

ÉVALUATION DE LA RELATION ENTRE TEMPÉRATURES DE L'AIR ET TEMPÉRATURES DE SURFACE ISSUES DU SATELLITE MODIS : APPLICATION AUX VIGNOBLES DE LA VALLÉE DE WAIPARA (NOUVELLE-ZÉLANDE)

Gwénaél MORIN ¹, Renan LE ROUX ¹, Andrew STURMAN ², Hervé QUÉNOL ¹⁻²

¹ LETG-Rennes, UMR 6554 CNRS - Université Rennes 2

Place du Recteur Henri Le Moal, 35043 Rennes, France

gwenael.morin@univ-rennes2.fr

² Centre for Atmospheric Research, University of Canterbury

Christchurch, Nouvelle-Zélande

Résumé

L'impact du changement climatique sur la viticulture nécessite d'élaborer des stratégies d'adaptation à l'échelle du vignoble. La variabilité climatique locale, notamment les effets sur la température, influence la croissance de la vigne et détermine les caractéristiques des vins. L'objectif, à travers l'analyse et la modélisation spatiale des températures, est de prendre en compte l'influence des facteurs environnementaux et topographiques sur les événements climatiques locaux. Cependant, cette méthode nécessite l'installation de réseau dense de data loggers enregistrant la température de l'air pour construire et valider les modèles statistiques climatiques locaux. L'imagerie thermique, issue de la télédétection, apparaît comme une donnée alternative afin de s'affranchir des réseaux de mesure. La température de l'air (T_a) peut être estimée à partir de données satellitaires dérivant la température de surface (LST) mesurée par *MODerate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) avec une résolution temporelle journalière et à 1 km de résolution spatiale. Une analyse comparée dans la vallée viticole de Waipara (Nouvelle-Zélande) durant la saison végétative 2017-2018 a mis en évidence de bonnes relations statistiques entre T_a et LST. Les analyses statistiques ont montré, pour les températures moyennes journalières, des résultats avec un RMSE moyen de 2,46°C et un coefficient $R^2 > 0,7$. À l'échelle diurne et nocturne, les températures minimales ont obtenu de meilleurs résultats, notamment avec le satellite Terra (RMSE $\approx 2,50^\circ\text{C}$ et $R^2 \approx 0,80$), que les températures maximales (RMSE $\approx 4,90^\circ\text{C}$ et $R^2 \approx 0,70$).

Mots-clés : modélisation climatique, télédétection infrarouge thermique, MODIS, température de surface, viticulture, Nouvelle-Zélande.

Abstract:

Evaluation of the relationship between air temperature and surface temperature from the MODIS satellite: Application to vineyards in the Waipara region in New Zealand

The impact of climate change in wine-growing regions requires strategies and adaptations at the vineyard level. The variability of local climatic factors, particularly temperature, influences the growth of the vine and determines the characteristics of the wines. The objective, through the analysis and spatial modelling of temperatures, is to take into account the influence of environmental and topographical factors on local climate events. However, this method requires the installation of a dense sensor network to build and validate local climate models. Thermal imaging, resulting from remote sensing, appears as an alternative data to free oneself from networks but also to expand the regions monitored and over a longer period. Indeed, the air temperature (T_a) environmental parameter can be estimated from thermal satellite data deriving from the surface temperature (LST) measured by *MODerate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) with a daily time resolution at 1 km spatial resolution. An analysis of the Waipara Wine Valley in New Zealand over the 2017-2018 growing season highlights the statistical relationship between T_a and LST. Statistical analyses show results for average daily temperatures with an average RMSE of 2.46°C and a R^2 coefficient > 0.7 . At the day and night scales, minimum temperatures record better results, particularly with the Terra satellite (RMSE $\approx 2.50^\circ\text{C}$ and $R^2 \approx 0.80$), than maximum temperatures (RMSE $\approx 4.90^\circ\text{C}$ and $R^2 \approx 0.70$).

Keywords: climate modelling, thermal infrared remote sensing, MODIS, surface temperature, viticulture, New Zealand.

Introduction

La culture de la vigne est un secteur économique clé pour de nombreux pays à travers le monde. Dans un contexte d'intensification des concurrences entre les pays producteurs de vins, les viticulteurs se défendent en mettant en valeur la spécificité des terroirs définis par les paramètres climatiques, pédologiques et physiologiques (Van Leeuwen et Seguin, 2006). La notion de terroir est, pour le viticulteur, un outil de commercialisation, permettant d'apporter une spécificité et une identité au vin. La composante climatique des terroirs, notamment la température, va impacter le développement de la vigne principalement au niveau de la phénologie ainsi que les caractéristiques et la qualité des vins produits. Plusieurs études se sont attachées, à partir des températures ou de sommes thermiques, à caractériser les climats viticoles (Winkler *et al.*, 1974 ; Huglin, 1978 ; Jones, 2006) ou à estimer les dates d'occurrences des différents stades phénologiques amenant à une gamme de différents indices bioclimatiques (Parker *et al.*, 2011, 2013). Ces travaux ont permis de déterminer les régions climatiques favorables pour la culture de la vigne. Ils ont montré que les limites de la culture de la vigne sont définies par des conditions climatiques spécifiques. Par conséquent, la vigne ne peut pas être cultivée à toutes les latitudes, notamment dans les secteurs où la température moyenne annuelle n'est pas assez élevée pour permettre une bonne maturation du raisin, ou dans les secteurs où les extrêmes climatiques tels que le gel ou les sécheresses sont trop fréquents (Quénol, 2014).

Mais ces différentes études abordent les grandes régions viticoles mondiales et ne prennent pas en compte la variabilité spatiale du climat aux échelles fines. Pourtant, les conditions de surface (nature et aspérité) peuvent engendrer une forte variabilité spatiale du climat sur des espaces relativement restreints. A l'échelle d'un vignoble ou d'une appellation viticole, les températures peuvent présenter des variations importantes voire supérieures à la variabilité régionale avec des écarts moyens pouvant atteindre plusieurs degrés (Quénol et Bonnardot, 2014). Ce sont ces caractéristiques locales, combinées aux pratiques viticoles qui vont déterminer la spécificité d'un vin et caractériser son terroir.

Plusieurs programmes de recherches internationaux¹ ont pour objectif d'analyser et de modéliser la variabilité spatiale du climat à l'échelle du vignoble et donc, de prendre en compte la notion de terroir. Ces travaux sont menés dans le contexte du changement climatique, où les incertitudes sur l'évolution future du climat sont nombreuses et la connaissance du milieu local peut être un atout pour définir des méthodes d'adaptation spécifiques (Ollat et Touzard, 2014 ; Quénol et Ollat, 2015). Une démarche d'analyse prenant en compte l'imbrication des échelles spatiales a permis d'étudier l'impact des facteurs locaux (*e.g.* altitude, inclinaison ou orientation de la pente, distance à la rivière, etc.) sur les variations climatiques à l'échelle des vignobles. Ces projets ont mis en place une méthodologie reposant sur des observations climatiques et agronomiques (stress hydrique, phénologie, taux de sucre, taux d'alcool, etc.) *in situ* afin de mettre en évidence le lien entre les caractéristiques d'un vin et le climat local (Bonnardot *et al.*, 2012 ; Quénol, 2014). Plusieurs vignobles et appellations viticoles ont été équipés de réseaux relativement denses de data loggers enregistrant la température de l'air prenant en compte les conditions locales du terrain (topographie, hydrographie, proximité de haies arborées,...) pour pallier aux manques d'informations disponibles à cette échelle (Quénol, 2014 ; Quénol et Bonnardot, 2014). Ces réseaux ont permis de créer des modèles statistiques fondés sur les

¹ LIFE-ADVCLIM (2014-2019) : *ADaptation of VIticulture to CLIMate change : High resolution observations of adaptation scenarii for viticulture* ; PICS-VSC² : *Observation et modélisation climatique à l'échelle du vignoble dans le contexte du changement climatique : applications aux vignobles français et néo-zélandais.*

relations entre les variables environnementales (topographie, distance à une rivière, longitude, latitude,...) et la variabilité des températures afin d'obtenir une spatialisation des températures et des indices bioclimatiques à échelle locale (Joly *et al.*, 2003 ; Madelin, 2004 ; Bonnefoy *et al.*, 2010) et, plus récemment, des modèles de régression non linéaire (Le Roux *et al.*, 2016, 2017a, 2017b) afin d'obtenir une spatialisation plus fine des températures. Les différentes applications dans plusieurs vignobles expérimentaux ont permis de construire un modèle "type" fondé spécifiquement sur l'influence des facteurs liés à la topographie. Après l'application du modèle, les données issues des data loggers ne sont plus utilisées pour le construire mais pour le valider. La nécessité d'installer des réseaux de mesures denses pour pouvoir réaliser ces cartographies aux échelles fines est un facteur limitant dans la reproductibilité de la méthode, notamment au niveau des ressources humaines et financières nécessaires mais également à cause de la contrainte de devoir attendre plusieurs années de mesures pour pouvoir construire et valider le modèle. L'objectif est donc d'évaluer les types de données qui pourraient être utilisés pour la modélisation de la variabilité spatiale des températures et qui permettraient, à terme, de remplacer l'installation d'un réseau de data loggers. Pour arriver à cet objectif, les développements portent principalement sur l'intégration dans le modèle, de données thermiques d'origine et avec des résolutions spatio-temporelles différentes (ex : imagerie satellitaire, données de type réanalyses Safran à 9 km, stations météorologiques des réseaux nationaux,...).

Dans cette optique, la potentialité de l'imagerie satellite thermique (*Thermal Infrared*, TIR) a été étudiée. La donnée la plus corrélée à la température de l'air (T_a) est la température de surface (LST ou T_s) (Vancutsem *et al.*, 2010 ; Zhang *et al.*, 2013 ; Zhu *et al.*, 2013 ; Kloog *et al.*, 2014 ; Meyer *et al.*, 2016 ; Southey, 2017) mais cette approche est considérée comme une relation complexe. Les données satellitaires thermiques les plus utilisées en climatologie sont celles issues des capteurs *MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) en raison de leur capacité à obtenir des données de LST à haute résolution temporelle (quotidienne) et moyenne résolution spatiale (1 km). La principale difficulté concerne l'adéquation entre les échelles spatiales et temporelles de l'imagerie satellitaire en relation avec la résolution spatiale des modèles climatiques à échelles fines. L'imagerie MODIS présente l'avantage de mettre à disposition des données pluri-quotidiennes. Même si la résolution spatiale reste trop grossière pour évaluer les variations de températures aux échelles les plus fines, l'objectif est ici avant tout d'évaluer le lien statistique entre l'imagerie thermique et la température de l'air. Peut-on retrouver la même variabilité spatiale des températures observée à partir d'un réseau de data loggers à partir de l'imagerie thermique satellitaire ?

Cet article présente la démarche méthodologique et les premiers résultats d'une étude réalisée dans la région viticole de Waipara en Nouvelle-Zélande où un réseau de data loggers enregistrant la température de l'air a été installé depuis juillet 2017 afin d'identifier les caractéristiques thermiques locales en lien avec le comportement de la vigne (phénologie) et les caractéristiques des vins (ex : taux de sucre, acidité, etc.).

