

ACQUISITION D'IMAGES THERMIQUES PAR DRONE : CORRECTIONS RADIOMETRIQUES A PARTIR DE DONNEES TERRAIN

Audrey Jolivot^{1*}, David Gómez-Candón^{2*}, Sylvain Labbé³, Nicolas Virlet², Jean-Luc Regnard²

¹CIRAD UMR TETIS, Montpellier

²Montpellier SupAgro UMR AGAP, Montpellier

³IRSTEA UMR TETIS, Montpellier

Résumé

Les images thermiques ont de nombreuses applications dans le domaine agronomique, notamment pour informer sur la réponse des plantes au stress hydrique. La miniaturisation des caméras thermiques permet aujourd'hui de les installer sur des drones. Cependant, les caméras thermiques miniaturisées embarquées à bord de drones n'ont pas de système de contrôle de la température des microbolomètres, ce qui conduit à la dérive continue des données, avec la difficulté de mesurer correctement la température absolue des objets étudiés sur le terrain. Nous présenterons ici une méthode de correction radiométrique des images thermiques acquises par drone afin de pallier cette difficulté.

La proposition consiste à cibler périodiquement des références de terrain stables, mesurées indépendamment, pour apprécier la dérive et calculer la température absolue. Un dispositif d'acquisition de mesures au sol consistant en un système d'enregistrement en continu de la température de quatre cibles (froide, chaude, sol sec et sol humide) via des thermo-radiomètres IR120 (Campbell®Scientific) a été installé les jours d'acquisition des images. Une station météorologique complète le dispositif et permet d'acquérir des données de température et d'humidité de l'air, de rayonnement solaire, et de vitesse du vent, toutes les 10 secondes. Les images acquises sont corrigées radiométriquement par régression linéaire à partir des données thermiques collectées sur la batterie de cibles. Les températures extraites des images corrigées ont été comparées aux températures moyennes de surface d'un échantillon de 10 arbres mesurées par thermo-radiomètres. Les résultats montrent une bonne corrélation entre les données issues des thermo-radiomètres et celles issues de la caméra thermique et corrigées radiométriquement. Ce système offre une précision suffisante pour être utilisé dans des études sur le stress hydrique de la végétation.

Mots clé : corrections radiométriques, infrarouge thermique, drone, stress hydrique, végétation

Abstract

Thermal images have many applications in agronomy, including crop water stress status assessment. Nowadays, the miniaturization of thermal cameras allows installing them onboard the Unmanned Aerial Vehicles (UAV), but this miniaturization leads to some difficulties: the miniaturized thermal cameras have no temperature control system of their sensor. The instability of the miniaturized camera makes a high drift in the acquisition of temperature data so that acquired thermal images don't fit the real temperature of the studying object, so data have to be continuously corrected. We need to have stable reference on field in order to compute the actual temperature value. In this article we present a method for radiometric correction of UAV remote sensed thermal images. We have implemented a device in order to retrieve ground temperature measurements. This device is composed with four targets (cold, hot, dry soil, wet soil) which measured continuously the target temperature thanks to IR120 (Campbell®) radio-thermometer. A meteorological station is included in this ground system and acquires air temperature and moisture, solar radiation, wind speed and direction every 10 seconds. The images are radiometrically corrected by linear regression from on ground thermal data collected. Corrected images have been compared with mean canopy surface temperature of a sample of 10 trees measured with radio-thermometers. The results showed a good link between data from on ground radio-thermometer and data from thermal camera after radiometric correction. We can conclude that images obtained by this method are of sufficient quality to be used in vegetation water stress studies.

Keywords: radiometric correction, thermal infrared, UAV, water stress, vegetation

1. Introduction

L'état hydrique de l'arbre est déterminé par les conditions environnementales (climat, état hydrique du sol), par les paramètres de la plante (variété, dimension de la canopée, charge de fruits), par les pratiques culturales (labour, mauvaises herbes, méthode et quantité d'irrigation, qualité de l'eau d'irrigation), et par les agents de stress biotique externes (maladie, ravageurs). L'état hydrique de l'arbre peut être évalué de manière directe (par exemple le potentiel hydrique de la feuille ou de la tige) et de manière indirecte (par exemple la température de feuille, Ben-Gal et al., 2009). Néanmoins, lorsque de telles informations sont nécessaires pour l'ensemble d'un verger (ou pour un échantillon représentatif), de manière simultanée,

