

Caractérisation et étalonnage d'une caméra thermique FLIR – SC 2000

Jean-François Hanocq¹, Marie Weiss¹, Jean-Pierre Lagouarde², Philippe Clastre¹

Résumé : *Le département Environnement et agronomie de l'Inra a acquis une caméra thermique FLIR-SC2000 pour réaliser le suivi de parcelles agricoles par l'acquisition d'images de température de surface, éventuellement en aéroporté. Les unités EMMAH du centre Inra d'Avignon et EPHYSE du centre Inra de Bordeaux ont effectué sa caractérisation. Afin de pouvoir exploiter correctement ces images, nous avons d'abord été conduits à caractériser précisément la réponse spectrale de la caméra, puis à contrôler sa précision et ses caractéristiques optiques compte tenu de son utilisation dans des environnements et sur des vecteurs très différents (cultures, forêts, serres, avion). Nous décrivons les matériels, les protocoles et les résultats d'expérimentation qui ont servi à la caractériser ; nous abordons également le fonctionnement de ce type de caméra à micro bolomètres dite "non refroidie" où une bonne utilisation du système interne d'auto étalonnage, le "shutter", est importante pour rester dans les limites d'utilisation données par le constructeur.*

Mots clés : Caméra thermique, caméra infrarouge, étalonnage

Introduction

Les unités EMMAH du centre Inra d'Avignon et EPHYSE du centre Inra de Bordeaux partagent depuis 2003, l'utilisation d'une caméra thermique "SC 2000" commercialisée par la société FLIR pour suivre l'état de cultures et de couverts forestiers. La société FLIR assure l'étalonnage absolu de la caméra ; nous décrivons dans ce document la réalisation, la mise en place des matériels et les protocoles ainsi que les résultats de la caractérisation réalisée par les deux unités. Cette caractérisation concerne :

- la détermination de la loi de projection,
- la réponse spectrale de la caméra FLIR,
- l'étalonnage de la caméra pour :
 - vérifier la précision de la mesure ;
 - déterminer l'influence de la température ambiante ;
 - étudier l'effet de vignettage des images ;
 - préciser le rôle et la commande du shutter.

1. Caractéristiques de la caméra

1.1 Détermination de la loi de projection géométrique

L'effet barillet correspond à une courbure des lignes droites qui va en s'amplifiant en bordure d'image (**figure 2**). Cette distorsion est liée au caractère imparfait des objectifs et aux aberrations des systèmes optiques. La déformation des lignes parallèles aux bords de l'image en une courbure d'autant plus accentuée que l'on s'éloigne du centre de l'image est

¹ UMR 1114 Environnement méditerranéen et modélisation des agro-hydrosystèmes, EMMAH, Inra-Univ. Avignon et Pays de Vaucluse – F-84914 Avignon
☎ 04 32 72 23 69 ✉ jean-francois.hanocq@avignon.inra.fr

² UR 1263 Ecologie fonctionnelle et physique de l'environnement EPHYSE, Inra F – 33883 Villenave d'Ornon

caractéristique d'une déformation en "barillet". Lors du traitement d'une image, il est important pour certaines applications particulières de corriger ces déformations.

Le protocole expérimental (**figure 1**) consiste à viser une grille métallique à maille carrée facilitant la lecture des déformations. La grille à température ambiante est posée au dessus d'un bac rempli d'eau et de glace fondante (ou maintenue par de petits supports de matériau isolant thermique au-dessus de packs de glace artificielle) de manière à avoir un bon contraste thermique (**figure 1**) avec le fond ainsi réalisé. La déformation est modélisée par l'ajustement d'un polynôme d'ordre 3 dont la forme est :

$$x' = a_1x^3 + a_2x^2y + a_3x^2 + a_4xy^2 + a_5xy + a_6x + a_7y^3 + a_8y^2 + a_9y + a_{10}$$

$$y' = b_1x^3 + b_2x^2y + b_3x^2 + b_4xy^2 + b_5xy + b_6x + b_7y^3 + b_8y^2 + b_9y + b_{10}$$