1. Matériels et méthodes

1.1. Site d'étude

La Nouvelle-Zélande, située au 16^{ème} rang mondial de la production de vins (2,9 millions d'hectolitres en 2017, www.oiv.int), offre un contexte topographique particulier et contrasté créant une forte variabilité de climats locaux (Quénol, 2014). La vallée de Waipara est une région viticole relativement récente où les premières vignes ont été plantées au début des années 1980 et comptent actuellement environ 1250 hectares de vignes. Elle est située à proximité de la côte est de l'île du Sud dans la région de Canterbury (Figure 1). Le vignoble est soumis à un climat océanique tempéré (11,8°C en moyenne annuelle) avec des précipitations plus

importantes en période hivernale (> 60 mm) qu'en période estivale (< 45 mm) pour un cumul moyen annuel de 624 mm. Les conditions climatiques des vignobles Waipara sont principalement influencées par le relief et la proximité de l'océan. A l'ouest, les Alpes du Sud limitent l'influence des perturbations d'ouest, de sorte que les précipitations sont assez faibles. La vallée de Waipara est aussi protégée des entrées maritimes par les collines situées à l'est. Cette situation soumet la vallée de Waipara à une grande diversité de vents locaux : effet de foehn, limitation de l'influence de la brise de mer à l'est ou vents catabatiques et anabatiques (brises de pente). Le climat, caractérisé par une température moyenne relativement basse (avec de fortes amplitudes saisonnières et journalières) et des précipitations assez faibles (notamment pendant la saison végétative de la vigne) est favorable pour une viticulture de qualité. Cette vallée est considérée par la classification des climats viticoles de Winkler comme une viticulture de climat frais ($1100 \text{ Degrés/Jours}$)² (Winkler *et al.*, 1974).

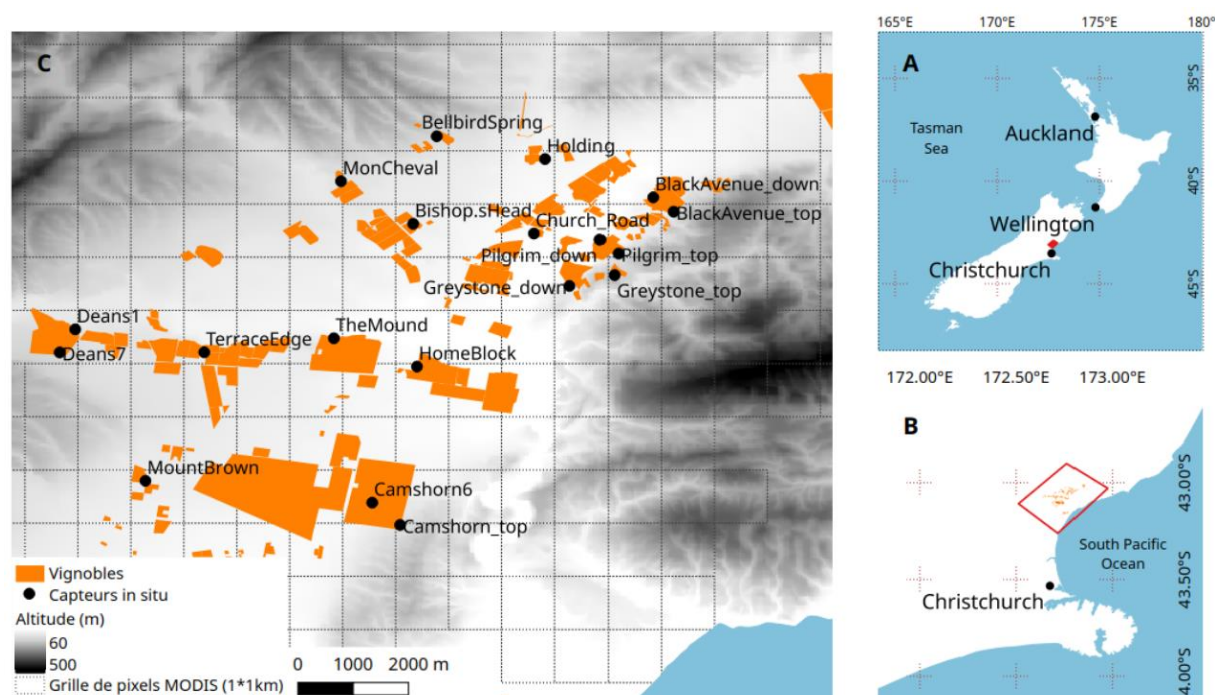


Figure 1. Localisation de la région viticole de la vallée de Waipara à A) l'échelle de la Nouvelle-Zélande, B) à l'échelle de la région du Canterbury située à 60 km au nord de Christchurch, C) à l'échelle du réseau de données de températures de l'air. *Location of the Waipara Valley wine region at A) the New Zealand scale, B) the Canterbury region scale at 60km north of Christchurch, C) the in situ air temperature data logger network.*

1.2. Données utilisées

1.2.1. Température de l'air issue du réseau de data loggers

L'étude a été réalisée sur la saison végétative 2017-2018 qui s'étend pour l'hémisphère Sud d'octobre à fin avril. L'analyse de la variabilité des températures de l'air à l'échelle locale a été effectuée à partir d'un réseau de dix-sept data loggers de températures (TinyTag®) installés depuis juillet 2017 et prenant en compte les paramètres locaux (pente, altitude, orientation). Ces

² L'indice de Winkler correspond à la somme des températures moyennes journalières au-dessus de 10°C sur la période du 1^{er} avril au 31 octobre dans l'hémisphère nord, et sur la période du 1^{er} octobre au 30 avril dans l'hémisphère sud. Cinq classes de "régions climatiques viticoles" ressortent en effet dans cette classification, de la plus fraîche à la plus chaude : Région I = < 1371 D/J ; Région II = $1389-1667$ D/J ; Région III = $1650-1926$ D/J ; Région IV = $1927-2205$ D/J ; Région V = > 2205 D/J.

variables topographiques ont préalablement été extraites du Modèle Numérique de Terrain (MNT) avec une résolution spatiale de 25 m fourni par *Land Information New Zealand* (LINZ). Le réseau de mesures couvre l'ensemble du vignoble de la région de Waipara. Les data loggers ont été installés à 1,5 m (*i.e.* hauteur moyenne de la vigne) et enregistrent les températures minimales, moyennes et maximales toutes les 30 min. Les moyennes journalières minimales (T_n) et maximales (T_x) ont été calculées, ainsi que la moyenne journalière, pour définir des indices bioclimatiques fondés sur des sommes thermiques journalières (degrés/jours) durant la saison végétative. Le calcul de ces indices, fortement corrélés aux différents stades phénologiques de la vigne ainsi qu'aux caractéristiques des raisins (ex : taux de sucre, acidités, ...), permet d'étudier l'influence de la variabilité locale du climat sur la vigne et le vin.

Une analyse statistique conjointe (classification par Analyse en Composantes Principales – ACP, et une Classification Hiérarchique Ascendante – CAH) des facteurs locaux (altitude, pente, exposition, distance à la côte, Figure 2a) et des températures de l'air (T_n et T_x , Figure 3) a permis d'identifier des groupes homogènes de data loggers.

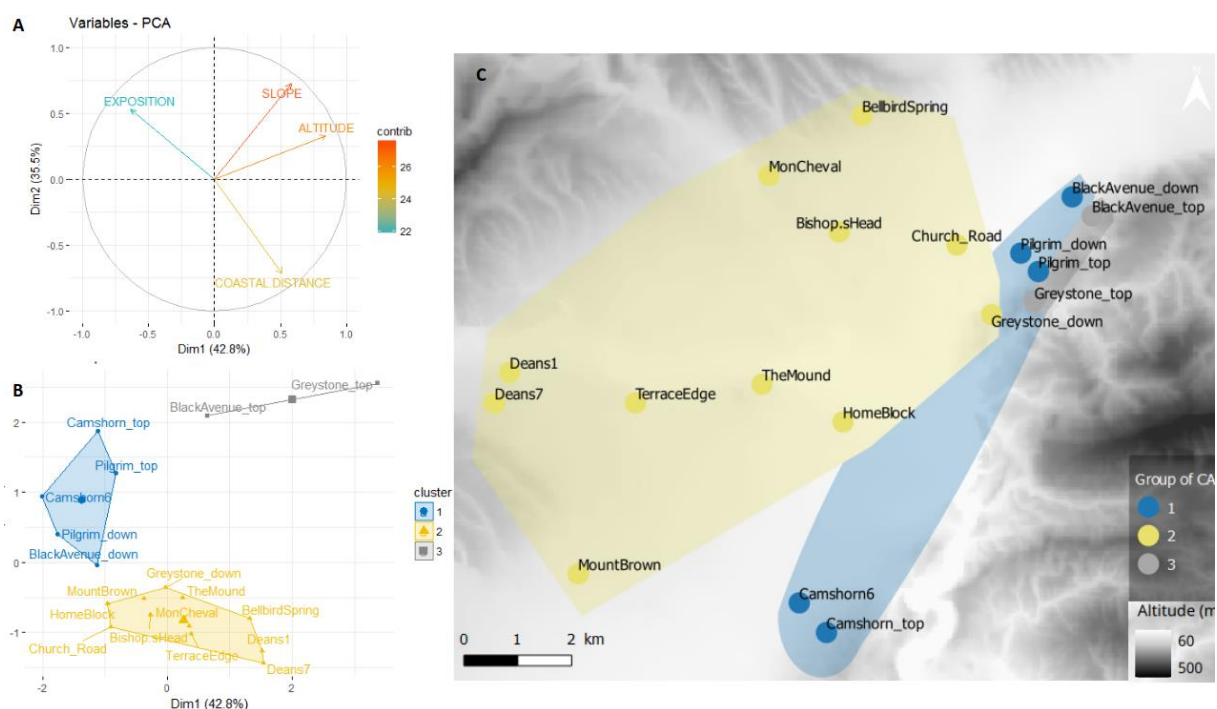


Figure 2. Analyse en Composante Principale (ACP) sur les facteurs topographiques (altitude, exposition, pente et distance à la côte) dans la vallée de Waipara durant la saison végétative 2017-2018 : a) représentation des variables topographiques sur le premier plan factoriel ; b) représentation des individus par rapport aux variables topographiques, c) répartition spatiale des groupes de capteurs *in situ* en fonction des facteurs locaux. *Principal Component Analysis (PCA) on topographic factors (elevation, exposure, slope and distance to the coast) in the Waipara Valley during the 2017-2018 growing season: a) representation of topographic variables in the first factorial plane; b) representation of individuals in relation to topographic variables; c) spatial distribution of in situ sensor groups according to local factors.*

Pour les facteurs locaux, trois principaux groupes topographiques ont été identifiés : 1) les data loggers disposés en fond de vallée et sur la partie est du site avec une exposition ouest, 2) les data loggers à mi-coteau à l'ouest du site avec une exposition est, et 3) les data loggers en haut de coteau sur la partie est du site exposés à l'ouest (Figures 2b et 2c). L'analyse statistique des températures (maximales et minimales) a fait ressortir plusieurs groupes en lien avec l'influence de la topographie et de l'océan sur les températures. Pour les températures maximales, les postes de mesures situés dans la partie sud du site d'étude enregistrent des valeurs moins élevées car influencées par la brise de mer. Dans la partie nord du site, la

configuration topographique avec la présence des collines plus élevées empêche la pénétration de la brise de mer engendrant ainsi des températures maximales plus élevées (Figure 3a et b). La variabilité spatiale des températures minimales est fortement influencée par la pente et l'exposition sans une distinction entre les parties nord et sud du site d'étude mais avec un groupe constitué du data logger le plus frais (en fond de vallée) : *ChurchRoad* (Figure 3c et d).