l'utilisation de ces méthodes traditionnelles (directes) n'est pas possible en raison (1) du temps et de la quantité de travail nécessaires, et (2) de la variabilité inhérente aux résultats dus aux changements de conditions climatiques pendant les mesures. Naor et al. (2006) ont montré qu'un échantillon représentatif de 4-8 arbres d'une population de 27-30 arbres était nécessaire pour obtenir des moyennes stables de potentiel hydrique de tige (SWP) chez le pommier, le nectarinier et le poirier, indiquant que de nombreuses mesures sont nécessaires pour évaluer la moyenne de vergers entiers. Pour surmonter ces limitations, des méthodes alternatives ayant la capacité de fournir instantanément les informations spatialement distribuées sont nécessaires.

La réponse immédiate de la plante au manque d'eau est la fermeture des stomates, ce qui entraîne une augmentation de la température de la canopée. Par conséquent, une mesure indirecte du stress hydrique subi par les plantes est basée sur une corrélation inverse entre la température de la feuille et l'ouverture des stomates (Fuchs 1990). Le suivi de la conductance stomatique à partir de l'imagerie thermique peut être un meilleur indicateur de la réponse de la plante au stress hydrique que le suivi du potentiel hydrique des feuilles. En effet, la fermeture des stomates peut apparaître avant un changement de l'état hydrique de la plante (Jones 2004). Stoll et Jones (2007) ont exploré la possibilité d'utiliser l'imagerie thermique en tant qu'outil de suivi du stress de la plante. Ces auteurs montrent que la différence de température du couvert végétal entre les plantes soumises à différents régimes hydriques peut être utile pour détecter le stress. Sela et al. (2007) combinent les images thermique et visible pour estimer le potentiel hydrique des feuilles de cultures de cotonnier. Galleguillos et al. (2011) comparent différentes méthodes de différenciation de la température pour estimer l'évaporation journalière de la vigne à partir de données satellitaires ASTER. Plus récemment, Cohen et al. (2012) ont développé une méthode basée sur l'imagerie thermique aérienne et la segmentation des images pour estimer l'état hydrique de palmiers. Cependant, la température de la canopée d'arbres individuels peut être déterminée à partir d'images thermiques à condition que la résolution spatiale des images soit suffisante (Berni et al. 2009a).

En combinant des données thermiques et des données multispectrales, les indices de stress sont un puissant outil pour évaluer les effets de la contrainte hydrique sur les plantes cultivées. L'un des indices le plus utilisé est le Crop Water Stress Index (CWSI) développé par Idso et al. (1981). Une extension de cet indice est le Water Deficit Index (WDI), proposé par Moran et al. (1994) pour des cultures non couvrantes dont les images thermiques génèrent des pixels mixtes ayant une proportion variables de sol et de végétation. Cet indice prend en compte le taux de couverture du sol pour l'estimation de l'évapotranspiration de surface dont le couvert végétal est hétérogène. Virlet et al. (soumis) ont proposé une méthode simplifiée de calcul du WDI pour rendre plus opérationnel son application dans un but de phénotypage d'arbres fruitiers à partir d'images aéroportées.

L'image thermique fournit la température de la canopée de chacun des arbres de la parcelle, et informe sur leur état hydrique. Cependant, dans la pratique, pour les applications de gestion de l'eau, il est nécessaire d'avoir à la fois des images thermiques à haute résolution spatiale, permettant l'identification de l'individu, mais aussi un bref délai de revisite (1 – 2 jours). Une application potentielle des mesures de températures de canopée est sa capacité à dépister les génotypes dans les programmes de sélection pour la résistance à la sécheresse (Blum et al. 1982 ; Reynolds et al. 1998). En outre, l'imagerie thermique est particulièrement adaptée pour la gestion des zones de petites à moyennes tailles (jusqu'à quelques centaines d'hectares). Dans ce contexte, l'utilisation de drones apporte la possibilité de vols fréquents, permettant l'évaluation des effets du régime hydrique et la programmation de l'irrigation, entre autres applications. Pour l'estimation de l'état hydrique à l'échelle de l'arbre,

l'imagerie par drone offre à la fois une vision globale de l'ensemble de la parcelle, et de la haute résolution spatiale nécessaire. De plus, le potentiel du drone pour l'évaluation du stress hydrique ou l'estimation du flux de chaleur latente (densité de flux d'évapotranspiration) des parcelles agricoles a déjà été démontré dans de nombreuses études (Berni et al. 2009a,b ; Zarco-Tejada et al. 2012). Par ailleurs, ce type d'images a été utilisé avec succès dans des études multi-temporelles sur des vergers d'arbres fruitiers (González-Dugo et al., 2013).

