



HAL
open science

**Caractérisation de la viticulture irriguée par
télédétection en contexte de changement climatique :
application aux vignobles de la province de Mendoza en
Argentine**

Perrine Loussert

► **To cite this version:**

Perrine Loussert. Caractérisation de la viticulture irriguée par télédétection en contexte de changement climatique : application aux vignobles de la province de Mendoza en Argentine. Géographie. Université Rennes 2, 2017. Français. NNT : 2017REN20052 . tel-01968041

HAL Id: tel-01968041

<https://theses.hal.science/tel-01968041>

Submitted on 2 Jan 2019

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

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



**UNIVERSITE
BRETAGNE
LOIRE**

THESE / UNIVERSITE RENNES 2

sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

Mention : Géographie

Ecole doctorale Sciences Humaines et Sociales

présentée par

Perrine Loussert

préparée à l'Unité Mixte de Recherche 6554 CNRS

Université Rennes 2

Littoral Environnement Télédétection et Géomatique

Thèse soutenue le 12 décembre 2017

devant le jury composé de :

Emmanuelle VAUDOUR

Maître de conférences à AgroParisTech / *rapporteur*

Agnès BEGUE

Directrice de recherche au CIRAD Montpellier / *rapporteur*

Pierre-Louis FRISON

Maître de conférences à l'Université Paris-Est / *examinateur*

Vincent DUBREUIL

Professeur à l'Université Rennes 2 / *examinateur*

Samuel CORGNE

Professeur à l'Université Rennes 2 / *directeur de thèse*

Hervé QUENOL

Directeur de recherche au CNRS / *co-directeur de thèse*

**Caractérisation de la
viticulture irriguée par
télédétection en contexte
de changement climatique :
Application aux vignobles
de la province de Mendoza
en Argentine**

REMERCIEMENTS

Dans cette belle aventure, parfois solitaire, qu'est la thèse, de nombreuses personnes contribuent de près ou de loin à son bon déroulement. Je tiens à toutes les remercier ici.

Tout d'abord, je vais commencer par les deux personnes sans lesquelles ce projet n'aurait jamais pu voir le jour. Je remercie donc chaleureusement mes deux directeurs de thèse Samuel Corgne et Hervé Quénot pour leur confiance, leur écoute et leurs nombreux encouragements lors des périodes de doutes et aussi la liberté de travail qu'ils m'ont accordée. Je suis ravie d'avoir mené ce projet à vos côtés et d'avoir pu relier deux thématiques de recherche du laboratoire.

Samuel, merci d'avoir dirigé cette thèse et surtout merci d'avoir fait de moi une radariste convaincue!

Hervé, je te remercie d'avoir répondu positivement à ma demande de stage en M2, de m'avoir initiée à la climatologie viticole et de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur les vignobles argentins.

Je tiens également à remercier Emmanuelle Vaudour, Agnès Bégué, Pierre-Louis Frison et Vincent Dubreuil qui ont accepté de participer à mon jury de thèse et d'évaluer mes travaux.

Je remercie aussi Eric Pottier et Grégoire Mercier, membres de mon comité de thèse, qui ont aiguillé et encouragé mes recherches.

Je souhaite dire merci à un chercheur extérieur, Frédéric Baup, qui a beaucoup contribué à ce travail de thèse. Fred, merci pour ton engouement pour mes recherches, tes critiques constructives, ton aide et ta curiosité scientifique.

Cette aventure a commencé par un séjour en Argentine pour réaliser la base de données de terrain de la thèse. Les prochaines lignes seront donc en espagnol. Las primeras personas que quiero agradecer son los ingenieros de la cátedra de Meteorología Agrícola

de la Facultad de Ciencias Agrarias de Mendoza. Gracias a Alejandro para tu apoyo, tu amistad, tu ayuda en las salidas en el campo. Siguen Adriana, Regina, Carlos y Mario. Ustedes hicieron de la cátedra mi laboratorio durante todas mis estancias en Mendoza. ¡ Gracias a todos!

El otro instituto que fue primordial en este trabajo es el INV. Quiero agradecer Carla Aruani y Alejandro Marianetti que me apoyaron en este proyecto provediandome contactos y ayuda. Quiero tambien agradecer Bruno, Sebastian, Fanny, Mario, Gabriel y Hugo que me acompañeron al campo varias veces.

Quiero tambien decir gracias a los ingenieros agronomos de las cuatro bodegas de vino : Matias, Alejandro, Pamela y Matthieu y Emiliano.

Al nivel personal quiero agradecer Fernanda y Ernesto para toda la buena onda y siempre recibirme en su casa. Gracias a mis amigas Argentinas Florencia, Annabel y Nathy, para su buen humor, para ayudarme mejorar mi español y haber enseñandome mucho. Je remercie mes amies françaises d'Argentine : Adeline et Emilie et Clara. Merci d'avoir contribué à mon intégration et pour tous les bons moments passés ensemble. Emilie, je tiens vraiment à te remercier tout particulièrement pour ton amitié, pour les si bons moments partagés à chacun de mes séjours et, pour ne choisir qu'un souvenir, nos demi-kilos de glace hebdomadaires à Helados de Chacras pour refaire le monde et trouver l'accord de saveurs parfait.

Je tiens ensuite à remercier tous les membres de LETG-Rennes, chercheurs, enseignants chercheurs, ingénieurs et administratifs pour leur sympathie et tous les moments partagés au détour d'un couloir, pendant les repas le midi ou autour d'un verre... C'est grâce à vous tous que le laboratoire possède une ambiance aussi chaleureuse et dynamique.

Plus particulièrement je tiens à remercier Jean, pour sa bonne humeur constante, les dimanches bricolage, les nabucettes quotidiennes, les missions SODAR à Rennes et dans le val de Loire. J'espère qu'on pourra faire une cuvée de cidre un jour ensemble.

Ensuite, il y a tous les doctorants, post-docs et stagiaires avec qui j'ai partagé mon quotidien pendant ces trois années. Je remercie particulièrement Pauline, Xavier, Julie, Véronique, Edwige, Etienne, Renan, Amit, Igor et Solen pour leurs précieux conseils, leur aide pour certains cours et les nombreux bons moments partagés. Un remerciement particulier pour Véronique, qui a été bien plus qu'une voisine de bureau et pour nos nombreux skypes hasardeux sur le continent américain.

Je remercie aussi les "p'tits jeunes" : Julien, Arthur, Thibault, Fanny, Audrey, Florent pour leur bonne humeur et leur enthousiasme et je vous souhaite à tous une belle aventure de thèse.

Merci également à Clémence, Karel, Enzo, Carole, Inès, Charlotte, Chloé et Hélène qui ont partagé mon quotidien au labo pendant quelques temps. Une mention spéciale pour Charlotte et notre "danse des poils" et pour le club des choupicornes.

Enfin, je remercie mes deux "tricotines" Marianne et Adeline pour cette jolie amitié

que nous avons tissée, les nombreux catsittings, les soirées rhum-verveine... Bon courage pour la dernière ligne droite!!!

Je tiens à remercier mes amis d'enfance, de l'ENSAT, du DNO, de Toulouse et de Rennes qui ont toujours le bon mot pour remonter le moral et qui sont toujours présents à mes côtés. Un merci spécial pour Annabelle et ses relectures de la thèse.

Je remercie également ma famille pour leur soutien infaillible quels que soient mes choix et les défis à relever.

Pour terminer, "last but not the least", il y a celui qui m'accompagne depuis toutes ces années, qui m'a épaulée tous les jours malgré la distance et qui y a cru pour deux quand je n'y croyais plus. Mes remerciements vont bien au-delà de ce que je peux écrire ici..

Sommaire

Introduction générale	1
I Télédétection et viticulture : concepts et cadre de l'étude	7
1 La physiologie de la vigne et son contrôle	9
2 La télédétection et ses applications en viticulture	27
3 Site d'étude et données	41
II Analyse multi-échelle du climat des régions viticoles d'Argentine	65
Introduction	67
4 Caractérisation et évolution du climat des régions vitivinicoles d'Argentine	69
5 Variabilité spatiale des conditions agroclimatiques dans la province de Mendoza	83
III Caractérisation des vignobles de Mendoza par télédétection optique et radar	99
Introduction	101
6 Evaluation des images Pléiades en mode multispectral et panchromatique pour la détermination de l'orientation des rangs des vignobles	103
7 Potentiel des séries temporelles d'images optiques et radar pour le suivi de la croissance végétative	113
8 Potentiel des images optiques et radar pour la classification des pratiques culturales des vignobles	135

9 Estimation de l'évapotranspiration des vignobles à partir des séries d'images satellitaires optiques	157
Conclusion générale et perspectives	177
Bibliographie	183
Annexes	223
A Indices Bioclimatiques	225
B Calibration de l'équation de Hargreaves	227

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis la révolution industrielle au XIX^{ème} siècle, les émissions de gaz à effet de serre augmentent et accentuent le réchauffement climatique en cours. Cette augmentation des températures observée de manière globale a des conséquences sur les écosystèmes et notamment la phénologie des êtres vivants (Parmesan et Yohe, 2003, Root *et al.*, 2003, Richardson *et al.*, 2013). Cette prise de conscience de l'impact de l'homme sur l'environnement et des premiers effets du changement climatique s'est accompagnée du développement de la recherche scientifique pour quantifier les changements en cours et élaborer des scénarios de l'évolution à moyen et long terme du climat (IPCC, 2014). Ces travaux constituent une base de connaissances nécessaire pour la mise en place de stratégies d'adaptation des écosystèmes et d'atténuation du changement climatique par la réduction de l'impact de l'homme sur l'environnement.

Les effets du changement climatique sont également observés sur les cultures agricoles. Les cultures pérennes comme la vigne en constituent un excellent marqueur et sont très sensibles aux variations de températures. C'est pourquoi, de nombreux travaux ont été réalisés afin de mieux comprendre la relation climat-vigne et de déterminer les besoins des différents cépages plantés à travers le monde (Huglin, 1978, Tonietto et Carbonneau, 2004, Jones *et al.*, 2005a, Parker *et al.*, 2013). Ils ont abouti à la détermination des besoins thermiques des différentes variétés et des intervalles de températures moyennes de la saison végétative qui assurent un développement optimal. En effet, la vigne est sensible aux variations du climat et son cycle physiologique en est directement impacté. Sur le plan viticole et oenologique, l'augmentation des températures s'accompagne d'une avancée des stades phénologiques, d'une augmentation de la teneur en alcool des vins et d'une modification des profils sensoriels des vins (Jones *et al.*, 2005a, Mira de Orduña, 2010, Fraga *et al.*, 2012). C'est pourquoi de nombreux travaux ont modélisé l'évolution du climat des régions viticoles des cinquante dernières années (Aruani, 2011, Briche, 2011, Bonnefoy, 2013, Neethling, 2016). Ceci permet d'identifier, pour un contexte viticole et climatique donné, la plage thermique potentielle d'adaptation de la vigne au changement climatique. De plus, les scénarios du changement climatique ont été appliqués aux différentes régions viticoles et à plusieurs échelles afin de déterminer les évolutions probables du climat

des régions viticoles mondiales actuelles (Schultz, 2000, Webb *et al.*, 2007, Santos *et al.*, 2011, Fraga *et al.*, 2012, Moriondo *et al.*, 2013, Quénol, 2014). L'analyse croisée des caractéristiques climatiques actuelles et futures d'une région viticole et des choix variétaux réalisés contribue à évaluer les stratégies possibles d'adaptation à court et moyen termes.

Cependant, toutes les régions viticoles n'ont pas la même marge d'adaptation au changement climatique sur le plan thermique. L'Argentine est le 5^{ème} producteur de vins mondial (Canziani et Scarel, 2010). La principale province productrice de vins, Mendoza, présente un climat continental semi-aride caractérisé par des températures élevées en été et une pluviométrie faible d'environ 200 mm par an. Sur le plan thermique, les conditions de culture correspondent déjà à la zone chaude à très chaude des classifications actuelles existantes des régions viticoles (Tonietto et Carbonneau, 2004, González *et al.*, 2009). De plus, sans l'irrigation, le développement de la viticulture n'aurait pas été possible. Les conditions de culture dans la vigne en Argentine sont proche des extrêmes sur les plans thermiques et hydriques. Ainsi, une augmentation de 1,5°C à 3°C de la température moyenne à l'horizon 2100, estimées suivant les scénarios RCP 4.5 et 8.5 (Barros *et al.*, 2015), n'est pas favorable à la poursuite de la culture de la vigne dans de bonnes conditions. De plus, avec les mêmes scénarios, les modèles prévoient une augmentation des précipitations estivales dans cette région et une diminution des précipitations hivernales dans les Andes (Chou *et al.*, 2014, Barros *et al.*, 2015). L'augmentation des précipitations peut sembler bénéfique pour l'agriculture. Cependant, à Mendoza, la majorité des précipitations estivales sont sous forme orageuse régulièrement accompagnées de grêle qui causent des dommages importants chaque année (Maldonado, 2001, Mezher *et al.*, 2012). En viticulture, la saison estivale comprend la période de maturation des raisins pour lesquels un stress hydrique modéré est favorable pour la production de raisins et de vins de qualité. Agosta *et al.* (2010) ont montré que les fortes précipitations estivales à Mendoza sont associées à des rendements plus faibles. De plus, la diminution des précipitations hivernales dans les Andes signifie moins de neige en hiver et moins d'eau dans les fleuves qui constituent la source d'eau principale pour la population, l'irrigation des cultures et les activités industrielles. La gestion de l'eau est donc un enjeu majeur dans l'oasis de Mendoza (Lavie, 2009). La viticulture contribue également au dynamisme économique de la province et c'est une activité de tradition car elle s'y développe depuis le XV^{ème} siècle. Ainsi, le maintien de cette culture dans la région et son adaptation au changement climatique est nécessaire à court et moyen termes.

Les différentes modélisations du changement climatique en Argentine ont été réalisées à l'échelle régionale (Barros *et al.*, 2015, Cabré *et al.*, 2016). Néanmoins, à l'échelle locale, les caractéristiques régionales du climat sont accentuées ou atténuées notamment par la topographie, l'exposition et la position des vignobles sur les pentes. Or les variations topoclimatiques peuvent être supérieures à la variabilité régionale du climat (Quénol, 2014). La compréhension de la source de variabilité des températures et des précipitations ainsi que les conséquences bioclimatiques peut permettre de définir les conditions locales

en mesure d'atténuer les températures élevées et les précipitations estivales. Elle est donc un des leviers pour définir les stratégies d'adaptation à moyen terme de la viticulture mendocienne.

L'autre levier concerne l'optimisation et l'adaptation des pratiques culturales. Les évolutions de la viticulture sont réalisées à l'échelle de l'homme qui cultive la vigne. De plus, les viticulteurs adaptent constamment leurs pratiques aux caractéristiques météorologiques annuelles et en fonction de leurs objectifs de production. En effet, en contexte de raréfaction de la ressource en eau, l'optimisation des pratiques d'irrigation est nécessaire. En 2002, encore 91% des vignobles étaient irrigués avec la méthode traditionnelle gravitaire (INDEC, 2002). Bien qu'étant un mode d'irrigation traditionnel des oasis argentines, ce mode d'irrigation ne permet pas une répartition optimale de l'eau sur les parcelles et l'efficacité d'application de cette méthode est de seulement 60% (Morábito *et al.*, 2007). De plus, aucun système de suivi des besoins en eau des cultures adapté au contexte local n'est mis en place à Mendoza. Ainsi, le suivi de la croissance de la vigne et de ses besoins en eau est une perspective intéressante afin d'améliorer la gestion de l'irrigation.

Dans ce contexte d'adaptation des pratiques à l'échelle locale, la télédétection satellitaire constitue un outil pertinent de part la variété des sources de données disponibles et de leurs résolutions spatiales, spectrales et temporelles. Les images satellitaires optiques et radar sont couramment utilisées en agriculture (McNairn et Brisco, 2004, Atzberger, 2013, Steele-Dunne *et al.*, 2017). L'utilisation de la télédétection pour optimiser les stratégies d'irrigation a également été étudié (Belmonte *et al.*, 2005, Vuolo *et al.*, 2015). De plus, l'emploi en viticulture de la télédétection pour caractériser les vignobles se développe depuis deux décennies (Vaudour *et al.*, 2014b, Hall, 2016). De nombreux travaux portent sur le suivi de l'expression végétative de la vigne, des rendements, et du potentiel des raisins (Johnson *et al.*, 2003, Bramley, 2005, Cunha *et al.*, 2010a, Fraga *et al.*, 2014). La majorité des travaux est conduite à deux échelles : l'échelle régionale pour étudier de manière globale une région viticole et l'échelle de la parcelle pour caractériser les hétérogénéités intra-parcellaires dans le contexte de la viticulture de précision. Néanmoins, très peu d'études sont menées à une échelle intermédiaire pour spatialiser l'information sur plusieurs lots de parcelles. Or, la conduite de la vigne en rangs et la diversité des pratiques culturales possibles introduisent une source de variation importante des paramètres dérivés des données de télédétection. L'identification de ces éléments et du biais introduit sur les données télédétectées est un champ d'investigation à aborder pour travailler à l'échelle d'un paysage viticole.

La problématique de cette thèse porte sur l'évaluation des images satellitaires optiques et radar pour la caractérisation des vignobles de Mendoza dans le contexte de la définition de stratégies d'adaptation au changement climatique à court et moyen termes. Cette thèse s'inscrit dans le cadre du programme LIFE ADVICLIM qui vise à améliorer la gestion locale des vignobles dans un objectif d'adaptation à moyen-terme au changement climatique. Elle s'inscrit également d'un partenariat scientifique avec le CNES (Centre National

d'Etudes Spatiales) et la DLR (Agence Spatiale Allemande). Les principales questions de recherche auxquelles elle vise à répondre sont les suivantes : Quelles sont les trajectoires d'évolution du climat en Argentine et les facteurs d'atténuation à l'échelle locale ? Dans ce contexte, quel est le potentiel des images satellitaires optiques et radar pour la cartographie et le suivi de la croissance de la vigne et des pratiques culturales d'intérêt ? Ces pratiques culturales concernent la protection des vignobles contre la grêle et la modernisation des systèmes d'irrigation. Enfin, les données satellitaires peuvent-elles contribuer à évaluer les besoins en eau de la vigne et aboutir à une meilleure gestion de l'eau en viticulture ? L'objectif principal de cette thèse vise ainsi à évaluer les données satellitaires à haute et très haute résolution spatiale en optique et radar pour une caractérisation fine des vignobles de Mendoza dans le contexte du changement climatique.

Afin de répondre à ces questions, cette thèse s'organise en trois parties et le travail est mené à trois échelles (Figure 1). La première partie présente le cadre général de l'étude à travers un état de l'art sur la physiologie de la vigne, les données de télédétection et le contexte de leur utilisation en viticulture. Puis, une présentation du site d'étude ainsi que des données de la thèse y sont détaillés. Ensuite, la deuxième partie concerne les évolutions du climat régional en Argentine et sa variabilité intra-régionale. Elle est divisée en deux chapitres :

- Le chapitre 4 analyse l'évolution du climat dans les principales régions viticoles d'Argentine sur les cinquante dernières années. Ces évolutions sont confrontées aux choix culturaux réalisés dans chacune des régions et leur possibilités d'adaptation.
- Le chapitre 5 détermine les sources de variabilités intra-régionales des indices bioclimatiques à Mendoza. Ce chapitre détermine les conditions agroclimatiques locales de la production vitivinicole dans la principale province productrice d'Argentine. Il vise à déterminer les conditions topographiques et géographiques qui optimisent le potentiel qualitatif de la production dans la province.

Les travaux de la troisième partie sont menés à l'échelle locale d'un district viticole de la province de Mendoza. Elle est divisée en quatre chapitres :

- Le chapitre 6 concerne l'évaluation des données Pléiades pour la détermination de l'orientation des rangées de vignes. Les travaux sont menés à deux résolutions spatiales afin de déterminer le niveau de résolution nécessaire à une estimation précise de l'orientation des rangs.
- Le chapitre 7 évalue les séries temporelles d'images optiques et radar pour le suivi de la croissance végétative des parcelles de vigne. Comme l'analyse est menée sur plusieurs vignobles, les signatures temporelles des vignobles sont tout d'abord analysé au regard des pratiques culturales pouvant bruite le plus les variables de télédétection.
- Le chapitre 8 porte sur l'évaluation des données satellitaires optiques et radar pour la cartographie de certaines pratiques culturales des vignobles. L'analyse est focalisée sur la détection de la gestion des inter-rangs combinée à l'équipement des

rangs en filets anti-grêle et sur la détection des modes d'irrigation.

- Enfin le chapitre 9 évalue les performances des données satellitaires optiques pour l'estimation de l'évapotranspiration de la vigne dans l'objectif de spatialiser les besoins en eau de la vigne.

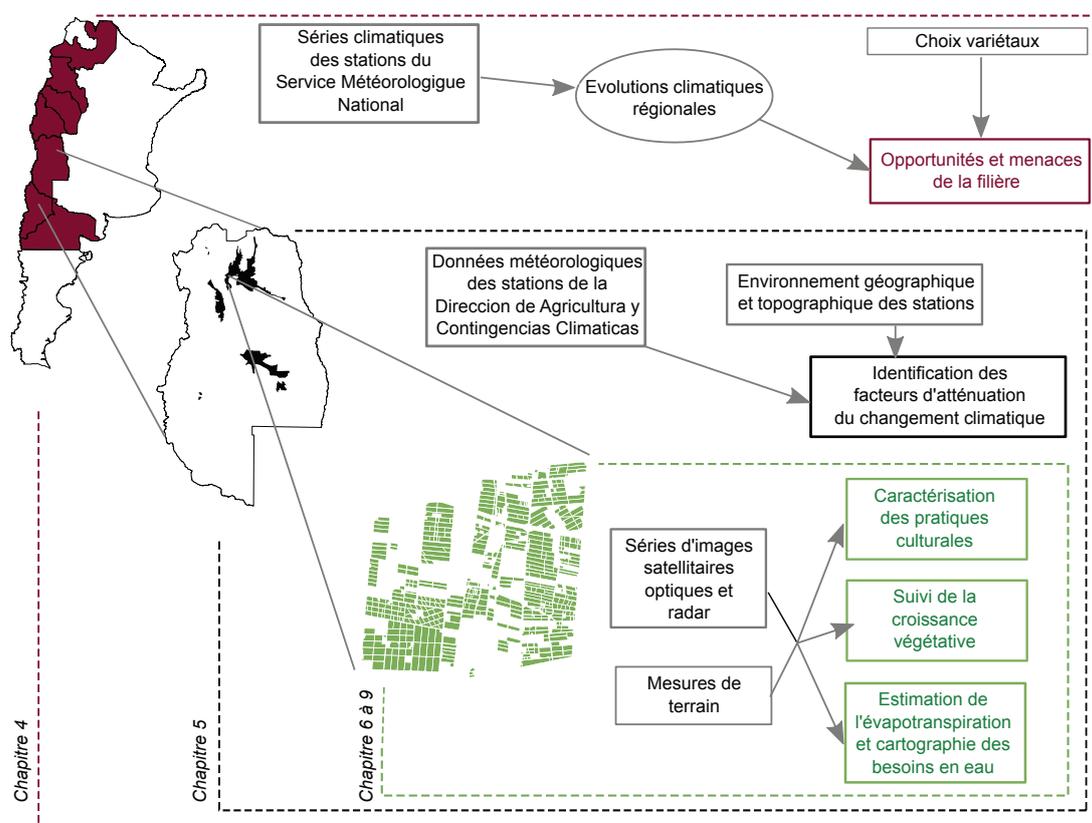


Figure 1 – Organisation générale de la thèse

PARTIE I

Téledétection et viticulture : concepts et cadre de l'étude

CHAPITRE 1

La physiologie de la vigne et son contrôle

Sommaire

1.1	Introduction	10
1.2	Présentation générale de la vigne	10
1.3	Cycle phénologique de la vigne	11
1.3.1	La dormance, le débourrement et la croissance végétative	11
1.3.2	La floraison et la nouaison	12
1.3.3	La véraison	12
1.3.4	La phase de maturation	13
1.4	Facteurs climatiques de contrôle du cycle de développement	14
1.4.1	La température	14
1.4.2	Le rayonnement solaire	15
1.4.3	Les précipitations	15
1.4.4	Le vent	16
1.4.5	Les indices bioclimatiques	16
1.5	Influence des caractéristiques du sol et de la géologie sur la phénologie et le potentiel qualitatif	18
1.5.1	Rôle de la géologie et de la géomorphologie	18
1.5.2	Rôle des caractéristiques du sol	18
1.6	Le rôle des pratiques culturales	19
1.6.1	Les pratiques pérennes	19
1.6.2	L'orientation des rangs	21
1.6.3	Les pratiques pluri-annuelles	22
1.6.4	Les pratiques annuelles	23
1.7	La notion de terroir et d'échelle spatiale de la viticulture	23
1.8	Conclusion	25

1.1 Introduction

La vigne est une culture pérenne cultivée sur tous les continents. Depuis l'Antiquité, cette culture s'est étendue et la répartition actuelle des vignobles est issue de différents facteurs historiques, géographiques et sociaux (Vidal, 2001). La production de raisins de qualité est le résultat de l'interaction entre le climat, la topographie, le sol et l'intervention humaine au travers des pratiques culturelles. Cela réfère à la notion de terroir. L'OIV (Organisation Internationale de la Vigne et du vin) en propose une définition consensuelle en 2010 :

"Le terroir vitivinicole est un concept qui se réfère à un espace sur lequel se développe un savoir collectif des interactions entre un milieu physique et biologique identifiable et les pratiques vitivinicoles appliquées, qui confèrent des caractéristiques distinctives aux produits originaires de cet espace. Le terroir inclut des caractéristiques spécifiques du sol, de la topographie, du climat, du paysage et de la biodiversité".

Dans un contexte de changement climatique, la connaissance des différents éléments du terroir et de leurs interactions apparaît nécessaire afin de définir les leviers d'adaptation. Dans ce cadre, ce chapitre a pour but de présenter un état des connaissances sur le cycle physiologique de la vigne et ses différents facteurs de contrôle. Comme l'étude des systèmes viticoles a une forte dimension géographique, les différentes échelles spatiales de la viticulture seront également présentées.

