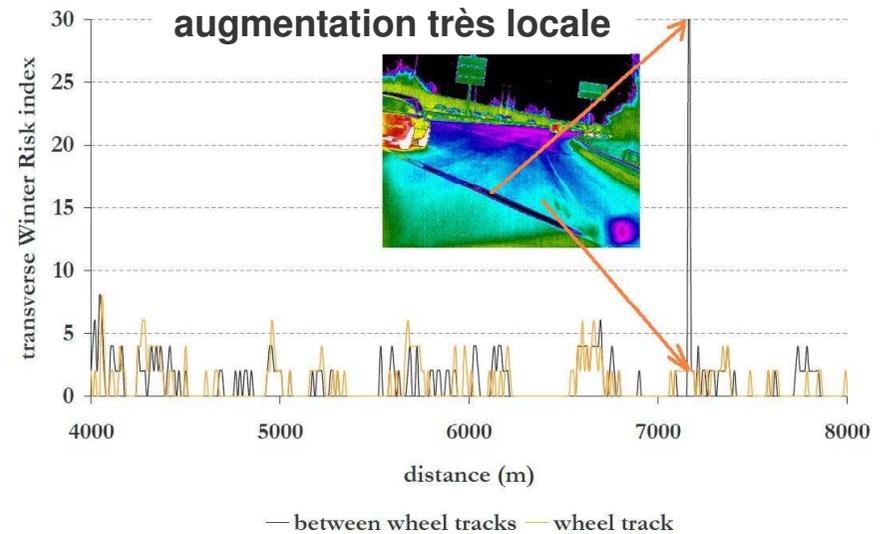
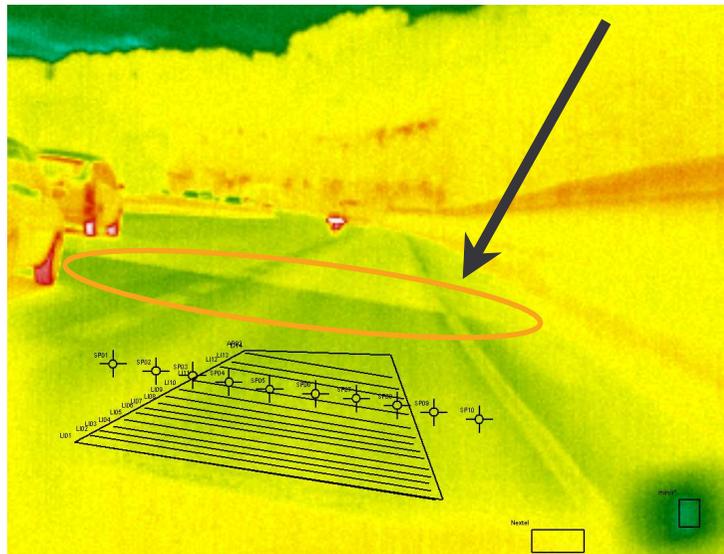


3.3. Évaluation du risque hivernal transversal

Circulation continue des roues véhicules \Rightarrow spécificité thermique des bandes de roulement

Investigation plus poussée sur un variation du risque hivernal en transversale (*usure préférentielle de la route dans ces bandes de roulement*)

points d'analyse pour l'étude du risque hivernal transversal



Aucune différence significative sauf sur points très localisés
Analyse très locale \Rightarrow disparition du risque hivernal dans les bandes de roulement compensée par l'apparition d'un risque hivernal ailleurs

4- Conclusion. Perspectives

Efficacité démontrée de la mise en oeuvre d'une caméra infrarouge embarquée en exploitation d'infrastructures

Corrections radiatives :

- **corrections d'émissivité / angle rasant**
- **atténuation du signal / distance à la route de route de la caméra**
- **analyse détaillée des différences mesurées par rapport au radiomètre** (*nature des structures, environnement radiatif*)

Améliorations déjà effectuées

- **meilleures positions des caméras (plusieurs voies auscultées)**
- **accroissement de la fréquence d'acquisition**



Merci de votre attention

contacts:

mario.marchetti@developpement-durable.gouv.fr

jean.dumoulin@ifsttar.fr

ibos@u-pec.fr

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Prévention des risques
Développement durable
Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**



UNIVERSITÉ
PARIS-EST

CMOI, Lille, 22-24 novembre 2011

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable, des Transports et du Logement