L'utilisation d'un drone permet une réduction des coûts d'acquisition des images par rapport à l'avion ou au satellite, une grande flexibilité en termes d'heure et de date d'acquisition (haute résolution temporelle pour la détection de changements), et la possibilité de voler à basse altitude ce qui permet une haute résolution spatiale (Rango et al., 2006). Un drone peut être déployé bien plus facilement que les moyens aériens classiques et est moins dépendant des conditions météorologiques. Toutefois, le champ d'une image drone (prise à basse altitude) ne peut couvrir l'ensemble de la parcelle, ce qui nécessite d'acquérir une série d'images (environ 30 à 100 images par hectare selon l'altitude et le capteur). Ces images doivent être orthorectifiées et mosaïquées pour créer une ortho-image géoréférencée précise. Wang et al. (2008) ont développé une méthode de mosaïquage d'images vidéo issues de caméra infrarouge thermique, basée sur un algorithme Scale Invariant Feature Transform (SIFT). Certaines études ont été portées sur le traitement et l'amélioration du géoréférencement automatique des mosaïques issues d'images thermiques sur des parcelles agricoles (Gómez-Candón et al., 2014).

Les progrès techniques en imagerie thermique ont permis d'élargir les possibilités d'applications en sciences agricoles, avec des dispositifs abordables adaptés à l'acquisition d'images aéroportées à haute résolution. Mais à cause de la faible capacité de charge utile de la plupart des petits drones, les images sont acquises avec du matériel à faible coût, hormis la caméra thermique (Rabatel et al. 2011). La température de surface (T_s) donnée par un pixel de l'image ne correspond pas à la température observée au niveau du sol, mais elle inclut les différentes contributions et atténuations des particules présentes dans l'atmosphère. De plus, la miniaturisation des caméras thermiques permet aujourd'hui de les installer sur des drones, mais cette miniaturisation comporte également des difficultés. Les caméras thermiques miniaturisées n'ont pas de système de refroidissement des microbolomètres, de sorte que la température du capteur évolue en permanence. L'instabilité de la température du capteur crée une forte dérive dans l'acquisition des données de température. Les images issues de la caméra (récupérées en comptes numériques) ne traduisent pas correctement la température réelle de l'objet étudié. Il est donc nécessaire de disposer de références de terrain, présentes dans l'image, dont la température est connue, pour recalculer la valeur des autres objets présents dans l'image.

Le traitement de l'image thermique reste encore une étape chronophage qui nécessite des connaissances spécialisées dans les logiciels et la thermographie. Ces méthodes doivent être encore automatisées avant que

la thermographie infrarouge puisse être appliquée comme un outil commun dans les pratiques agricoles (Maes & Steppe 2012).

Nous présenterons ici une méthode de correction radiométrique des images thermiques acquises par drone, testée sur une parcelle de pommiers de 6400m² pendant l'été 2013.

2. Matériel et méthodes

2.1 Site d'étude

L'étude a été réalisée sur une parcelle expérimentale de pommiers adultes cultivés à l'Unité expérimentale Diascope de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) située à Mauguio, près de Montpellier, France. La parcelle de 6400m² est constituée de 520 arbres disposés en 10 rangées. Les rangées sont espacées de 5m et les arbres de 2m. 122 géotypes de pommiers sont présents sur la parcelle, chacun étant répété quatre fois : deux sous régime d'irrigation à satiété (ETM) et deux où l'irrigation a été progressivement réduite, afin de tester l'effet de la contrainte hydrique.

2.2 Le dispositif de mesures au sol

a. Cibles thermiques

La méthode est basée sur la connaissance précise de températures de brillance d'objets repérables sur les images thermiques.