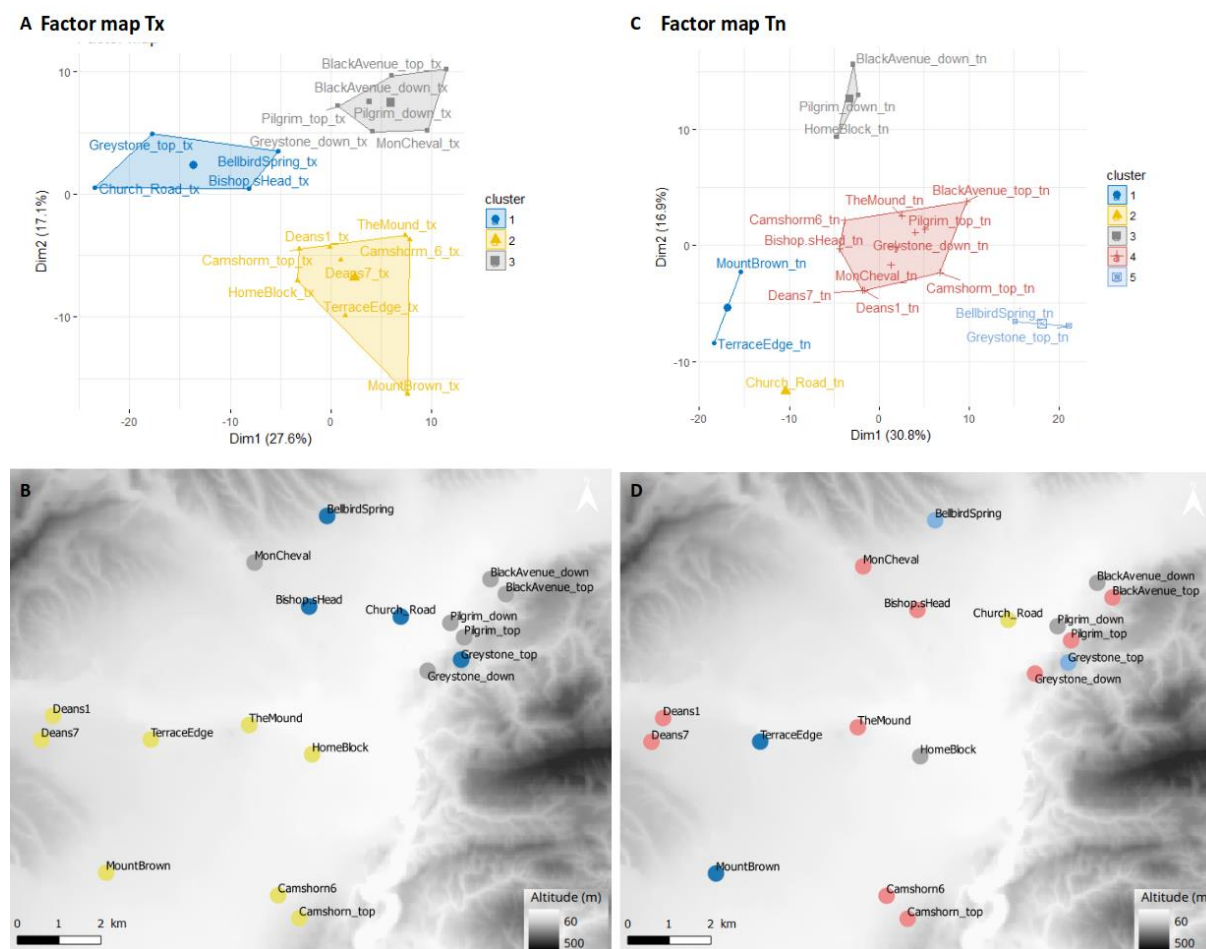


Figure 3. Analyses en Composante Principale (ACP) sur les températures minimales et maximales de l'air dans la vallée de Waipara durant la saison végétative 2017-2018 : a) représentation des individus par rapport aux températures de l'air maximales, b) répartition spatiale des groupes de capteurs *in situ* en fonction des températures maximales, c) représentation des individus par rapport aux températures de l'air minimales, d) répartition spatiale des groupes de data logger en fonction des températures minimales. *Principal Component Analysis (PCA) on minimum and maximum air temperatures in the Waipara Valley during the 2017-2018 growing season: a) representation of individuals in relation to maximum air temperatures, b) spatial distribution of in situ sensor groups in relation to maximum temperatures, c) representation of individuals in relation to minimum air temperatures, d) spatial distribution of in situ sensor groups in relation to minimum temperatures.*

A partir de cette analyse statistique, cinq data loggers représentatifs de la variabilité spatiale des températures ont été choisis en fonction de leur identité topographique et/ou thermique pour illustrer les résultats des analyses statistiques entre les températures de surfaces et les températures de l'air³ : les points de mesures *Bellbird*, *BlackAvenue_top* et *Pilgrim_top* ont été choisis pour représenter les trois groupes “facteurs locaux” (Figure 2a), puis *ChurchRoad* caractérisant le point de mesure le plus froid, notamment pour les températures minimales

³ Les différentes analyses statistiques entre températures de l'air et températures de surface ont été réalisées pour tous les points de mesures. Par souci de clarté dans la présentation des résultats, il a été préféré de présenter quelques points de mesures représentatif de l'ensemble du réseau de mesures.

(Figure 3c et d), puis *Mount Brown* représentatif de la partie sud du site d'étude influencée par la brise de mer pour les températures maximales (Figure 3a et b).

1.2.2. Température de surface issue de l'imagerie thermique MODIS

Le capteur MODIS est embarqué sur les satellites Terra et Aqua de la NASA lancés en 2000 et 2002. Les deux satellites ont la particularité de traverser l'équateur de deux manières : *Terra* en orbite descendante à environ 10h30 et 22h30 ; *Aqua* en orbite ascendante à environ 01h30 et 13h30, ce qui permet d'observer différentes conditions de couverture nuageuse (Wan *et al.*, 2004 ; Williamson *et al.*, 2014 ; Marchand, 2017). Les deux satellites acquièrent 36 bandes spectrales avec trois résolutions spatiales : 250 m (bandes 1-2), 500 m (bandes 3-7) et 1000 m (bandes 8-36). Les produits journaliers *Land Surface Temperature* (LST) et *Emissivity* sont inclus dans MYD11A1 (Aqua) et MOD11A1 (Terra). Ces données (températures de surface et émissivité de surface Terra et Aqua) accessibles gratuitement ont largement été utilisées dans la littérature (Mostovoy *et al.*, 2006 ; Bosilovich, 2006 ; Vancutsem *et al.*, 2010 ; Kloog *et al.*, 2014 ; Sohrabinia *et al.*, 2015 ; Meyer *et al.*, 2016 ; Southey, 2017). Ces données sont extraites à 1 km de résolution spatiale des bandes 31 (10,78-11,28 μm) et 32 (11,77-12,27 μm) utilisant l'algorithme split-window (McMillin, 1975 ; Wan et Dozier, 1996). L'avantage majeur de la version 6 est la suppression des pixels sous couverture nuageuse (Wan, 2014) avec la fourniture des critères de qualité dans *Quality Flag for LST*.

Les données MODIS utilisées dans cette étude ont été téléchargées via la plateforme *Land Processes distributed Active Archive Center* (<https://lpdaac.usgs.gov/>) et correspondent aux produits “MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1 km SIN Grid V006” et “MODIS/Aqua Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1 km SIN Grid V006” de la tuile MODIS “h30v13”. Les données ont été re-projetées en système WGS84 et converties en degrés Celsius (selon la formule : $\text{DN} \times 0,2 - 273,15$; Wan *et al.*, 2015).

L'objectif est d'évaluer le potentiel de l'imagerie thermique MODIS en utilisant la donnée satellitaire brute, sans interpolation et uniquement lorsque les données sont disponibles (aucune reconstruction de données). La figure 4 illustre pour chaque data logger les fréquences de disponibilité journalière des données MODIS allant de 0 (aucune donnée disponible) à 4 (l'ensemble des données disponibles par jour).

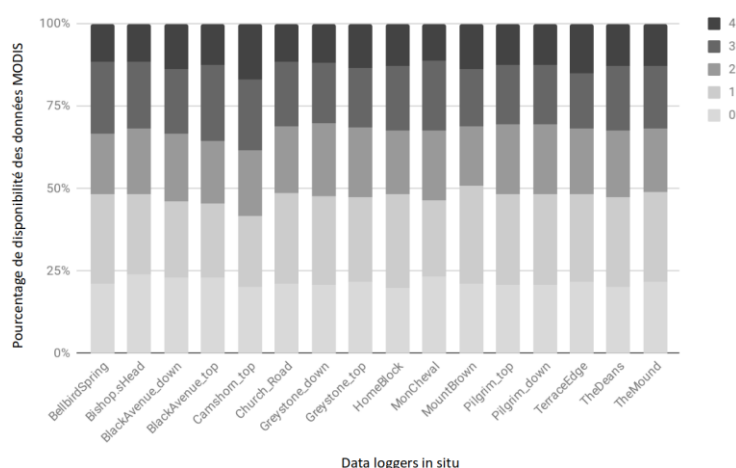


Figure 4. Fréquences de la disponibilité des données de températures de surfaces (MODIS) pour chaque localisation de data logger durant la saison végétative 2017-2018 dans la vallée viticole de Waipara. Chaque localisation dispose de 0 à 4 données MODIS par jour issues des satellites Terra et Aqua lors de chacune de leur acquisition diurne (MOD_{Day} et MYD_{Day}) et nocturne ($\text{MOD}_{\text{Night}}$ et $\text{MYD}_{\text{Night}}$). *Frequency of availability of surface temperature data (MODIS) for each sensor location in situ during the 2017-2018 growing season in the Waipara Wine Valley. Each location has 0 to 4 MODIS data per day from the Terra and Aqua satellites during each of their day (MOD_{Day} and MYD_{Day}) and night ($\text{MOD}_{\text{Night}}$ and $\text{MYD}_{\text{Night}}$) acquisitions.*

La température de surface correspondante a été extraite pour chaque point de mesure de température de l'air du réseau de data loggers. Dans le contexte d'une analyse à échelle fine, utiliser l'imagerie thermique est pertinent si la résolution spatiale et temporelle est suffisante pour mettre en évidence l'influence des effets locaux. Dans cette étude, l'analyse comparative entre température de l'air et température de surface a pour objectif d'évaluer la capacité de l'imagerie MODIS à 1 km à retranscrire les structures thermiques cohérentes avec celles obtenues à partir de l'analyse des températures issues du réseau de data loggers. Les données de températures de l'air et températures de surfaces sont présentées dans le Tableau 1.

Température de l'air (T_a , <i>in situ</i>)	Ta moyenne journalière (T_m)		
	Ta maximale journalière (T_x)		
	Ta minimale journalière (T_n)		
Température de surface (LST) des satellites MODIS	LST du satellite MOD _{DAY} (MOD_{Tx})	moyenne des LST maximales journalières (LST_x)	LST moyenne journalière (LST_m)
	LST du satellite MYD _{DAY} (MYD_{Tx})		
	LST du satellite MOD _{NIGHT} (MOD_{Tn})	moyenne des LST minimales journalières (LST_n)	
	LST du satellite MYD _{NIGHT} (MYD_{Tn})		

Tableau 1. Liste des données de températures de l'air (Ta) et températures de surface (LST) issues des satellites MODIS utilisées. *List of air temperature (Ta) and surface temperature (LST) data from MODIS satellites used.*

1.3. Relation statistique entre températures de l'air et de surface

Pour comparer les distributions spatiales des températures de surfaces issues des satellites MODIS et des températures de l'air *in situ*, les données ont été sélectionnées selon leur disponibilité et leur qualité. Des analyses statistiques par régressions linéaires simples ont été appliquées à travers deux approches (Figure 5) :

- 1) **Une analyse journalière de la température moyenne**, comprenant les jours durant lesquels les quatre valeurs MODIS (MYD_{Day}, MYD_{Night}, MOD_{Day}, MOD_{Night}) et les températures de l'air moyennes journalières (T_m) *in situ* ont été exploitables.

Pour les données satellitaires, seules les situations sans couverture nuageuse ont été sélectionnées pour chaque capteur. Les moyennes journalières des quatre valeurs de température de surface (LST_m) et de la température de l'air (T_m) ont été calculées. Elles ont ensuite été comparées par régression linéaire simple et par le calcul d'indicateurs statistiques tels que le coefficient de corrélation (R²) et le *Root Mean Square Error* (RMSE).

- 2) **Une analyse diurne et nocturne des températures maximales et minimales** lorsque les deux images acquises par chaque capteur (MYD et MOD) étaient disponibles (sans couverture nuageuse). L'analyse diurne a mis en relation les températures maximales de l'air (T_x) avec les températures de surfaces de jour (MOD_{Tx} et MYD_{Tx}). Alors que l'analyse nocturne a mis en relation les températures minimales de l'air (T_n) avec les températures de surfaces acquises de nuit (MOD_{Tn} du jour précédant et MYD_{Tn}).