1.2 Présentation générale de la vigne

La vigne est une liane appartenant à la famille des *Vitaceae* et au genre *Vitis* (Vivier *et al.*, 2000). Elle est cultivée pour ses raisins dont on commercialise les grappes, le jus, ou le vin. Plusieurs familles d'espèces de vignes sont répertoriées dont la plus répandue est *Vitis Vinifera* (Antcliff, 1988). Les cépages dits "nobles" appartiennent à cette espèce car elle présente des qualités organoleptiques adaptées à la production de raisins de cuve (Reynier, 2011). On retrouve également *Vitis Riparia*, *Vitis Labrusca*, *Vitis Rupestris* dont sont issus par croisement avec *Vitis Vinifera* les cépages hybrides et les porte-greffes résistants aux phylloxera (Vivier *et al.*, 2000). En effet à la fin du 19^{ème} siècle, le phylloxera, puceron ravageur originaire des Etats-Unis, a dévasté le vignoble européen en attaquant les racines des vignes de l'espèce *vinifera* (This *et al.*, 2006). La solution la plus efficace a été de greffer les cépages européens sensibles au phylloxera sur un système racinaire résistant issu des espèces américaines, les porte-greffes. Avec cette technique de nombreux croisements ont été réalisés afin d'obtenir un large panel de porte-greffes permettant également d'adapter le système racinaire au type de sol et faire correspondre la production aux objectifs des viticulteurs.

1.3 Cycle phénologique de la vigne

La vigne est une culture pérenne qui réalise un cycle de développement et de reproduction complet chaque année. Le cycle de développement de la vigne comprend un cycle végétatif qui vise à assurer le développement de la souche et du système racinaire. Il produit de manière visible la canopée de la vigne constituée de rameaux et de feuilles. Le cycle reproducteur se déroule en parallèle du cycle végétatif. Son objectif est d'assurer la pérennité de l'espèce en produisant des graines, les pépins, contenus dans les raisins. Le terme phénologie correspond à l'apparition d'événements annuels périodiques du monde vivant déterminée par l'évolution saisonnière du climat. Plusieurs auteurs ont cherché à déterminer les stades clés de la phénologie de la vigne comme Baggiolini (1952) et Eichhorn et Lorenz (1977) dont les stades phénologiques de la figure 1.1 sont nommés suivant leurs classifications. Les lettres correspondent à celle de Baggiolini et les chiffres à celle de d'Eichhorn et Lorentz. Les mois sont ceux correspondant à l'hémisphère Sud car cette thèse porte sur des vignobles de cet hémisphère.

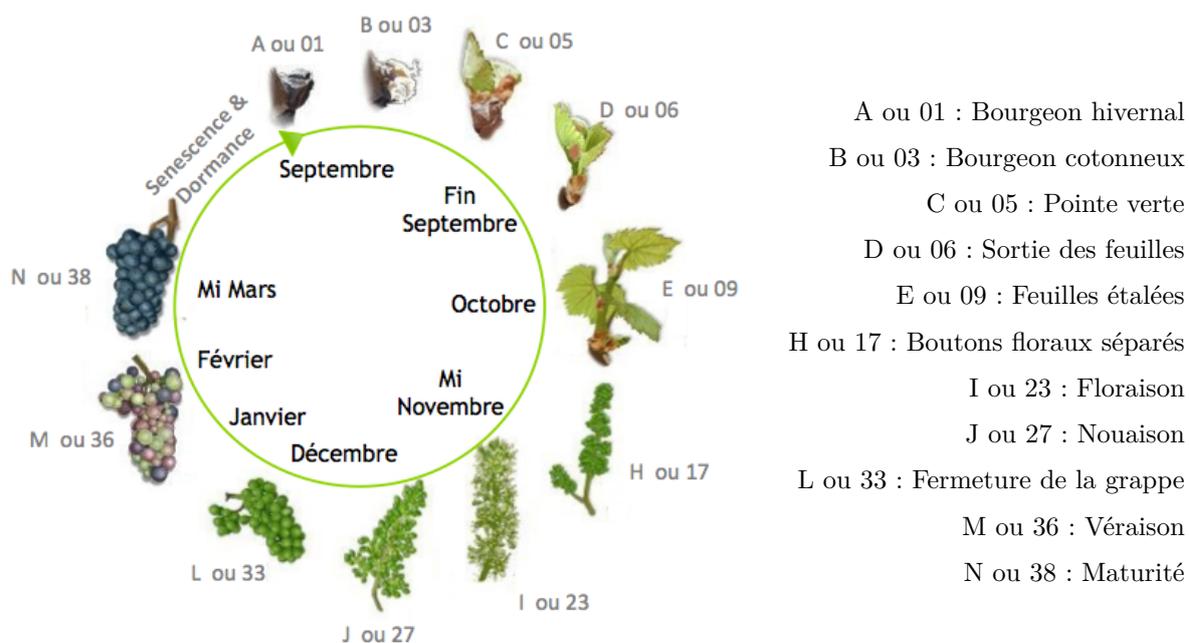


Figure 1.1 – Les stades principaux du développement de la vigne

1.3.1 La dormance, le débourrement et la croissance végétative

En hiver, la vigne est en dormance. Ce processus physiologique de latence protège les tissus contre le gel avant le cycle végétatif suivant. En effet, des dommages sur les bourgeons peuvent mettre en péril la production de l'année suivante. Au printemps, la dormance est levée et le cycle végétatif commence. La levée de dormance se fait suite à l'accumulation d'énergie grâce à la chaleur durant l'hiver et au début du printemps (Pouget, 1968). Elle est donc intimement liée à la température environnante. Les bourgeons

vont ensuite éclore et les premières feuilles se développent. Le débourrement s'étend des stades A à C. Le stade pointe verte (C) sert de référence pour la date de débourrement. Les bourgeons qui éclosent et les premières pousses vont être très sensibles au gel (De-reuddre *et al.*, 1993). Puis la croissance végétative va continuer jusqu'au milieu de l'été. Les rameaux se développent ainsi que les feuilles. Ces dernières vont assurer la majeure partie de la photosynthèse.

1.3.2 La floraison et la nouaison

Le développement des inflorescences commence juste après le débourrement et s'étend jusqu'à la floraison. Les vignes ont atteint le stade de floraison quand 50% des inflorescences sont matures. Il faut noter que les vignes cultivées pour leur raisin sont hermaphrodites et majoritairement autogames (This *et al.*, 2006). Au cours de ce stade, le pollen est libéré par les étamines et va ensuite féconder les ovaires. La fécondation est autogame dans la plupart des cas, mais le vent peut permettre une fécondation allogame entre plusieurs ceps (Blouin, 2007). Ce stade phénologique est crucial pour la détermination du rendement, car le nombre d'inflorescences fécondées détermine le rendement potentiel. La floraison intervient au début de l'été et lorsque la fécondation échoue on parle de coulure. Certains cépages y sont plus sensibles que d'autres. Le Malbec fait partie des cépages sensibles (Galet, 2000). Les conditions agroclimatiques au moment de la floraison sont déterminantes pour le bon déroulement de la fécondation. Lorsque la fécondation est réussie, les baies vont commencer à se développer, c'est la nouaison. Lorsque le développement des baies est hétérogène sur la grappe, suite à une coulure partielle, on parle de millerandage.

1.3.3 La véraison

Suite à la floraison et à la nouaison, les baies de raisin se développent tout d'abord en taille. Cette étape définit le nombre de cellules de chaque baie ainsi que leur acidité initiale. Ensuite, le métabolisme des vignes s'oriente vers la maturation des pépins qui, d'un point de vue biologique, garantissent la survie de l'espèce. Ces modifications vont entraîner l'accumulation de nouveaux composés dans les baies notamment du fructose, du glucose et des polyphénols. Ces derniers vont modifier la couleur des baies. Lorsque la moitié des baies a changé de couleur le stade de véraison est atteint. La véraison va durer quelques heures pour une baie mais peut atteindre jusqu'à 15-20 jours pour une parcelle (Blouin, 2007). Ce stade phénologique marque également l'arrêt de la croissance végétative et le début de la phase d'aoûtement caractérisée par la lignification progressive des rameaux, puis la sénescence des feuilles.

1.3.4 La phase de maturation

Enfin, la dernière phase du cycle est la maturation des raisins (Figure 1.2). Après la véraison, les composés continuent de s'accumuler dans les baies. Parmi les composés impliqués dans la détermination de la qualité et du potentiel des raisins sont retrouvés les sucres, les acides majoritairement composés de l'acide tartrique et l'acide malique, et les polyphénols (pour les raisins rouges). L'accumulation des sucres est directement liée au degré d'alcool après fermentation (Jackson, 2008). Les polyphénols comprennent les anthocyanes qui seront responsables de la couleur du vin et les tanins qui jouent un rôle dans la structure du vin. Une diminution de la teneur en acides, en particulier de l'acide malique, est observée alors que l'acide tartrique demeure relativement stable. La diminution de la teneur en acide malique dépend de la température (Kliewer, 1971, Buttrose *et al.*, 1971, Huglin et Schneider, 1998). Cette phase s'accompagne d'une augmentation de la taille des baies par augmentation de la taille des cellules. Cette dernière étape du cycle phénologique avant les vendanges dure en moyenne de 35 à 45 jours après la véraison. L'équilibre du vin produit et son potentiel organoleptique dépendent du niveau de maturité atteint et de l'équilibre entre le sucre et l'acidité (Beelman et Gallander, 1979).

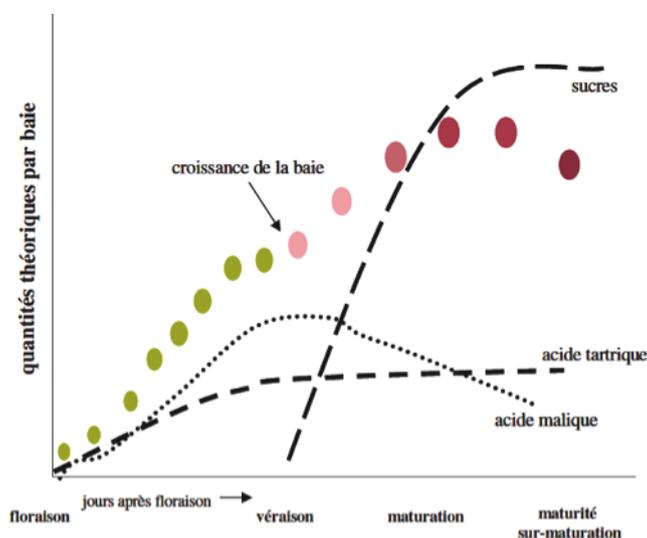


Figure 1.2 – Evolution des composants des baies durant la phase de maturation (Deloire, 2007)

1.4 Facteurs climatiques de contrôle du cycle de développement

1.4.1 La température

La température va en grande partie déterminer le cycle de développement de la vigne (Carbonneau *et al.*, 2007). La croissance a lieu grâce à la photosynthèse. Dans des conditions optimales de luminosité et d'alimentation hydrique, la photosynthèse augmente à partir de 10°C de manière linéaire, se stabilise entre 25°C et 30°C puis décroît pour s'annuler vers 40°C. Donc la température de 10°C est la température limite inférieure de la croissance, c'est le zéro de végétation (Huglin et Schneider, 1998). De plus, la croissance n'a lieu que lorsque la photosynthèse est supérieure à la respiration. Cette dernière augmente avec la température. Ainsi, la croissance va augmenter en suivant la courbe de l'activité photosynthétique jusqu'à l'optimum puis ralentir (Downey *et al.*, 2006, Keller, 2010).

Lors de la deuxième partie du cycle phénologique, à partir de la véraison, la croissance végétative est terminée. Cette partie du cycle de développement est moins dépendante de la température (Winkler, 1974). Cependant, la température reste une variable déterminante dans le processus de maturation des raisins. L'accumulation des sucres dans les baies, qui sont des produits de la photosynthèse, augmente avec la température jusqu'à son seuil d'inhibition (Coombe et McCarthy, 2000, Ribéreau-Gayon *et al.*, 2006, Jackson, 2008). Des températures élevées favorisent la diminution de l'acide malique par augmentation de la respiration car il est consommé durant la respiration (Keller, 2015). Concernant, les anthocyanes dont dépend la couleur des vins rouges, leur synthèse est favorisée par des températures diurnes comprises entre 20°C et 25°C associées à des températures nocturnes inférieures à 15°C. Ces dernières vont également favoriser la synthèse des composés aromatiques. Mais des températures dépassant les 35°C vont limiter l'accumulation des anthocyanes (Mori *et al.*, 2007).

Les températures extrêmes ont également des effets sur la vigne (Huglin et Schneider, 1998). En hiver, des températures inférieures à -15°C ou -20°C vont provoquer des dommages sur les bourgeons mais peuvent également entraîner la mort des souches (Dami *et al.*, 2012). Les températures minimales inférieures à 0°C (en particulier celles inférieures à -2.5°C) en début de cycle végétatif vont engendrer de forts risques de gelées des jeunes pousses (Reynier, 2011, Poling, 2008). Le gel des jeunes pousses induit un fort risque de gel des bourgeons primaires et secondaires avec des répercussions sur la production de l'année et la suivante (Jackson, 2008). Durant la seconde partie du cycle, des températures maximales supérieures à 35°C vont perturber la photosynthèse, inhiber la production de pigments, retarder l'accumulation des sucres et dessécher les grappes partiellement ou complètement (Greer et Weston, 2010, Webb *et al.*, 2010). Ceci correspond à l'échaudage. Ce risque est particulièrement important dans les régions au climat chaud.

1.4.2 Le rayonnement solaire

La vigne est sensible aux variations d'énergie lumineuse car c'est grâce au rayonnement solaire qu'a lieu la photosynthèse (Smart *et al.*, 1988, Huglin et Schneider, 1998). Cette dernière va augmenter jusqu'à un tiers de la luminosité enregistrée pour une journée ensoleillée (Kriedemann et Smart, 1971). Le rayonnement solaire a aussi un rôle dans les processus physiologiques initiés par la lumière comme l'initiation des inflorescences (Vasconcelos *et al.*, 2009) et la synthèse des composés phénoliques (Keller, 2015). Il est également un inhibiteur du développement de certaines maladies (Williams *et al.*, 2007). Cependant, comme le rayonnement solaire est également la principale source d'énergie thermique, il reste difficile de séparer les effets du rayonnement solaire de ceux de la température (Downey *et al.*, 2006) même si des études ont essayé de les étudier séparément (Spayd *et al.*, 2002, Tarara *et al.*, 2008).

1.4.3 Les précipitations

Dans de nombreuses régions viticoles, les vignes ne sont pas irriguées et les précipitations jouent un rôle majeur dans l'alimentation hydrique de la vigne. Cet élément est un facteur clé dans le contrôle de la croissance végétative et pour le potentiel qualitatif de la vendange (Morlat *et al.*, 1992, Ojeda *et al.*, 2002, Van Leeuwen *et al.*, 2009). L'eau intervient dans la chaîne photosynthétique et est un élément constitutif clé des cellules végétales. Les totaux pluviométriques ainsi que la périodicité des précipitations vont intervenir aux différentes étapes du cycle végétatif. En hiver, les précipitations reconstituent les réserves hydriques du sol. En période de maturation, un stress hydrique léger à modéré favorise la concentration des baies en sucres, en composés phénoliques et aromatiques qui augmentent le potentiel qualitatif de la vendange (Van Leeuwen *et al.*, 2009). Une pluviométrie excessive ou persistante pendant la floraison et la maturation sont dommageables pour la production. En effet, des conditions pluvieuses et humides durant la floraison vont empêcher la fécondation et favoriser les risques de coulure, qui ont un impact négatif sur les rendements (May, 1987, Galet, 2000, Johnson, 2000). Durant la maturation, les précipitations vont augmenter la taille des baies et diluer les composés qu'elles contiennent (Coombe et McCarthy, 2000, Van Leeuwen *et al.*, 2009).

Les précipitations et les conditions d'humidité qu'elles engendrent sont également un facteur important du développement des maladies cryptogamiques telles que le mildiou et l'oïdium et de la pourriture grise sur les grappes en période de maturation. Elles sont à l'origine de pertes quantitatives et qualitatives de la vendange (Jermini *et al.*, 2010).

Les précipitations sous forme de grêles conduisent également à des dommages importants à la fois sur les grappes et sur les organes végétatifs (Reynier, 2011). Les dommages quantitatifs et qualitatifs sur la vendange varient suivant l'intensité des épisodes de grêle.

1.4.4 Le vent

Le vent est une composante météorologique conduisant à des effets positifs ou négatifs sur la vigne. Tout d'abord, le vent a un effet sur les maladies. Il est soit un des vecteurs des spores des maladies cryptogamiques, soit il en protège en séchant les grappes et la canopée après une épisode pluvieux ou pour dissiper l'humidité matinale (Reynier, 2011). Le vent a également des conséquences mécaniques sur les organes végétatifs en déchirant certains éléments (Reynier, 2011). Une vitesse du vent supérieure à 4 m/s a des conséquences physiologiques notamment par la fermeture des stomates et induit donc une diminution de l'activité photosynthétique (Campbell-Clause, 1998) pouvant perturber la croissance et retarder la maturité lorsque l'exposition à des vents forts est régulière (Dry *et al.*, 1988). Dans le cas des vignobles littoraux, le vent peut aussi limiter les excès de chaleur grâce aux brises de mer (Bonnardot *et al.*, 2005), même si les vents salés peuvent entraîner des brûlures de la végétation (Reynier, 2011).

1.4.5 Les indices bioclimatiques

La localisation géographique des régions viticoles du monde montre que la vigne est conduite sous des latitudes variées (Figure 1.3) principalement entre 30° et 50° pour les deux hémisphères. La vigne est donc cultivée dans des contextes climatiques divers (Tonietto et Carbonneau, 2004, Jones *et al.*, 2012).

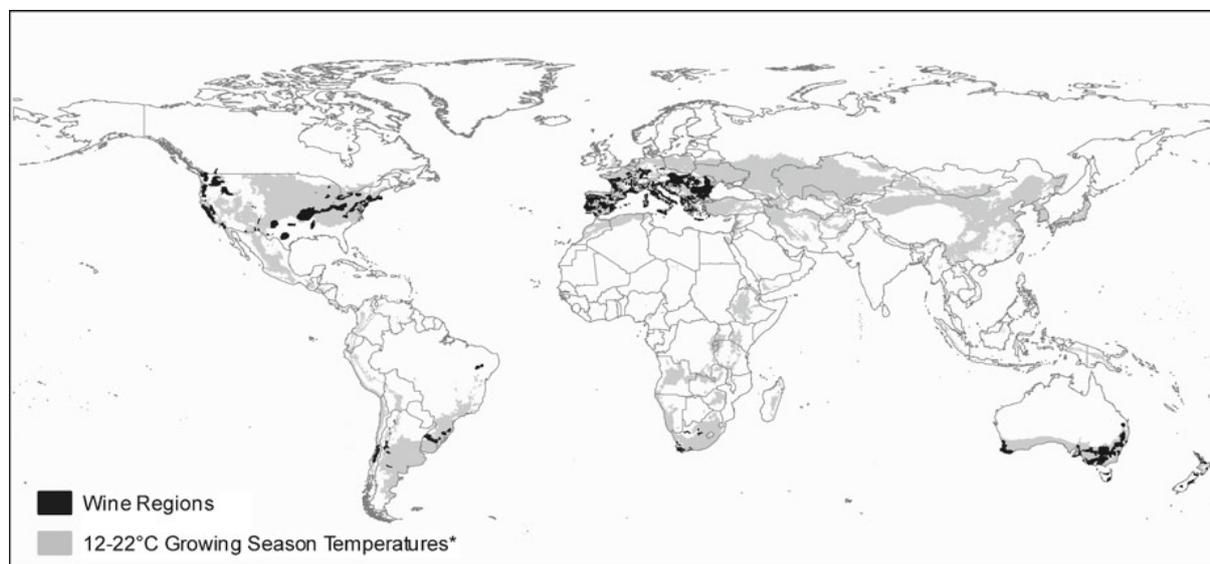


Figure 1.3 – Localisation géographique des principales régions viticoles mondiales en noir et isothermes optimales de la saison végétative entre 12°C et 22°C (Jones *et al.*, 2012)

La forte corrélation des stades phénologiques de la vigne à la température a permis le développement de nombreux indices bioclimatiques qui contribuent à évaluer le potentiel climatique des régions où la vigne est cultivée. Ils peuvent également être utilisés pour

prédire les stades phénologiques de la vigne (Parker *et al.*, 2013) en particulier la floraison et la véraison. Le premier indice bioclimatique à avoir été développé est l'indice de Winkler (Amerine et Winkler, 1944, Winkler, 1974). Cet indice est basé sur l'accumulation des degrés jours supérieurs à 10°C sur une période de 7 mois. Une première détermination du potentiel climatique en cinq régions appliquées à la Californie a été réalisée avec cet indice. Les régions définies ont depuis été améliorées afin d'être appliquées à un plus large panel de climats et de définir les bornes supérieures et inférieures de l'indice (Jones *et al.*, 2009, Hall et Jones, 2010). A partir de cet indice, d'autres indices basés sur des sommes de températures ont été développés. L'indice des degrés-jours biologiquement actifs a été défini par Gladstones (1992). Cet indice, contrairement à celui de Winkler, est basé sur une relation non linéaire entre la température et les processus physiologiques. Il intègre une borne supérieure du cumul à une température moyenne de 19°C ainsi qu'un coefficient de longueur du jour. Ce coefficient est utilisé dans le calcul de l'indice héliothermique de Huglin qui prend en compte la température moyenne et la température maximale du jour (Huglin, 1978). D'autres indices qui ne sont pas basés sur des cumuls de températures ont également été développés comme l'indice de la température moyenne de la saison végétative (Jones *et al.*, 2005b) et l'indice de latitude-température (Kenny et Shao, 1992). Tous ces indices permettent une régionalisation des aptitudes climatiques grâce à leurs différents intervalles. Malgré leurs différences de calcul, ils sont fortement corrélés (Hall et Jones, 2010) et le calcul de tous les indices n'est pas nécessaire pour l'analyse du potentiel climatique d'une région donnée.

Même si la deuxième partie du cycle phénologique concernant la maturation des raisins est moins directement dépendante de la température, cette étape du cycle phénologique n'en demeure pas moins conditionnée par les conditions météorologiques durant la maturation. Ainsi, plusieurs indices contribuent à évaluer le potentiel oenologique des régions viticoles. Un des plus utilisés est l'indice de fraîcheur des nuits (Tonietto, 1999) qui représente la moyenne des températures nocturnes du mois précédent la vendange. L'indice de Branäs (Branäs *et al.*, 1946) et l'indice de sécheresse (Tonietto et Carbonneau, 2004) adapté de Riou *et al.* (1994) apportent des détails supplémentaires sur les conditions d'humidité et d'alimentation hydrique de la vigne. Ils offrent un complément d'information sur les conditions de maturation des raisins et le potentiel qualitatif de la production.

La combinaison de différents indices bioclimatiques a été réalisée par Tonietto et Carbonneau (2004) afin de proposer une classification multicritère sur trois indices complémentaires : l'indice de Huglin, l'indice de fraîcheur des nuits et l'indice de sécheresse. Cette classification a été appliquée sur les séries climatiques de 97 régions viticoles et a abouti à la caractérisation de 36 types de climats viticoles au potentiel différent.

1.5 Influence des caractéristiques du sol et de la géologie sur la phénologie et le potentiel qualitatif

1.5.1 Rôle de la géologie et de la géomorphologie

La littérature concernant les effets du substrat géologique sur la vigne et le vin n'aboutit pas à un consensus. Bien que certains auteurs avancent des effets empiriques de la roche mère sur la typicité des vins (Champagnol, 1997, Wilson, 1998), d'autres pensent (Huggett, 2006) que les effets sont indirects via la géomorphologie et les caractéristiques des sols qui en sont issus.

En effet, les différents substrats rocheux : grès, calcaire, schiste, granite... ne présentent pas les mêmes propriétés physico-chimiques. Certaines roches vont s'éroder plus aisément que d'autres. Ces processus d'érosion ont façonné les paysages. Les effets d'altitude, de position sur les pentes et d'orientation de la pente vont avoir des conséquences sur les conditions climatiques locales des parcelles (appelée variabilité topoclimatique (Dumas *et al.*, 1997)) et indirectement sur la physiologie de la vigne et la composition chimique des raisins. Les pentes, en favorisant l'érosion des sols, vont notamment conduire à des différences de profondeur des sols : sols peu profonds au sommet et en haut des pentes, plus profonds en bas des pentes.

1.5.2 Rôle des caractéristiques du sol

Le sol est avec le climat le deuxième facteur prédominant dans la détermination du potentiel viticole d'un lieu géographique donné. Il va influencer, associé au climat, la physiologie de la vigne à travers deux variables clés : la vigueur de la plante et sa précocité (Barbeau, 2008). La vigueur réfère à la quantité de biomasse produite par la plante alors que la précocité positionne son développement physiologique dans le temps (Coulon, 2012).

La texture du sol, sa profondeur, sa composition minérale et microbiologique sont les principales variables qui directement et indirectement vont influencer le développement physiologique et la composition des baies (Van Leeuwen *et al.*, 2004a, Trought *et al.*, 2008, Morlat et Bodin, 2006). La profondeur du sol détermine la profondeur potentielle d'enracinement. Elle est par conséquent positivement corrélée à l'alimentation hydrique et minérale de la vigne qui détermine son potentiel de vigueur (Jackson, 2008). La vigueur de la vigne va influencer le micro-climat des grappes (Smart, 1985) et d'un point de vue métabolique le poids des baies et leur concentration en sucres, anthocyanes et arômes (Barbeau, 2008, Jackson, 2008). Ainsi en général les vignes vigoureuses sont caractérisées par une acidité totale élevée et une teneur plus faible en sucres et en composés phénoliques (Barbeau *et al.*, 1998, Tesic *et al.*, 2002, Jackson, 2008). La vigueur est également négativement corrélée à la précocité qui est quant à elle positivement corrélée au

potentiel qualitatif des raisins (Barbeau *et al.*, 1998, Asselin *et al.*, 2001, Jones et Davis, 2000).