Le dispositif est constitué de quatre cibles thermiques : une cible chaude réalisée avec une planche de bois peinte en noir mat, une cible froide en polystyrène blanc, ainsi que deux cibles intermédiaires : une zone de sol nu sec (chemin) et une de sol désherbé et constamment humidifié. Les températures des cibles chaude et froide correspondent aux températures extrêmes de la zone d'étude. Les cibles doivent être suffisamment grandes (1.4 x 1.4 m dans notre cas) pour être représentées par plusieurs pixels dans l'image infrarouge thermique. Un radiothermomètre (IR120, Campbell®) est placé au dessus de chaque cible. L'angle de visée étant de 40°, les capteurs sont placés à 2m au dessus des cibles afin de ne pas avoir d'autre matière interférant dans la mesure de la température. Chaque capteur acquiert en continu la température de surface des cibles : une mesure est réalisée toutes les secondes, la moyenne et l'écart-type étant enregistrés toutes les dix secondes par la centrale d'acquisition (CR1000, Campbell®Sci.). Le schéma du dispositif est présenté en Figure 1.

b. Station météorologique

En parallèle à ces acquisitions, une station météorologique Campbell® mesure au même pas de temps la température et l'humidité de l'air (HMP60), l'ensoleillement (pyranometer LP02) ainsi que la vitesse et la direction du vent (WindSonic). Les capteurs sont connectés à la centrale d'acquisition. Le logiciel LoggerNet® permet la programmation des capteurs ainsi que la récupération des données.

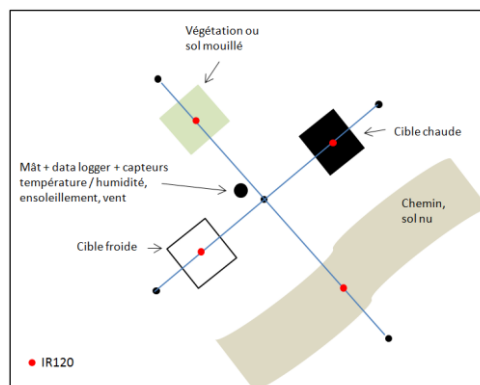


Figure 1 : Dispositif d'acquisition sol

c. Mesure sur pommiers

Dix pommiers sont équipés de radiothermomètres IR120 positionnés à 4.5m au dessus du sol. La température de surface de ces arbres est scrutée toutes les 30 secondes, moyennée et enregistrée toutes les dix minutes par des centrales CR3000 (Campbell®Sci.).

d. Mesures de positionnement

Quinze points de contrôle ont été positionnés sur la parcelle. Leurs coordonnées géographiques ont été relevées au GPS Différentiel (RTK GPS, Leica Geosystems®) avec une précision de l'ordre du centimètre. Ces points de contrôle (appelés mires) sont constitués d'une planche de bois recouverte d'un film de papier aluminium supportant un adhésif opaque de plus forte émissivité ; ces mires sont facilement repérables sur les images aériennes dans le visible et dans l'infrarouge thermique.

2.3 L'acquisition des images

Les images sont acquises par un drone du type OktoKopter de la marque MikroKopter®. Il comporte huit rotors (Figure 2a.) et peut transporter une charge utile maximum de 3kg. Une plateforme fixée à la nacelle du drone est équipée d'une micro caméra infrarouge thermique (Thermoteknix Miricle 307K, 640*480, Figure 2b.) et de deux appareils photo numérique compact DP1x Sigma (2640 * 1760 pixels), l'un acquérant dans le visible et l'autre modifié pour acquérir dans le proche infrarouge (Lebourgeois et al., 2008). La caméra thermique est équipée d'un système d'autocalibration (shutter) programmé toutes les quatre secondes.



Figure 2 : Système d'acquisition d'images aériennes.

a) OktoKopter, b) Caméra infrarouge thermique

Les images sont acquises lors de périodes ensoleillées et sans vent (rafales inférieures à 20km/h) à 40m d'altitude. La caméra doit être allumée vingt minutes avant le vol pour stabiliser sa température interne et éviter ainsi d'accentuer les dérives instrumentales. L'heure des capteurs (centrale d'acquisition et caméra

thermique) est synchronisée sur l'heure universelle GMT, obtenue par un GPS et transmise aux capteurs grâce au logiciel GPS Clock. L'autonomie de la batterie étant faible, l'acquisition d'images pour la parcelle entière est réalisée en deux vols afin de changer la batterie à mi-chemin. Le drone effectue un passage au dessus du dispositif de cibles au décollage et à l'atterrissage lors de chaque vol : quatre passages au dessus du dispositif sont réalisés au cours de l'acquisition de la parcelle entière. Le drone reste en vol stationnaire quelques secondes au dessus du dispositif de cibles pour éviter un effet de flou sur les images.

2.4 Extraction des images

Les images sont extraites du fichier vidéo par un programme codé en Python faisant appel au logiciel libre Avconv. Seules les images prises juste après l'autocalibration sont conservées.