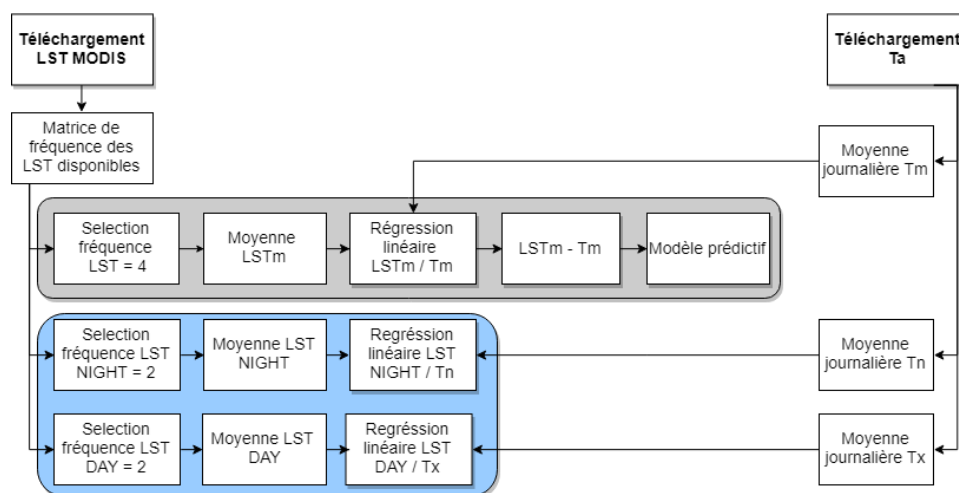


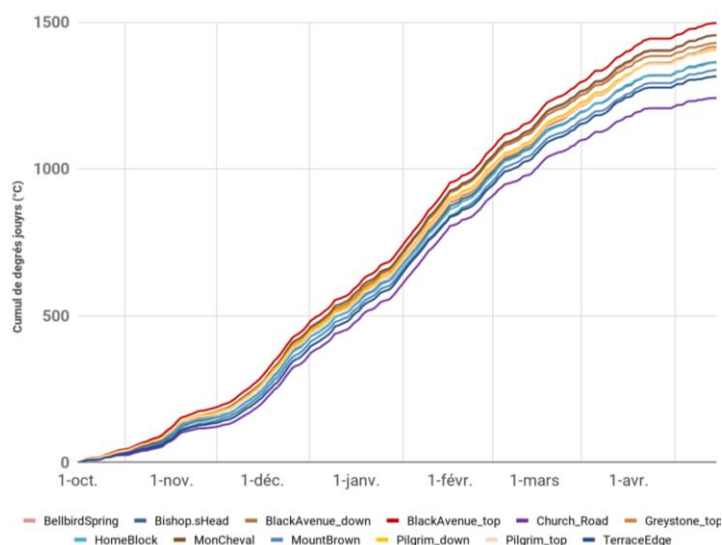
Figure 5. Chaîne de traitement de l'analyse statistique entre températures de l'air (data logger, T_a) et températures de surfaces (données thermiques issues des satellites MODIS, Land Surface Temperature LST) à l'échelle journalière. Une première analyse (en gris) concerne les températures moyennes (LST_m : température de surface moyenne et T_m : température de l'air moyenne) et la seconde analyse concerne les minimales (LST_{NIGHT} et T_n) et les maximales (LST_{DAY} et T_x). *Processing chain of statistical analysis between air temperatures (in situ sensors, T_a) and surface temperatures (thermal data from MODIS satellites, Land Surface Temperature LST) on a daily scale. A first analysis (in grey) concerns the average temperatures (LST_m : average surface temperature and T_m : average air temperature) and the second analysis concerns the minimum (LST_{NIGHT} and T_n) and maximum (LST_{DAY} and T_x).*

2. Résultats

2.1. Températures moyennes durant la saison végétative 2017-2018

A l'échelle de la saison végétative (d'octobre à avril), les secteurs les plus frais sont identifiés en fond de vallée et les plus chauds en haut de coteaux. Les valeurs de l'indice de Winkler (sommes de degrés/jour) vont de 1242 D/J pour les data loggers situés en fond de vallée (*ChurchRoad*) à 1497 D/J en haut de coteau (*BlackAvenue_top*). Cette différence de 250 D/J est liée à l'influence de facteurs locaux correspondant à une classe climatique. Par comparaison, la valeur enregistrée à *ChurchRoad* correspond à la classe I (Champagne, Bourgogne, ...) et celle de *BlackAvenue_top* se situe dans la classe II (Bordeaux, Côtes du Rhône) (Winkler et al., 1974) (Figure 6).

Figure 6. Evolution journalière de l'indice de Winkler (ou "degrés-jours") calculé durant la saison végétative 2017-2018 dans la vallée viticole de Waipara, correspondant à la somme des températures moyennes journalières à partir de la base 10°C. *Daily evolution of the Winkler index (or "degree days") calculated during the 2017-2018 growing season in the Waipara wine valley, corresponding to the sum of the average daily temperatures from the base 10°C.*



Ces différences mettent en évidence que les impacts locaux peuvent engendrer une variabilité spatiale des températures du même ordre (voire supérieure) à celle observée entre deux régions viticoles (Quénol, 2014). A l'échelle des vignobles de Waipara, cette forte variabilité spatiale des températures a une influence sur la croissance de la vigne, le niveau de maturité des raisins (ex : taux de sucre, acidité, ...) et, par conséquent, sur les caractéristiques des vins (Neethling, 2016). Les caractéristiques du réseau de data loggers (choix de l'emplacement des points de mesures, densité des points de mesures, etc.) ont permis de prendre en compte l'influence des facteurs locaux.

Les différences identifiées entre températures de l'air et températures de surfaces (Figures 7 et 8) varient entre 0 et 3,2°C pour les températures moyennes, minimales et maximales. La température de l'air moyenne saisonnière varie de 15,7 à 17°C alors qu'à l'échelle des images MODIS (1 x 1 km), la variabilité spatiale des températures de surfaces moyennes saisonnières est plus lissée (14,7 à 15,3°C) (Figures 7a et b).

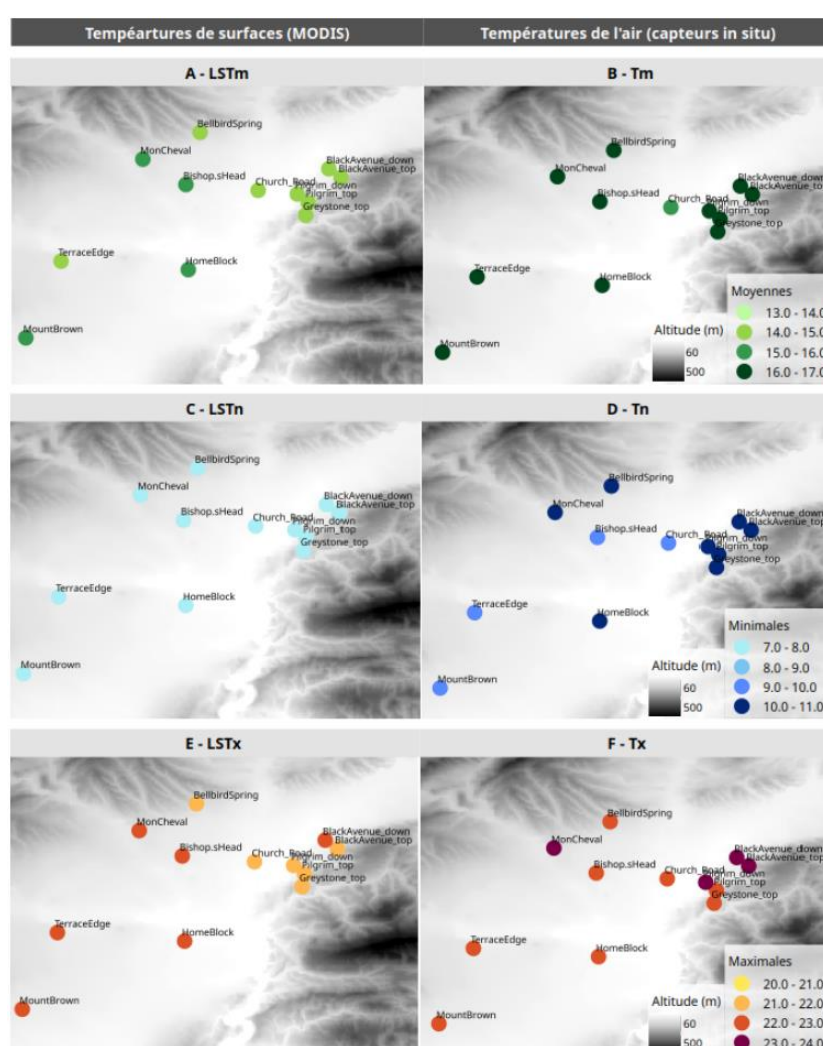


Figure 7. Répartition des températures de surface (estimées par satellite) moyennes (a), minimales (c), maximales (e) et des températures de l'air (mesurées *in situ*) moyennes (b), minimales (d) et maximales (f) durant la saison végétative octobre 2017-avril 2018 dans la vallée viticole de Waipara. La localisation des 12 data loggers met en évidence la variabilité des facteurs locaux notamment l'altitude représentée par le Modèle Numérique de Terrain (DEM, à 25 m de précision) fourni par LINZ Data Service. *Distribution of average (a), minimum (c), maximum (e) and average (b), minimum (d) and maximum (f) surface temperatures (estimated by satellite) during the October 2017-April 2018 growing season in the Waipara Wine Valley. The location of the 12 in situ sensors highlights the variability of local factors, in particular the altitude represented by the Digital Terrain Model (DEM, at 25 m accuracy) provided by LINZ Data Service.*

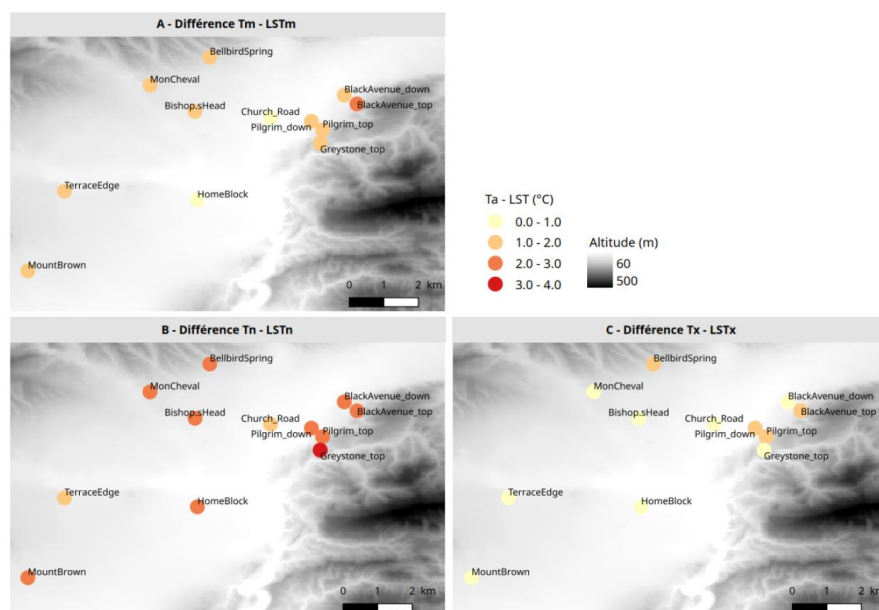


Figure 8. Répartition des différences moyennes par data logger entre températures de l'air (T_a) et températures de surfaces (LST) a) moyennes, b) minimales et c) maximales durant la saison végétative octobre 2017-avril 2018 dans la vallée viticole de Waipara. *Distribution of differences between air temperatures (T_a) and surface temperatures (LST) a) average, b) minimum and c) maximum during the October 2017-April 2018 growing season in the Waipara wine valley.*

Les températures de l'air minimales comprises entre 9,2 et 10,9°C sont plus élevées que les températures de surfaces acquises de nuit (entre 7,3 et 7,9°C) (Figures 7c, d, e, f). Toutefois, les structures spatiales restent similaires avec des températures minimales plus basses en fond de vallée et plus élevées en haut de coteaux. Cette répartition des températures minimales correspond aux nuits calmes avec ciel clair favorables à la formation d'inversions thermiques et à l'accumulation d'air froid dans les parties basses de la vallée. Concernant les valeurs maximales, les températures de l'air sont en moyenne plus élevées (entre 22,17 et 23,5°C) que les températures de surface (entre 21,5 et 22,9°C). Les différences les plus marquées (Figure 8) se situent sur les secteurs en pente par rapport aux secteurs subhorizontaux. Ces secteurs sont les plus sensibles aux variations des températures de surfaces, et difficilement pris en compte du fait de la résolution spatiale de 1 km (Hutengs et Vohland, 2016 ; Sismanidis et *al.*, 2017 ; Zhao, 2019).