A partir d'une même origine, (x, y) sont les coordonnées (lignes et colonnes) d'un point donné de la grille et (x', y') celles de l'image de la caméra, a_i et b_j sont les coefficients des polynômes. L'identification des mailles (x,y) et des points correspondants (x',y') dans l'image permet de calculer les coefficients a_i et b_j à l'aide de Matlab. La **figure 2** montre que l'effet barillet est faible pour l'objectif standard de la SC 2000 dont l'angle d'ouverture est de 24° (horizontal) et de 18° (vertical). La distorsion est plus grande avec des objectifs grands angulaires à ouverture plus large.

Il existe maintenant sur le Web des outils d'assemblage et de corrections d'images (ex : adobe photoshop, panotools) pour réaliser des mosaïques pour couvrir des zones de grandes dimensions.

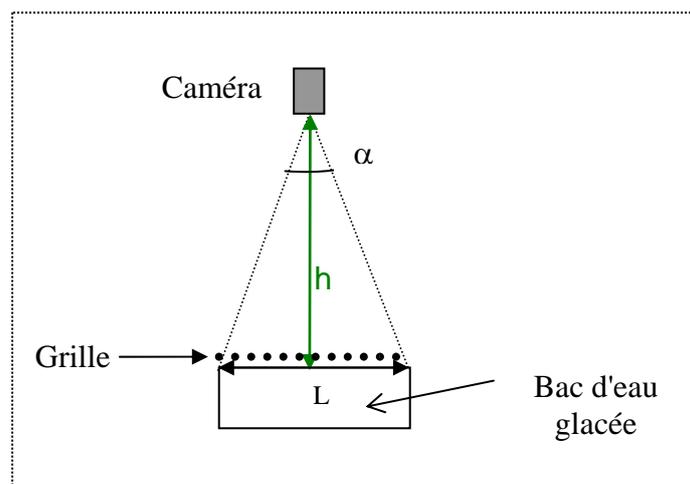


Figure 1 : Protocole d'expérimentation pour visualiser la grille

☞ La même méthode utilisée à diverses hauteurs h permet, à partir des dimensions de la portion de grille vue, de caractériser le champ de l'objectif utilisé et les angles d'ouverture des axes principaux de l'image [selon une relation $0.5 L/h = \text{tg}(\alpha/2)$].

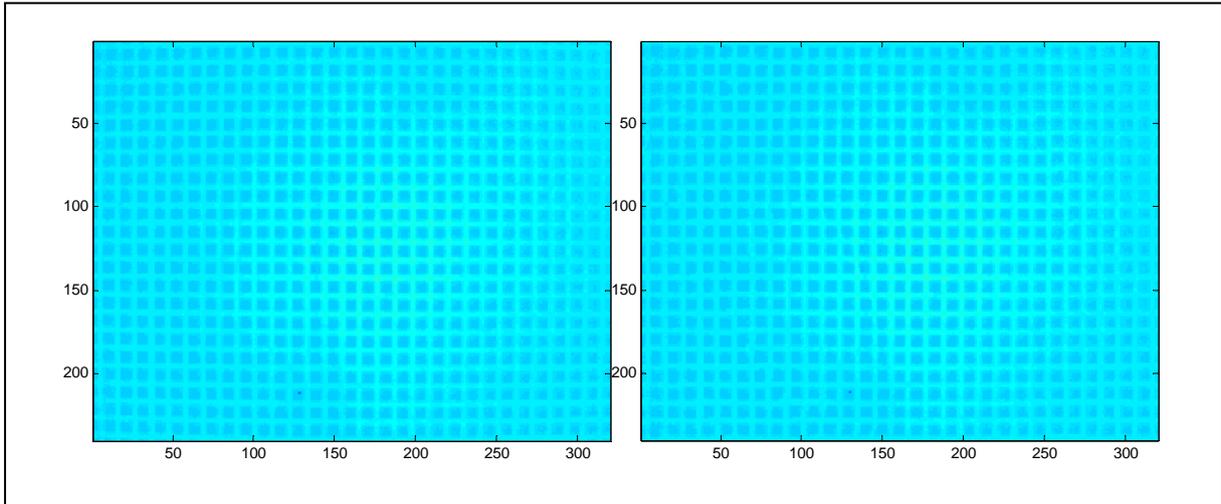


Figure 2 : à gauche : image distordue par l'effet barillet, à droite : image corrigée