1.6 Le rôle des pratiques culturales

Les conditions climatiques, géologiques et pédologiques déterminent le potentiel viticole d'un milieu donné. Les pratiques culturales constituent le dernier paramètre qui aide le viticulteur à adapter sa production à ses objectifs et au potentiel du milieu. Les pratiques culturales sont divisées en trois catégories :

- Les pratiques pérennes regroupent les pratiques qui sont réalisées au moment de la plantation de la parcelle et qui ne peuvent pas être modifiées
- Les pratiques pluri-annuelles ou semi-pérennes correspondent aux pratiques qui sont mises en place pour plusieurs années mais qui peuvent être modifiées
- Les pratiques annuelles concernent toutes les pratiques qui sont définies au cours de la saison végétative pour s'adapter aux conditions agroclimatiques et aux objectifs de rendement et de qualité définis pour l'année

1.6.1 Les pratiques pérennes

1.6.1.1 Choix du matériel végétal

Lors de la plantation d'une parcelle de vigne, le choix du cépage (et du porte-greffe dans les pays touchés par le phylloxera) doit être réalisé. Si dans certains pays disposant d'un système d'appellations comme la France, le choix peut-être imposé par un cahier des charges, dans d'autres le choix est libre. Cependant, le choix de la variété doit être raisonné suivant la compatibilité des différents cépages au climat de la région de production. En effet, les besoins physiologiques des différents cépages varient et donc les besoins thermiques pour atteindre les différents stades de développement aussi. Les cépages précoces comme le Pinot Noir et le Gewurztraminer ont des besoins thermiques plus faibles pour atteindre les différents stades phénologiques (Figure 1.4) à l'inverse des cépages tardifs comme le Mourvèdre, le Carignan et l'Ugni Blanc. Ainsi, les cépages précoces seront plus adaptés dans les climats frais où ils pourront atteindre un niveau de maturité suffisante au cours de la saison végétative. Plus le cépage choisi sera tardif, plus il sera adapté à un contexte climatique plus chaud. Jones (2006) a ainsi résumé les intervalles de température moyenne de la saison végétative optimaux pour différents cépages (Figure 1.6.1.1).

La greffe d'un système racinaire différent de celui du cépage, n'est pas pratiquée dans toutes les régions viticoles. Cependant, lorsque les plants sont greffés, le choix du porte-greffe peut accentuer ou de corriger certaines caractéristiques du sol (Reynier, 2011). Les porte-greffes ont des systèmes racinaires différents qui vont donc modifier l'alimentation hydrique et minérale de la plante et donc influencer la croissance végétative et la vigueur de la vigne (Williams et Smith, 1991, Koundouras *et al.*, 2008). Toutefois Smart *et al.*

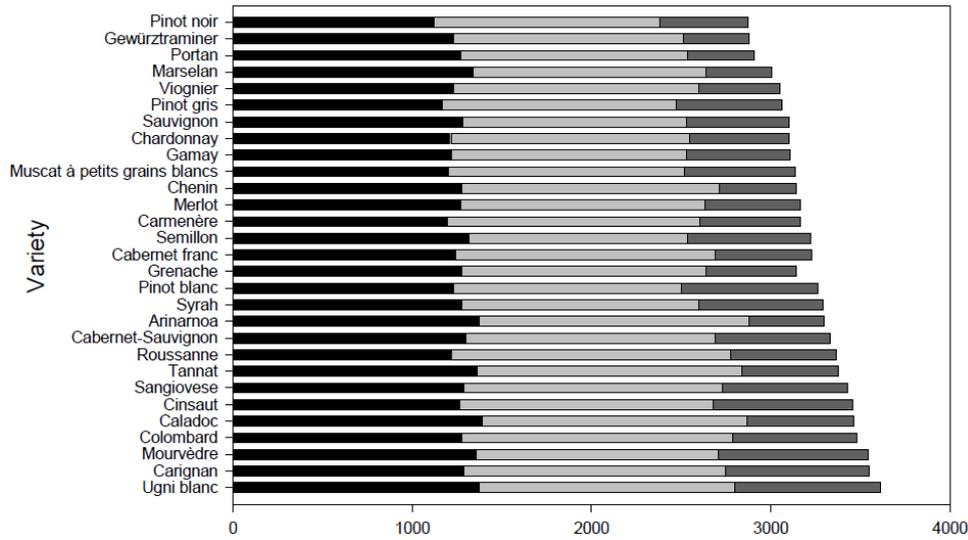


Figure 1.4 – Classifications de cépages selon leurs besoins thermiques (en °C) pour atteindre la floraison, la véraison et la maturité (fixée à une concentration en sucre de 200g/L) (Parker *et al.*, 2013)

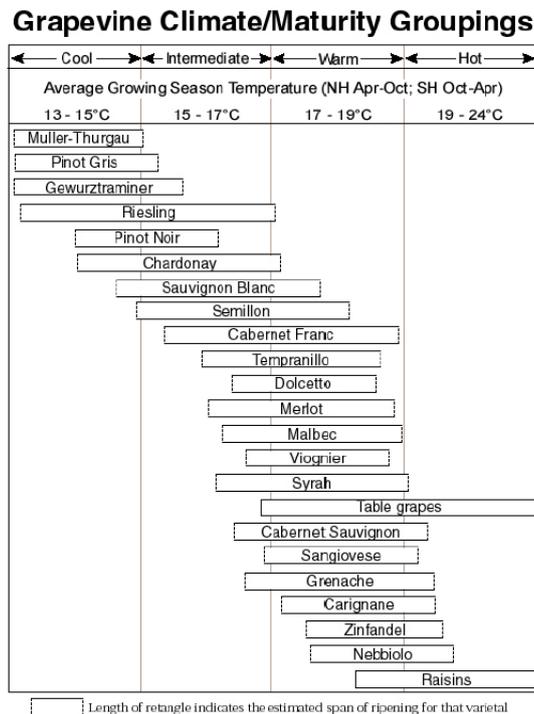


Figure 1.5 – Température moyenne de la saison végétative nécessaire pour l'obtention de raisins à haut potentiel qualitatif pour les principaux cépages cultivés dans le monde (Jones, 2006)

(2006) indiquent que les caractéristiques du sol jouent un rôle primordial dans le développement racinaire et donc la nutrition de la vigne. Les différences entre les porte-greffes n'interviennent que dans un second plan.

Dans le cas des vignobles irrigués, la salinité des eaux souterraines utilisées pour l'irrigation peut avoir des impacts négatifs à long terme sur la production (Walker, 1994, Shani et Ben-Gal, 2005). Plusieurs études ont montré que l'utilisation de porte-greffes tolérants à la salinité peut être une solution pour limiter la toxicité des sols salinisés sur la vigne (Walker *et al.*, 2002, 2004, 2010)

1.6.1.2 Choix de la densité de plantation

Dans les régions soumises à un cahier des charges, la densité de plantation est une des variables partiellement contraintes. Elle correspond au nombre de plants à l'ha et dépend des écarts inter-ceps et inter-rangs fixés à la plantation. Le choix de la densité de plantation est en effet décisif pour contrôler l'expression végétative et piloter la qualité potentielle des raisins. Jackson et Lombard (1993), Hunter (1998a,b) ont montré que plus la densité de plantation augmente, plus la compétition entre les plants pour la nutrition hydrique et minérale augmente. Avec une forte densité de plantation, la vigueur et les rendements sont partiellement contrôlés et les raisins produits sont plus concentrés. Les écarts inter-rangs et inter-ceps sont optimaux lorsqu'ils sont fixés à 2 m x 1 m ou 2 m x 2 m (Hunter, 1998a).

1.6.2 L'orientation des rangs

Les vignes sont couramment conduites en rangs et présentent donc un motif en rang-orienté. Le choix de l'orientation des rangs dépend de la topographie du site et de l'optimisation de la mécanisation lorsque l'entretien du vignobles est majoritairement mécanisé (Reynier, 2011). Ainsi la variabilité de l'orientation des rangs retrouvée dans un paysage viticole va impliquer des différences topoclimatiques entre les parcelles. En effet, pour une altitude et une orientation de pente données, l'intensité et la durée d'exposition au soleil des grappes et de la canopée varient en fonction de l'orientation des rangs. Riou *et al.* (1989) ont montré que l'orientation Nord-Sud permet le plus haut taux d'absorption d'énergie lumineuse par la vigne au cours d'une saison végétative. Ces résultats ont été confirmés et complétés par Hunter *et al.* (2016) qui ont comparé les quatre directions des rangs. Ils ont montré que l'exposition directe des grappes associée à l'augmentation de la température induit les processus de maturation. Cependant, cette exposition directe des grappes peut également causer des dommages liés à la chaleur ou à des brûlures (Weiss *et al.*, 2003). Les orientations N-S et NO-SE (hémisphère Nord) sont les plus exposées à ces dommages. Giacosa *et al.* (2015) ont évalué les effets de deux orientations : N-S et E-O, sur la maturité des baies et la teneur en anthocyanes. Leurs résultats indiquent que seule l'acidité totale est significativement plus élevée dans le moût issu de la parcelle avec

les rangs orientés E-O. La concentration en anthocyanes, le poids des baies, l'épaisseur de la pulpe et le degré d'alcool probable sont statistiquement similaires dans les deux cas.

1.6.3 Les pratiques pluri-annuelles

Les pratiques pluri-annuelles concernent principalement le système de taille, les pratiques culturales des inter-rangs et l'installation de systèmes de protection comme les filets anti-grêle.

1.6.3.1 Le système de taille

Le type de taille correspond à la forme donnée à la souche ainsi qu'à la répartition et à la longueur des bois de taille laissés (Reynier, 2011). C'est sur ces derniers que les rameaux de l'année suivante vont se développer. Le système de taille est partiellement contraint dans les régions viticoles présentant un cahier des charges d'appellation. Il dépend également de la densité de plantation, de la hauteur de la souche et des usages locaux (Reynier, 2011). En fonction du système de taille choisi, la canopée sera ou non palissée. Le palissage est géré par des fils et des piquets et maintient la canopée et les rameaux dans une certaine position (Reynier, 2011). Le choix du système de taille et de palissage modifie la surface foliaire potentielle, le rapport feuille/fruit et la surface foliaire exposée à la lumière. Ainsi, l'activité photosynthétique, la vigueur et les rendements vont être impactés. Reynolds et Heuvel (2009) proposent une revue de l'impact de plusieurs méthodes de conduite sur la vigueur et la composition des raisins.

1.6.3.2 La gestion des inter-rangs

Les rangs étant espacés de 2 m en moyenne, plusieurs pratiques culturales peuvent être pratiquées pour gérer cet espace. Des combinaisons de désherbage chimique ou mécanique et d'enherbement sont pratiquées. Le désherbage chimique est associé à une consommation de produits phytosanitaires supplémentaires. Le désherbage mécanique quant à lui peut augmenter les risques d'érosion du sol (Reynier, 2011). L'enherbement entraîne une compétition pour la nutrition minérale et hydrique. Il a un effet positif sur le contrôle de la vigueur et des rendements et sur la qualité des raisins (Testic *et al.*, 2007). De plus, le choix des variétés plantées dans l'inter-rang peut permettre de réaliser un enrichissement en certains minéraux.

1.6.3.3 Système de protection du vignoble

Certaines régions viticoles présentent un risque particulièrement important de grêle comme l'Argentine (Mezher *et al.*, 2012). La grêle peut conduire à d'importants dommages sur les vignes (Leyvraz, 1950). L'installation de filets anti-grêle est fréquente dans les régions particulièrement menacées. Cependant, en plus du coût des équipements, l'utilisation des filets va modifier le microclimat des vignes. Rana *et al.* (2004), Moratiel

et Martínez-Cob (2012) ont identifié une diminution de l'évapotranspiration des vignes équipés de filets anti-grêle. Les modifications du micro-climat des vignes sous les filets anti-grêle a également des conséquences sur la composition des raisins. Avenant (1995) ont montré qu'avec la réduction de l'évapotranspiration des vignes recouvertes par des filets, les raisins présentent des concentrations en sucre plus faibles et une acidité plus élevée. De plus, le nombre et la fertilité des bourgeons sont réduits.

1.6.4 Les pratiques annuelles

Les pratiques annuelles concernent toutes les actions réalisées sur la parcelle durant l'année. Elles contribuent à définir la vigueur et le niveau de rendement souhaité, de gérer le ratio feuilles/fruits qui optimise la nutrition des baies et est un élément déterminant pour la qualité des raisins (Kliewer et Dokoozlian, 2005). Les pratiques annuelles vont également être un outil pour le viticulteur pour s'adapter aux conditions météorologiques de l'année grâce aux traitements phytosanitaires, aux interventions sur la canopée à l'irrigation (Reynier, 2011).

Dans les régions viticoles où la pluviométrie est insuffisante pour couvrir les besoins de la vigne, l'irrigation est un des facteurs de contrôle principal de l'alimentation hydrique et de la qualité des raisins. Les quantités d'eau à apporter dépendent de l'évapotranspiration de la plante, des précipitations et des caractéristiques du sol comme sa réserve utile et l'accessibilité de l'eau (Allen *et al.*, 1998). De nombreux travaux ont étudié les effets du régime d'alimentation hydrique sur le développement de la vigne, sa vigueur et la composition des raisins. Si la quantité d'eau disponible dans le sol n'est pas limitante, la vigueur est favorisée. Ceci conduit à des rendements plus élevés et un allongement de la période de croissance mais ne favorise pas la concentration des raisins en sucres, polyphénols et arômes (Testic *et al.*, 2002). A l'inverse, un stress hydrique persistant va diminuer l'activité photosynthétique qui va donc diminuer l'accumulation des photosynthétats dans les baies (Ojeda, 1999). De nombreux auteurs ont montré qu'un stress hydrique modéré pendant la maturation a un effet positif sur la qualité des raisins en favorisant la concentration en sucres et en polyphénols (Matthews et Anderson, 1988, Morlat *et al.*, 1992, Ojeda *et al.*, 2002, Girona *et al.*, 2009). L'irrigation partiellement déficitaire est donc bénéfique pour la qualité des raisins durant la maturation dans les régions où l'irrigation est pratiquée.

1.7 La notion de terroir et d'échelle spatiale de la viticulture

Les paragraphes précédents montrent les interactions entre la vigne, son environnement climatique, topographique et pédologique et les interventions humaines. Tous ces éléments sont en interaction directe dès lors que la vigne est étudiée à une échelle très fine. La notion

de terroir intervient donc à une grande échelle correspondant à celle de la parcelle. De plus, il faut noter que le climat est un élément essentiel dans les spécificités du terroir. Or les caractéristiques du climat à l'échelle locale sont dépendantes de celles du climat régional (Quénol, 2011). Cette dépendance provient de l'organisation hiérarchique du climat où le niveau supérieur conditionne en partie les niveaux inférieurs (Choisnel, 1986, 1996).

Ainsi, de la répartition mondiale de la viticulture au potentiel viticole et oenologique d'une parcelle de vignes, plusieurs échelles spatiales sont à considérer qui correspondent aux différentes échelles du climat (Figure 1.6).

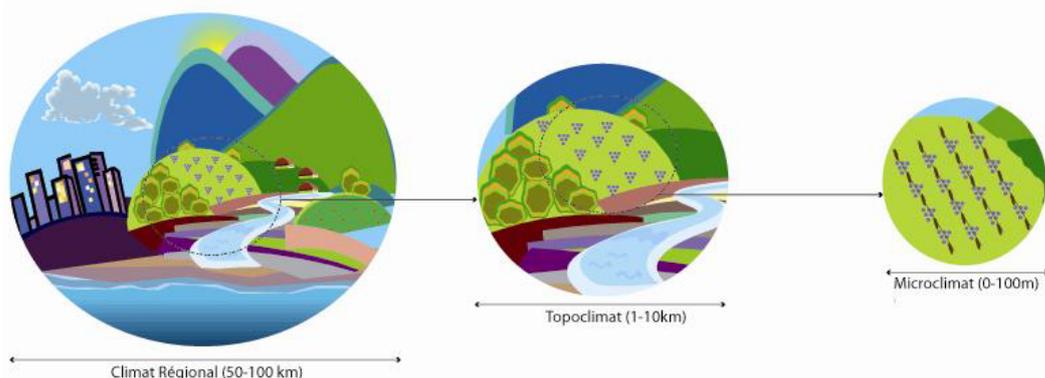


Figure 1.6 – Les échelles spatiales du climat (Quénol, 2011)

L'échelle régionale va s'appliquer à l'étude d'une zone géographique telle qu'un pays ou une région viticole. Sa superficie est de plusieurs centaines de kilomètres. L'étude du climat régional à travers les indices bioclimatiques va entre autre expliquer la répartition des cépages (Jackson et Lombard, 1993) car leur adaptation au climat régional définit si un niveau de maturité suffisant pourra être atteint (Jones, 2006).

Le topoclimat correspond à un niveau intermédiaire d'une superficie comprise entre 1km et 10km. A l'échelle topoclimatique, les facteurs géographiques du milieu liés à la topographie et à l'organisation du paysage sont déterminants (Figure 1.7). La variabilité topoclimatique peut être très importante voire supérieure à la variabilité régionale (Bonney *et al.*, 2013). Au sein d'une région viticole, elle explique la répartition géographique des vignobles ainsi que les éventuelles différenciations qualitatives (appellations, mentions géographiques...). Cette variabilité spatiale à l'échelle locale est également un des leviers à l'adaptation de la viticulture au changement climatique à moyen terme (Quénol, 2014). Par exemple, concernant les vignes cultivées dans des régions au climat chaud, un positionnement des vignobles en altitude est associé à des températures nocturnes moins élevées, qui sont propices au maintien d'une acidité suffisante et à la synthèse des composés aromatiques (Kliewer et Torres, 1972).

Le microclimat concerne le climat de la plante à la parcelle avec une résolution de quelques dizaines de mètres (Vaudour, 2003). C'est à ce niveau que s'ajoutent les effets liés

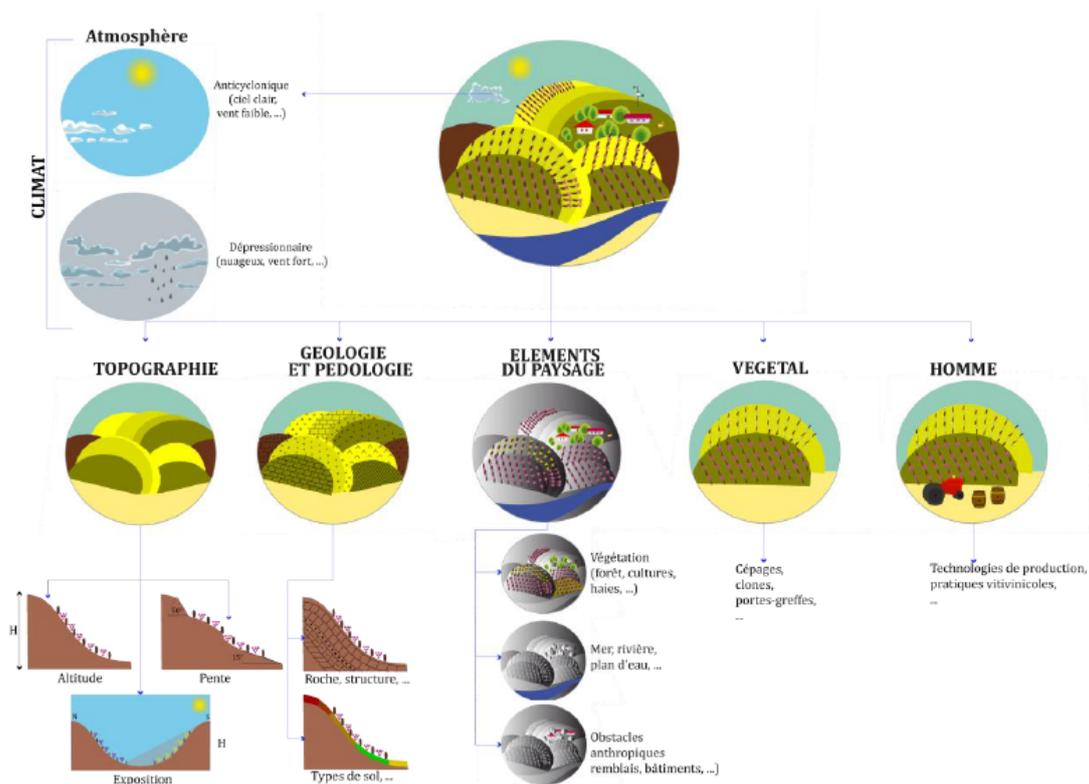


Figure 1.7 – Facteurs de variabilité du climat local (Quénol, 2011)

aux caractéristiques du sol, aux pratiques culturales et à l’organisation de la canopée. Les caractéristiques du microclimat vont intervenir sur la vigueur et la précocité de la parcelle et donc sur le potentiel qualitatif des raisins produits (Smart, 1985, Jackson et Lombard, 1993, Coulon, 2012). Pour une saison végétative donnée, s’ajoute l’effet millésime dû aux conditions météorologiques de l’année.

1.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté les différentes interactions entre la vigne, son milieu et l’homme. Il a montré l’importance du climat et en particulier de la température aux différentes échelles spatiales de la viticulture. A l’échelle locale, la topographie accentue ou atténue les caractéristiques climatiques régionales. Cependant, à l’échelle de la parcelle, les facteurs humains à travers les pratiques culturales permettent de tirer profit des caractéristiques du milieu voire d’apporter certaines mesures correctrices.

Afin de comprendre le fonctionnement des systèmes viticoles et de définir des leviers d’adaptation à court et moyen termes au changement climatique, les analyses à l’échelle locale sont capitales. En effet, ce sont les viticulteurs qui seront les acteurs de ces changements, les solutions proposées doivent correspondre à leur échelle d’action.

CHAPITRE 2

La télédétection et ses applications en viticulture

Sommaire

2.1	Introduction	28
2.2	Caractéristiques des données de télédétection	28
2.2.1	La télédétection passive dans le domaine de l'optique	28
2.2.2	La télédétection active dans le domaine des hyperfréquences	29
2.3	Les vignobles et leurs signatures dans les différentes fréquences	32
2.3.1	Signatures optiques des vignobles et principaux indices de végétation	33
2.3.2	Caractéristiques des vignobles sur les images RSO à différentes fréquences	34
2.4	Les principales applications de la télédétection en viticulture	35
2.4.1	Détection et cartographie des vignobles	36
2.4.2	Suivi de la phénologie de la vigne par télédétection	36
2.4.3	Utilisation de la télédétection pour l'étude des pratiques culturales	37
2.5	Conclusion	39

2.1 Introduction

La caractérisation des vignobles aux échelles locales, du paysage viticole à la parcelle, sont compatibles avec l'intégration de données de télédétection de part leurs résolutions. La démarche de recherche proposée dans cette thèse vise à évaluer le potentiel des données satellitaires optiques et radar pour la caractérisation et le suivi des vignobles aux échelles locales.

Ce chapitre vise ainsi à contextualiser l'état actuel des connaissances sur l'interaction signal cible entre la vigne et les différents domaines de fréquences. De plus, les applications existantes de la télédétection en viticulture sont présentées. Dans un premier temps ce chapitre détaille les caractéristiques des données de télédétection dans le domaine du visible et des hyperfréquences. La signature théorique des parcelles de vigne au regard de la littérature ainsi que les principaux paramètres dérivés pour l'étudier sont évoqués. Ensuite les différentes applications thématiques de la télédétection en viticulture sont abordées.

2.2 Caractéristiques des données de télédétection

Les données de télédétection qui sont utilisées pour les applications en viticulture concernent principalement le domaine de l'optique. Cependant, quelques travaux ont été effectués à partir d'images acquises dans le domaine des hyperfréquences. La figure 2.1 présente les différents types d'ondes sur le spectre électromagnétique. Le spectre du visible s'étend de 400 à 800 nm et le domaine des micro-ondes qui correspond aux fréquences des capteurs RSO (radar à synthèse d'ouverture) de 0,8 à 133 cm.

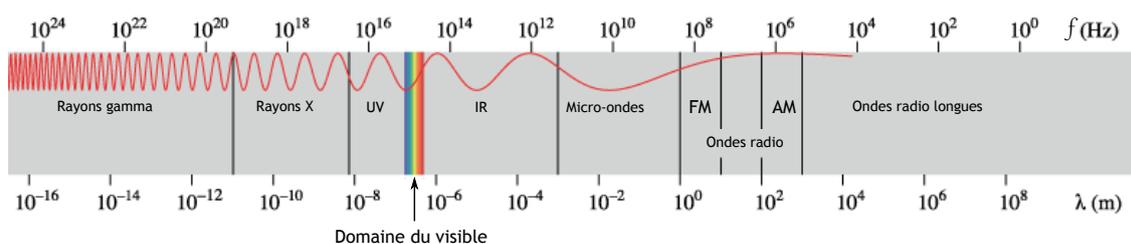


Figure 2.1 – Principaux domaines de fréquences du spectre électromagnétique (adapté de <http://www.alloprof.qc.ca/BV/pages/s1137.aspx>)

2.2.1 La télédétection passive dans le domaine de l'optique

Dans le cas de la télédétection optique passive, les capteurs enregistrent la part du rayonnement réfléchi et émis par les surfaces terrestres. Les gammes de longueur d'ondes enregistrées en télédétection passive s'étendent des ultra-violetaux aux infra-rouges. Comme

elle exploite le rayonnement provenant d'une source naturelle, le soleil, les images optiques doivent être acquises durant la journée. La télédétection passive est sensible aux conditions atmosphériques et la présence de nuages constitue une des limites principales à cette technologie. Les images optiques sont caractérisées par leur résolution spatiale, spectrale, temporelle et radiométrique. La résolution spatiale correspond à la taille minimum des objets pouvant être identifiés au sol et donc à celle des pixels. La résolution spectrale est la capacité du capteur à distinguer deux longueurs d'onde voisines. Elle est caractérisée au niveau du capteur par le nombre de bandes et leur largeur. La résolution radiométrique est la capacité du capteur à distinguer deux enregistrements aux valeurs différentes. Enfin la résolution temporelle est caractérisée par la fréquence de revisite du capteur sur le même lieu géographique. Les capteurs optiques enregistrent la réflectance des surfaces terrestre. Elle correspond au rapport entre l'énergie reçue et l'énergie émise/réfléchi par une surface donnée pour une bande spectrale donnée.

2.2.2 La télédétection active dans le domaine des hyperfréquences

Dans le cadre de la télédétection active, le capteur possède un émetteur qui va envoyer une onde électromagnétique à une certaine fréquence. Un récepteur va enregistrer l'écho renvoyé de cette onde suite à son interaction avec la surface. Les capteurs RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) utilisent des longueurs d'onde de 0.3 cm à 1 m qui sont divisées en plusieurs bandes (Figure 2.2). La capacité de pénétration du signal RSO dépend de la bande choisie. Plus la longueur d'onde est grande, plus le rayonnement pénètre dans les surfaces (Ulaby *et al.*, 1982). A titre illustratif, la figure 2.3 présente les éléments de la végétation qui interagissent avec le signal en fonction de la longueur d'onde émise. Le signal RSO apparaît ainsi sensible aux objets dont la dimension est du même ordre que la longueur d'onde. Les capteurs satellitaires acquièrent dans les fréquences des bandes X, C et L car les signaux dans ces fréquences ne sont pas perturbés par l'atmosphère. Les applications en agriculture concernant le suivi des cultures utilisent ces trois bandes (McNairn et Brisco, 2004, Steele-Dunne *et al.*, 2017). Contrairement aux données de télédétection optique passive, l'acquisition des images est indépendante des conditions météorologiques (présence de nuages) et de luminosité (acquisition diurne et nocturne).