Les données annuelles et mensuelles ne traduisent pas l'influence des conditions atmosphériques sur la variabilité spatiale des températures à l'échelle du site d'étude. Une analyse de la variabilité thermique journalière a donc été effectuée.

2.2. Températures moyennes journalières

A cette échelle temporelle, la corrélation entre la température de surface moyennée des quatre images MODIS et la température de l'air moyenne a été analysée pour chaque data loggers. Les coefficients de détermination (R^2) sont compris entre 0,72 et 0,90 (Figure 9a) et les RMSE entre 1,73 et 3,52°C (Figure 9b). L'analyse plus détaillée des cinq data loggers représentatifs des "structures topographiques et thermiques" du site confirme la bonne corrélation linéaire entre température de l'air et de température de surface mais avec des disparités plus fortes au niveau du RMSE. *Bellbird*, *BlackAvenue_top*, *Pilgrim_top* et *ChurchRoad* ont un RMSE entre 2 et 2,50°C alors qu'il est de 3,52°C à *MountBrown* (Figures 9 et 10). Ces résultats confirment que la structure spatiale de la répartition des températures moyennes est similaire pour les deux types de données mais avec des différences au niveau des

RMSE entre chaque point de mesures. L'analyse des températures moyennes journalières a nécessité la disponibilité des quatre images thermiques des satellites MODIS (LSTm) ce qui a réduit considérablement le nombre de jours d'observations (Tableau 2). Le faible nombre d'observations n'a pas permis, d'une part de valider statistiquement le lien entre températures de l'air journalières moyennes et températures de surface et d'autre part, d'expliquer les écarts de RMSE entre chaque point de mesure.

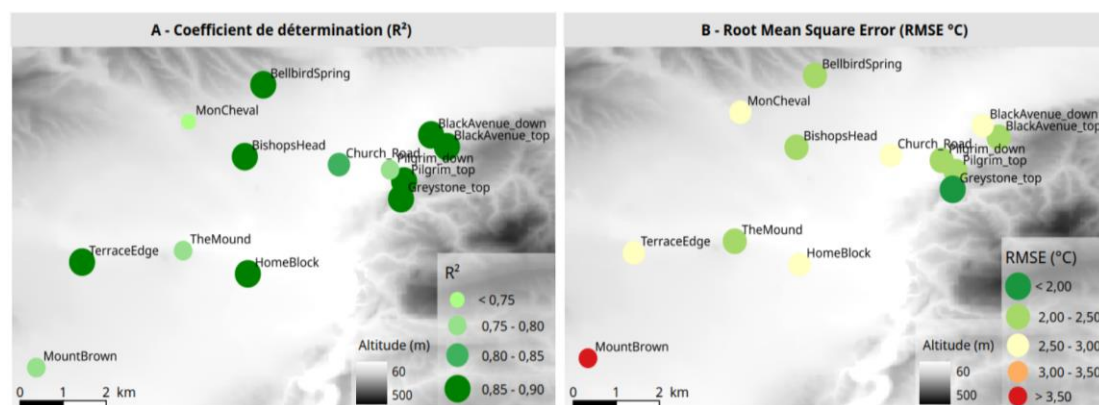


Figure 9. Distribution spatiale a) du coefficient de détermination (R^2) et b) de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de corrélation statistique entre T_m (température de l'air moyenne journalière) et LST_m (température de surface moyenne journalière) pour 13 data loggers entre juillet 2017 et mai 2018 dans la vallée viticole de Waipara. *Spatial distribution a) of the determination coefficient (R^2) and b) of the mean square error (RMSE) of statistical correlation between T_m (daily mean air temperature) and LST_m (daily mean surface temperature) for 13 sensors between July 2017 and May 2018 in the Waipara wine valley.*

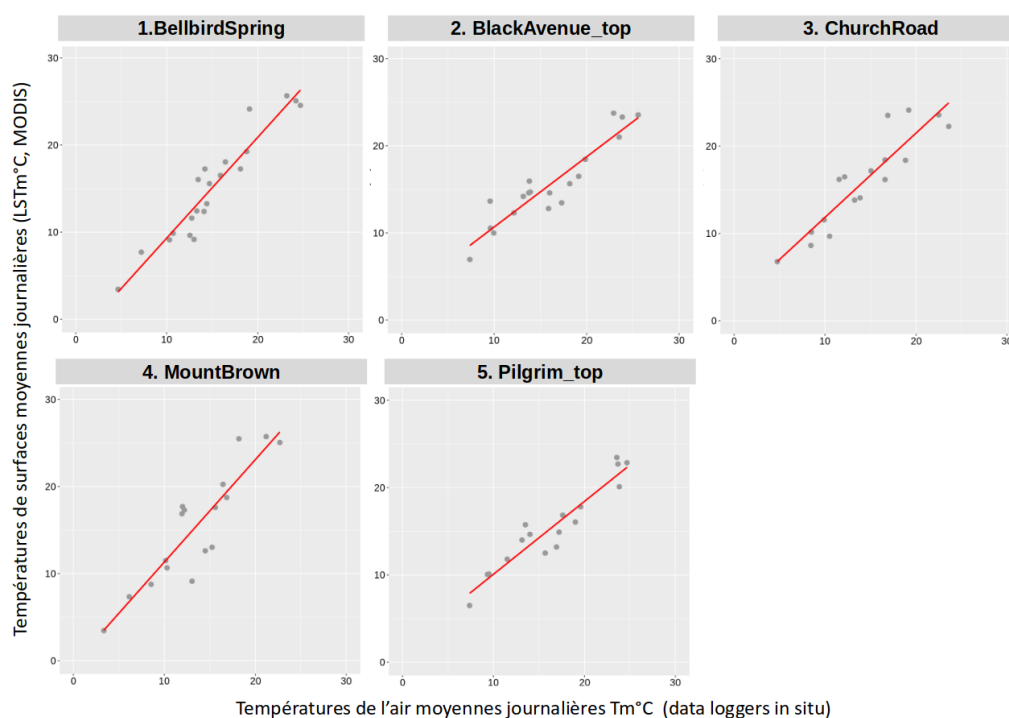


Figure 10. Corrélation linéaire entre la température de surface journalière (LST_m) issue des satellites MODIS et la température moyenne journalière de l'air (T_m). Les nuages de points représentent les données acquises entre juillet 2017 et mai 2018 dans la vallée viticole de Waipara mettant en correspondance les valeurs de LST_m en fonction de T_m pour cinq data loggers : 1) BellbirdSpring, 2) BlackAvenue_top, 3) ChurchRoad, 4) MountBrown et 5) Pilgrim_top. *Linear correlation between the daily surface temperature (LST_m) from MODIS satellites and the average daily air temperature (T_m). The point clouds represent data acquired between July 2017 and May 2018 in the Waipara Wine Valley mapping LST_m values to T_m for five data loggers: 1) BellbirdSpring, 2) BlackAvenue_top, 3) ChurchRoad, 4) MountBrown and 5) Pilgrim_top.*

Data loggers <i>in situ</i>	R ²	RMSE	n	p-value
BellbirdSpring	0,90	2,03	21	***
BlackAvenue_top	0,86	2,03	19	***
Church_Road	0,83	2,77	17	***
MountBrown	0,80	3,52	17	***
Pilgrim_top	0,90	2,00	17	***

Tableau 2. Indicateurs statistiques de la relation entre température moyenne de l'air (Tm) et température de surface (LSTm) journalières pour 5 points de mesures représentatifs de la vallée de Waipara durant la saison végétative 2017-2018 (seuils de significativité : *** = 0,001 ; ** = 0,01 ; * = 0,05). *Statistical indicators of the relationship between mean air temperature (Tm) and daily surface temperature (LSTm) for 5 sites representative of Waipara Valley during the 2017-2018 growing season (Significance thresholds: *** = 0.001; ** = 0.01; * = 0.05).*

2.3. Températures maximales et minimales journalières

L'analyse diurne (LSTx) et nocturne (LSTn) s'appuyant sur deux images (et non plus quatre), permet d'augmenter le nombre de situations et donc d'améliorer la significativité statistique des résultats. Trois types de relations statistiques ont été calculés : 1) celle entre la moyenne des deux images et la température de l'air (MEAN/Ta), 2) celle entre l'image issue du capteur *Terra* et la température de l'air (MOD/Ta) et 3) celle entre l'image issue du capteur *Aqua* et la température de l'air associée (MYD/Ta), appliquée à l'analyse diurne (Tx) puis nocturne (Tn). L'objectif a été d'identifier laquelle des données MODIS brutes (*Terra*, *Aqua* et *Terra/Aqua*) est la mieux corrélée avec la température de l'air (sans appliquer de reconstruction de données spatiale ou temporelle).

Pour les températures maximales, le nombre d'observations correspondant aux données disponibles pour les deux capteurs (*Aqua* et *Terra*) le même jour a été en moyenne de 68 observations (Tableau 3), tandis que le nombre d'observations exploitables par capteur est presque deux fois plus élevé (une moyenne de 132 observations disponibles par capteur) (Figure 11).

Data loggers <i>in situ</i>	A) MEAN / TX				B) MOD/TX				C) MYD/TX			
	R ²	RMSE (°C)	n	p-value	R ²	RMSE (°C)	n	p-value	R ²	RMSE (°C)	n	p-value
BellbirdSpring	0,77	4,37	67	***	0,63	5,21	134	***	0,76	4,31	134	***
BlackAvenue_top	0,75	3,95	71	***	0,68	4,77	137	***	0,77	4,15	135	***
Church_Road	0,69	4,26	65	***	0,55	5,28	126	***	0,73	4,30	121	***
MountBrown	0,64	5,61	72	***	0,60	6,16	138	***	0,67	5,58	137	***
Pilgrim_top	0,74	3,98	68	***	0,66	4,85	139	***	0,74	4,27	129	***

Tableau 3. Indicateurs statistiques de la relation entre la température maximale de l'air (Tx) et A) la moyenne des températures de surface maximales (MEAN), B) la température de surface maximale acquise par Terra (MOD), C) la température de surface maximale acquise par Aqua (MYD) pour 5 sites représentatifs de la vallée de Waipara durant la saison végétative 2017-2018 (seuils de significativité : *** = 0,001 ; ** = 0,01 ; * = 0,05). *Statistical indicators of the relationship between the maximum air temperature (Tx) and A) the average of the maximum surface temperatures (MEAN), B) the maximum surface temperature acquired by Terra (MOD), C) the maximum surface temperature acquired by Aqua (MYD) for 5 sites representative of Waipara Valley during the 2017-2018 growing season (significance thresholds: *** = 0.001; ** = 0.01; * = 0.05).*

Les corrélations entre les valeurs moyennes des deux satellites et les températures maximales sont bonnes (MEAN/TX = 0,64 $\geq$ R² $\geq$ 0,77) mais relativement proches de celles obtenues avec le capteur MYD_{DAY}. La combinaison des deux satellites de jour permet de diminuer légèrement le taux d'erreur (RMSE) d'estimation des températures de surfaces en journée. Lorsque les deux capteurs sont analysés indépendamment, les relations statistiques diffèrent. Le capteur MYD_{DAY} (*Aqua*), qui acquiert les LST vers 13h30 heure solaire locale, obtient de meilleurs

coefficients de corrélation ($0,67 \geq R^2 \geq 0,77$) que le capteur MOD_{DAY} qui enregistre des images à 10h30 ($0,55 \geq R^2 \geq 0,68$). Cela peut s'expliquer par le fait que les valeurs du MYD_{DAY} sont plus proches du pic journalier des températures maximales de l'air, contrairement aux résultats de Zeng (2015) ne trouvant pas de différence significative entre les deux satellites diurnes. D'une manière générale, ces résultats montrent l'intérêt d'utiliser le capteur *Aqua* plutôt que le capteur *Terra* ou la combinaison des deux pour l'estimation des températures maximales.