1.2 Caractéristiques spectrales de la caméra

Lorsqu'il s'agit de caractériser une surface donnée, la courbe de réponse spectrale de la caméra est un paramètre important. Nous avons réalisé une étude théorique pour caractériser l'impact de la réponse spectrale de la caméra sur des mesures aéroportées à l'aide des modèles de simulation du transfert radiatif dans l'atmosphère MODTRAN et LOWTRAN 7. Nous avons choisi les hypothèses suivantes :

- une émissivité de surface de 0,98, caractéristique d'un sol couvert ;
- une température de surface de 30°C ;
- une visée de la surface à une hauteur de 3 000 m ;
- une visibilité de 50 km et un modèle d'aérosol « mid latitude summer », caractéristique des latitudes tempérées.

Les résultats montrent une forte sensibilité de la mesure aux effets atmosphériques en-deçà de 7,5 μm et surtout au-delà de 13 μm : la transmission de la luminance provenant de la surface (sol + végétation) s'y trouve fortement réduite tandis qu'une forte contribution de l'atmosphère s'ajoute à la mesure (**figure 3**).

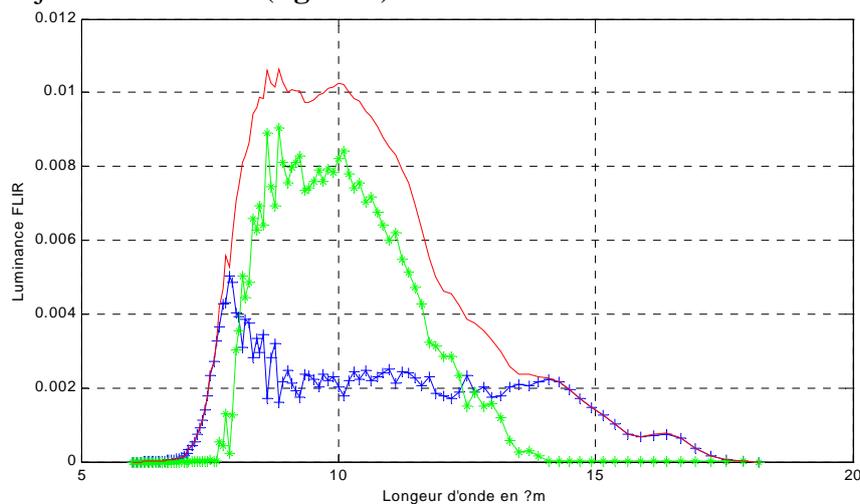


Figure 3 : Luminance provenant de la surface (vert), de l'atmosphère (bleu) et totale (rouge) pour la caméra FLIR (sans filtre Oriel)

Afin d'optimiser la réponse spectrale de la caméra pour caractériser au mieux la surface, nous avons donc intercalé un filtre³ dans le système optique de la caméra permettant ainsi d'avoir une bande passante strictement comprise entre 7,5 et 13 μm (**figure 4**).