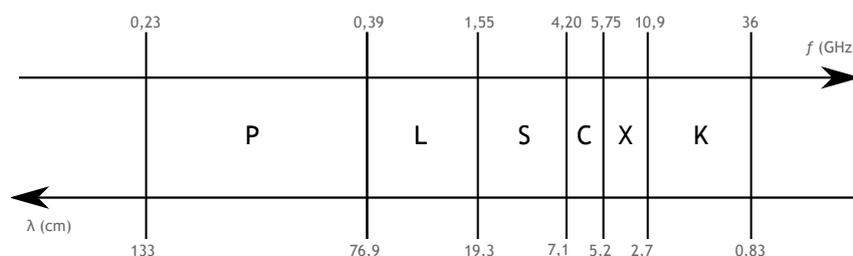


Figure 2.2 – Plages de fréquences (GHz) et de longueurs d'onde (cm) des bandes dans le domaine des hyperfréquences, adapté de Lee et Pottier (2009a)

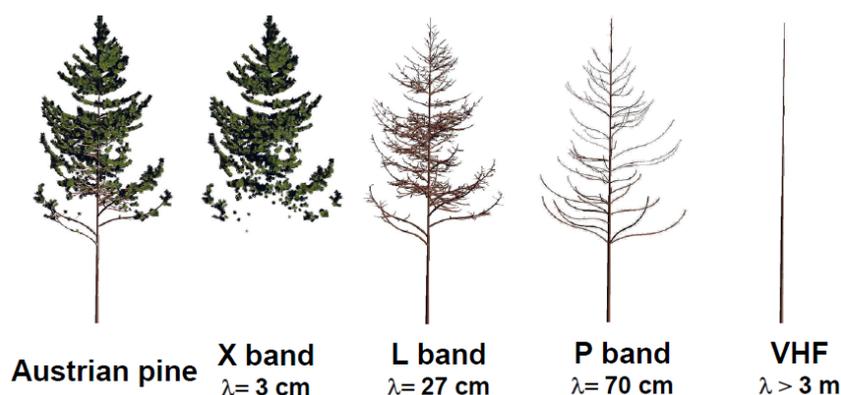


Figure 2.3 – Principaux diffuseurs de la végétation en fonction de la longueur d'onde émise par le capteur (Le Toan, 2005)

La géométrie d'acquisition des images RSO est différente de celle des images optiques. Le schéma de la figure 2.4 résume la géométrie d'acquisition des images RSO dans le cas d'une visée latérale. L'image est construite à partir du temps de trajet aller-retour des ondes émises. Lors du déplacement du satellite le long de l'azimut (ou direction de vol), l'antenne éclaire le sol sur une certaine fauchée par l'envoi successif d'impulsion d'ondes. Entre la portée proximale et distale, les angles d'acquisitions augmentent. Si la distance entre la portée proximale et distale est très grande, l'angle d'incidence varie de manière importante mais cet effet peut être corrigé (Baghdadi *et al.*, 2001). L'angle d'incidence est un paramètre primordial dans le choix des conditions d'acquisition car en fonction de sa valeur, l'intensité des rétrodiffusions varie pour une même surface (Ulaby *et al.*, 1978, Aubert *et al.*, 2011). La résolution spatiale étant dépendante de la taille de l'antenne en radar, les capteurs RSO, par l'envoi successif d'ondes, simulent une grande antenne, permettant d'obtenir des résolutions spatiales de quelques mètres.

En télédétection radar, différents types d'information peuvent être étudiés comme l'intensité du signal rétrodiffusé, sa polarisation ou la phase (pour les applications interférométriques notamment qui ne seront pas abordées ici).

2.2.2.1 Coefficients de rétrodiffusion

L'indicateur le plus couramment utilisé est le coefficient de rétrodiffusion qui correspond au rapport entre la puissance reçue (puissance renvoyée par la cible qui est captée) et la puissance émise par l'antenne. Les valeurs des coefficients de rétrodiffusion varient suivant un ensemble de paramètres liés aux caractéristiques du capteur (la fréquence, la polarisation, l'angle d'incidence...) et de la cible (structure géométrique, constante diélectrique, propriétés physiques...). En fonction des propriétés de la cible, l'onde va être diffusée suivant différents mécanismes illustrés dans la figure 2.5. Les trois principaux mécanismes de rétrodiffusion vont renvoyer une part variable de l'intensité initiale. Le simple rebond conduit aux valeurs de rétrodiffusion les plus faibles et le double rebond aux plus

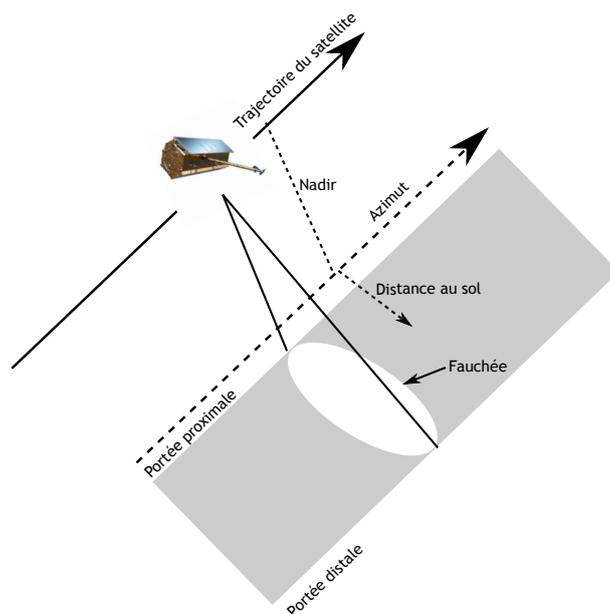


Figure 2.4 – Géométrie d’acquisition des capteurs RSO à visée latérale d’après Lee et Pottier (2009a)

élevées.

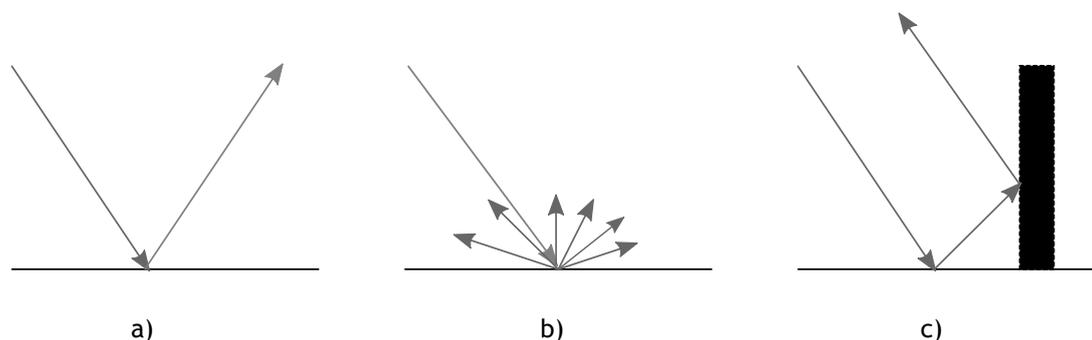


Figure 2.5 – Illustration des trois principaux types de mécanismes de rétrodiffusion d’une surface : a) Simple rebond, b) diffusion multiple, c) double rebond

2.2.2.2 Décompositions polarimétriques

la polarimétrie radar qui vise à traiter et analyser l’état de polarisation d’une onde électromagnétique constitue une information originale des images radar. Cette propriété des ondes électromagnétiques décrit l’alignement et la régularité d’un champ électromagnétique dans le plan transverse à sa propagation. Les ondes radar sont caractérisées par leur état de polarisation en plus de leur fréquence. Les capteurs radar utilisent généralement deux polarisations d’émission : horizontale et verticale. Ils peuvent également enregistrer les ondes retour en polarisation horizontale ou verticale. La polarimétrie radar étudie

ainsi la modification de la polarisation d'une onde lors de son interaction avec la cible. En fonction de la structure géométrique de l'objet, de sa forme, de son orientation et de ses propriétés physiques, la cible modifie ou non l'état de polarisation de l'onde. Par exemple, une onde émise en polarisation horizontale peut être rétrodiffusée suivant les composantes horizontales et verticales. L'onde est alors dépolarisée. Le degré de dépolarisation est lié au mécanisme de rétrodiffusion et aux propriétés de la cible.

Plusieurs décompositions de la matrice de diffusion permettent de rendre compte de la dépolarisation de l'onde rétrodiffusée (Cloude et Pottier, 1996, Freeman et Durden, 1998). Parmi elles, la décomposition de Cloude et Pottier (1996) est une diagonalisation de la matrice de cohérence T_3 . Cette matrice est issue du produit entre un vecteur représentant une vectorisation cohérente de la matrice de diffusion : le vecteur de Pauli et de son transpose conjugué. A partir des valeurs propres de la matrice de cohérence et de leurs probabilités associées, trois paramètres sont dérivés :

- l'angle alpha (α) qui donne un nom au mécanisme de rétrodiffusion dominant. Si $\alpha = 0^\circ$ il y a une diffusion de surface. Si $\alpha = 45^\circ$ il y a une diffusion dipolaire ou de volume. Si $\alpha = 90^\circ$ il y a une diffusion de type double rebond
- l'entropie (H) qui renseigne sur le caractère aléatoire de la diffusion. Si $H = 0$, alors il y a un seul mécanisme de diffusion qui domine (cas des surfaces en eau) ; Si $H = 1$, alors plusieurs mécanismes de diffusion sont présents et le signal est dépolarisé
- l'anisotropie (A) qui caractérise l'importance des mécanismes de rétrodiffusion secondaires par rapport au mécanisme de rétrodiffusion principal. Ce paramètre doit être utilisé en complémentarité de celui de l'entropie. Il devient intéressant pour des valeurs d'entropie élevées. Si $A = 0$, alors les deux mécanismes secondaires sont mélangés dans des proportions égales. Si $A = 1$, alors le second mécanisme domine.

Les décompositions polarimétriques sont adaptées aux traitements de données en polarisation complète. Cependant, la plupart des capteurs fournissent des données en polarisation duale (HH/VV, HH/HV ou VV/VH). La décomposition $H/\alpha/A$ a été adaptée aux données en polarisation duale (Cloude, 2007). Cependant un des canaux de polarisation est manquant (sur le principe d'une configuration monostatique où $HV=VH$). L'interprétation des mécanismes de diffusion en est modifiée particulièrement dans le cas des polarisations croisées (HH/HV, VV/VH) (Ji et Wu, 2015).

2.3 Les vignobles et leurs signatures dans les différentes fréquences

Cette section s'intéresse à la signature des parcelles viticoles dans le domaine optique et des hyperfréquences au regard de la littérature existante.

2.3.1 Signatures optiques des vignobles et principaux indices de végétation

Les parcelles viticoles sont composées de rangées de vignes séparées par des inter-rangs. Comme il a été vu dans le chapitre précédent, les pratiques culturales de ces inter-rangs peuvent varier. Cependant, quelles que soient les pratiques culturales opérées, les parcelles de vigne ne sont composées que de deux types de surface : la végétation et une certaine proportion de sol. La figure 2.6 présente les signatures spectrales théoriques de ces deux types de surfaces comparées à celle d'un couvert végétal d'une autre culture. Il apparaît que les canaux dans les longueurs d'onde du proche infra-rouge et dans une moindre mesure du rouge et du vert sont utiles pour la discrimination de ces surfaces.

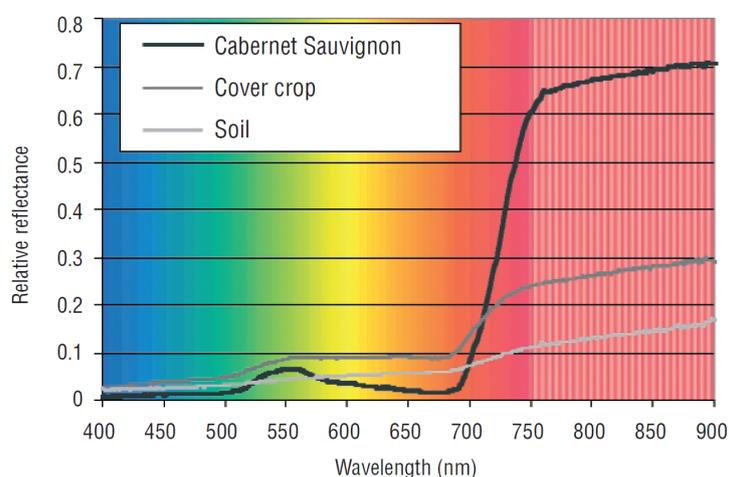


Figure 2.6 – Exemples de signatures spectrales de la vigne, du sol et d'un couvert végétal (Hall *et al.*, 2002)

La combinaison de ces canaux dans le calcul d'indices de végétation est largement répandue dans la littérature concernant les applications viticoles de la télédétection. L'indice le plus utilisé est le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Hall *et al.*, 2002, Hall, 2016). Cependant, cet indice sature lorsque la végétation est dense (Huete *et al.*, 2002). A très haute résolution spatiale, les valeurs de l'indice sur les rangées de vigne peuvent atteindre la saturation. L'utilisation d'autres indices tel que l'EVI (Enhanced Vegetation Index) et le TVI (Triangular Vegetation Index) apparaît adaptée pour étudier la canopée à l'échelle intra-parcellaire avec des images à très haute résolution spatiale (Hall et Wilson, 2013). Lorsque le contraste entre le sol et les rangées de vigne doit être accentué, le choix de la bande du rouge apparaît pertinent, afin de limiter les biais liés aux variations de vigueur des rangs (Delenne *et al.*, 2006).

2.3.2 Caractéristiques des vignobles sur les images RSO à différentes fréquences

A l'heure actuelle, très peu d'études se sont penchées sur les applications de la télédétection radar en viticulture. Alors que de nombreux travaux se sont intéressés au potentiel des données RSO pour les grandes cultures (McNairn et Brisco, 2004, Steele-Dunne *et al.*, 2017), l'organisation géométrique des parcelles de vigne semble être un frein aux études du potentiel du radar en viticulture. De plus, l'utilisation d'éléments métalliques dans les parcelles : fils de palissage et parfois piquets en métal peut constituer une source de bruit importante.

Malgré le faible nombre d'études réalisées, la littérature existante couvre une large gamme de fréquences et d'angles d'incidence et apporte une première réflexion sur l'interaction signal cible entre les signaux RSO et la vigne ainsi que des pistes sur les sources de variations du signal (Company *et al.*, 1994, Paloscia *et al.*, 1995, Baghdadi *et al.*, 2006, Burini, 2009, David Ballester-Berman *et al.*, 2012). En effet, ces études indiquent tout d'abord qu'en bande X et C, la diffusion de surface due aux bandes de sol entre les rangs est importante dans le signal rétrodiffusé (Company *et al.*, 1994, David Ballester-Berman *et al.*, 2012). La figure 2.7 illustre schématiquement les mécanismes de diffusion présents sur une parcelle de vigne.

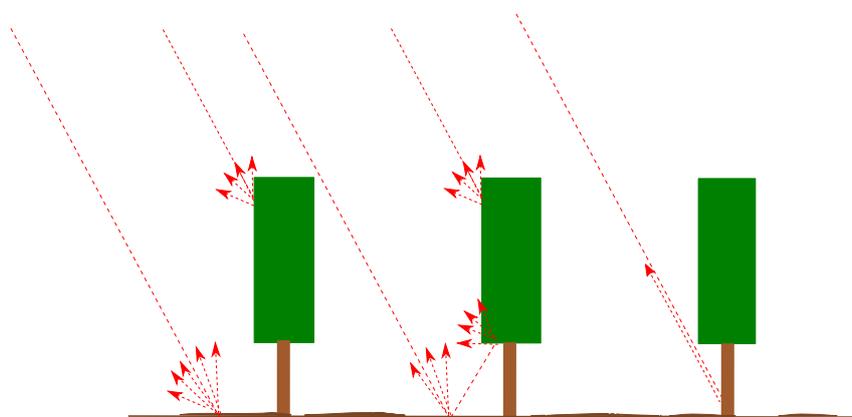


Figure 2.7 – Représentation schématique des mécanismes de diffusion présents sur une parcelle de vigne

En bande L, la même observation a été réalisée par (Burini, 2009), même si la contribution du sol diminue avec l'augmentation de l'angle d'incidence (avec des angles d'incidence étudiés de 25-35° et 45-55°). Cet effet de l'angle d'incidence est réduit en bande C, avec des angles d'incidence testés de 34° et 40°, et disparaît lorsque la végétation est développée (David Ballester-Berman *et al.*, 2012). Le choix de l'angle d'incidence a donc une importance modérée pour les applications en bande C sur les vignobles.

L'orientation d'un motif linéaire par rapport à la direction de visée du signal joue un rôle théorique sur l'intensité du signal RSO rétrodiffusé (Ulaby *et al.*, 1978). Les parcelles

de vignes étant le plus souvent plantées en rangs, l'orientation des rangs par rapport à la visée du signal doit être étudiée afin d'en évaluer l'impact sur les rétrodiffusions. Company *et al.* (1994), Burini (2009), Paloscia *et al.* (1995) ont observé, en bande L, une augmentation des rétrodiffusions avec l'angle azimutal ainsi qu'un maximum lorsqu'il atteint 90°. Cette observation est plus marquée en polarisation HH qu'en VV. En bande X et C cet effet de l'orientation des rangs n'est pas mis en évidence (Company *et al.*, 1994, Paloscia *et al.*, 1995, David Ballester-Berman *et al.*, 2012). Par contre en bande X, la sensibilité du signal aux variations de la rugosité du sol de l'inter-rang est remarquée par Company *et al.* (1994).

Sur le plan polarimétrique, Baghdadi *et al.* (2006) et David Ballester-Berman *et al.* (2012) ont réalisé la décomposition de Cloude et Pottier (1996) à partir d'images en bandes L et P (Baghdadi *et al.*, 2006) associées à des angles d'incidences entre 44° et 62° et en bande C (David Ballester-Berman *et al.*, 2012) avec des angles d'incidences de 34° et 40°. Quelle que soit la bande utilisée, les vignes sont caractérisées par une entropie variable entre 0,5 et 0,8. En bande C, l'analyse des deux séries temporelles 34° et 40° d'incidence au cours de la saison végétative montre que l'entropie augmente avec la croissance végétative, indiquant que la croissance végétative accentue la dépolarisation du signal (David Ballester-Berman *et al.*, 2012). L'angle alpha caractérise une diffusion volumique majoritaire en bande L et un double rebond majoritaire en bande P (Baghdadi *et al.*, 2006). En bande C, l'étude de David Ballester-Berman *et al.* (2012) décompose l'angle alpha moyen en ces trois composantes et indique que durant tout le cycle végétatif, la diffusion de surface reste un paramètre dominant dans la rétrodiffusion du signal quel que soit l'angle d'acquisition.

Enfin le biais induit par la présence de piquets en métal a été testé par Baghdadi *et al.* (2006). Les piquets en métal entraînent une augmentation des coefficients de rétrodiffusion en bande L pour la polarisation VV et une variation du ratio VV/HH d'environ 2 dB. En bande P, aucun effet n'est présent dû à la différence de matériau des piquets.

La signature des vignobles en imagerie RSO est donc caractérisée par une forte proportion de diffusion de surface ainsi qu'une dépolarisation induite par la végétation qui augmente avec la croissance végétative dans toutes les fréquences étudiées. Afin de s'affranchir des effets dus à l'orientation des rangs par rapport à la direction de visée du signal, le choix de la bande X ou de la bande C semble être préférable. Pour ces deux polarisations, l'influence du choix de l'angle d'incidence est également réduite.

2.4 Les principales applications de la télédétection en viticulture

Depuis deux décennies, les applications de la télédétection en viticulture se sont développées. Un grand nombre des études réalisées apporte une contribution au zonage des terroirs viticoles et à la caractérisation des hétérogénéités intra-parcellaires (Hall *et al.*,

2002, Vaudour *et al.*, 2014b). Un bilan sur ces études est présenté dans les paragraphes suivants. De nombreux travaux s'intéressent à la cartographie des types de sol pour le zonage des terroirs viticoles (Vaudour *et al.*, 2014b). Ces aspects n'étant pas développés dans la suite de ce travail, ils ne sont pas présentés. De plus, seules les études impliquant l'utilisation d'images aériennes, satellitaires ou acquises par drone sont évoquées.

2.4.1 Détection et cartographie des vignobles

L'utilisation de la télédétection permet dans un premier temps de détecter les vignobles. De nombreuses recherches ont été effectuées. Les premiers travaux ont concerné l'utilisation d'images satellites à moyenne ou haute résolution spatiale et des méthodes de classification supervisées (Trolier *et al.*, 1989, Rubio *et al.*, 2001, Lanjeri *et al.*, 2004, Rodríguez Pérez *et al.*, 2008a). Cependant, ces études aboutissent à des résultats contrastés. car l'hétérogénéité des parcelles de vignes favorise les confusions.

Les images RSO ont été employées par Baghdadi *et al.* (2006), Burini (2009) pour classer les vignobles. Bien que les vignes présentent des caractéristiques particulières, les biais liés à la présence d'éléments comme les piquets en métal, l'influence de l'orientation des rangs ne sont pas négligeables.

C'est pourquoi, les travaux plus récents emploient des images à très haute résolution spatiale et exploitent la présence du motif orienté des vignobles afin d'aboutir à des segmentations et des détections plus précises. Les analyses sont basées sur des approches fréquentielles (Wassenaar *et al.*, 2002, Rabatel *et al.*, 2006, Delenne *et al.*, 2006, Lefebvre *et al.*, 2010) ou texturales à travers l'analyse des matrices de co-occurrences (Gong *et al.*, 2003, Delenne *et al.*, 2008). La localisation du motif orienté sur les images permet donc de détecter les vignobles, mais l'emploi d'images à très haute résolution spatiale a permis la mise au point de méthodes d'extraction des rangs au sein des parcelles (Hall *et al.*, 2003, Delenne *et al.*, 2010, Puletti *et al.*, 2014) allant même jusqu'à la détection de plants manquants (Delenne *et al.*, 2010).

2.4.2 Suivi de la phénologie de la vigne par télédétection

Le cycle phénologique de la vigne est constitué d'un cycle végétatif et d'un cycle reproducteur (cf Chapitre 1). L'étude du cycle de développement de la vigne inclut toutes les études dédiées au suivi des caractéristiques de la canopée et de l'évolution des grappes. Le suivi de la phénologie de la vigne est un instrument pour le pilotage des pratiques culturales, l'estimation des rendements et l'évaluation du potentiel des raisins (Jones et Davis, 2000, Barbeau, 2008, Coulon, 2012).

De nombreuses études ont analysé à très haute résolution spatiale la corrélation des indices de végétation aux variables quantitatives de fonctionnement de la vigne (Johnson *et al.*, 1996, Montero *et al.*, 1999, Dobrowski *et al.*, 2002, Hall *et al.*, 2003, Dobrowski *et al.*, 2003). Ces travaux ont ainsi déterminé des relations linéaires entre les indices de

végétation et des variables quantitatives concernant le développement végétatif : LAI, poids des bois de taille, densité de la canopée. Ces études ont été menées à l'échelle d'une ou plusieurs parcelles et ont permis de spatialiser les différences de vigueur à l'échelle intra-parcellaire. Johnson (2003) a également observé une stabilité de la relation entre le NDVI et le LAI sur plusieurs saisons végétatives sur un vignoble. Cependant, d'autres études plus approfondies sont nécessaires car la dynamique de croissance est fortement liée aux conditions climatiques et aux pratiques culturales. La dynamique temporelle a été utilisée notamment dans les travaux de Montero *et al.* (1999), Hall et Wilson (2013). Plusieurs études, deux à l'échelle régionale (Rodríguez Pérez *et al.*, 2008b, Cunha *et al.*, 2010b) et une à l'échelle d'une parcelle de vigne (Fraga *et al.*, 2014), ont combiné les séries temporelles d'images optiques sur plusieurs saisons végétatives. Le profil moyen d'indices de végétation calculés sur les vignobles au cours de la saison végétative a été identifié. En utilisant différentes métriques issues de ces séries temporelles, ils ont corrélé les stades phénologiques de la vigne du cycle reproducteur tels que la floraison et la véraison à l'évolution des indices de végétation. Ces résultats sont cohérents avec la relation étroite entre la dynamique du cycle de développement végétatif et du cycle reproducteur (Keller, 2015).

De plus, certains auteurs ont exploité la corrélation entre le niveau de vigueur, les rendements et la qualité potentielle des raisins. Ils ont ainsi dérivé des cartes d'estimations des rendements (Cunha *et al.*, 2010a) et de certains composés contenus dans les raisins (Bramley, 2001, Johnson *et al.*, 2001, Lamb *et al.*, 2004, Fiorillo *et al.*, 2012) . Cependant, ces résultats sont des estimations indirectes de la variabilité intra-parcellaire des paramètres mesurés à partir de leur corrélation avec la vigueur. Les corrélations sont dépendantes de la vitesse de maturation et peuvent varier à l'échelle intra-parcellaire suivant les variations de vigueur (Fiorillo *et al.*, 2012). Les outils de la télédétection optique ne permettent pas de dériver une information directe sur la composition des raisins.

Enfin, concernant l'emploi de l'imagerie RSO pour le suivi du développement de la vigne, David Ballester-Berman *et al.* (2012) ont montré une relation entre les rétrodiffusions en HV et l'évolution de la surface foliaire. Ils ont également utilisé un "Water Cloud Model" afin d'estimer la contribution de chaque élément de la parcelle dans les coefficients de rétrodiffusion et de suivre l'évolution de la croissance végétative, ainsi que le développement des grappes. Cependant, les performances d'ajustement et de prédiction de leur modèle ne sont pas présentées.

2.4.3 Utilisation de la télédétection pour l'étude des pratiques culturales

Les applications de la télédétection concernant la détection des pratiques culturales sont peu nombreuses. En effet, la plupart des études sont réalisées afin de mettre en évidence l'hétérogénéité intra-parcellaire. Ainsi, les travaux se focalisent sur quelques par-

celles entretenues de manière similaire. Cependant, la détection des cépages, de l'orientation des rangs et la gestion de l'irrigation a été étudiée. De plus, les cartographies de la vigueur constituent également une source d'information pour un pilotage de précision de certaines opérations culturales comme la fertilisation.