2.5 Correction radiométrique

Les valeurs moyennes des quatre cibles sont calculées pour chacune des images acquises au dessus des cibles, puis comparées aux données enregistrées exactement à la même heure par le dispositif au sol. L'équation du type :

$$y = ax + b \quad (1)$$

issue de la régression linéaire de ces données est appliquée aux images thermiques. Le drone étant passé quatre fois au dessus des cibles, nous obtenons quatre équations. Les images thermiques sont divisées en quatre groupes. L'équation correspondante est appliquée aux images acquises le plus proche dans le temps du passage de drone au dessus des cibles (Figure 3).

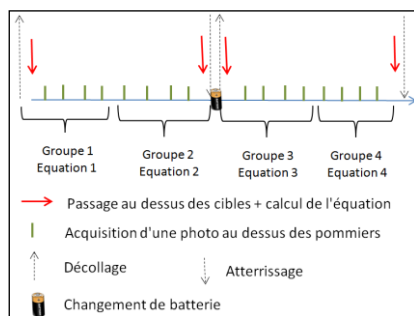


Figure 3 : Représentation du découpage du groupe d'images acquises et attribution de l'équation de correction à appliquer à ce groupe d'images

2.6 Orthorectification et mosaïquage

Les informations de vol (position et orientation) issues du drone, ainsi que les relevés GPS des mires permettent d'orthorectifier et de géoréférencer chaque image. Ce traitement est réalisé via le logiciel Leica Photogrammetric Suite 2010© (LPS, Leica Geosystems, 2006) par la méthode d'aéro-triangulation. L'erreur quadratique moyenne (RMSE, Root Mean Squared Error) a été calculée et a confirmé la qualité de l'orthorectification (Gómez-Candón et al. 2014). Les images sont ensuite mosaïquées.

2.7 Validation

La validation de la méthode est réalisée :

- par comparaison des températures relevées sur l'image corrigée avec les températures acquises par les IR120 positionnés au dessus de 12 pommiers. La température moyenne est calculée pour chaque arbre au sein d'une zone buffer de 50 cm de rayon correspondant à des arbres de 3m de hauteur (Figure 4) d'après la formule :

$$r = h * \tan(\alpha) \quad (2)$$

où h est la hauteur entre le capteur et le haut de l'arbre, α le demi angle de visée du capteur (20°C pour l'IR 120) et r le rayon d'emprise du capteur.

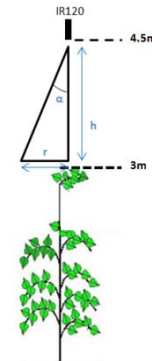


Figure 4 : Calcul du rayon d'emprise du radiothermomètre par rapport à la hauteur du pommier

- par comparaison avec les mesures des radiothermomètres positionnés sur les cibles et des images thermiques des cibles, non utilisées pour le calibrage, auxquelles les équations de correction ont été appliquées.

3. Résultats

Les images ont été acquises le 1^{er} aout 2013. Cinq vols ont été réalisés : vol 1 à 8h, vol 2 à 10h20, vol 3 à 12h20, vol 4 à 14h30 et vol 5 à 16h30 (heure GMT ; 12h GMT = midi solaire).

2.1 Corrections radiométriques

Les cibles thermiques apparaissent de manière claire et homogène sur les images. Elles sont facilement identifiables dans le visible et dans l'infrarouge thermique (Figure 5). Cette qualité permet la création d'AOI (Area Of Interest) afin de calculer la valeur moyenne de chaque cible pour chaque image brute.

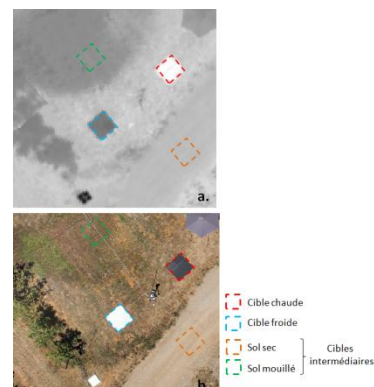


Figure 5 : Zoom sur le dispositif de mesures au sol, images acquise par drone à 12h20 GMT : a. dans l'infrarouge thermique, b. dans le visible.

Les données de températures des cibles correspondant à l'heure exacte de passage de chaque vol sont issues des radiothermomètres (Figure 6).