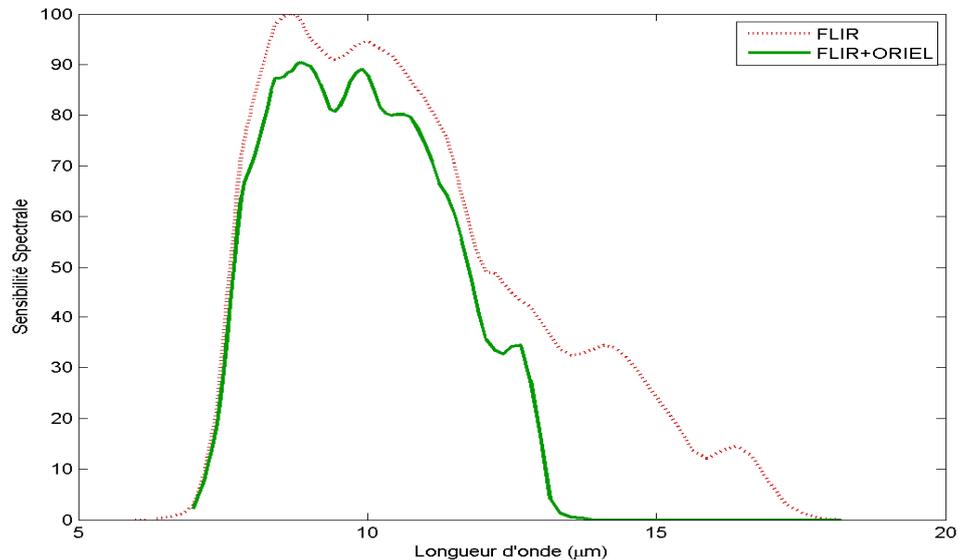


Figure 4 : Sensibilité spectrale de la caméra FLIR seule et de la caméra FLIR + filtre ORIEL

2. Etalonnage radiométrique de la caméra

2.1 Etalonnage absolu

En général, la société FLIR assure l'étalonnage absolu ; la précision annoncée de cette caméra est de $\pm 2^\circ$. Après réception de la caméra, nous avons réalisé des mesures à température ambiante, en visant une surface d'eau dont la température est stabilisée par un bain thermostatique. Les paramètres introduits dans le logiciel d'interprétation des images ThermaCAMResearch associés à la caméra étaient les suivants : distance = 0 ; émissivité = 1,0, transmission optique = 1,0, transmission atmosphérique = 1,0. La température du bain a été comparée à la température de surface T_s estimée à partir de la mesure de température de brillance T_b de la caméra par la relation :

$$T_b^4 = \varepsilon_w T_s^4 + (1 - \varepsilon_w) T_a^4$$

dans laquelle les températures sont en K. L'émissivité de l'eau du bain ε_w est fixée à 0,98, tandis que T_a désigne la température ambiante du laboratoire où se fait la mesure.

On observe une très bonne corrélation ($R^2 = 0,9998$) entre température observée et température mesurée, nettement meilleure que la précision annoncée par le constructeur (**figure 5**). Nous avons vérifié la stabilité dans le temps de la caméra par répétition de la même expérience d'étalonnage à plusieurs mois d'intervalle et elle s'est révélée excellente.