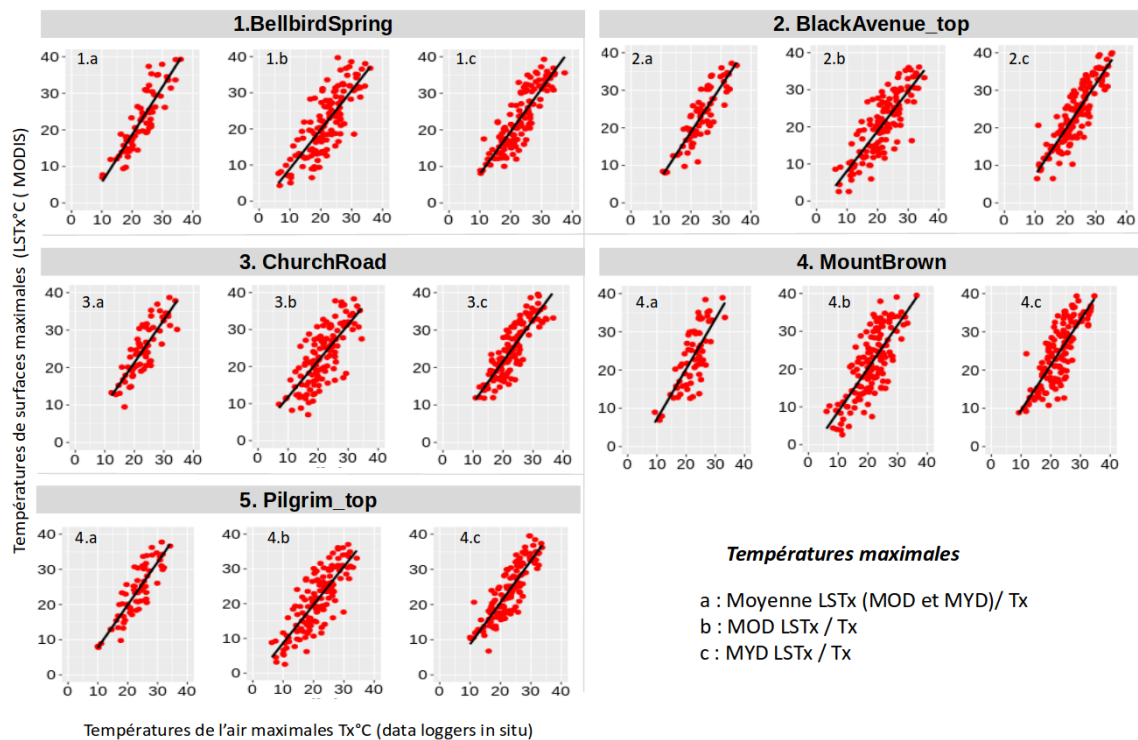


Figure 11. Analyse des températures maximales entre juillet 2017 et mai 2018 dans la vallée viticole de Waipara pour cinq data loggers in situ 1) BellbirdSpring, 2) BlackAvenue_top, 3) ChurchRoad, 4) MountBrown et 5) Pilgrim_top. Corrélation de la température de l'air journalière maximale (Tx) et de la température de surface maximale journalière : a) moyenne des maximales des satellites Terra et Aqua (Moyenne LSTx MOD et MYD), b) maximale du satellite Terra (MOD) et c) maximale du satellite Aqua (MYD) pour chaque data logger in situ. Maximum temperature analysis between July 2017 and May 2018 in the Waipara Wine Valley for five in situ data logger 1) BellbirdSpring, 2) BlackAvenue_top, 3) ChurchRoad, 4) MountBrown and 5) Pilgrim_top. Correlation of the maximum daily air temperature (Tx) and the maximum daily surface temperature: a) average of the maximums of the Terra and Aqua satellites (Average LSTx MOD and MYD), b) maximum of the Terra satellite (MOD) and c) maximum of the Aqua satellite (MYD) for each data logger in situ.

La même démarche d'analyse a été suivie pour les températures minimales : comparaison entre température minimale de l'air (Tn) et LSTn du satellite *Terra*, LSTn du satellite *Aqua* et moyenne LSTn *Terra/Aqua*. Les heures d'acquisition sont 22h30 pour le satellite *Terra* (MOD_{NIGHT}) et 1h30 pour Aqua (MYD_{NIGHT}).

Les résultats sont similaires à ceux obtenus avec les températures maximales mais avec de meilleures relations statistiques (Figure 12). D'autres travaux ont obtenu des résultats similaires avec des corrélations entre températures de surfaces MODIS et températures de l'air *in situ* plus élevées pour l'analyse nocturne que pour l'analyse diurne (Wan, 2008 ; Huang *et al.*, 2015 ; Shi *et al.*, 2016). Les données du capteur Terra (MOD_{NIGHT}) ont obtenu des coefficients de détermination allant de 0,81 à 0,87 tandis que les résultats du capteur Aqua (MYD_{NIGHT}) sont compris entre 0,31 et 0,45. L'erreur quadratique moyenne avec le capteur MOD_{NIGHT} est comprise entre 2,1 et 3,07°C, équivalente à celle obtenue avec la moyenne des deux satellites ($2,5^{\circ}\text{C} \geq \text{RMSE} \geq 3,8^{\circ}\text{C}$) (Tableau 4). En s'approchant de l'erreur quadratique la plus faible

possible, la précision du modèle linéaire est significative ($P < 0.001$) et permet d'évaluer la stabilité des paramètres permettant d'ajuster le modèle. Comme pour les températures maximales, ces résultats incitent à plutôt utiliser un seul capteur (pour les températures minimales, le capteur *Terra*), plutôt que la combinaison des deux.

Data loggers in situ	A) MEAN / T _N				B) MOD/T _N				C) MYD/T _N			
	R ²	RMSE (°C)	n	p-value	R ²	RMSE (°C)	n	p-value	R ²	RMSE (°C)	n	p-value
BellbirdSpring	0,68	2,81	49	***	0,81	2,42	113	***	0,36	4,01	114	***
BlackAvenue_top	0,80	2,50	50	***	0,85	2,19	119	***	0,43	3,88	122	***
Church_Road	0,69	3,80	41	***	0,82	3,07	93	***	0,31	4,35	109	***
MountBrown	0,68	3,13	49	***	0,87	2,41	113	***	0,44	4,07	123	***
Pilgrim_top	0,78	2,63	46	***	0,87	2,10	112	***	0,45	3,81	120	***

Tableau 4. Indicateurs statistiques de la relation entre la température minimale de l'air (T_n) et A) la moyenne des températures de surfaces minimales (MEAN), B) la température de surface minimale acquise par Terra (MOD), C) la température de surface minimale acquise par Aqua (MYD) pour 5 sites représentatifs de la vallée de Waipara durant la saison végétative 2017-2018 (seuils de significativité : *** = 0,001 ; ** = 0,01 ; * = 0,05). *Statistical indicators of the relationship between the minimum air temperature (T_n) and A) the average of the minimum surface temperatures (MEAN), B) the minimum surface temperature acquired by Terra (MOD), C) the minimum surface temperature acquired by Aqua (MYD) for 5 sites representative of Waipara Valley during the 2017-2018 growing season (significance thresholds: *** = 0.001; ** = 0.01; * = 0.05).*

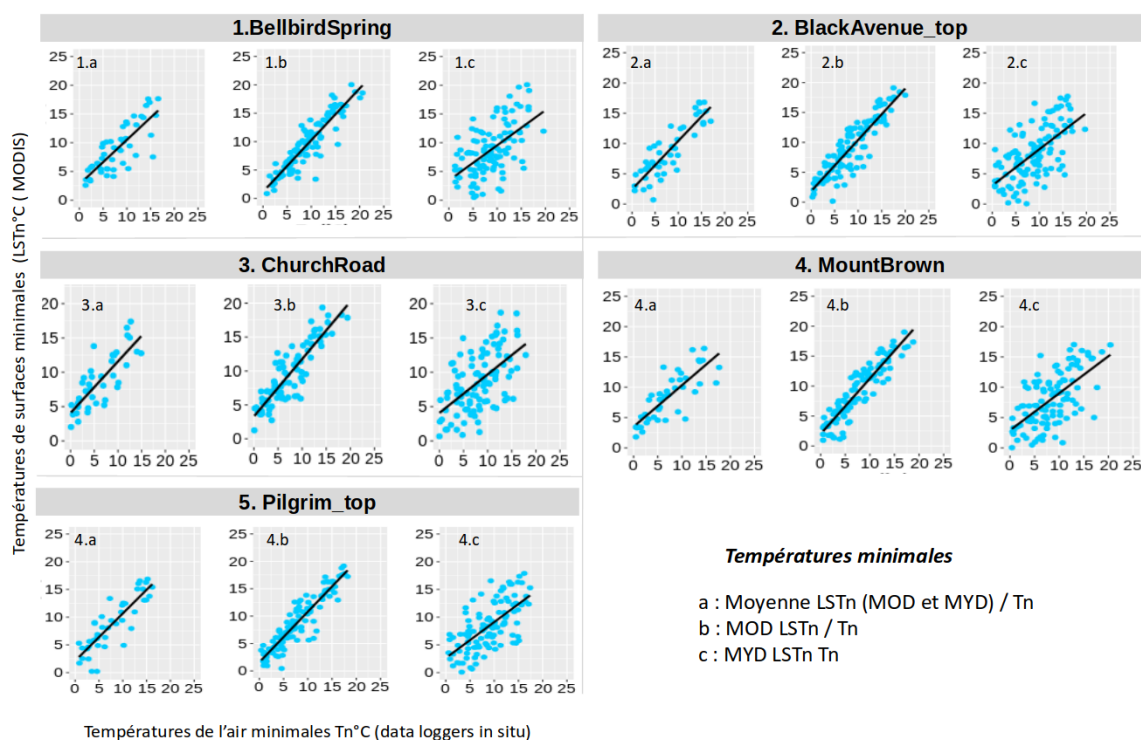


Figure 12. Analyse des températures minimales entre juillet 2017 et mai 2018 dans la vallée viticole de Waipara pour cinq data loggers in situ 1) BellbirdSpring, 2) BlackAvenue_top, 3) ChurchRoad, 4) MountBrown 5) Pilgrim_top. Corrélation de la température de l'air journalière minimale (T_n) et de la température de surface minimale journalière : a) moyenne des minimales des satellites Terra et Aqua (Moyenne des LST_n MOD et MYD), b) minimale du satellite Terra (MOD) et c) minimale du satellite Aqua (MYD) pour chaque data logger in situ. *Analysis of minimum temperatures between July 2017 and May 2018 in the Waipara Wine Valley for five in situ data loggers 1) BellbirdSpring, 2) BlackAvenue_top, 3) ChurchRoad, 4) MountBrown 5) Pilgrim_top. Correlation of the minimum daily air temperature (T_n) and the minimum daily surface temperature: a) average of the minimums of the Terra and Aqua satellites (Average of the LST_n MOD and MYD), b) minimum of the Terra satellite (MOD) and c) minimum of the Aqua satellite (MYD) for each data logger in situ.*

L'utilisation conjointe des deux acquisitions thermiques de surfaces (maximales et minimales) n'apporte pas d'amélioration significative au niveau de la diminution des biais et de la qualité des corrélations avec les températures de l'air. Les températures de surfaces maximales acquises par le satellite Aqua (MYD Tx) sont plus proches des températures maximales de l'air acquises par les data loggers. Pour les minimales, les valeurs acquises par le satellite Terra (MOD Tn) sont les mieux corrélées avec les températures minimales *in situ*. La qualité de la relation statistique entre Ta et Ts est donc en grande partie liée à l'heure d'acquisition de la donnée. Très logiquement, le radiomètre ayant l'heure d'acquisition la plus proche du pic minimal ou maximal de la température *in situ* de l'air est celui qui obtient les meilleurs résultats. De plus, d'autres facteurs comme l'humidité du sol, le vent, les précipitations (Benali *et al.*, 2012), le rayonnement solaire pour les températures maximales (Vancustem *et al.*, 2010) ou encore l'influence de l'irrigation sur l'évapotranspiration du couvert végétal (Zeng, 2015) peuvent accentuer les biais et par conséquent la qualité de la relation statistique entre températures de surface et température de l'air.