2.4.3.1 Pratiques pérennes

Dans l'étude des pratiques pérennes, des travaux ont évalué le potentiel de la télédétection pour la discrimination des cépages. Les deux principales études ont employé un capteur hyperspectral CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager) en acquisition aéroportée (Lacar *et al.*, 2001, Ferreiro-Armán *et al.*, 2006). Les classifications portent sur la caractérisation de deux variétés rouges : Syrah et Cabernet Sauvignon étudiés dans l'article de Lacar *et al.* (2001), Merlot et Cabernet Sauvignon dans les travaux de Ferreiro-Armán *et al.* (2006). Ces derniers séparent ces deux variétés et les classifications prennent en compte deux classes supplémentaires, le sol et les arbres. Leurs résultats aboutissent à environ 90% de précision. Une étude a également évalué le potentiel d'images satellitaires WorldView-2 (Karakizi *et al.*, 2016) pour la classification de 6 cépages différents. Leur approche est basée sur une segmentation préalable des rangées de vignes avec une approche orientée objet et les classifications sont réalisées à l'échelle du pixel et de l'objet. Leurs résultats indiquent que la classification sur les vignes par approche objet permet une meilleure discrimination des variétés. La précision de leur classification atteint 90% avec un classifieur SVM (Séparateurs à Vastes Marges).

La détection de l'orientation des rangs sur un paysage viticole a été réalisée par Lefebvre *et al.* (2011). Une méthode de détection de l'orientation des textures a été développée à partir d'une décomposition en ondelettes du signal en niveaux de gris qui est comparée à la méthode de Josso *et al.* (2005) basée sur une transformée de fourier et une ACP (Analyse en Composantes Principales). La méthode est appliquée à des images à très haute résolution spatiale et permet une détection précise de l'orientation des rangs.

2.4.3.2 Gestion de l'irrigation

La gestion de l'irrigation et du stress hydrique de la vigne est un enjeu pour la qualité des raisins et la maîtrise des rendements en climat semi-aride (Ojeda, 1999). Ainsi, de nombreux travaux ont été réalisés afin d'évaluer le potentiel des images satellitaires pour le suivi des besoins en eau et du stress hydrique. Pour l'évaluation des besoins en eau, l'estimation de l'évapotranspiration est une variable importante. Plusieurs auteurs ont évalué les images satellitaires à moyenne et haute résolution spatiale pour le suivi de l'évapotranspiration à travers la méthode du bilan énergétique des surfaces (González-Dugo *et al.*, 2012, Palladino *et al.*, 2013, Poblete-Echeverría et Ortega-Farias, 2013, Carrasco-Benavides *et al.*, 2014). Bien que ces méthodes permettent une bonne estimation de l'évapotranspiration, elles sont limitées par la disponibilité des données pour un suivi régulier.

Le potentiel des données de télédétection associées aux relevés météorologiques pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle des vignes a été évalué (Er-Raki *et al.*, 2013, Vanino *et al.*, 2015). Les résultats de ces deux études montrent un bon potentiel des indices de végétation pour dériver le coefficient cultural et de l'approche analytique pour estimer l'évapotranspiration des vignobles.

La détection du stress hydrique à partir de données thermiques a également été étudiée. En effet le CWSI (Crop Water Stress Index) est un indice très utilisé qui estime le stress hydrique d'une plante à partir de son impact sur sa température (Jackson *et al.*, 1981). Ainsi, le potentiel des bandes thermiques de capteurs aéroportés a été évalué pour le calcul du CWSI (Bellvert *et al.*, 2014, 2015). Leurs résultats indiquent très bon potentiel des images thermiques pour estimer le stress hydrique. Cependant la résolution spatiale est un facteur important de la précision des modèles et une résolution spatiale de 0.3 m est nécessaire. Acevedo-Opazo *et al.* (2008) a également montré que la variabilité intra-parcellaire d'un indice de végétation tel que le NDVI peut être corrélée à des écarts de vigueur et de rendements liés à des différences d'alimentation et de stress hydrique.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les caractéristiques des données de télédétection optiques et radar ainsi que le contexte des travaux existants impliquant les données de télédétection pour la viticulture. Si les études utilisant les données optiques sont nombreuses, deux types d'échelles spatiales sont privilégiées : l'échelle régionale associant des données à moyenne et haute résolution spatiale et l'échelle de la parcelle employant dans la majorité des cas des données à très haute résolution spatiale (drones ou capteurs aéroportés).

Les applications dédiées à la caractérisation de la vigueur sont majoritaires mais des travaux visant à caractériser l'état hydrique ou des pratiques culturales ont été réalisés. Ainsi, même si les indices de végétation sont très corrélés aux variables biophysiques de la vigne, l'effet des pratiques culturales sur le potentiel des indices de végétation ne sont toujours pas déterminés. Les travaux effectués sur le suivi des stades phénologiques grâce aux métriques dérivées du suivi de la croissance végétative à échelle régionale ouvrent des perspectives à une échelle plus locale avec les données à très haute résolution temporelle de Sentinel-2.

Concernant, l'évaluation des données RSO pour la caractérisation des vignobles, un petit nombre d'études a été réalisée. Cependant, elles couvrent une large gamme de fréquences, de polarisations et d'angle d'incidence. Elles permettent de dresser un état des lieux des mécanismes de rétrodiffusion impliqués et de l'impact de certaines pratiques culturales comme le labour des inter-rangs, l'orientation des rangs ainsi que l'effet de la présence de piquets métalliques dans les parcelles. Ainsi, le fort impact potentiel des pratiques culturales sur les données RSO impliquent une bonne connaissance des pratiques culturales des sites échantillonnés et ainsi qu'une évaluation de leur effet réel sur

les signatures des vignobles au cours de la saison végétative.

Les travaux de cette thèse s'inscrivent donc dans une volonté d'améliorer la connaissance de l'interaction signal cible avec les données radar au travers des particularités culturelles de plusieurs domaines viticoles argentins. De plus, cette échelle d'analyse n'étant pas privilégiée en optique, il est également intéressant d'évaluer l'impact de ces pratiques culturelles sur les signatures spectrales de la vigne en optique. L'évaluation combinée des images optiques et radar pour des applications en viticulture est également une perspective à exploiter dans ces travaux.

CHAPITRE 3

Site d'étude et données

Sommaire

3.1	Introduction	42
3.2	La viticulture en Argentine	42
3.2.1	Les principales régions viticoles argentines	42
3.2.2	Les caractéristiques de la région viticole de Mendoza	45
3.2.3	Lujan de Cuyo : un département viticole de la zone centrale de production	48
3.3	Les données des stations météorologiques	49
3.3.1	Réseaux de mesures	49
3.3.2	Pré-traitement des données météorologiques	51
3.3.3	Calcul des indices bioclimatiques	52
3.3.4	Calcul de l'évapotranspiration de référence	52
3.4	Les données de télédétection	53
3.4.1	Les images satellitaires optiques	53
3.4.2	Les images satellitaires radar	55
3.5	Les observations et mesures de terrain	57
3.5.1	Les parcelles viticoles	58
3.5.2	Les pratiques culturales	58
3.5.3	Suivi de la croissance végétative	61
3.6	Conclusion	63

3.1 Introduction

Les travaux de cette thèse sont menés à trois échelles :

- A l'échelle régionale sur les principales régions vitivinicoles d'Argentine afin de dresser un bilan des évolutions climatiques et du contexte de production viticole,
- A l'échelle intra-régionale sur la province de Mendoza pour comprendre les facteurs géographiques et topographiques de variabilités spatiales des conditions agroclimatiques de production,
- A l'échelle locale d'un district viticole dans l'objectif d'évaluer le potentiel de la télédétection pour caractériser les vignobles, suivre leur croissance et leurs besoins en irrigation.

Ce chapitre est dédié à la présentation du contexte d'étude à ces trois échelles ainsi que les données qui ont été utilisées et leurs pré-traitements. La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du contexte viticole argentin et de la province de Mendoza qui est plus particulièrement étudiée dans cette thèse. Ensuite, les données satellitaires, météorologiques sont présentées ainsi que leurs pré-traitements. Enfin, les données de terrain sur le site d'étude à l'échelle locale sont détaillées.

3.2 La viticulture en Argentine

3.2.1 Les principales régions viticoles argentines

La viticulture est présente en Argentine depuis la colonisation espagnole aux XV^{ème} XVI^{ème} siècles même si la production était loin derrière celles du Pérou, du Chili et du Paraguay. C'est au cours du XVII^{ème} siècle que ces dernières ont fortement diminué alors que la production argentine de la région de Cuyo s'est développée (Canziani et Scarel, 2010). Aujourd'hui l'Argentine est le V^{ème} producteur mondial de vin. Avec plus de 220 000 ha, elle fait partie des 10 pays ayant la plus importante surface viticole (Canziani et Scarel, 2010). La viticulture est présente dans 7 provinces qui comptent au moins 1000 ha en 2015 (Figure 3.1), avec une dominance nette des provinces de Mendoza et San Juan (Figure 3.2(a)). En ce qui concerne l'encépagement, les cépages rouges sont majoritaires dans la plupart des provinces viticoles. Les cépages gris ou rosés concernent essentiellement les variétés locales comme la Cereza, la Criolla grande et la Criolla chica.

Les différentes provinces viticoles peuvent être organisées en trois régions. Les provinces de Salta, Catamarca et La Rioja constituent la région Nord-Est de la production viticole. La figure 3.3 illustre la localisation des aires viticoles au sein de ces trois provinces. Trois vallées irriguées concentrent la production : les vallées Calchaquies qui sont présentées sur la figure 3.3(a) et les vallées de Catamarca et de La Rioja (Figure 3.3(b)). Dans les vallées Calchaquies, sont retrouvés les vignobles les plus hauts en altitude (pou-



Figure 3.1 – Localisation des principales provinces viticoles d'Argentine

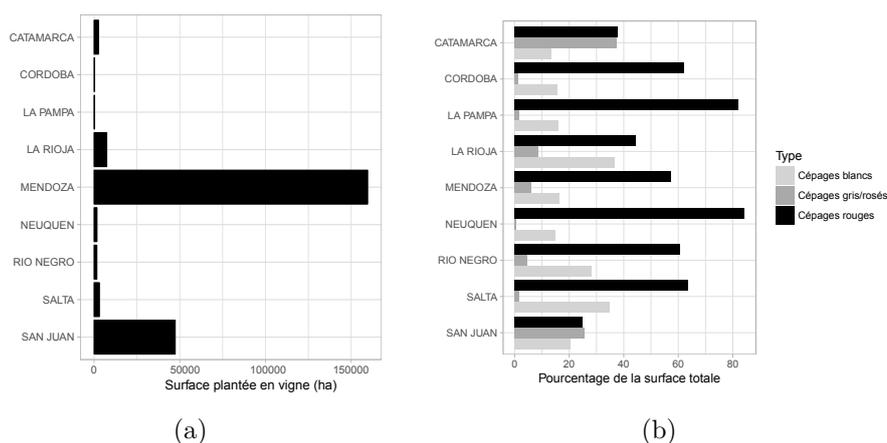


Figure 3.2 – Surfaces viticoles totales et proportion de couleur d'encépagement par rapport à la surface totale dédiée à la production de vins par province (INV, 2015b)

vant atteindre 2000m). Elles comptent 3144 ha de vignes en 2015 (INV, 2015b) dont plus de la moitié autour de Cafayate. Les superficies destinées à la production de vins sont composées à 64% de cépages rouges (Malbec et Cabernet Sauvignon majoritaires) et à 35% de cépages blancs (Torrontés majoritaire) (INV, 2015d).

A Catamarca, les vignobles sont situés à la fois dans la vallée occidentale, qui est une région relativement montagneuse, et dans les vallées orientales à plus faible altitude. En 2015, un total de 2679 ha (INV, 2015b) de vignes est présent avec une proportion équivalente des variétés rosées, dominées par la variété Cereza, et rouges : Cabernet Sauvignon, Malbec et Syrah (INV, 2015d). La province de La Rioja, est la plus grande productrice de vins de la région du Nord-Est avec 7449 ha de vignes en 2015 (INV, 2015b). Les vignobles

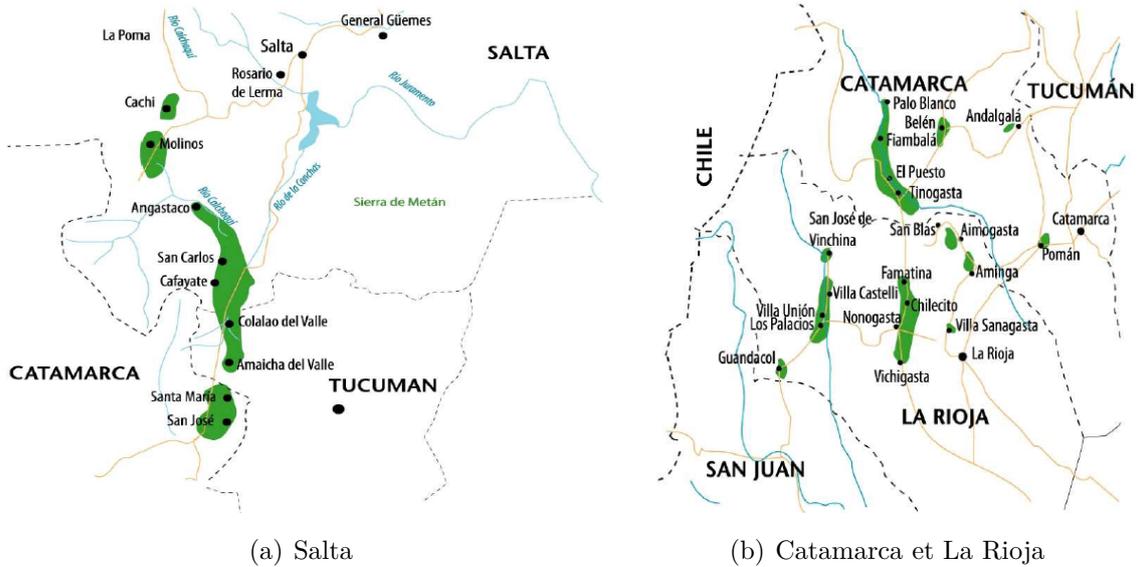


Figure 3.3 – Localisation schématique des surfaces viticoles de la région viticole du Nord-Est (INV, 2014)

sont présents dans les vallées près de Famatima, Chilecito et Felipe Varel (INV, 2014). Plus de 90% des raisins produits sont destinés à la vinification. Les cépages rouges sont dominants à 50%, Cabernet Sauvignon, Malbec et Syrah, suivis par les cépages blancs à 40% où le Torrontés est majoritaire (INV, 2015d).

La région Centre-Ouest regroupe les provinces viticoles de San Juan et Mendoza. San Juan est la deuxième province viticole avec 47394 ha de vignes en 2015. Les vignes sont majoritairement situées dans l'oasis irriguée du río San Juan, vallée de Tullum à environ 600m d'altitude qui concentre la majorité des vignobles mais aussi les vallées de Ullum (700 m d'altitude) et El Pedernal (1350 m d'altitude). 71% des vignobles sont destinés à la production de vins. Les cépages rouges représentent 35% des surfaces parmi lesquelles on retrouve en plus grande proportion la Syrah, le Bonarda et le Malbec (INV, 2015d). Les cépages blancs représentent 29% des surfaces destinées à la vinification avec comme cépages principaux le Pedro Gimenez, le Muscat d'Alexandrie et le Torrontés (INV, 2015d). Dans les années 1990 la production de vins rouges était anecdotique, mais s'est fortement développée dès le début des années 2000. Mendoza est la plus importante province viticole, ses caractéristiques sont détaillées dans la section 3.2.2.

La région Sud concerne les surfaces viticoles des provinces de Neuquen, La Pampa et Río Negro. La figure 3.4 illustre la localisation des vignobles dans cette région. Les vignobles sont situés dans les vallées des fleuves Río Negro et Río Colorado. En 2015, cette région compte 3670 ha de vigne, répartis de la manière suivante : 1751 ha dans la province de Neuquen, 1675 ha dans celle de Río Negro et 243 ha pour la Pampa (INV, 2015b). La production est orientée à plus de 90% vers la production de vins. Une large

proportion (plus de 80%) de cépages rouges destinés à la vinification est observée pour Neuquen et La Pampa et seulement 15% de cépages blancs. Pour Río Negro les cépages rouges représentent 65% des surfaces destinées à la vinification et 30% pour les cépages blancs (INV, 2015b). Les cépages majoritaires sont le Malbec et le Merlot pour les cépages rouges (INV, 2015d). En ce qui concerne les cépages blancs, le Chardonnay est majoritaire à Neuquen alors que le Torrontés l'est dans la province de Río Negro (INV, 2015d).

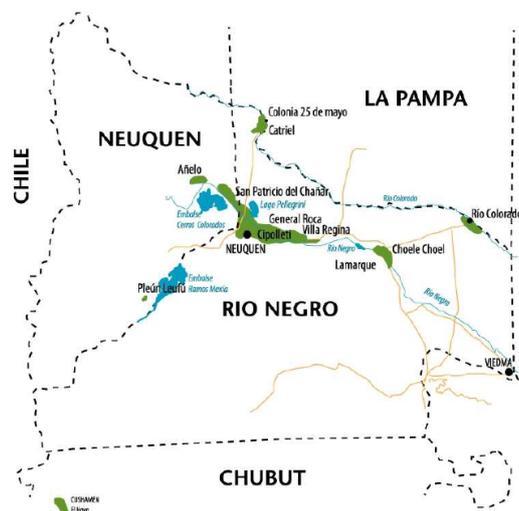


Figure 3.4 – Localisation schématique des surfaces viticoles de la région viticole du Sud (INV, 2015a)

3.2.2 Les caractéristiques de la région viticole de Mendoza

La viticulture est présente à Mendoza dans les quatre oasis principales (Figure 3.5). En effet, la région étant majoritairement désertique, l'agriculture s'est concentrée près des fleuves où l'irrigation s'est développée et des oasis artificielles ont été créées. D'un point de vue viticole, chaque oasis a ses caractéristiques pédoclimatiques et la filière s'y est développée différemment. En particulier, suite à la crise viticole des années 1990, la filière s'est reconstituée en orientant une partie de la production vers des vins haut de gamme de qualité (Vigil *et al.*, 2003). Les vignobles sont présents dans les quatre oasis principales, divisés en cinq aires de production. L'aire Nord se trouve dans l'oasis Nord et s'étend sur les départements de Lavalle, Las Heras et une partie de Guaymallén et Maipú. L'aire Centre aussi appelée Zona Alta del Río Mendoza se situe au Sud de l'oasis Nord dans les départements de Luján de Cuyo, Godoy Cruz, Maipú et Guaymallén. Ensuite il y a une aire de production dans l'oasis Est et Sud qui sont éponymes et enfin la vallée de Uco dans l'oasis Centre.

La figure 3.6 détaille pour chaque zone de production de la province, les surfaces totales plantées en vigne ainsi que les proportions, dans chaque couleur de cépage, destinées à la vinification.

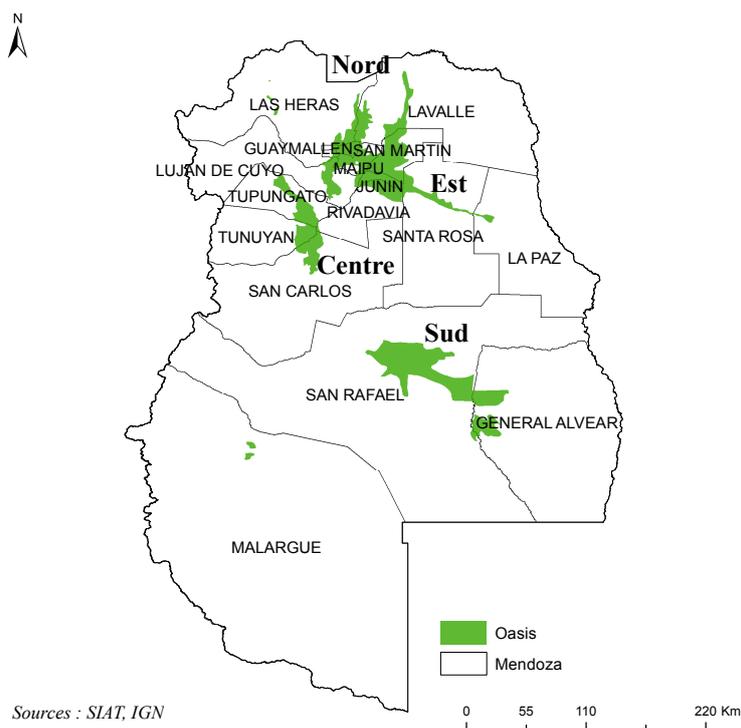


Figure 3.5 – Localisation des quatre oasis de la Province de Mendoza

L'aire Est concentre la plus grande surface avec ses 68000 ha représentant 43% des vignobles de Mendoza. 73% de la production sont destinés à la vinification et 27% à la production de moûts vendus à l'international. Avec la réorganisation de la filière, la production de cette zone a tenté une augmentation de la production qualitative en augmentant les superficies des cépages nobles rouges aux dépens des superficies des variétés locales rosées (Figure 3.7(d)). En 2015, presque la moitié de la surface est constituée de cépages rouges. Elle reste cependant l'aire de production qui produit le plus de vins de table à Mendoza (INV, 2015b).

L'aire Centre (ou Zona alta del Río Mendoza) représente 13% des vignobles de Mendoza. C'est la première zone viticole et l'essentiel de la production est destinée à l'élaboration de vins de qualité. Les vignes sont implantées au pied du piémont andin ou sur les premières pentes à environ 900 m d'altitude. La production de plus de 90% des vignobles est destinée à la vinification dont 78% des vignobles constitués de cépages rouges. Le Malbec, cépage emblématique de la région, est largement majoritaire (Figure 3.7(b)).

Ensuite, la vallée de Uco est la troisième zone productrice de Mendoza avec ses 27750 ha représentant 17% de la superficie viticole de la province. Cette zone de production a connu un développement récent, les surfaces plantées en vigne ayant doublé depuis les années 1990. 99% des vignobles sont destinés à la vinification, cette zone est également dédiée à la production de vins de qualité. Le Malbec est ici aussi le cépage majoritaire (Figure 3.7(c)).

Enfin, les aires Nord et Sud représentent respectivement 10% et 12% des vignobles de

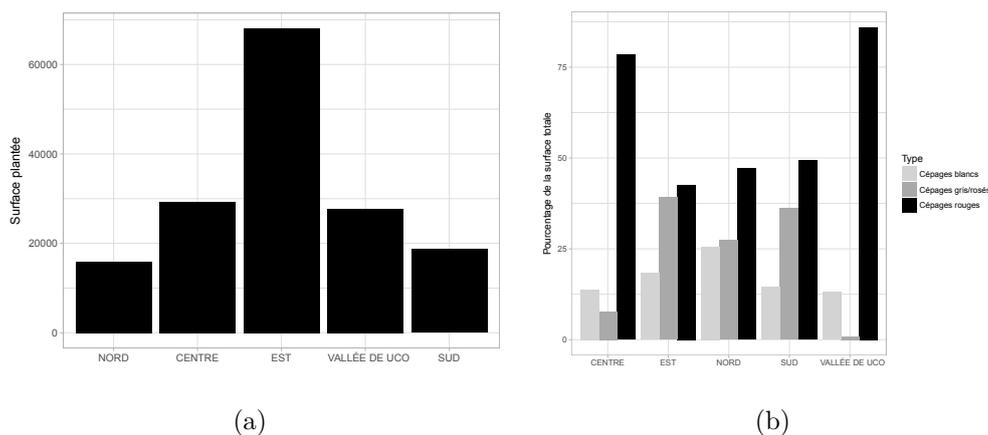


Figure 3.6 – Surfaces viticoles totales et proportion de couleur d'encépagement par rapport à la surface totale dédiée à la production de vins par aire de production à Mendoza (INV, 2015b)

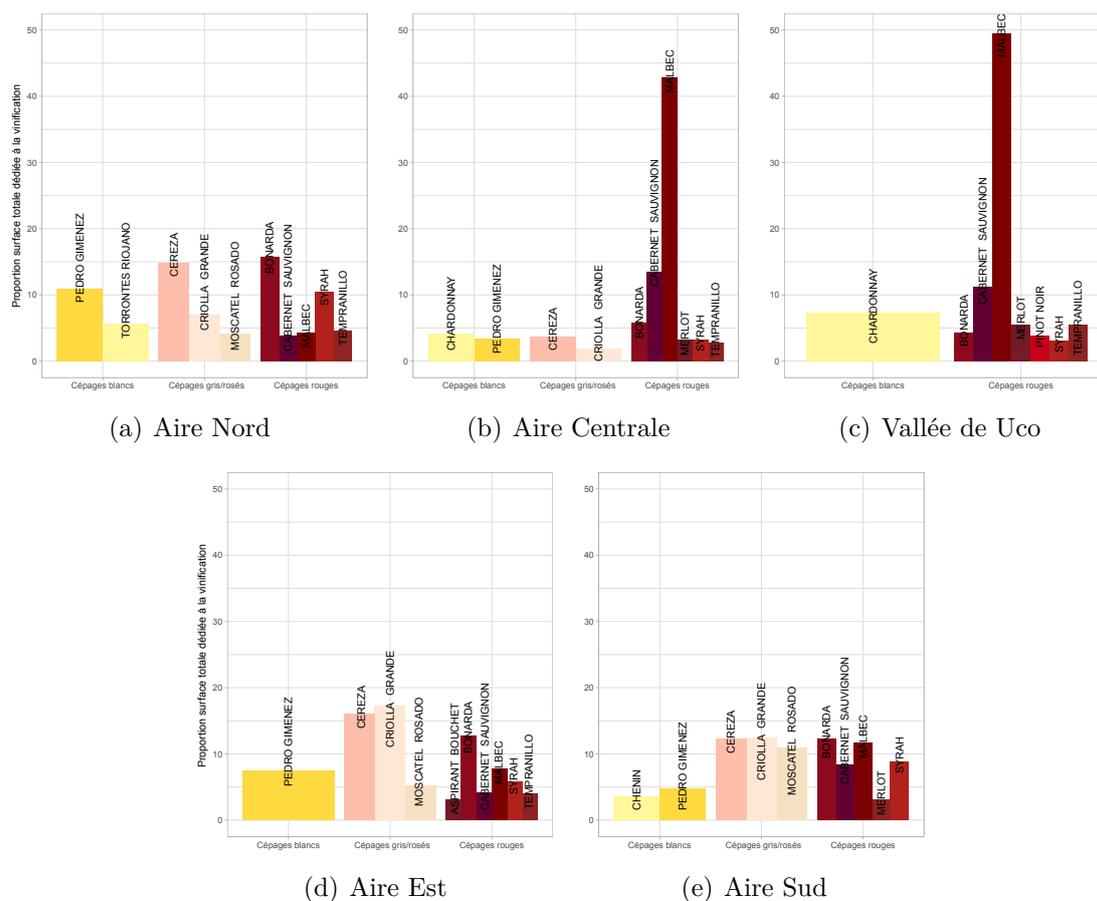


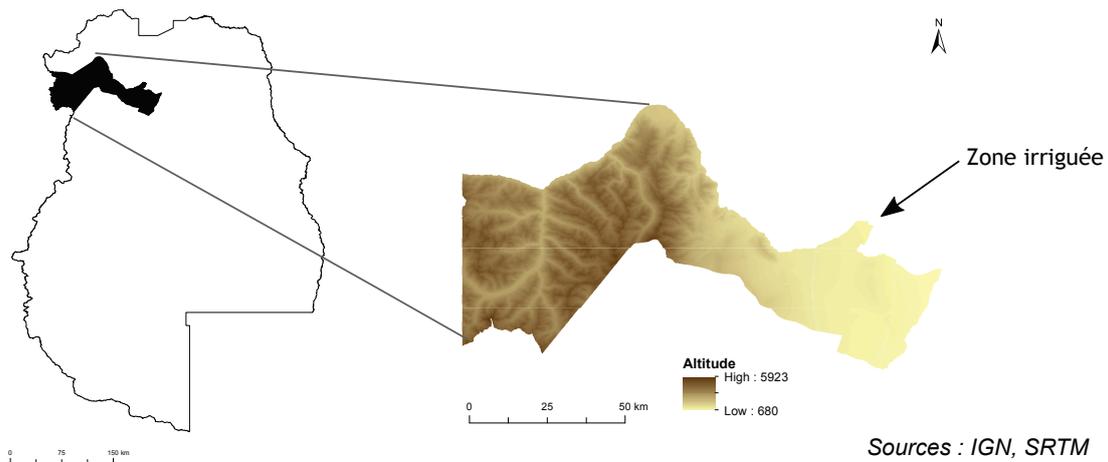
Figure 3.7 – Cépages majoritaires par couleur et par aire de production à Mendoza (INV, 2015d)

Mendoza. La majorité des vignobles sont destinés à la vinification avec une dominance des variétés rouges. Le Bonarda et les cépages locaux (Cereza, Criolla Grande) sont majoritaires. Les cépages locaux sont en diminution depuis les années 1990. Les vins de ces deux zones de production sont peu exportés et demeurent sur le marché national.