Les vingt droites de régression (4 par vol x 5 vols dans la journée) et leurs coefficients de détermination sont calculés (Figure 7). Les coefficients obtenus sont tous supérieurs à 0.99. Chaque équation des droites de régression est appliquée au groupe d'images correspondant (comme décrit au § 2.5). Les images sont ensuite orthorectifiées et géoréférencées afin de créer la mosaïque d'images pour chaque vol (Figure 8). Les RMSE obtenues sont acceptables pour ce type d'étude (inférieures à 0.03m pour des images dont la résolution est de 0.02m).

2.2 Validation

a. Comparaison Images corrigées / IR120 pommiers

Les données issues de l'image thermique sont comparées aux températures acquises par les capteurs IR120 positionnés au-dessus des pommiers. Une étude des arbres sur le terrain a montré que tous ne mesurent pas 3m comme indiqué à l'origine. Les buffers ont donc été adaptés à la taille de chaque arbre selon la formule (2). Le coefficient de détermination (R^2) de 0.768 ($pvalue < 0.001$) montre une bonne corrélation entre les données (Figure 9). Les écarts sont le plus souvent inférieurs à 1°, cette précision étant suffisante pour obtenir une mesure quantifiée et exploitable au niveau de stress hydrique de la plante.

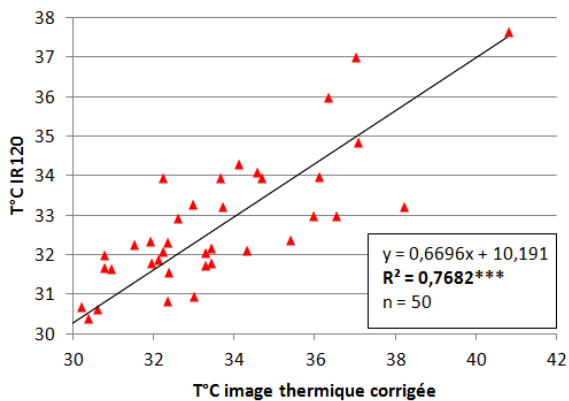


Figure 9 : Régression linéaire entre la température issue de l'image thermique corrigée et la température acquise par les radiothermomètres positionnés au-dessus des pommiers

b. Comparaison IR120 cibles / nouvelles images corrigées

Une série d'images brutes (une image par vol) a été corrigée avec les équations correspondant à l'heure de prise de la photo. Les valeurs moyennes des cibles ont été calculées sur ces images corrigées et comparées aux températures mesurées à la même heure par les IR120 positionnés au dessus des cibles. La corrélation est quasi parfaite avec un coefficient de détermination de 0.997 ($pvalue < 0.001$) (Figure 10).

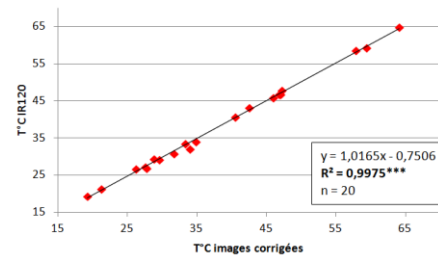


Figure 10 : Régression linéaire entre les températures moyennes des cibles mesurées sur les images non utilisées pour le calibrage et corrigées avec les équations correspondantes et les températures des IR120 placés au dessus des cibles

4. Discussion et perspectives

Le survol de la parcelle complète, en comptant le changement de batterie, dure entre 10 et 13 minutes. Une meilleure autonomie de la batterie, évitant ainsi un retour à la base et une manipulation de la batterie, permettrait une diminution du temps d'acquisition entre la première et la dernière photo.

La méthode s'appuie entièrement sur la température réelle des cibles. Ainsi, un biais des capteurs et donc des valeurs acquises, perturberait la correction des images thermiques. Jusqu'à présent, la température des cibles était vérifiée à l'aide d'un autre radiothermomètre (Fluke®). L'acquisition prochaine d'un corps noir permettra une meilleure calibration des capteurs. Le choix des quatre cibles détermine également la qualité de la correction radiométrique. Le nombre d'individus ($n=4$, 4 cibles) utilisé pour calculer l'équation de la droite de régression est faible, mais nous avons montré que ce nombre est suffisant pour un bon résultat. Nous constatons ainsi que le couplage drone, caméra thermique et radiothermomètre est un dispositif facilement réalisable et rapidement mis en place, permettant l'acquisition de données multi-temporelles au cours de la journée. Les améliorations futures permettront une meilleure précision de ces données.