L'analyse détaillée des écarts entre température de surface et température de l'air (LST-Ta) a permis d'identifier l'ampleur des biais pour chaque data logger en fonction des capteurs MODIS (Terra ; Aqua ; Terra/Aqua). Pour les températures minimales, les biais sont moins importants que pour les maximales. Par exemple, la majeure parties des données ont un biais compris entre -3 et 3°C pour les minimales et entre -6 et 4°C pour les maximales (Figure 13). Les biais plus importants pour les valeurs diurnes sont dus principalement à des facteurs atmosphériques liés au rayonnement solaire (angle solaire, effet d'ombre, etc.) (Zhu *et al.*, 2013 ; Mutiibwa *et al.*, 2015 ; Azevedo *et al.*, 2016).

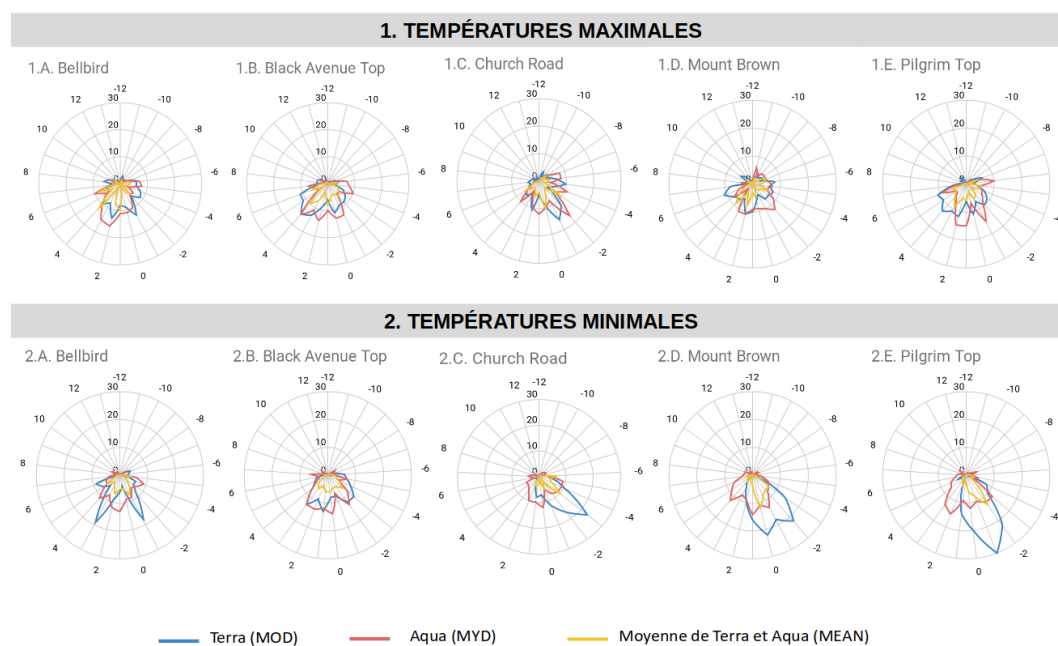


Figure 13. Nombre d'occurrences entre juillet 2017 et mai 2018 des différences entre 1) les températures de l'air et de surfaces minimales et 2) les températures de l'air et de surfaces maximales, pour les valeurs du satellite Terra (bleu), du satellite Aqua (rouge) et la moyenne des deux (jaune). Analyse focalisée sur cinq data loggers dans la vallée viticole de Waipara : 1) Bellbird, 2) BlackAvenue_top, 3) Church_Road, 4) Mount Brown et 5) Pilgrim_top. L'axe vertical représente le nombre d'occurrences des différences de températures allant de 0 à 30. Ces différences de températures sont réparties dans le sens horaire -12 à 12°C. *Number of occurrences between July 2017 and May 2018 of differences between 1) minimum air and surface temperatures and 2) maximum air and surface temperatures, for Terra (blue), Aqua (red) and the average of both (yellow). Analysis focused on five data loggers in the Waipara wine valley: 1) Bellbird, 2) BlackAvenue_top, 3) Church_Road, 4) Mount Brown and 5) Pilgrim_top. The vertical axis represents the number of occurrences of temperature differences ranging from 0 to 30. These temperature differences are distributed clockwise -12 to 12°C.*

Discussion et conclusion

Les facteurs locaux (*e.g.* pente, exposition, type de sol, distance à la mer, etc.) provoquent des variations du climat (notamment des températures) qui peuvent être supérieures à la variabilité climatique d'échelles plus larges. C'est très souvent cette variabilité spatio-temporelle du climat liée à des phénomènes d'échelles imbriquées (du macro- au microclimat) qui fournit les conditions optimales pour la croissance des cépages et caractérise la spécificité d'un terroir viticole (Quénol, 2017). La construction de modèles climatiques prenant en compte ces facteurs locaux nécessite l'acquisition de données *in situ* nécessitant l'installation de réseaux de stations météorologiques ou data loggers dans les vignobles. L'installation de réseaux de mesures *in situ* est contraignante et nécessite plusieurs années d'acquisition de données pour construire et valider le modèle. L'évaluation de l'imagerie thermique a donc été réalisée avec l'objectif d'être intégrée dans la chaîne de modélisation climatique à échelle locale.

Cette étude a donc proposé une analyse statistique des liens entre les températures de l'air enregistrées par un réseau de data loggers *in situ* et les températures de surfaces estimées par l'imagerie thermique satellitaire MODIS dans la région viticole de Waipara (Nouvelle-Zélande). Les capteurs MODIS acquièrent quatre images LST par jour. Pour évaluer le potentiel de ces données en limitant au maximum les biais et incertitudes (d'origine météorologique et/ou instrumentale), aucune interpolation temporelle et spatiale n'a été appliquée.

Les résultats obtenus à partir des moyennes journalières sont encourageants car avec des valeurs de R^2 supérieures à 0,70 et des structures spatiales thermiques comparables aux températures de l'air. Cependant, le nombre de données manquantes n'a pas permis d'analyser le suivi quotidien ou hebdomadaire des LST pendant la saison de croissance de la vigne. En effet, le calcul d'indices bioclimatiques (comme ceux de Huglin ou de Winkler) est fondé sur des sommes de degrés/jours (D/J) durant la période végétative de la vigne (d'octobre à avril dans l'hémisphère sud). Leur calcul à partir de l'imagerie thermique nécessite la reconstruction de données pour les journées manquantes (Kang *et al.*, 2018 ; Ghafarian Malamiri *et al.*, 2018). Les analyses statistiques menées sur les températures minimales et maximales journalières ont également montré de bonnes relations statistiques avec de meilleurs résultats pour les températures minimales. Pour chaque cas, les données acquises par le satellite dont la fenêtre d'acquisition est la plus proche du pic de température (minimale ou maximale) ont obtenu les meilleurs résultats : avec le satellite *Terra* pour les maximales et avec le satellite *Aqua* pour les minimales. Il est important de noter que la moyenne des deux satellites n'apporte pas un gain significatif produisant des coefficients de corrélation et une erreur quadratique proche du résultat issu du satellite le plus corrélé. Les biais entre température de l'air et température de surface sont plus importants pour les températures maximales. D'autres travaux ont mis en évidence des résultats similaires en les attribuant à une plus forte variabilité temporelle des températures diurnes dépendante du rayonnement solaire, en particulier lors de situations de ciel dégagé (Benali *et al.*, 2012 ; Mutiibwa *et al.*, 2015). Cela est également le cas pour cette étude à l'échelle de la vallée de la Waipara puisque seules les situations atmosphériques avec ciel clair ont été analysées. Inversement, comme l'ont démontré Zeng (2015) et Noi *et al.* (2016), les relations statistiques sont meilleures pour les températures nocturnes car l'absence de rayonnement solaire limite les fortes variations de température entre la fenêtre d'acquisition du satellite et le moment durant lequel la température minimale de la nuit est atteinte.

La qualité de la relation statistique entre l'imagerie thermique et les réseaux de mesures *in situ* est donc intrinsèquement liée à la résolution et à la synchronicité temporelle mais également à la résolution spatiale. En effet, l'imagerie thermique MODIS a été confrontée à un réseau de data loggers installé récemment dans une région viticole peu étendue (1250 hectares) et dont la

variabilité spatiale des températures engendrée par la topographie est importante. Pour la saison végétative 2017-2018, les écarts de degrés jours (issus des températures de l'air) atteignent jusqu'à 255°C de différence entre *BlackAvenue_top* (1497°C) situé en haut de coteau et *ChurchRoad* (1242°C) dans le fond de vallée. Plusieurs data loggers sont ainsi compris dans le même pixel associé d'un kilomètre de l'imagerie MODIS, lissant ces effets locaux.

Les résultats obtenus montrent que les données MODIS ont permis d'obtenir une structure spatiale de la température de surface comparable à celle obtenue avec le réseau de data loggers. L'utilisation de données satellitaires avec des résolutions spatiales plus fines apporterait une information supplémentaire pour la quantification de la variabilité locale des températures par le biais d'une meilleure prise en compte de la topographie. L'objectif serait également d'évaluer la structure spatiale des températures en lien avec les effets locaux car plusieurs travaux ont démontré l'amélioration de l'information avec des méthodes de descentes d'échelles de températures de surfaces, et en s'appuyant sur des combinaisons de différentes sources de données (MODIS, Landsat, VIIRS, ASTER,...), sur les variables topographiques (altitude, pente, etc.) ou encore sur l'occupation des sols (Hutengs et Vohland, 2016 ; Essa *et al.*, 2017 ; Xia *et al.*, 2018).

Les résultats ont également montré que des développements sont nécessaires pour limiter la part des données manquantes. Les analyses ont été réalisées uniquement sur des situations de temps clair sans couvert nuageux. Les analyses statistiques ont été réalisées spécifiquement avec les données satellitaires brutes sans recours à la reconstruction de données pour éviter d'engendrer des biais supplémentaires. Cela a eu pour conséquence sur la période étudiée de diminuer le nombre de jours sélectionnés. Pourtant, en viticulture, les données journalières sont nécessaires pour le calcul des indices bioclimatiques basés sur les sommes de degrés/jours. Il serait envisageable d'appliquer des interpolations temporelles entre LST et Ta, comme dans les applications de Metz *et al.* (2017), Kang *et al.* (2018) ou plus particulièrement dans l'étude de Southey (2017) pour une région viticole d'Afrique du Sud (à condition que les biais soient évalués préalablement). La finalité est de pouvoir disposer d'une chronique journalière permettant ensuite, dans le contexte viticole, de calculer différents indices bioclimatiques (Zhang *et al.*, 2013 ; Southey, 2017).