3.2.3 Lujan de Cuyo : un département viticole de la zone centrale de production

Lujan de Cuyo est un département de la province de Mendoza situé dans la partie Nord (Figure 3.8). Seule la partie Est du département fait partie de l'oasis Nord de la province et concentre les tissus urbains et les activités agricoles du département. Cette partie correspond à une plaine au pied de la cordillère des Andes de 700 à 1100 m d'altitude. D'un point de vue géomorphologique, cette zone se situe dans un vaste cône de déjection de dépôts alluviaux quaternaires et tertiaires (Lavie, 2009). Dans cette oasis, l'eau provient des cours d'eau andins, notamment le río Mendoza alimenté par la fonte de la neige et des glaciers (Lavie, 2009).

15800 ha de vignes y sont plantés représentant 57% des vignobles de l'aire centrale de production de Mendoza (INV, 2015b). La production est à 92% dédiée à l'élaboration de vins de qualité (INV, 2015b). Le cépage majoritaire est le Malbec. Dans la partie du département où les vignes sont plantées, les sols sont profonds et fertiles. La gestion de l'eau et du stress hydrique de la vigne est la variable dominante dans la maîtrise de la vigueur et la production de raisins de qualité.



3.3 Les données des stations météorologiques

3.3.1 Réseaux de mesures

Dans les différents chapitres utilisant des données issues de stations météorologiques, trois sources de données ont été utilisées.

3.3.1.1 Stations du réseau national

Afin d'étudier le climat régional des principales régions vitivinicoles d'Argentine, les stations du réseau du SMN (Servicio Meteorológico Nacional) ont été utilisées. Ces stations répondent aux normes de l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale). Les données quotidiennes ont été fournies par le SMN. La liste des stations et les variables mesurées sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 – Coordonnées géographiques des stations du SMN et liste des variables mesurées

Station	Lat. (°)	Lon. (°)	Alt. (m)	Variable mesurée
SALTA AERO	-24,856	-65,486	1246	Temp. minimale : T_n (°C)
LA RIOJA AERO	-29,382	-66,796	438	Temp. maximale : T_x (°C)
CATAMARCA AERO	-28,596	-65,752	464	Temp. moyenne : T_m (°C)
SAN JUAN AERO	-31,571	-68,418	597	Temp. du point de rosée :
USPALLATA	-32,600	-69,333	1844	$T_{rosée}$ (°C)
SAN CARLOS	-33,767	-69,033	940	Précipitation : P_r (mm)
SAN MARTIN	-33,083	-68,417	653	Pression atmosphérique :
MENDOZA AERO	-32,832	-68,793	704	P (hPa)
CHACRAS DE CORIA	-32,983	-68,867	920	Vitesse du vent : V_{vent}
MALARGUE AERO	-35,494	-69,574	1430	($m.s^{-1}$)
SAN RAFAEL AERO	-34,588	-68,403	753	Durée du jour : H_e (h)
NEUQUEN AERO	-38,949	-68,167	273	

3.3.1.2 Stations du réseau de la DACC

La DACC (Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas) a installé un réseau de 32 stations, réparties sur les quatre oasis de la Province de Mendoza (Figure 3.9). Elles sont installées sur des propriétés. La DACC met à disposition les données quotidiennes pendant 3 mois et ainsi que des statistiques mensuelles sur son site internet. Les données horaires de température ont été fournies et les données de précipitations mensuelles ont

été récupérées sur leur site internet. Seules les stations présentant une * ont des données de précipitations disponibles.

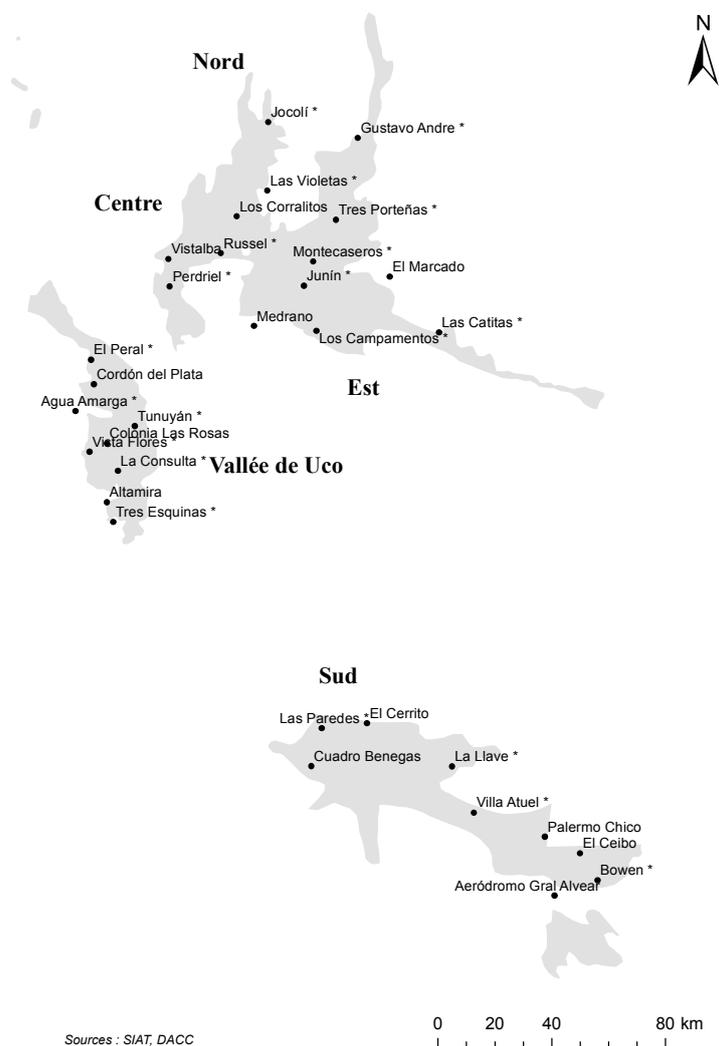


Figure 3.9 – Localisation des stations du réseau de la DACC au sein des 5 aires de production viticoles de la province de Mendoza

3.3.1.3 Station installée sur le site d'étude

Enfin, pour l'étude des besoins en eau de la vigne, les données quotidiennes de la station de la Finca Decero ont été fournies. C'est une station météorologique complète de Pessl Instrument installée selon leurs recommandations disponibles sur leur site internet (Instruments, 2012). Les variables mesurées sont répertoriées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 – Variables mesurées par la station météorologique de la Finca Decero

Variable	Abbréviation et unité
Temp. minimale	T_n (°C)
Temp. maximale	T_x (°C)
Temp. moyenne	T_m (°C)
Humidité relative	HR (%)
Précipitation	P_r (mm)
Radiation solaire	R_s ($W.m^{-2}$)
Vitesse du vent	V_{vent} ($m.s^{-1}$)

3.3.2 Pré-traitement des données météorologiques

3.3.2.1 Cas des données horaires de température

Les données manquantes ou erronées ont été filtrées. Ensuite les données ont été agrégées au pas de temps journalier. La température minimale du jour correspond à la température minimale mesurée dans l'intervalle $[18h-UTC_{jour-1}-18h-UTC_{jour}]$. La température maximale du jour correspond à la température maximale mesurée dans l'intervalle $[6h-UTC_{jour}-6h-UTC_{jour+1}]$. La température moyenne est ensuite obtenue en calculant la moyenne entre la température minimale et maximale. Les données de températures des journées aux relevés incomplets (moins de 19h de relevés) sont considérées comme manquantes.

3.3.2.2 Pré-traitements des données journalières

Les données journalières des températures (sauf celles issues des données horaires) ont été vérifiées afin de détecter les valeurs manquantes et erronées. En ce qui concerne les données de précipitations, de nombreux jours sont sans précipitations ou présentent des précipitations fortes et ponctuelles liées à des orages. Elles n'ont donc pas été pré-traitées ainsi que les données de vitesse du vent par manque de données d'un deuxième anémomètre. Les données de durée du jour, d'humidité relative et de température du point de rosée ont simplement été filtrées pour repérer les données manquantes. Pour les données de radiation solaire (dont radiation solaire dérivée des enregistrements de durée du jour), il a été vérifié que les valeurs de R_{so} (radiation solaire par temps clair) représente la limite supérieure des valeurs de R_s des différentes stations. Les mesures de radiation solaire de la station de Decero étaient bien en-dessous de la courbe de radiation solaire par temps clair. Elles ont donc été corrigées à l'aide d'un facteur multiplicateur de 1,3. Les valeurs de R_s nettement supérieures aux valeurs de R_{so} ont été considérées comme manquantes.

3.3.2.3 Remplacement des données manquantes

L'analyse réalisée ne concerne que les données des campagnes viticoles (période du 1^{er} octobre au 30 avril). Les données manquantes en dehors de cette période de l'année ne sont pas considérées. Dans le cas où une seule donnée de température est manquante au cours d'une saison végétative donnée, elle est remplacée par la moyenne des températures des jours voisins. Dans le cas du jeu de données de la DACC, il y a plusieurs stations par Oasis. Quand plusieurs données sont manquantes, des régressions linéaires ont été effectuées avec les données des stations voisines (en incluant les stations SMN présentes sur la province). A chaque fois, la station la plus proche, dont la régression est la plus significative et permettant la reconstruction du plus grand nombre de données a été retenue. Pour les paramètres nécessaires au calcul de l'évapotranspiration de référence, les données manquantes ont été remplacées en suivant la procédure recommandée par la FAO (Allen *et al.*, 1998). Le choix des paramètres pour convertir les données de durée du jour en radiation solaire, les coefficients proposés par Grossi Gallegos et Atienza (1991) et ceux par défaut ont été testés et les valeurs de radiation estimées comparées à celles de Grossi Gallegos (1998) pour choisir les meilleurs paramètres.

3.3.3 Calcul des indices bioclimatiques

Les indices bioclimatiques suivants ont été calculés pour les campagnes viticoles complètes des données du réseau SMN et de la DACC : température moyenne, minimale et maximale de la saison végétative, indice de Winkler, indice de Huglin, indice des degrés jours biologiquement efficaces, indice de sécheresse, indice de fraîcheur des nuits. Les formules et références des différents indices sont en annexe A.

3.3.4 Calcul de l'évapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence nécessaire au calcul de l'indice de sécheresse ET_0 a été calculée à l'aide de l'équation de Penman-Monteith version FAO 56 Allen *et al.* (1998) (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)(Equation 3.1).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3.1)$$

ET_0 est l'évapotranspiration de référence en mm.j^{-1} ; Δ est la pente de la courbe de la pression de vapeur en $\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$; R_n correspond à la radiation nette $\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$. ; G est le flux de chaleur du sol égal à 0 pour un pas de temps quotidien $\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$; γ est la constante psychrométrique $\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$; T est la température moyenne de l'air en $^\circ\text{C}$; u_2 est la vitesse du vent mesurée à 2 m du sol en m.s^{-1} ; e_s est la pression de vapeur saturante en kPa ; e_a est la pression de vapeur actuelle en kPa .

En la multipliant par un coefficient cultural K_c elle devient l'évapotranspiration potentielle maximale de la culture en conditions optimales.

L'évapotranspiration de référence a été calculée pour les 3 jeux de données. Dans le cas des stations météo de la DACC, seules les données de température sont disponibles. L'équation de Hargreaves a été utilisée. Comme les valeurs par défaut des coefficients conduisaient à une sous-estimation de l' ET_0 , l'équation a été calibrée pour l'année 2014-2015 à l'aide des 3 stations SMN complètes de la Province de Mendoza. La calibration de l'équation est détaillée en annexe B.

3.4 Les données de télédétection

3.4.1 Les images satellitaires optiques

Deux séries temporelles d'images optiques ont été acquises lors de la saison végétative 2014-2015. Le tableau 3.3 détaille les caractéristiques des deux capteurs et le calendrier d'acquisition. Ces deux types d'images fournissent ainsi des données à trois résolutions spatiales différentes.

Tableau 3.3 – Caractéristiques des images satellitaires optiques utilisées

Capteur	Date	Résolution spatiale	Bandes spectrale utilisée
Landsat-8 OLI	15-09-2014	30 m	B1 : 0,433 - 0,453 μm (Aérosols)
	17-10-2014	30 m	B2 : 0,450 - 0,515 μm (Bleu)
	04-12-2014	30 m	B3 : 0,525 - 0,600 μm (Vert)
	05-01-2015	30 m	B4 : 0,630 - 0,680 μm (Rouge)
	21-01-2015	30 m	B5 : 0,845 - 0,885 μm (PIR)
	22-02-2015	30 m	B6 : 1,560 - 1,660 μm (MIR) B7 : 2,100 - 2,300 μm (MIR)
Pléiades	23-12-2014	2 m	B1 : 0,430 - 0,560 μm (Bleu)
	09-01-2015	2 m	B2 : 0,500 - 0,617 μm (Vert)
	25-01-2015	2 m	B3 : 0,590 - 0,722 μm (Rouge)
	11-02-2015	2 m	B4 : 0,740 - 0,945 μm (PIR)
	02-03-2015	0,5 m	B5 : 0,460 - 0,845 μm (PAN)

3.4.1.1 Pré-traitements des images optiques

Les images ont tout d'abord été calibrées radiométriquement et corrigées des effets de l'atmosphère. Ces calibrations sont indispensables pour comparer des images acquises sur une même zone d'étude à des dates différentes. Les comptes numériques sont convertis en réflectance qui correspond à une valeur physique (Kergomard, 2000). Le modèle 6S (Vermote *et al.*, 1997) est utilisé et comprend trois étapes. Les comptes numériques

sont premièrement convertis en valeurs de luminance. Ensuite, les valeurs de luminance sont converties en réflectances exo-atmosphériques et ces dernières en réflectances au sol. Les corrections ont été appliquées sur chacune des bandes des deux types d'images utilisées à chaque date d'acquisition. Dans un second temps, les images doivent être corrigées géométriquement. Les images Landsat-8 sont fournies déjà corrigées géométriquement. Les images Pléiades ont été orthogéoréférencées, les unes par rapport aux autres en utilisant les données parcellaires et des points d'amers pris sur les images Landsat. Ceci permet d'éliminer les distorsions d'altitude, de rotation, de courbure etc... enregistrées par le capteur. Le système de projection utilisé est l'UTM zone 19S (code EPSG : 32719). Une cinquantaine de points de contrôle ont été répartis sur les images. L'erreur quadratique moyenne de la correction géométrique obtenue est inférieure à 1 pixel.

3.4.1.2 Calcul des indices de végétation

Suite aux calibrations radiométriques, atmosphériques et géométriques des images optiques, des indices de végétation ont été calculés. Le tableau 3.4 présente les différents indices calculés et leurs formules. Les indices de végétation sont sensibles à la densité et à l'état de croissance ou de santé de la végétation. Quand l'activité photosynthétique augmente, la réflectance dans le proche infra-rouge augmente alors qu'elle diminue dans le rouge. Donc, plus la végétation sera dense, plus les valeurs des indices seront élevées. Parmi les indices de végétation calculés, le NDVI et le SR (couramment appelé PCD dans les applications en viticulture) sont les plus simples et les plus courants. L'étude étant effectuée sur des vignobles aux caractéristiques géométriques et à l'entretien de l'inter-rang variable, le SAVI et le MTVI2 ont été également dérivés des images. Pour le calcul du SAVI, le facteur d'ajustement du sol a été fixé à 0.5 qui est une valeur adaptée à une densité de végétation moyenne (Huete, 1988).

3.4.1.3 Calcul du LAI à partir des images satellites

Le LAI (Indice de la surface foliaire) correspond à la moitié de la surface foliaire interceptrice par unité de surface au sol (Chen et Black, 1992). C'est une mesure sans dimension (m^2 de feuilles par m^2 de sol). Cette variable est couramment utilisée pour suivre l'évolution de la croissance des cultures à travers l'évolution de la surface foliaire. De plus, en viticulture l'estimation de la surface foliaire de la vigne est une des variables permettant d'en estimer la vigueur.

Le LAI peut être directement dérivé des images satellitaires à partir de méthodes empiriques ou des modèles de transferts radiatifs. Dans cette thèse, le modèle empirique de Liu *et al.* (2010) a été utilisé. Ce modèle permet de dériver le LAI à partir du MTVI2 à partir de l'équation suivante :

$$LAI_{MTVI2} = -6,247 \times \ln(0,943 - 0,643 \times MTVI2) \quad (3.2)$$

Tableau 3.4 – Indices de végétation calculés à partir des images satellitaires optiques

Nom	Equation
Normalized Difference Vegetation Index (Rouse Jr <i>et al.</i> , 1973)	$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$
Plant Cell Density (Jordan, 1969) or Simple Ratio	$PCD = \frac{\rho_{nir}}{\rho_{red}}$
Soil Adjusted Vegetation Index (Huete, 1988)	$SAVI = (1 + L) \frac{(\rho_{nir} - \rho_{red})}{\rho_{nir} + \rho_{red} + L}$
Modified Triangular Vegetation Index 2 (Haboudane <i>et al.</i> , 2004)	$MTVI2 = \frac{1,5(1,2(\rho_{nir} - \rho_{green}) - 2,5(\rho_{red} - \rho_{green}))}{\sqrt{(2\rho_{nir} + 1)^2 - (6\rho_{nir} - 5\sqrt{\rho_{red}}) - 0,5}}$

Il a été testé sur de nombreuses cultures (Liu *et al.*, 2010) et a été employé dans plusieurs travaux comme mesure du LAI dérivé des images satellitaires (Fieuzal *et al.*, 2013, Betbeder *et al.*, 2016).

3.4.2 Les images satellitaires radar

Une série temporelle d'images TerraSAR-X a été acquise durant la campagne végétative 2014-2015 en double polarisation HH/VV. Les caractéristiques des images sont présentées dans le tableau 3.5. Un angle d'incidence de 28° a été choisi afin d'obtenir de l'information à la fois sur la végétation et sur le sol. La série comporte 6 images acquises durant le cycle végétatif 2014-2015.

3.4.2.1 Pré-traitement des images radar

Les différents pré-traitements effectués sont présentés sur le schéma 3.10

a) Extraction des coefficients de rétrodiffusion

Les images TerraSAR-X ont été calibrées radiométriquement selon l'équation suivante (Fritz, 2007) :

$$\sigma^0 = (K_s \cdot DN^2 - NEBN) \cdot \sin(\theta) \quad (3.3)$$

où K_s est la constante d'étalonnage, DN est l'amplitude du signal de rétrodiffusion égale à la valeur numérique de chaque pixel, $NEBN$ (Noise Equivalent Beta Naught) est le bruit du capteur et θ l'angle d'incidence.

Tableau 3.5 – Caractéristiques des images TerraSAR-X utilisées

Caractéristiques d'acquisitions	Haute résolution spotlight Double polarisation HH/VV Acquisition ascendante droite Angle d'incidence : 28°
Résolutions	Résolution spatiale : 1,5 m Résolution azimutale : 2,2 m
Couverture	5 km x 10 km
Dates d'acquisition	19-09-2014 22-10-2014 13-11-2014 16-12-2014 18-01-2015 25-03-2015

Cette équation permet de convertir les valeurs numériques de chaque pixel en coefficient de rétrodiffusion sur une échelle linéaire. Ensuite le chatoiement a été atténué à l'aide d'un filtrage spatial. Le chatoiement est un bruit poivre et sel sur l'image dû à la diffusion multiple dans chaque cellule de l'image. Le filtre Lee Refined (Lee, 1981) avec une fenêtre de 7x7 a été utilisé. Ce filtre a été retenu car il permet de lisser les zones homogènes tout en préservant les détails sur les zones hétérogènes (Lee et Pottier, 2009b). La taille de la fenêtre glissante choisie est adaptée aux études à l'échelle parcellaire (Betbeder, 2015). Ensuite, les images ont été géocodées et corrigées des déformations topographiques en utilisant le modèle numérique de terrain SRTM (Shuttle Radar Topography). Les images ont été également corrigées géométriquement pour se superposer aux données optiques et projetées dans le système UTM zone 19S (code EPSG : 32719) à l'aide de 50 points de contrôles sélectionnés à partir des données parcellaires et d'une image Pléiades. L'erreur quadratique moyenne de la correction géométrique est inférieure à 1 pixel.

Enfin, les coefficients de rétrodiffusion ont enfin été convertis en décibels (échelle logarithmique) avec l'équation suivante :

$$\sigma^0(dB) = 10 \log_{10}(\sigma^0) \quad (3.4)$$

La ratio HH/VV a également été calculé.

b) Extraction des paramètres polarimétriques

La matrice de covariance C_2 a été extraite à partir de la matrice de diffusion S dérivée des images brutes en SLC (Single Look Complex). Le chatoiement a ensuite été filtré à l'aide du filtre de Lee Refined 7x7 comme pour les rétrodiffusions. Les matrices de

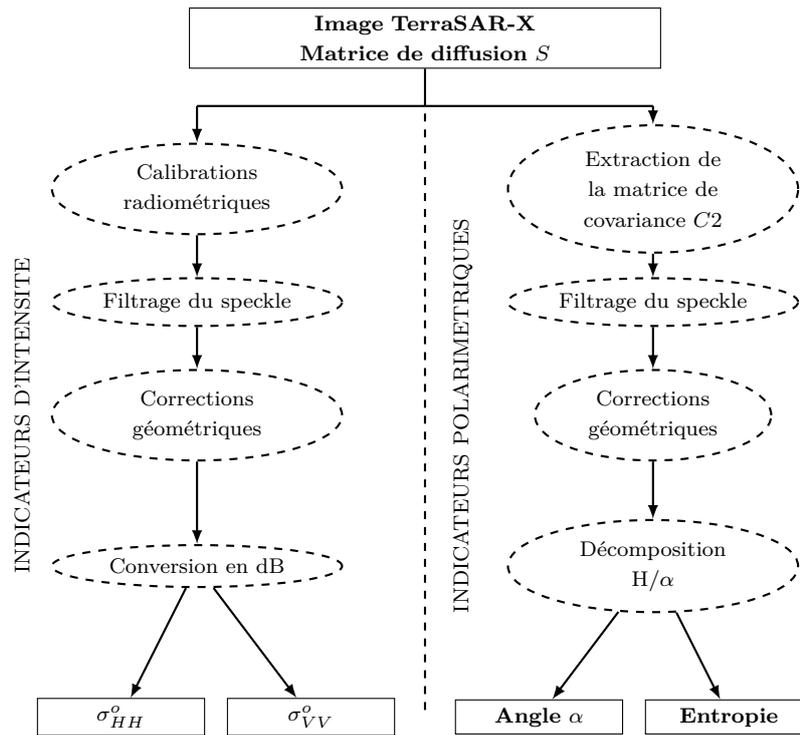


Figure 3.10 – Schéma des pré-traitements effectués sur les images radar

covariance ont été corrigées géométriquement en suivant la même procédure que pour les rétrodiffusions. Enfin, les paramètres polarimétriques, l'entropie et l'angle alpha ont été extraits à l'aide de la décomposition de Cloude et Pottier adaptée à la polarisation double (Cloude, 2007). Tous les traitements polarimétriques ont été réalisés avec le logiciel PolSARpro V5.0 (Pottier et Ferro-Famil, 2012). La décomposition de Cloude et Pottier (1996) est normalement réalisée à partir de la matrice de cohérence. Cependant, la matrice de covariance et la matrice de cohérence sont issues de deux vectorisations de la matrice de diffusion. Une matrice de passage permet de passer de l'une à l'autre. Les décompositions polarimétriques peuvent être réalisées à partir des deux matrices. La matrice de covariance C_2 a été utilisée ici car les fonctionnalités du logiciel en polarisation duale ne permettent pas de traiter la matrice de cohérence en polarisation duale T_2 .

3.5 Les observations et mesures de terrain

Cette section détaille toutes les données qui ont été collectées sur le site d'étude situé dans le district d'Agrelo qui fait partie du département de Lujan de Cuyo. Les données ont été collectées lors de la campagne viticole 2014-2015.

3.5.1 Les parcelles viticoles

3.5.1.1 Parcelle des domaines échantillonnés

Dans cette thèse, les travaux réalisés sur le site d'Agrelo portent principalement sur les parcelles de 4 domaines viticoles sur lesquelles ont été collectées toutes les données. Les quatre domaines ont été choisis pour la variété des pratiques culturales, leurs objectifs de production et la localisation de leurs vignobles pour couvrir une grande partie du site 3.11.

Le domaine de la bodega Alta Vista représente le site aux pratiques culturales les plus traditionnelles, Septima et Decero correspondent aux domaines dits "modernes" qui ont été créés suite à la crise viticole des années 1990. Les vignes sont jeunes et l'orientation de la production suit les volontés du marché. Enfin, le site de Los Reyunos est un domaine où les raisins ne sont pas vinifiés sur place mais vendus. Leurs objectifs de production sont orientés vers des hauts rendements.