³ Filtre LOT-ORIEL Réf : A206-160

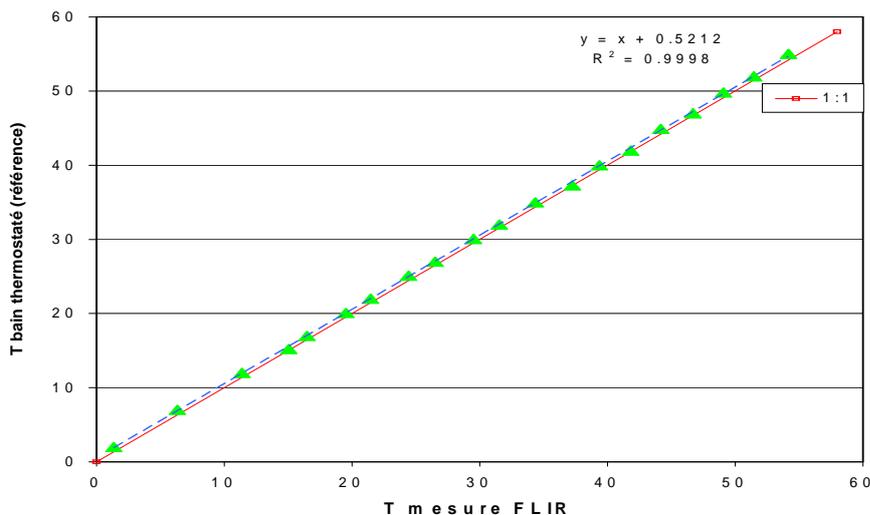


Figure 5 : Courbe d'étalonnage de la caméra FLIR

2.2 Influence de la température ambiante

La caméra devant fonctionner *a priori* dans des environnements très différents, nous avons vérifié la stabilité de cette relation en fonction de la température ambiante. Nous avons donc réalisé pour cela la série d'expériences à l'aide du matériel suivant (**figure 6**) :

- **un corps noir** : ce dispositif développé au laboratoire, est constitué d'un caisson en matériau isolant, renfermant en son centre un réservoir cylindrique en cuivre dans lequel circule de l'eau portée à la température désirée au moyen d'un bain thermostatique. Le fond du réservoir comporte une cavité dont l'ouverture circulaire débouche sur un côté du caisson ; par conduction thermique, la température de ses parois internes est identique à celle de l'eau du réservoir. Le fond de la cavité qui est face à l'ouverture est la partie visée par la caméra et une peinture spécialement choisie pour ses propriétés d'émissivité, recouvre toute la surface interne.
- **une enceinte climatique** : cette enceinte où est placée la caméra sert à créer les conditions d'environnement (température et humidité de l'air). Le côté de l'enceinte placé en regard du corps noir comporte une ouverture circulaire dans la paroi pour une visée de la caméra dans la cavité du corps noir. Nous avons utilisé un matériau isolant et extensible (type mousse) pour fermer l'espace entre la paroi de l'enceinte et le contour externe de l'objectif de la caméra afin de limiter les fuites d'air.

L'installation de ce matériel nous a donné la possibilité de simuler le fonctionnement de la caméra pour les températures ambiantes suivantes : **10, 20, 30 et 40 degrés**. Pour une température ambiante donnée, nous avons débuté les cycles de mesure sur le corps noir après que la caméra soit restée au moins deux heures dans l'enceinte climatisée. Les températures du corps noir ont été successivement les suivantes : **10, 20, 30, 40 et 50 degrés**. Un cycle de mesures consiste à enregistrer une image toutes les minutes pendant 10 minutes après avoir vérifié que la température du corps noir est bien stabilisée (déclenchement automatique de séquences de mesure programmable avec la caméra).