La comparaison entre les données issues des capteurs IR120 placés au-dessus les pommiers et celles issues des images corrigées n'est pas très précise, à cause de plusieurs facteurs. Tout d'abord la fréquence d'acquisition des mesures des IR120 sur les pommiers est de 10 minutes avec des écart-types pouvant atteindre 0.5°C. Ces données sont donc difficilement comparables avec des données instantanées acquises par la caméra. Cette difficulté pourrait être améliorée en diminuant le pas de temps entre chaque mesure des IR120. Le deuxième élément concerne l'état de la végétation. En effet, certaines branches sont cassées. La canopée des arbres adultes n'étant pas très homogène, les capteurs sont susceptibles de mesurer du sol. Il n'est pas facile de déterminer ce que vise exactement le capteur et donc de comparer la même information. Enfin, les capteurs sont fragiles et peuvent être endommagés (deux capteurs sont tombés en panne durant l'étude). Malgré cela, les résultats montrent un lien suffisant entre l'image thermique corrigée et les mesures de terrain pour l'évaluation du stress hydrique. La mesure sur les cibles de référence, sur des images différentes de celles ayant servi pour établir la correction, montre une régression très précise entre l'image et les températures acquises exactement à la même heure.

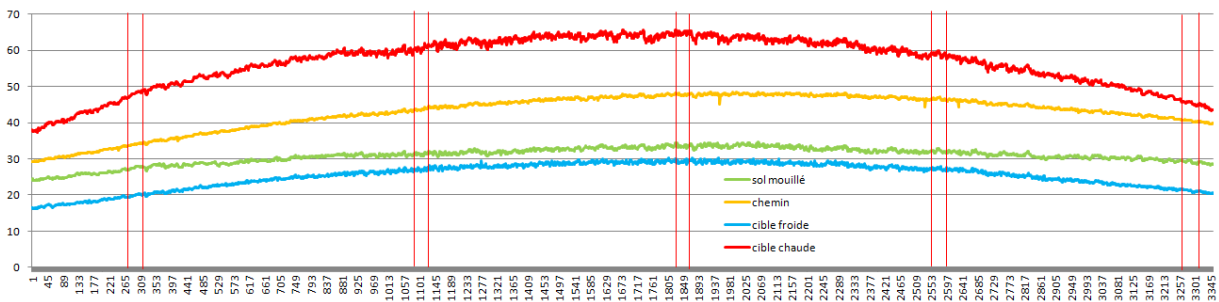


Figure 6 : Représentation graphique des mesures de température acquises sur chacune des cibles. Les lignes verticales rouges correspondent aux passages du drone au dessus des cibles.

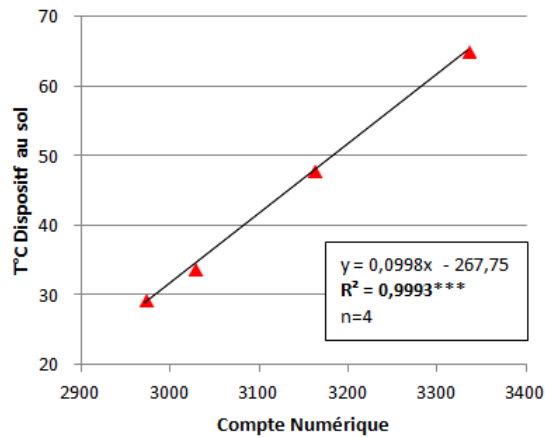


Figure 7 : Régression linéaire entre la température moyenne des cibles observées sur l'image thermique et la température mesurée par radiothermomètre pour le vol de 12h20



Figure 8 : Mosaïque des images infrarouge thermique radiométriquement corrigées pour le vol de 12h20

5. Conclusion

Les résultats obtenus nous montrent que la méthode est efficace pour corriger radiométriquement les images du canal infrarouge thermique. Grâce à cette méthode nous pouvons d'une part mesurer la température de la canopée de toute une parcelle, mais également, dans nos conditions d'études (altitude d'acquisition, matériel, et donc résolution des images) mesurer la température à l'échelle de chaque arbre individuellement. La souplesse du dispositif et de la méthode de traitement des images a permis la réalisation de cinq vols dans la journée, permettant de réaliser une étude multi-temporelle du suivi de la parcelle entière et rend ainsi possible le suivi du stress hydrique au cours de la journée. Nous pouvons conclure que les images corrigées par la méthode proposée sont d'une qualité suffisante pour être utilisées dans des études sur le stress hydrique de la végétation.