3.5.1.2 Parcelle à l'échelle du paysage

Afin de fournir une information plus générale ou de tester les possibilités d'extension de certains travaux, toutes les parcelles présentes sur le site d'étude ont été digitalisées par image-interprétation à partir des images Pléiades. Ce parcellaire est présenté dans la figure 3.12 en fonction du mode de conduite de la canopée.

Sur les 2250 ha de vignes plantées sur cette zone, 120 ha correspondent à des vignes conduites en pergola soit 5% de la surface. Les vignes conduites en pergola présentent un écart inter-cep équivalent à celui de l'écart inter-rang. Elles vont donc présenter un motif en grille plus ou moins visible en fonction de l'état de croissance de la vigne au lieu d'un motif en rangs. De plus la canopée est conduite à environ 2m de hauteur et la géométrie de la canopée est horizontale.

Parmi les 4 domaines suivis, seules trois parcelles sont conduites de cette manière. Ainsi, dans tous les travaux de cette thèse, cette catégorie de parcelles n'a pas été retenue car elles ne constituent pas une classe significative en effectif dans le jeu de données de terrain.

3.5.2 Les pratiques culturales

Un inventaire des pratiques culturales pérennes, pluri-annuelles ainsi que les registres de toutes les pratiques annuelles réalisées durant la campagne d'étude a été réalisé.

La figure 3.13 présente les cépages plantés sur les différentes parcelles des quatre domaines échantillonnés. Le Malbec est le cépage majoritaire suivi par le Cabernet Sauvignon comme attendu sur un site viticole de l'aire centrale de production de Mendoza.

Le tableau 3.6 présente un résumé des pratiques pérennes par domaine viticole sur le site d'étude.

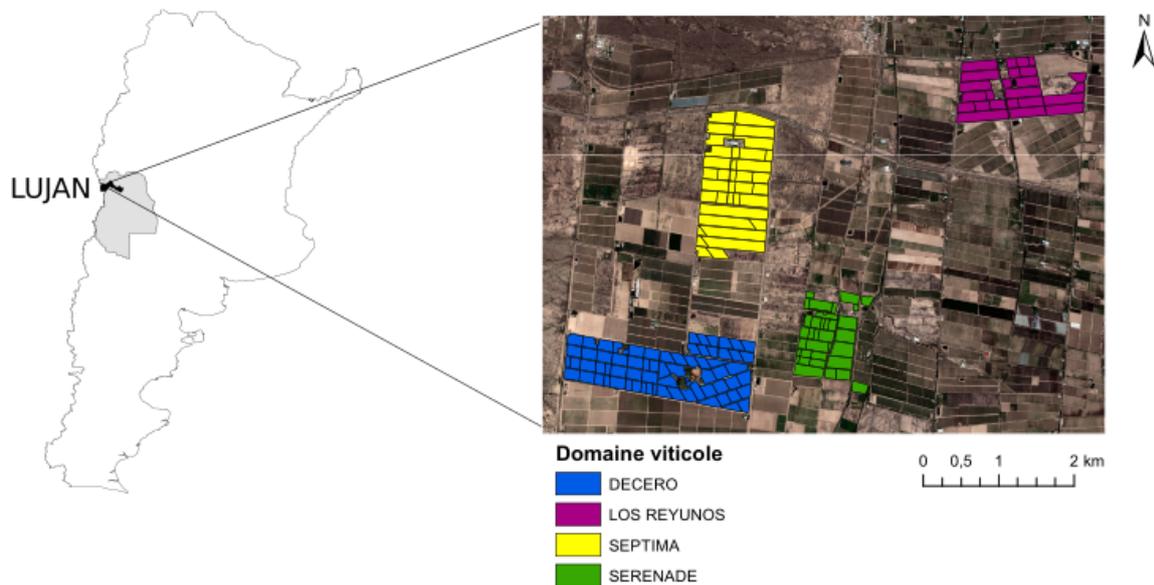


Figure 3.11 – Localisation des parcelles des quatre domaines viticoles échantillonnés

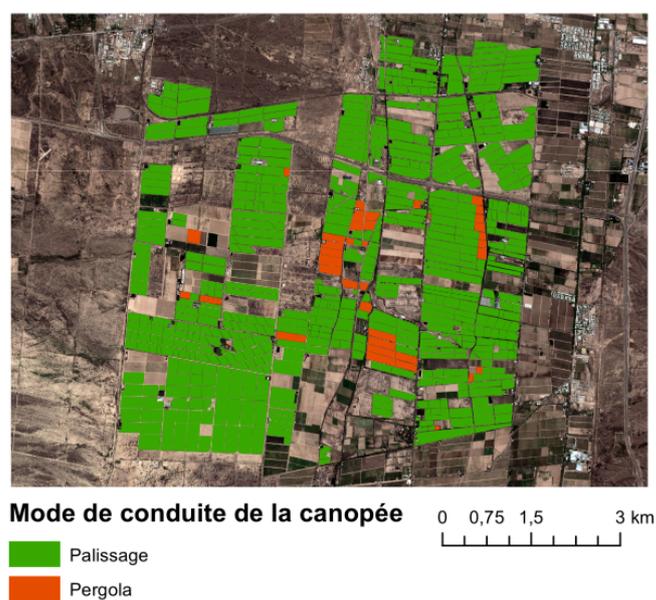


Figure 3.12 – Parcelles de vignes présentes sur la zone d'étude en fonction du mode de conduite de la canopée



Figure 3.13 – Carte des principaux cépages plantés sur les quatre domaines échantillonnés

Tableau 3.6 – Résumé par domaine viticole des pratiques culturales de plantation et de gestion des parcelles

Vignoble	Ecart Inter-rang	Ecart Inter-cep	Row orientation	Année de plantation
Septima	[2,2 - 3,0]m	[1,0 - 2,0]m	5° et 144°	[2000 - 2006]
Decero	[2,0 - 2,2]m	[1,0 - 1,4]m	5° et [150° - 155°]	[2001 - 2013]
Los Reyunos	1,8 m	1 m	167.5°	[2005 - 2012]
Alta Vista	[1,8 - 2,0]m	1.0 m	[8° - 11°]	[1960 - 2003]

Sur les quatre vignobles suivis, une diversité des écarts inter-rangs, des années de plantation et des orientations des rangs est présente. Les pratiques pérennes des parcelles de Decero et Septima sont très similaires sauf pour l'écart inter-rang qui est plus variable pour Septima. Les vignes d'Alta Vista sont les plus anciennes du site d'étude avec une partie des parcelles datant des années 1960. Les autres vignobles ont été plantés au début des années 2000. Ceci s'explique en grande partie par l'évolution de la filière vers la production de vins de qualité suite à la crise viticole des années 1990 et au fort développement de celle-ci dans le département de Lujan de Cuyo.

De plus, il faut aussi noter que les sites échantillonnés regroupent les deux modes

d'irrigation des vignobles de Mendoza : la méthode gravitaire sur les parcelles d'Alta Vista et l'irrigation par goutte à goutte sur les autres vignobles. La méthode gravitaire est le mode d'irrigation traditionnel. Des sillons d'irrigation sont creusés par labour entre les rangs et l'eau circule sur la parcelle tout en s'infiltrant grâce au tomero qui la fait circuler progressivement sur la parcelle. Le tomero est l'employé du domaine qui est en charge de l'irrigation. La figure 3.14 illustre le fonctionnement de cette méthode d'irrigation.



Figure 3.14 – Illustration de l'irrigation par méthode gravitaire (photo prise à Agrelo le 3 décembre 2014)

Cependant, cette méthode d'irrigation ne permet pas de réaliser un apport homogène d'eau sur les parcelles et une partie de l'eau s'évapore durant chaque irrigation. L'efficacité d'application maximale de ce système d'irrigation est estimée à 60% (Morábito *et al.*, 2007). Ceci signifie que 60% de l'eau qui arrive sur la parcelle sont accumulés dans le sol. Dans le cas d'une irrigation par goutte à goutte des tuyaux sont placés sous le rang et délivrent l'eau d'irrigation au pied des ceps de vigne. Cette méthode plus coûteuse à l'installation permet une répartition homogène de l'eau sur les parcelles et présente une efficacité de 90% (Morábito *et al.*, 2007).

3.5.3 Suivi de la croissance végétative

La croissance végétative a été suivie sur 14 parcelles présentées sur la figure 3.15.

Les mesures ont été effectuées toutes les deux semaines et également synchronisées au calendrier d'acquisition de TerraSAR-X. Deux variables ont été mesurées, la hauteur totale de la canopée et la surface foliaire nommée ensuite LAI (Leaf Area Index). Ces deux variables ont été mesurées sur 4 placettes par parcelle. Elles ont été choisies pour représenter la parcelles et la proportion de ces hétérogénéités.

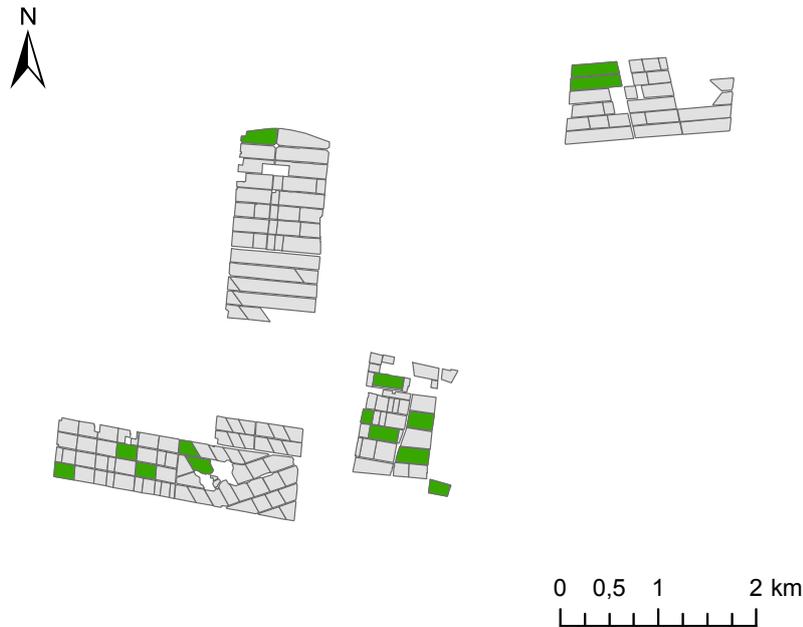


Figure 3.15 – Localisation (en vert) des parcelles échantillonnées pour le suivi de la croissance végétative sur le site d'étude

3.5.3.1 Mesures du LAI

Les mesures de LAI ont été réalisées de manière indirecte à travers des photographies hémisphériques. Afin de couvrir le gradient rang/inter-rang, un total de 5 photos par placettes a été acquises réparties sous le rang central de la placette et à différents endroits de l'inter-rang (Figure 3.16). Pour chaque parcelle, 4 placettes sont échantillonnées et donc un total de 20 photographies a été acquis par parcelle à chaque relevé.

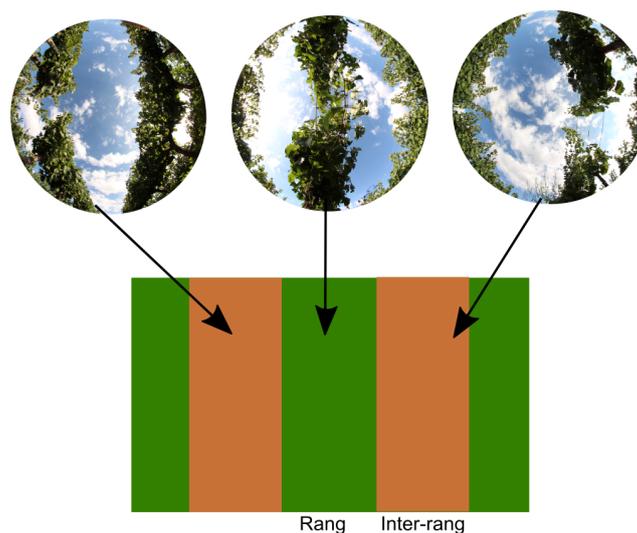


Figure 3.16 – Exemples de photographies hémisphériques acquises à différentes positions par rapport au gradient rang/inter-rang

Les photos ont ensuite été traitées avec le logiciel CAN-EYE (Demarez *et al.*, 2008). Il permet de dériver de manière indirecte le LAI des parcelles à travers l'estimation de la fraction de trou et du coefficient d'aggrégation de la canopée. Cette méthode permet d'échantillonner rapidement plusieurs parcelles que les méthodes indirectes traditionnelles comme la mesure de la longueur des rameaux (Tregoat *et al.*, 2001). Elle conduit à une surestimation du LAI (López-Lozano *et al.*, 2009), mais qui est constante sur la saison et les mesures par cette méthode présentent une bonne corrélation aux mesures directes du LAI (Orlando *et al.*, 2016).

Enfin, l'estimation du LAI à partir de photographies hémisphériques est une mesure indirecte basée sur la détection des parties vertes de la plante et sera donc appelée GLAI correspondant au Green Leaf Area Index dans le reste de ce manuscrit.

3.5.3.2 Mesure de la hauteur de la canopée

Les mesures de hauteur de la canopée ont été réalisées sur 10 ceps de vignes par placettes soit un total de 40 mesures par parcelles. Elles correspondent à la hauteur maximale atteinte par la canopée à partir du sol. A l'échelle de la parcelle, la moyenne des mesures à été considérée.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté, le contexte viticole argentin de manière générale ainsi que toutes les données acquises et leurs pré-traitements.

A l'échelle régionale, le contexte viticole des principales régions et les données des stations du réseau SMN avec leur historique disponible depuis les années 1960 ont permis d'étudier le potentiel viticole de ces régions viticoles ainsi que les tendances d'évolution climatique sur les cinquante dernières années (Chapitre 4).

A l'échelle inter-régionale, le contexte viticole de la province de Mendoza dans les quatre aires de production associées aux données des stations du réseau SMN et de celui de la DACC ont été employés afin d'évaluer les différences agroclimatiques des différentes aires de production viticoles ainsi que le rôle des caractéristiques topographiques et géographiques des aires de production (Chapitre 5).

Enfin à l'échelle locale, l'impact des pratiques culturales sur les variables optiques et radar a été déterminé à partir des données acquises sur les quatre domaines viticoles (Chapitre 6, 7 et 8). Ensuite, le potentiel des données satellitaires pour cartographier la croissance végétative et estimer les besoins en eau de la vigne a été évalué dans les chapitres 7 et 9.

PARTIE II

Analyse multi-échelle du climat des régions viticoles d'Argentine

INTRODUCTION

Historiquement, le berceau de la viticulture en Argentine correspond à la région de Cuyo dans la Province de Mendoza (Agosta *et al.*, 2010). Cependant, la viticulture est aujourd'hui présente du Nord du pays, dans la province de Salta, jusqu'aux portes de la Patagonie, dans la province de Neuquen. Avec cette grande variété de latitude, la vigne est cultivée en Argentine sous plusieurs types de climats. Comme il a été vu précédemment, le climat est l'un des principaux facteurs qui détermine l'aptitude d'une région à la culture de la vigne (Jones, 2006) et qui détermine le choix optimal des variétés et la qualité potentielle des raisins (Van Leeuwen *et al.*, 2004b, 2009, Parker *et al.*, 2013). De plus, dans le contexte du changement climatique, certaines régions de production sont menacées alors que d'autres vont voir leur climat devenir plus favorable (Jones *et al.*, 2005a). Les travaux de Cabré *et al.* (2016) concernent la projection des indices bioclimatiques et des précipitations en Argentine, en particulier de Mendoza jusqu'au Nord de la Patagonie, en suivant le scénario A2 du changement climatique. Les résultats indiquent une augmentation globale de la température moyenne de la saison végétative à l'horizon 2100 ≥ 2 °C. D'un point de vue bioclimatique, une diminution de l'aire de la région considérée comme trop froide selon la classification de Winkler (1974) et une augmentation de la région trop chaude sont attendues. Concernant les précipitations, les résultats indiquent une légère augmentation de la pluviométrie estivale dans la région de Cuyo ainsi qu'une diminution des précipitations hivernales y compris en montagne. Ce dernier point est confirmé par Villalba et Boninsegna (2009) avec le scénario A1B. Or, la viticulture en Argentine est dépendante de l'irrigation. La diminution des précipitations hivernales sous forme de neige en montagne réduit également le débit des rivières et les quantités d'eau disponibles pour l'irrigation (Villalba et Boninsegna, 2009, Mussetta et Barrientos, 2015). Au Nord de l'Argentine et de la Patagonie, une forte diminution des précipitations estivales est attendue. Ces travaux suggèrent donc que les contraintes des régions vitivini- coles actuelles vont évoluer. Avec l'augmentation des températures, les régions les plus fraîches vont devenir plus favorables. La viticulture a commencé à se développer dans des secteurs jusqu'ici considérés comme non favorables : en altitude dans la Quebrada de Humauaca dans la province de Salta, et en Patagonie près de El Bolson au Sud des

régions viticoles actuelles (Quénol, 2014). Cependant, les évolutions attendues concernant les régimes pluviométriques suggèrent que l'aridité va s'accroître ainsi que les contraintes concernant la disponibilité de l'eau pour l'irrigation.

En parallèle, à Mendoza, une augmentation de la température moyenne de la saison végétative de 2 degrés associée à une augmentation de la pluviométrie estivale n'est pas favorable à la pérennité de la production d'une vendange saine (Agosta *et al.*, 2012) ni à l'élaboration de vins de qualité (Tonietto, 1999, Keller, 2010, Jones, 2004). En outre, la diminution des précipitations hivernales dans les Andes va encore réduire la quantité d'eau disponible pour l'irrigation des cultures dans une région où l'eau est source de conflits d'usage (Bustos, 2013, Mussetta et Barrientos, 2015). Les projections des scénarios récents du changement climatique RCP 4.5 et RCP 8.5 (GIEC, 2013) confirment une augmentation de la température moyenne annuelle de 1,5°C (RCP 4.5) à 3°C (RCP 8.5) à l'horizon 2100 (Barros *et al.*, 2015) ainsi qu'une diminution des précipitations hivernales de -1 mm/j (RCP 4.5) à -4 mm/j (RCP 8.5) (Chou *et al.*, 2014). En fonction, des changements qui seront réellement observés au cours du 21^{ème} siècle, des mesures d'adaptation brutales (changement de cépages, déplacement des vignobles...) pourront être nécessaires afin d'assurer la pérennité de la première région viticole d'Argentine.

Ainsi l'objectif de cette partie est d'étudier le climat des régions viticoles d'Argentine à deux échelles. Tout d'abord une analyse de la variabilité spatiale et temporelle du climat entre les différentes régions productrices de raisins est effectuée dans le chapitre 4. Cette analyse a pour but de déterminer le potentiel viticole des différentes régions et son évolution durant les cinquante dernières années. Ensuite, le chapitre 5 est dédié à l'analyse de la variabilité spatiale du climat au sein de la province Mendoza dans les cinq aires de production viticole. L'objectif est ici d'identifier les sources de variation du climat à l'échelle intra-régionale afin de mieux connaître les leviers pour une adaptation à moyen-terme de la filière viticole dans cette région.

CHAPITRE 4

Caractérisation et évolution du climat des régions vitivinicoles d'Argentine

Sommaire

4.1	Introduction	70
4.2	Matériel et méthodes	70
4.2.1	Région d'étude	70
4.2.2	Données utilisées	71
4.2.3	Analyse de la variabilité spatiale et temporelle régionale des températures et des précipitations de la saison végétative	72
4.3	Résultats et discussion	73
4.3.1	Variabilité inter-régionale et temporelle des températures moyennes, minimales et maximales des saisons végétatives et des précipitations	73
4.3.2	Evolution des indices bioclimatiques	77
4.3.3	Choix variétaux	79
4.4	Limites de l'utilisation des indices bioclimatiques	81
4.5	Conclusion	82

4.1 Introduction

L'Argentine s'étend sur plus 3000 km du Nord au Sud de 22° à 55° de latitude. Selon la classification de Köppen (Kottek *et al.*, 2006) les régions arides sont concentrées à l'Ouest du pays près de la cordillère des Andes sous l'influence du vent zonda. Au centre et à l'Est du pays, les climats des pampas (tempérés chauds avec ou sans hiver secs) sont retrouvés ainsi que le domaine tropical plus au Nord (Bianchi et Cravero, 2010). Le Sud du pays est sous l'influence des vents d'origine polaire froids (el Pampero) et est composé de climats désertiques froids ou océaniques froids (Bianchi et Cravero, 2010). Les différentes régions vitivinicoles d'Argentine réparties suivant un gradient latitudinal depuis le Nord du pays jusqu'au Nord de la Patagonie sont ainsi implantées dans des régions aux climats variés.

Les indices bioclimatiques basés sur l'étude des températures durant la période végétative : température de la saison végétative, indice des degrés jours de Winkler, indice de Huglin, indice des jours biologiquement actifs, indice de fraîcheur des nuits (formules et références dans l'annexe A) sont couramment utilisés afin d'étudier le potentiel viticole du point de vue thermique. Au-delà du potentiel thermique, des indices incluant les cumuls pluviométriques comme l'indice de sécheresse sont également utilisés afin de caractériser le déficit ou l'excédent hydrique d'une région. Dans un contexte d'aridité fortement présent en Argentine, l'utilisation de ce type d'indice apparaît indispensable. Tonietto et Carbonneau (2004) ont notamment couplé l'analyse de l'indice de Huglin, l'indice de fraîcheur des nuits et l'indice de sécheresse afin de classer les types de climats des régions viticoles du monde. Ceci permet de mieux connaître les conditions climatiques de production des raisins ainsi que le potentiel qualitatif global d'une région. A l'échelle annuelle, les différents indices sont utiles pour caractériser le potentiel d'un millésime.

Aussi, l'étude de l'évolution temporelle de ces indices à l'échelle régionale est un bon marqueur des premiers impacts régionaux du changement climatique (Jones, 2007, Bonnefoy, 2013, Schultz, 2000, Tomasi *et al.*, 2011). Dans ce chapitre, l'évolution climatique des 6 principales régions viticoles d'Argentine de 1964 à 2016 est étudiée à partir des stations du réseau météorologique national. Ces stations, qui correspondent aux normes de l'OMM, sont représentatives du climat régional. Le potentiel de chaque région et l'évolution climatique sont confrontés à l'organisation actuelle de la production et notamment à l'encépagement choisi.

4.2 Matériel et méthodes

4.2.1 Région d'étude

Cette étude porte sur les principales régions viticoles d'Argentine. Elles sont localisées dans la partie Ouest du pays, au pied de la Cordillère des Andes (Figure 4.1. Plus de détails sont disponibles dans la section 3.2.1

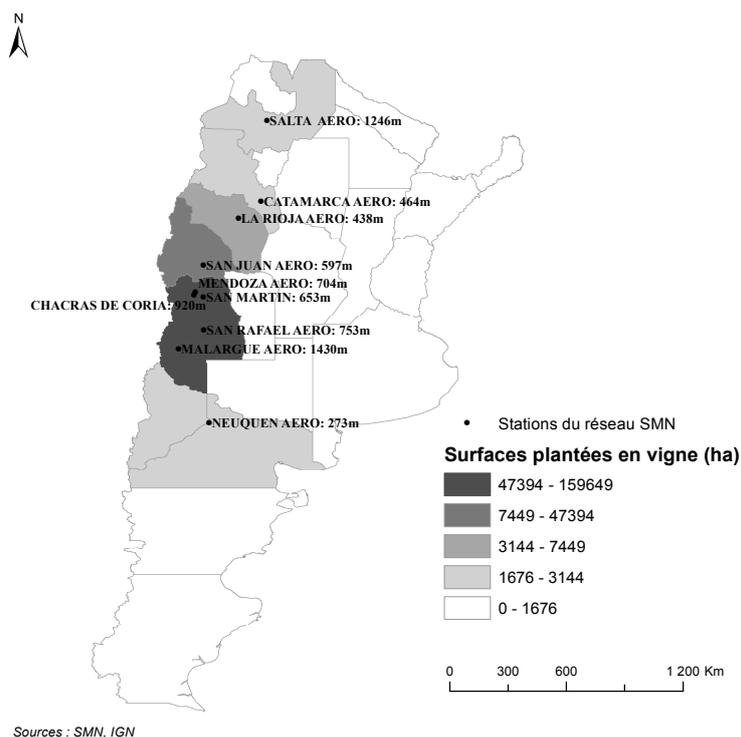


Figure 4.1 – Localisation des stations du réseau météorologique national (SMN) associée aux surfaces plantées en vignes de chaque province viticole

4.2.2 Données utilisées

4.2.2.1 Données météorologiques

Les données quotidiennes des stations météorologiques du réseau SMN ont été utilisées dans ce chapitre. Leur localisation au sein des différentes provinces viticoles est illustrée dans la figure 4.1. Les détails concernant les paramètres fournis et le pré-traitement des données sont présentés dans les sections 3.3.1.1 et 3.3.2. Les différents indices calculés sont développés dans la section 3.3.3.

4.2.2.2 Statistiques viticoles

Les registres annuels de l'INV (Instituto Nacional de Vitivinicultura) ont été téléchargés sur leur site internet. Les données concernées sont les registres de 2015 des surfaces viticoles et variétés plantées (INV, 2015b).

4.2.3 Analyse de la variabilité spatiale et temporelle régionale des températures et des précipitations de la saison végétative

Tout d'abord, le test de Pettitt (Pettitt, 1979) a été réalisé afin de détecter les ruptures d'homogénéité dans les séries des températures minimales, maximales et moyennes des saisons végétatives. Le potentiel viticole des six régions étudiées a été analysé en étudiant les classes des différents indices bioclimatiques. Il a ensuite été confronté aux choix variétaux actuels réalisés dans chaque région. Les anomalies de la température moyenne de la saison végétative et des cumuls de précipitations par saison végétative ont été calculées. Selon, les signes des anomalies, chaque campagne viticole a été classée dans un des quatre types du tableau 4.1. En fonction des ruptures dans les séries climatiques, le jeu de données a été divisé en deux sous-séries. La fréquence des 4 classes au cours des deux sous-périodes a été calculée afin d'étudier l'évolution des types d'années du point de vue météorologique. Les classes ne prennent pas en compte l'intensité de l'anomalie uniquement son signe. De plus, les différents types d'années n'entraînent pas des caractéristiques météorologiques similaires entre les différentes régions viticoles étudiées.