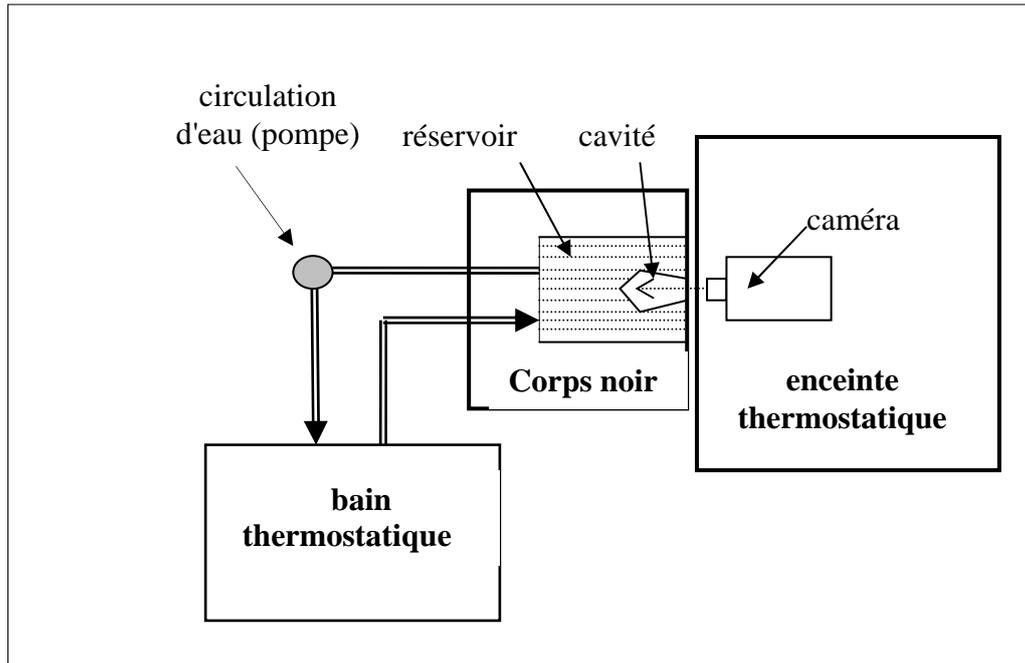


Figure 6 : Schéma synoptique de l'installation pour l'étalonnage radiométrique de la caméra

Les résultats (**figure 7**) montrent que la réponse de la caméra varie avec la température ambiante mais ces variations restent inférieures à la précision indiquées par le constructeur, ce qui confirme les résultats trouvés précédemment. Pour la plupart de nos applications, cette précision est suffisante et par conséquent, aucune correction d'étalonnage ne sera appliquée à la caméra.

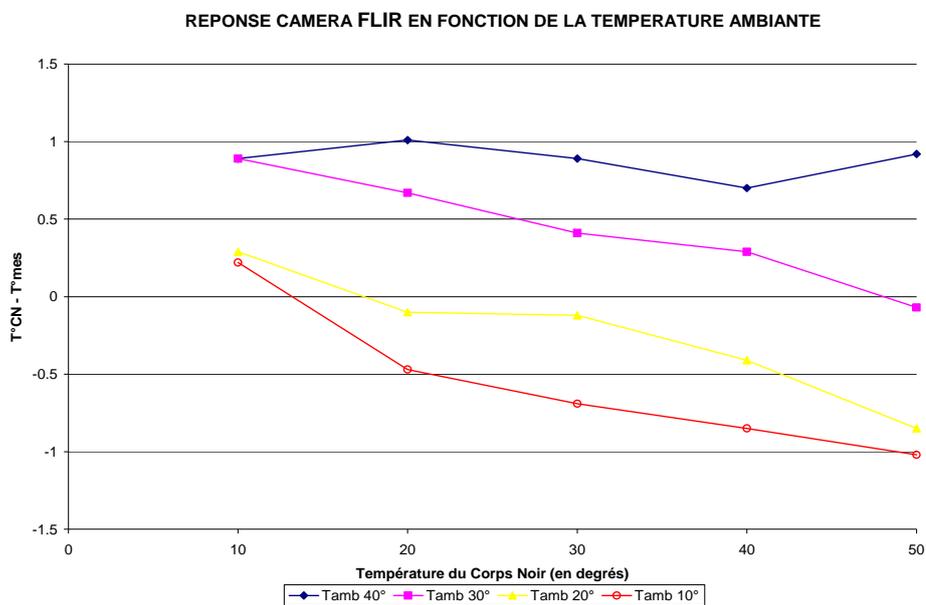


Figure 7 : Différence entre la température mesurée par la caméra et la température du corps noir en fonction de la température du corps noir

2.3 Effet de vignettage

Le vignettage est principalement lié à la qualité des éléments optiques qui composent l'objectif. Si l'on vise une surface de température homogène, il se caractérise par une non-homogénéité de la réponse de la caméra dans le champ de visée. Le vignettage correspond à l'atténuation progressive et concentrique du signal au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de l'image. Le protocole expérimental consiste à viser à environ 30 cm de distance des surfaces de nature différente, considérées comme homogènes en température et choisies pour couvrir une gamme de températures allant de 0° à 45°C.