La fusion de différents types de données spatiales et temporelles peut aussi permettre de détailler la variabilité d'une saison végétative à une échelle géographique pertinente d'un terroir viticole. Les différents développements envisagés pourront être appliqués à d'autres régions viticoles (par exemple, Marlborough en Nouvelle-Zélande et Pomerol/Saint-Emilion/Entre-deux-Mers en France) équipées de stations et de data loggers météorologiques, avec des séries sur plusieurs années. Différents travaux de modélisation climatique portent sur ces deux sites d'études (Quénol, 2014 ; Le Roux *et al.*, 2017a et b ; Sturman *et al.*, 2017), l'objectif étant d'y coupler la donnée satellitaire issue de la télédétection thermique.

Bibliographie

- Azevedo J., Chapman L. & Muller C., 2016. Quantifying the daytime and night-time urban heat island in Birmingham, UK: A comparison of satellite derived land surface temperature and high resolution air temperature observations. *Remote Sens.*, 8 (2), 153. <https://doi.org/10.3390/rs8020153>
- Benali A., Carvalho A. C., Nunes J. P., Carvalhais N. & Santos A., 2012. Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data. *Remote Sens. Environ.*, 124, 108-121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.024>.

- Bonnardot V., Carey V.A., Madelin M., Cautenet S., Coetzee Z., Quénol H., 2012. Spatial variability of night temperatures at a fine scale over the Stellenbosch wine district, South Africa. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 46, 1-13. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2012.46.1.1504>
- Bonnefoy C., Quénol H., Planchon O., Barbeau G., 2010. Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo*, 14. <https://doi.org/10.4000/echogeo.12146>
- Bosilovich M.G., 2006. A comparison of MODIS land surface temperature with in situ observations. *Geophys. Res. Lett.*, 33. <https://doi.org/10.1029/2006GL027519>
- Essa W., Verbeiren B., van der Kwast J., Batelaan O., 2017. Improved DisTrad for downscaling thermal MODIS imagery over urban areas. *Remote Sens.*, 9, 1243. <https://doi.org/10.3390/rs9121243>
- Ghafarian Malamiri H., Rousta I., Olafsson H., Zare H. & Zhang H., 2018. Gap-Filling of MODIS Time Series Land Surface Temperature (LST) Products Using Singular Spectrum Analysis (SSA). *Atmosphere*, 9(9), 334. <https://doi.org/10.3390/atmos9090334>
- Huang R., Zhang C., Huang J., Zhu D., Wang L. & Liu J. (2015). Mapping of Daily Mean Air Temperature in Agricultural Regions Using Daytime and Nighttime Land Surface Temperatures Derived from TERRA and AQUA MODIS Data. *Remote Sensing*, 7, 8728-8756. <https://doi.org/10.3390/rs70708728>
- Huglin P., 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes rendus des séances de l'Académie d'agriculture de France*, 64, 1117-1 126.
- Hutengs C. & Vohland M., 2016. Downscaling land surface temperatures at regional scales with random forest regression. *Remote Sens. Environ.*, 178, 127-141. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.006>
- Joly D., Nilsen L., Fury R., Elvebakk A., Brossard T., 2003. Temperature interpolation at a large scale: test on a small area in Svalbard. *Int. J. Climatol.* 23, 1637-1654.
- Jones G.V., 2006. Climate and terroir: impacts of climate variability and change on wine. *Fine Wine Terroir - Geosci. Perspect.*, 1-14.
- Kang J., Tan J., Jin R., Li X., Zhang Y., Kang J., Tan J., Jin R., Li X., Zhang Y., 2018. Reconstruction of MODIS land surface temperature products based on multi-temporal information. *Remote Sens.*, 10, 1112. <https://doi.org/10.3390/rs10071112>
- Kloog I., Nordio F., Coull B.A., Schwartz J., 2014. Predicting spatiotemporal mean air temperature using MODIS satellite surface temperature measurements across the Northeastern USA. *Remote Sens. Environ.*, 150, 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.024>
- Le Roux R., de Rességuier L., Corpetti T., Jégou N., Madelin M., van Leeuwen C., Quénol H., 2017a. Comparison of two fine scale spatial models for mapping temperatures inside winegrowing areas. *Agric. For. Meteorol.*, 247, 159-169.
- Le Roux R., De Rességuier L., Katurji M., Zawar-Reza P., Sturman A., Van Leeuwen C., Quénol H., 2017b. Analyse multiscalaire de la variabilité spatiale et temporelle des températures à l'échelle des appellations viticoles de Saint-Émilion, Pomerol et leurs satellites. *Climatologie*. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1243>
- Le Roux R., Katurji M., De Rességuier L., Sturman A., Van Leeuwen C., Parker A., Trought M., Quénol H., 2016. *A fine scale approach to map bioclimatic indices using and comparing dynamical and geostatistical methods*. Terroir Congress, Oregon, 6p.
- Madelin M., 2004. *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : modélisations spatiales aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air*. Thèse de doctorat, Paris 7, 327p.

- Marchand N., 2017. *Suivi de la température de surface du sol en zones de pergélisol Arctique par l'utilisation de données de télédétection satellite assimilées dans le schéma de surface du modèle climatique canadien (CLASS)*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 191p.
- McMillin L.M., 1975. Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption. *J. Geophys. Res.*, 80(36), 5113-5117.
- Metz M., Andreo V., Neteler M., 2017. A new fully gap-free time series of land surface temperature from MODIS LST data. *Remote Sens.*, 9, 1333. <https://doi.org/10.3390/rs9121333>
- Meyer H., Katurji M., Appelhans T., Müller M., Nauss T., Roudier P., Zawar-Reza P., 2016. Mapping daily air temperature for Antarctica based on MODIS LST. *Remote Sens.*, 8, 732. <https://doi.org/10.3390/rs8090732>
- Mostovoy G.V., King R.L., Reddy K.R., Kakani V.G., Filippova M.G., 2006. Statistical estimation of daily maximum and minimum air temperatures from MODIS LST data over the State of Mississippi. *GIScience Remote Sens.*, 43, 78-110. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.43.1.78>
- Mutiibwa D., Strachan S., Albright T., 2015. Land surface temperature and surface air temperature in complex terrain. *IEEE Journals & Magazine [WWW Document]*. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7243313/>
- Noi P., Kappas M. & Degener J., 2016. Estimating daily maximum and minimum land air surface temperature using MODIS land surface temperature data and ground truth data in Northern Vietnam. *Remote Sens.*, 8(12), 1002. <https://doi.org/10.3390/rs8121002>
- Neethling E., 2016. *Adaptation de la viticulture au changement climatique: vers des stratégies à haute résolution*. Doctoral dissertation, Université Rennes 2.
- Ollat N. & Touzard J. M., 2014. Adaptation à long terme au changement climatique pour la viticulture et l'œnologie : un programme de recherche sur les vignobles français. *Revue des œnologues et des techniques vitivinicoles et œnologiques*, 41(152), 11-12.
- Parker A., Cortázar-Atauri I.G. de, Chuine I., Barbeau G., Bois B., Boursiquot J.-M., Cahurel J.-Y., Claverie M., Dufourcq T., Gény L., Guimberteau G., Hofmann R.W., Jacquet O., Lacombe T., Monamy C., Ojeda H., Panigai L., Payan J.-C., Lovelle B.R., Rouchaud E., Schneider C., Spring J.-L., Storchi P., Tomasi D., Trambouze W., Trought M., Leeuwen C. van, 2013. Classification of varieties for their timing of flowering and veraison using a modelling approach: A case study for the grapevine species *Vitis vinifera* L.. *Agric. For. Meteorol.*, 180, 249–264. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.06.005>
- Parker A., De Cortazar-Atauri I.G., Van Leeuwen C., Chuine I., 2011. General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L. *Aust. J. Grape Wine Res.* 17, 206–216.
- Quénol H., 2014. *Changement climatique et terroirs viticoles*. Lavoisier Tec&doc, 444p.
- Quénol H. & Bonnardot V., 2014. A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change : the “TERADCLIM” project. *Int. J. Vine Wine Sci.* 23-32.
- Quénol H. & Ollat N., 2015. Changement climatique : de modèles prédictifs mondiaux vers des méthodes d'adaptation à l'échelle de l'exploitation viticole. *Rev. Oenologues Tech. Vitivinic. Oenologiques*, 42, 7-8.
- Quénol H., 2017. Viticulture – experimentation or adaptation? In ‘Adaptating to Climate Change’, Thiebault S., Laville B. and Euzen A., ediSens, 333-340.
- Shi L., Liu P., Kloog I., Lee M., Kosheleva A. & Schwartz J., 2016. Estimating daily air temperature across the Southeastern United States using high-resolution satellite data: A statistical modeling study. *Environmental research*, 146, 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.12.006>

- Sismanidis P., Keramitsoglou I., Bechtel B. & Kiranoudis C., 2016. Improving the downscaling of diurnal land surface temperatures using the annual cycle parameters as disaggregation kernels. *Remote Sens.*, 9(1), 23. <https://doi.org/10.3390/rs9010023>
- Sohrabinia M., Zawar-Reza P., Rack W., 2015. Spatio-temporal analysis of the relationship between LST from MODIS and air temperature in New Zealand. *Theor. Appl. Climatol.*, 119, 567-583. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1106-2>
- Southey T.O., 2017. *Integrating climate and satellite remote sensing to assess the reaction of Vitisvinifera L. cv. Cabernet Sauvignon to a changing environment*. Thesis, Stellenbosch University, 293p.
- Sturman A., Zawar-Reza P., Soltanzadeh I., Katurji M., Bonnardot V., Parker A.K., Trought M.C., Quénol H., Le Roux R. and Gendig E. , 2017. The application of high-resolution atmospheric modelling to weather and climate variability in vineyard regions. *OENO One*, 51(2), 99-105.
- Van Leeuwen C. & Seguin G., 2006. The concept of terroir in viticulture. *Journal of wine research*, 17(1), 1-10.
- Vancutsem C., Ceccato P., Dinku T., Connor S.J., 2010. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sens. Environ.*, 114, 449-465. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.002>
- Wan Z., 2008. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products. *Remote Sens. Environ.*, 112(1), 59-74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.06.026>
- Wan Z., 2014. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sens. Environ.*, 140, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.027>
- Wan Z., Hook S., Hulley G., 2015. *MOD11A1 MODIS and MYD11A1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V006*. Distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://lpdaac.usgs.gov/>
- Wan Z. & Dozier J., 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 34, 892-905. <https://doi.org/10.1109/36.508406>
- Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z.-L., 2004. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature. *Int. J. Remote Sens.*, 25, 261-274.
- Williamson S.N., Hik D.S., Gamon J.A., Kavanaugh J.L., Flowers G.E., 2014. Estimating temperature fields from MODIS land surface temperature and air temperature observations in a sub-arctic alpine environment. *Remote Sens.*, 6, 946-963. <https://doi.org/10.3390/rs6020946>
- Winkler A.J., Cook J., Kliwer W., Lider L., 1974. *General Viticulture*, University of California Press, Berkeley, 710p.
- Xia H., Chen Y., Zhao Y., Chen Z., Xia H., Chen Y., Zhao Y., Chen Z., 2018. Regression-then-fusion or fusion-then-regression? A theoretical analysis for generating high spatiotemporal resolution Land Surface Temperatures. *Remote Sens.*, 10, 1382. <https://doi.org/10.3390/rs10091382>
- Zhao W., Duan S. B., Li A. & Yin G., 2019. A practical method for reducing terrain effect on land surface temperature using random forest regression. *Remote Sensing of Environment*, 221, 635-649. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.008>
- Zeng L., Wardlow B., Tadesse T., Shan J., Hayes M., Li D. & Xiang D., 2015. Estimation of daily air temperature based on MODIS land surface temperature products over the corn belt in the US. *Remote Sens.*, 7(1), 951-970. <https://doi.org/10.3390/rs70100951>

Zhang L., Huang J., Guo R., Li X., Sun W., Wang X., 2013. Spatio-temporal reconstruction of air temperature maps and their application to estimate rice growing season heat accumulation using multi-temporal MODIS data. *J. Zhejiang Univ. Sci.*, B14, 144-161. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1200169>

Zhu W., Lü A., Jia S., 2013. Estimation of daily maximum and minimum air temperature using MODIS land surface temperature products. *Remote Sens. Environ.*, 130, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.034>