Références

- Blum, A., Mayer, J. and Gozlan, G., 1982. Infrared thermal sensor of plant canopies as a screening technique for dehydration avoidance in wheat. *Field Crops Res.*, vol. 5, pp. 137–146.
- Ben-Gal, A., Agam, N., Alchanatis, V., Cohen, Y., Yermiyahu, U., Zipori, Y., et al., 2009. Evaluating water stress in irrigated olives: Correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrigation Science*, 27, 367–376.
- Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Sepulcre-Canto, G., Fereres, E., & Villalobos, F., 2009a. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*, 113, 2380–2388.
- Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Suarez, L., & Fereres, E., 2009b. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 722–738.
- Cohen, Y., Alchanatis, V., Prigojin, A., Levi, A., Soroker, V., 2012. Use of aerial thermal imaging to estimate water status of palm trees. *Precision Agriculture* 13, 123-140.
- Fuchs, M., 1990. Infrared measurement of canopy temperature and detection of plant water-stress. *Theoretical Applied Climatology*, 42, 253–261.
- Galleguillos, M., Jacob, F., Prévot, L., French, A., Lagacherie, P., 2011. Comparison of two temperature differencing methods to estimate daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed from ASTER data. *Remote Sensing of Environment* 115, 1326–1340.
- Gómez-Candón, D., Labbé, S., Virlet, N., Jolivot, A. and Regnard, J.L., 2014. High resolution thermal and multispectral UAV imagery for precision assessment of apple tree response to water stress. *In proceedings of the Second International Conference on Robotics, Associated High-Technologies and Equipment for Agriculture and Forestry*. Madrid. Spain.
- González-Dugo, V., Zarco-Tejada, P., Nicolás, E., Nortes, P.A., Alarcón J.J., Intrigliolo, D.S., Fereres, E., 2013. Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agriculture* 14, 660-678.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L., 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural and Forest Meteorology* 24, 45–55.
- Jones, H.G. Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. In: *Journal of Experimental Botany* 55, 2427–2436, 2004.
- Lebourgeois V., Bégué A., Labbé S., Mallavan B., Prévot L., Roux B., 2008. Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? *A crop monitoring test. Sensors* 8, 7300-7322
- Maes, W.H. Steppe, K., 2012. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany* 63, 4671–4712.
- Moran, M., Clarke, T., Inoue, Y., Vidal, A., 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 49, 246–263.
- Naor, A., Gal, Y., & Peres, M., 2006. The inherent variability of water stress indicators in apple, nectarine and pear orchards, and the validity of a leaf-selection procedure for water potential measurements. *Irrigation science*, 24(2), 129-135.
- Rabatel, G., Gorretta, N., Labbé, S., 2011. Getting NDVI Spectral Bands from a Single Standard RGB Digital Camera: A Methodological Approach. *Lecture Notes in Computer Science*. Vol 7023, 333-342.
- Rango, A., Laliberte, A.S., Steele, C., Herrick, J.E., Bestelmeyer, B., Schmutge, T., Roanhorse, A. and Jenkins, V. 2006. Using unmanned aerial vehicles for rangelands: Current applications and future potentials. *Environmental Practice*, 8:159-168.
- Reynolds, M., Singh, R., Ibrahim, A., Ageeb, O., Larqué-Saavedra, A. and Quick, J.S., 1998. Evaluating physiological traits to complement empirical selection for wheat in warm environments. *Euphytica*, vol. 100, no. 1–3, pp. 85–94.
- Sela, E., Cohen, Y., Alchanatis, V., Saranga, Y., Cohen, S. and Möller, M., 2007. Thermal imaging for estimating and mapping crop water stress in cotton. In: J. V. Stafford (Ed.), *European conference in precision agriculture*. Wageningen: Academic Publications. 365-371.
- Stoll, M. and Jones, H.G., 2007. Thermal imaging as a viable tool for monitoring plant stress. *International Journal of Vine and Wine Sciences*. 41, 77–84.
- Virlet, N., Lebourgeois, V., Martinez, S., Costes, E., Labbé, S., Regnard, J.L., 2014. Stress indicators based on airborne thermal imagery for field phenotyping of heterogeneous tree population for response to water constraints. *Journal of Experimental Botany*. Submitted.
- Wang, Y., Camargo, A., Fevig, R., Martel, F., Schultz, R.R., 2008. Image Mosaicking from Uncooled Thermal IR Video Captured by a Small UAV. *IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation*, 2008. 161-164.
- Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., & Berni, J. A. J., 2012. Fluorescence, temperature and narrowband indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322–337.