Les surfaces utilisées ont été les suivantes :

- corps noir du banc d'étalonnage à 0°, 24° et 40° C ;
- disque en laiton massif recouvert avec une peinture noire thermique (émissivité proche de 1) et laissé à la température ambiante du laboratoire ;
- bac avec glace fondante ;
- mur du laboratoire d'étalonnage (qui est climatisé) ;
- dalles en béton exposées horizontalement au soleil.

Pour chaque surface, des enregistrements ont été effectués à la vitesse maximum, c'est-à-dire à environ 4 images/seconde pendant 30 secondes. Dans le but de nous assurer d'une bonne homogénéité de la température intégrée en chaque point du champ, nous avons effectué des mouvements de translations rectilignes d'environ 10 cm (supérieurs à la variabilité éventuelle intracible) avec la caméra pendant l'enregistrement des données ; le but en était de soumettre tous les pixels à un échantillonnage comparable de la surface. C'est le cas par exemple, pour le bac à glace finement broyée, le mur du laboratoire et les dalles en béton. Pour tracer l'image des surfaces, nous avons calculé la valeur moyenne de chaque pixel sur les 120 images acquises (**figure 8**).

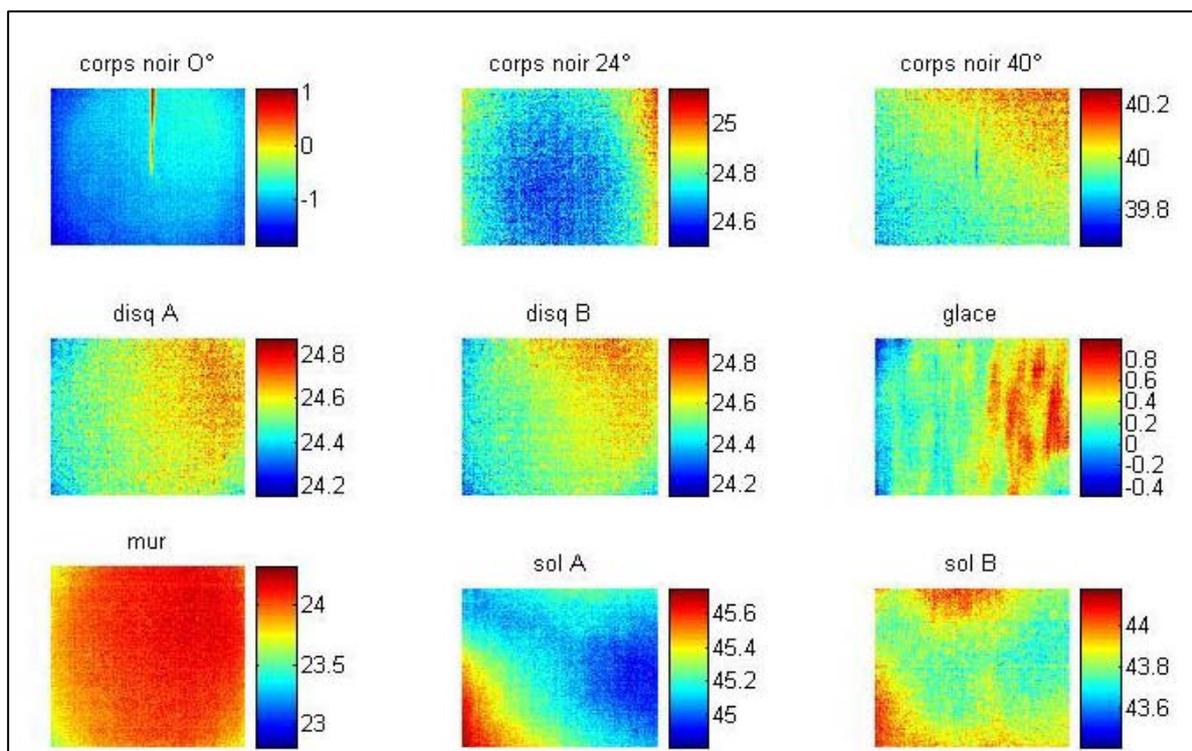


Figure 8 : Effet de vignettage en fonction des différentes cibles visées

On observe pour le corps noir à 40° et le disque A et B, que le coin supérieur droit est légèrement plus chaud. Cet effet pourrait être dû à la proximité du volet qui sert à l'auto-étalonnage (shutter) de la caméra dont nous donnons ensuite quelques explications sur son fonctionnement ; en moyenne, les corrections à appliquer seraient de 0,4°C. Ce même effet n'étant pas visible pour les autres surfaces, nous avons considéré que le vignettage était négligeable.

2.4 Rôle et fonctionnement du shutter

La caméra SC 2000 fait partie d'une génération de caméra dite "non refroidie" c'est-à-dire que le détecteur n'est pas refroidi à très basse température (type stirling) mais régulé en température par un composant à effet Peltier pour maintenir la matrice proche de 25°, température ambiante standard. Cette technologie n'offre pas une régulation thermique de la matrice suffisante à elle seule pour compenser les facteurs d'échauffement interne, notamment celui du détecteur qui reçoit le flux de l'objet visé. Pour obtenir la précision attendue, un système d'auto étalonnage est intégré à la caméra. Son fonctionnement est basé sur une action mécanique consistant à intercaler dans le trajet optique un volet obturateur (shutter) dont la température est mesurée en continu. Cette commande provoque une interruption d'environ une à deux secondes de la scène visée pendant laquelle la caméra va se recalculer en prenant comme référence la température de l'obturateur. Sur le mode "automatique", l'intervalle de temps entre les déclenchements est variable ; il est dépendant de la température de divers éléments internes de la caméra qui sont mesurés en continu. En moyenne, c'est un déclenchement toutes les 5 minutes mais ce temps peut être plus long et atteindre 15 à 20 minutes ; dans l'intervalle de deux déclenchements du shutter, on constate une augmentation apparente de la température qui affecte en premier les contours de l'image. Suivant les conditions d'environnement, après quelques minutes, l'élévation de température peut atteindre 1,5°C.

Sur le mode "manuel", la fonction est inhibée et peut donc être déclenchée à volonté, juste avant une prise d'image par exemple. Ce dernier mode de fonctionnement est à adopter pour garder une précision supérieure au demi-degré. En règle générale, elle est obtenue avec certitude lorsque l'acquisition de l'image est faite dans les 30 secondes qui suivent le déclenchement du shutter.

Conclusions

Nous avons réalisé la caractérisation radiométrique et géométrique de la caméra. Nous avons vérifié que la précision de la mesure était dans les limites d'erreur annoncées par le constructeur ($\pm 2^\circ$) et que l'on restait également inférieur à $\pm 2^\circ$ pour des variations de la température ambiante comprises entre 10° et 40°C. Nous avons également réalisé la caractérisation de la loi de projection, incluant la correction de l'effet barillet.

La fonction "auto shutter" est à utiliser avec réserve compte tenu de la précision désirée. Une précision inférieure ou égale au demi degré peut être obtenue dans le cas d'un fonctionnement séquentiel et donc automatique des prises d'images, à condition de pouvoir déclencher le shutter à la demande c'est-à-dire juste avant l'acquisition de l'image. Cette fonction n'existe pas sur ce modèle de caméra et nous avons développé un logiciel pour y remédier.

L'évolution technologique des dernières générations de caméras non refroidies s'est traduite par une meilleure stabilité et une meilleure précision que la SC 2000 ; de ce fait, les auto étalonnages sont beaucoup plus espacés et la fréquence de déclenchement du shutter peut être programmée.

Bibliographie

Lagouarde J-P., Ballans H., Moreau P., Guyon D., and Coraboeuf D. (2000) Experimental study of brightness surface temperature angular variations of maritime pine. *Remote Sensing of Environment* **72**, 17-34.