Tableau 4.1 – Caractéristiques des quatre types de saisons végétatives en fonction du signe des anomalies de la température moyenne de la saison végétative et du cumul des précipitations de la saison végétative

Type	Anomalie de la température moyenne de la saison végétative	Anomalie du cumul de précipitations durant la saison végétative
Plus fraîche et plus humide	< 0	> 0
Plus fraîche et plus sèche	< 0	> 0
Plus chaude et plus sèche	> 0	< 0
Plus chaude et plus humide	> 0	> 0

4.3 Résultats et discussion

4.3.1 Variabilité inter-régionale et temporelle des températures moyennes, minimales et maximales des saisons végétatives et des précipitations

La variabilité inter-régionale et temporelle des températures minimales, maximales et moyennes des saisons végétatives est présentée dans la figure 4.2. Toutes les courbes présentent une pente indiquant une augmentation globale des températures sur la période concernée. Les provinces de La Rioja et Catamarca sont caractérisées par les températures moyennes de la saison végétative les plus élevées presque toujours supérieures à 24°C. Ces deux régions sont donc dans la catégorie considérée comme trop chaude pour la culture de la vigne. Les températures minimales et maximales confirment cette hypothèse avec des températures minimales supérieures à 17°C et maximales supérieures à 30°C. A l'opposé, la station de Malargue Aero, située dans la Province de Mendoza à 1430 m d'altitude, présente des températures moyennes de la saison végétative autour de 16°C pour des températures minimales et maximales de 8°C et 24°C respectivement. La station de San Juan Aero se trouve dans la classe très chaude avec des températures moyennes de la saison végétative avoisinant les 23°C. Cette région est également caractérisée par des températures maximales de la saison végétative élevées supérieures à 30°C, associées à des températures minimales en moyenne de 15°C. Parmi les stations de la province de Mendoza, celles de l'aéroport de Mendoza et du département de San Martin présentent des températures moyennes, minimales et maximales plus élevées que celles des stations de Chacras de Coria (située au Sud de la ville de Mendoza) et de l'aéroport de San Rafael (située au Sud de la Province). Les deux premières sont dans la classe très chaude alors que les suivantes sont dans la classe chaude. Les stations situées dans les régions de Salta et Neuquen/Río Negro présentent des valeurs de températures moyennes et maximales de la saison végétative similaires à celles de Chacras de Coria et San Rafael Aero. La station de Salta Aero présente cependant des températures minimales de la saison végétative plus élevées que les stations de Chacras de Coria, Neuquen Aero et San Rafael Aero suggérant une amplitude thermique globalement plus faible. L'influence tropicale est encore présente dans cette région. Les caractéristiques thermiques des saisons végétatives des différentes stations sont conformes à celles attendues dans le contexte climatique du pays. La variabilité présente parmi les 4 stations de la province de Mendoza suggère qu'à une échelle plus grande les conditions locales ont un impact non négligeable sur l'accentuation ou l'atténuation du climat régional.

Le test de Pettit a été effectué afin de détecter les ruptures dans les séries climatiques des températures minimales, maximales et moyennes de la saison végétative. Le tableau 4.2 détaille les années des ruptures, leur significativité ainsi que les évolutions des moyennes des températures avant et après rupture. Toutes les tendances sont significatives

au seuil de 0,05% (Test de Mann et Whitney).

Toutes les stations présentent une rupture significative de la série des températures moyennes de la saison végétative sauf la station de La Rioja Aero. Cette dernière a lieu au cours de la campagne 1984-1985 pour une majorité de station. Les plus tardives ont lieu au début des années 2000 (stations de Salta Aero et San Rafael Aero). Les ruptures des températures minimales et maximales de la saison végétative sont également significatives pour la plupart des stations. Globalement une augmentation d'au moins 0,5°C de la température moyenne de la saison végétative entre la période pré et post-rupture est observée. Ce résultat confirme la tendance à l'augmentation des températures indiquée sur la figure 4.2.

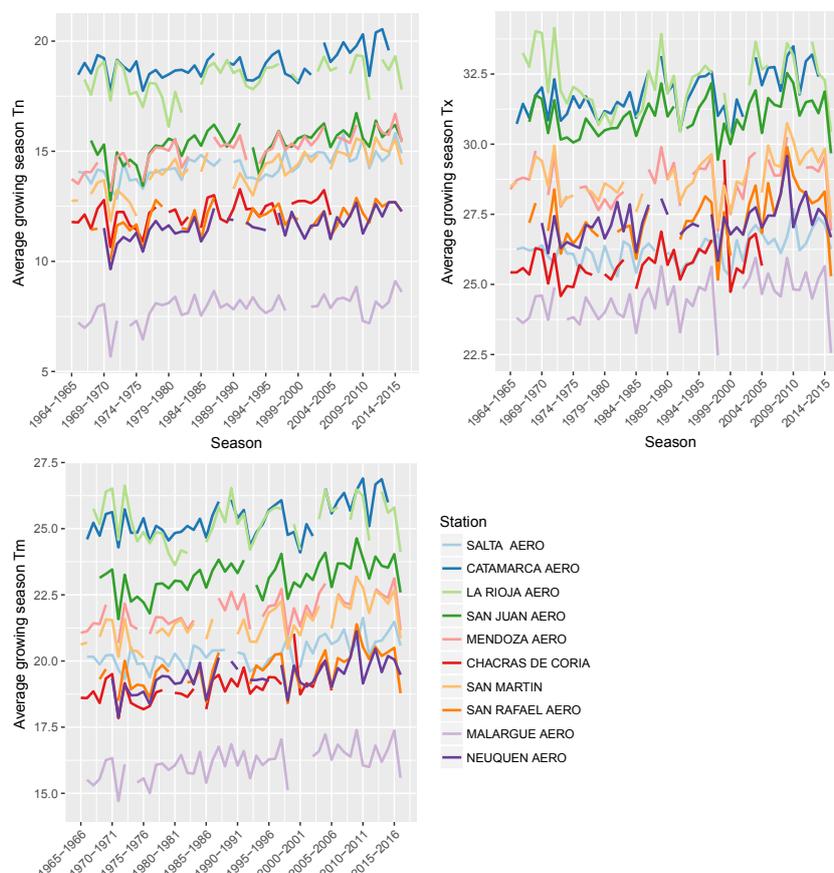


Figure 4.2 – Températures minimales, maximales et moyennes des saisons végétatives de 1965 à 2015 pour les 10 stations étudiées du réseau SMN

Les cumuls mensuels moyens des précipitations de la saison végétative par station sont présentés dans le tableau 4.3. Les régimes pluviométriques ne présentent pas de changements significatifs au cours de la période étudiée. Cependant, Planchon et Rosier (2005) ont observé sur la période 1971-1990 une anomalie positive des précipitations variable suivant les stations qui n'a pas modifié les trames climatiques régionales. La variance des cumuls mensuels est plus importante entre Décembre et Février. Pour toutes les stations sauf celle de Neuquen Aero, les précipitations augmentent d'octobre à janvier

puis diminuent entre février et avril. Un gradient Nord-Sud de Salta à Mendoza est observé caractérisé par une pluviométrie décroissante. La pluviométrie plus abondante dans le Nord-Ouest argentin à Salta est liée aux flux de Nord-Est d'air tropical humide (Planchon et Rosier, 2005). Dès 30° de latitude, l'aridité sur le versant argentin de la cordillère est présente (Planchon et Rosier, 2005) et accentuée dans la région de Mendoza par le zonda. La région viticole Sud (Neuquen et Río Negro) située au Nord de la Patagonie, présente une pluviométrie plus abondante. Cette station est située plus à l'ouest que les précédentes et au gradient Nord-Sud s'ajoute l'effet du gradient Est-Ouest. Ce dernier est lui aussi caractérisé par une diminution de la pluviométrie liée à la diminution de l'influence océanique et à l'effet de foehn au pied de la cordillère des Andes. Ainsi, la viticulture est majoritairement présente dans les régions les plus arides 4.1.

Tableau 4.2 – Ruptures climatiques dans les séries des températures moyennes, minimales et maximales de la saison végétative et tendances associées. Les lignes présentant des * ne sont pas significatives au seuil de 0,05%

Station	Rupture T_m	Tendance T_m °C	Rupture T_n	Tendance T_n °C	Rupture T_x	Tendance T_x °C
SALTA AERO	1999-2000	+0,70	1996-1997	+0,80	1994-1995	+0,52
CATAMARCA AERO	1984-1985	+0,66	2001-2002	+0,86	1984-1985	+0,82
LA RIOJA AERO	1985- 1986*	+0,45	1985-1986	+0,74	1971-1972*	-1,10
SAN JUAN AERO	1984-1985	+0,57	1981-1982	+0,73	1985-1986	+0,49
MENDOZA AERO	1982-1983	+0,73	1982-1983	+1,05	2001-2002*	+0,51
CHACRAS DE CORIA	1984-1985	+0,57	1984-1985	+0,50	1984-1985	+0,65
SAN MARTIN	1993-1994	+0,90	1993-1994	+1,29	2001-2002*	+0,78
SAN RAFAEL AERO	2001-2002	+0,63	1984-1985	+0,58	2001-2002	+0,92
MALARGUE AERO	1984-1985	+0,61	1976-1977	+0,87	1985-1986	+0,64
NEUQUEN AERO	1985-1986	+0,57	1985-1986	+0,71	2001-2002*	+0,56

Enfin, les classes d'anomalies de température moyenne et précipitations cumulées de la saison végétative avant et après la rupture dans les séries des températures moyennes de la saison végétative sont illustrées dans la figure 4.3. Sauf pour la station de La Rioja,

Tableau 4.3 – Cumuls mensuels moyens (en mm) sur la période 1964-2015 durant la saison végétative et les écarts-type associés entre parenthèse

Station	Oct.		Nov.		Déc.		Jan.		Fev.		Mar.		Avr.	
	μ	σ												
SALTA AERO	26	(22)	61	(41)	140	(61)	192	(75)	156	(70)	111	(51)	35	(30)
CATAMARCA AERO	25	(22)	49	(32)	63	(33)	89	(44)	77	(39)	58	(39)	27	(24)
LA RIOJA AERO	15	(20)	38	(36)	62	(47)	86	(50)	81	(52)	59	(41)	23	(22)
SAN JUAN AERO	4	(6)	8	(10)	12	(13)	18	(16)	21	(27)	10	(9)	3	(5)
MENDOZA AERO	13	(15)	17	(18)	22	(20)	35	(38)	36	(38)	30	(28)	15	(17)
CHACRAS DE CORIA	15	(15)	23	(22)	29	(30)	37	(28)	34	(34)	31	(29)	19	(21)
SAN MARTIN	13	(20)	22	(19)	28	(24)	43	(30)	41	(42)	35	(34)	13	(19)
SAN RAFAEL AERO	29	(29)	42	(36)	46	(33)	54	(43)	48	(48)	42	(37)	25	(25)
MALARGUE AERO	21	(21)	21	(25)	26	(26)	24	(26)	32	(33)	24	(25)	23	(29)
NEUQUEN AERO	22	(24)	14	(19)	13	(18)	18	(25)	16	(21)	23	(39)	22	(38)

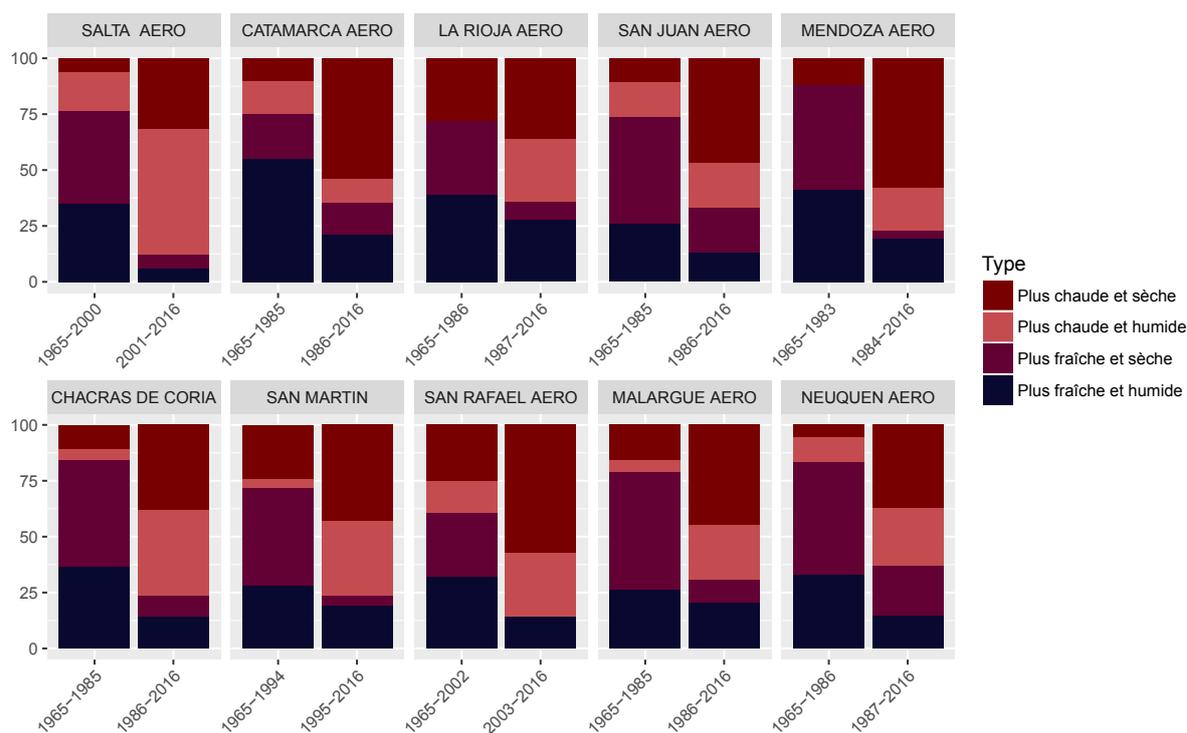


Figure 4.3 – Fréquences des types de saisons végétatives par période pré et post-rupture par station

qui ne présente pas de rupture ni d'évolution significative des températures moyennes de la saison végétative, la fréquence des années plus chaudes que la moyenne augmente. Une augmentation de la fréquence des années plus chaudes et plus sèches que la moyenne est aussi observée. De plus, les années à la fois plus chaudes et plus humides étaient peu ou pas présentes avant la rupture avec un maximum de 20% des saisons pour la station de Salta Aero. Cette classe est beaucoup plus présente après la rupture en particulier pour les stations de Salta Aero, Chacras de Coria, San Martin et San Rafael Aero. La proportion d'années plus humides que la moyenne n'a pourtant pas évolué ou faiblement ce qui est cohérent avec l'absence de changement dans les régimes pluviométriques. Les précipitations étant concentrées sur la saison estivale de décembre à février, les conséquences sur la quantité et qualité de la vendange vont dépendre de la fréquence et de l'intensité des épisodes pluvieux ainsi que de leur date d'occurrence. Les précipitations estivales étant, de plus, majoritairement sous forme orageuse, de forts écarts dans les totaux pluviométriques vont être observés à l'échelle des vignobles. Cependant, dans le contexte du changement climatique, les travaux de Aruani (2011) ont montré que sur la période 1960-2010, une augmentation de la teneur en sucre des raisins et une avancée des dates de vendanges sont observées. Celles-ci sont corrélées à l'augmentation des températures des stations utilisées dans ce chapitre. Ceci indique que les changements observés à l'échelle régionale par les stations de référence se traduisent également par des impacts sur la production de manière globale à l'échelle régionale. Les évolutions observées sont en accord avec les projections des scénarios RCP 4.5 et 8.5 d'une évolution des températures moyennes de 2°C à 4°C (Barros *et al.*, 2015) s'accroissant sur les mois d'été associées à une augmentation des pluviométries estivales sauf pour le Nord-Ouest (Chou *et al.*, 2014). Ces évolutions sont cohérentes avec les observations de l'évolution du climat sur la période 1964-2016 sauf l'augmentation de la fréquence des années plus humides à Salta. Mais cette anomalie pluviométrique positive reste présente dans la littérature (Planchon et Rosier, 2005). Elle est également en adéquation avec la présence de périodes humides et sèches dans la région subtropicale du Nord-Ouest argentin (Loyarte, 1995, Salomon, 2004).

4.3.2 Evolution des indices bioclimatiques

Les séries des températures ayant révélé une augmentation d'environ +0,5°C sur la période étudiée, cette section est dédiée à la caractérisation des classes et à l'évolution des indices bioclimatiques, pour les six régions viticoles étudiées. La variabilité inter-annuelle et inter-régionale des indices utilisés pour la classification multicritère des régions viticoles mondiales de Tonietto et Carbonneau (2004) est présentée dans la figure 4.4. Le potentiel viticole des différentes régions étudiées présente de fortes variations. On retrouve trois stations dans la classe HI+3 de l'indice de Huglin correspondant à plus de 3000°C cumulés de l'indice (Catamarca Aero, La Rioja Aero et San Juan Aero). Ces stations présentent également des nuits tempérées (San Juan Aero) à chaudes (Catamarca Aero et La Rioja Aero) ainsi qu'un déficit hydrique modéré à élevé. Dans ces régions, il n'y a donc pas de

limites thermiques à la culture de la vigne, même si les températures très élevées peuvent entraîner l'inhibition de la photosynthèse et bloquer la maturité et donc diminuer la qualité des raisins (Coombe et McCarthy, 2000, Keller, 2015). La station de Malargue Aero, la plus en altitude, est celle qui présente le climat le plus frais, située dans la classe tempérée de l'indice de Huglin, aux nuits très fraîches pendant la maturation et au déficit hydrique modéré. Les autres stations se trouvent dans la classe chaude de l'indice de Huglin, avec un déficit hydrique modéré et des températures nocturnes du mois de mars fraîches à tempérées. En ce qui concerne la variation au sein de chaque région des indices au cours de la période, les écarts inter-quartiles de l'indice de Huglin et de l'indice de fraîcheur des nuits sont similaires pour les différentes stations. Par contre, l'indice de sécheresse est plus variable pour les stations de Salta Aero, La Rioja Aero et San Rafael Aero.

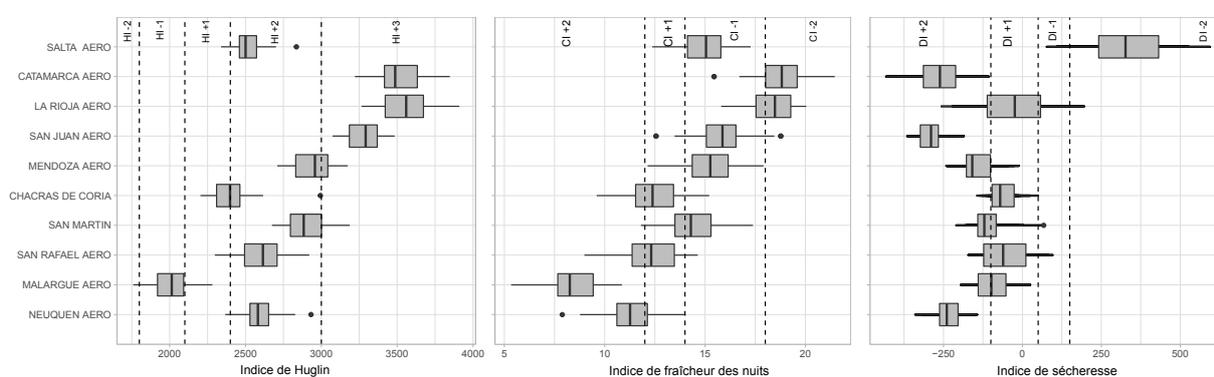


Figure 4.4 – Variabilité inter-annuelle et inter-régionale de trois indices bioclimatiques : indice de Huglin, indice de fraîcheur des nuits et indice de sécheresse des 10 stations du réseau SMN

Ensuite, le tableau 4.4 présente les tendances d'évolution des trois indices bioclimatiques au cours de la période étudiée. L'indice de Huglin présente une augmentation significative pour toutes les stations sauf celle de La Rioja Aero. Cette observation est cohérente avec la tendance positive de variation des températures moyennes de la saison végétative. Une augmentation de 220°C est observée en moyenne sur les stations pour une augmentation moyenne d'environ 4°C par an. Les classes de l'indice de Huglin ayant un intervalle de 300°C (sauf la classe chaude 600°C), un changement de classe à la classe supérieure pour la plupart des stations pourrait être observé au cours du 21^{ème} siècle si les tendances se maintiennent. Ces observations sont cohérentes avec l'extension de la classe VI de l'indice de Winkler modélisée par Cabré *et al.* (2016) au détriment des classes IV et V qui concernent la plupart des régions viticoles actuelles de l'Argentine. L'indice de fraîcheur des nuits a augmenté en moyenne de 1,5°C sur l'ensemble des stations avec des variations entre les stations. Un changement de classe de l'indice est également envisageable pour les stations des classes nuits fraîches à nuits tempérées. L'indice de sécheresse ne présente pas d'évolution significative sauf pour les stations de Catamarca Aero, San Juan Aero et Malargue Aero. Pour ces dernières l'indice a diminué de plus de 85 mm. Les

cumuls pluviométriques n'ayant pas varié, la demande en eau de la vigne a elle augmenté avec l'augmentation des températures et de la transpiration de la vigne. Cependant, dans le calcul de l'indice de sécheresse, la diminution de la transpiration de la plante liée à la fermeture des stomates en condition de températures très élevées et présence d'une ressource hydrique limitée (cas probable de Catamarca Aero et San Juan Aero) n'est pas prise en compte donc cette observation est à nuancer.

4.3.3 Choix variétaux

Les trois principaux cépages rouges et blancs cultivés sont indiqués dans le tableau 4.5.

Le Malbec, cépage majoritaire de Mendoza est également cultivé dans chaque région dans des proportions non négligeables. La température moyenne de la saison végétative des stations de Mendoza Aero, Neuquen Aero et Salta Aero sont proches et oscillent autour de 19-20°C. Ces stations se trouvent dans la limite haute des conditions optimales de culture du malbec mais également des cépages secondaires légèrement plus tardifs. Les besoins thermiques ne sont pas limitants pour les stations étudiées sauf celles de Malargue Aero située à une altitude supérieure à celle des autres stations. Pourtant située dans la province de Mendoza, cette station illustre les caractéristiques de la pré-cordillère et marque le gradient thermique entre le piémont andin où l'activité viticole est fortement développée et les zones plus élevées en altitude qui ne sont pas encore plantées en vigne. Les régions viticoles les plus chaudes d'après les classifications : Catamarca, San Juan et La Rioja, cultivent en proportion plus importantes des cépages plus tardifs comme le Cabernet Sauvignon et la Syrah (Van Leeuwen *et al.*, 2004b). Cependant, avec des valeurs moyennes de la température moyenne de la saison végétative supérieures à 23°C et un indice de Huglin dans la classe trop chaude, ces régions présentent des caractéristiques thermiques supérieures aux conditions optimales de culture de ces cépages (Jones, 2006). Mais, comme le montre les variations des caractéristiques climatiques des 4 stations situées dans la province de Mendoza, ce résultat est à nuancer au regard des conditions topographiques et mésoclimatiques des aires plantées en vigne. En effet le topoclimat peut varier par rapport aux climat régional défini avec la station de référence de manière importante notamment en fonction de l'altitude, de l'exposition et de la position des vignobles sur les pentes (Bonney *et al.*, 2013, Quénel *et al.*, 2015) Néanmoins, avec les scénarios du changement climatique, le déplacement des vignobles plus en altitude est une des adaptations possibles à long terme de la viticulture argentine. En effet, comme le montre la station de Malargue Aero pour la province de Mendoza, le gain d'altitude permet de limiter les excès thermiques, même s'il augmente le risque de gel. La diminution de l'indice de fraîcheur des nuits est aussi un atout pour la production de vins de qualité (Keller, 2010, Beelman et Gallander, 1979, Adams, 2006). Même si les conditions climatiques de cette station sont encore aujourd'hui inférieures aux besoins thermiques du Malbec, le cépage emblématique de la viticulture argentine, l'augmentation des températures prévue par les scénarios du changement climatique serait favorable au déplacement du cépage à

Tableau 4.4 – Evolution des différents indices bioclimatiques au cours de la période 1965-2016

Station	Indice de Huglin			Indice de fraîcheur des nuits			Indice de sécheresse					
	Tendance °C/year	Evolution 1965-2015	R ²	pvalue	Tendance °C/year	Evolution 1965-2015	R ²	pvalue	Tendance mm/year	Evolution 1965-2015	R ²	pvalue
SALTA AERO	+3,33	+170	0,26	<0,01	+0,03	+1,53	0,13	0,01	-0,84	-43	0,01	0,47
CATAMARCA AERO	+5,14	+262	0,30	<0,01	+0,02	+1,02	0,09	0,04	-2,64	-135	0,23	<0,01
LA RIOJA AERO	+1,55	+79	0,02	0,37	+0,01	+0,51	0,02	0,31	+0,25	13	0,00	0,83
SAN JUAN AERO	+3,44	+175	0,20	<0,01	+0,02	+1,0	0,06	0,08	-1,80	-92	0,38	<0,01
MENDOZA AERO	+3,64	+186	0,21	<0,01	+0,04	+2,0	0,26	<0,01	-0,04	-2,04	0,00	0,94
CHACRAS DE CORIA	+5,62	+287	0,29	<0,01	+0,02	+1,03	0,07	0,1	+0,97	+50	0,08	0,09
SAN MARTIN	+4,72	+241	0,30	<0,01	0,04	+2,04	0,26	<0,01	+0,77	+39	0,05	0,14
SAN RAFAEL AERO	+4,54	+231	0,21	<0,01	+0,03	+1,5	0,11	0,09	-0,97	-49	0,03	0,24
MALARGUE AERO	+4,23	+216	0,28	<0,01	+0,03	+1,4	0,16	<0,01	-1,7	-87	0,22	<0,01
NEUQUEN AERO	+4,09	+209	0,25	<0,01	+0,03	+1,4	0,11	0,02	+1,04	+53	0,11	0,03

Tableau 4.5 – Principaux cépages cultivés (rouges et blancs) des six régions étudiées source INV 2015 destinés à la vinification

Région	Cépages rouges	Cépages blancs
Salta	Malbec : 56,0% Cabernet S. : 25,0% Tannat : 6,0%	Torrontés : 87,0% Sauvignon : 4,0% Chardonnay : 4,0%
Catamarca	Cabernet S : 31,5% Malbec : 24,5% Syrah : 22,6%	Torrontés Riojanino : 91,9% Pedro Gimenez : 3,6% Muscat d'Alexandrie : 2,0%
La Rioja	Cabernet S : 23,5% Malbec : 21,6% Syrah : 18,5%	Torrontés Riojanino : 79,1% Muscat d'Alexandrie : 12,2% Chardonnay : 3,3%
San Juan	Syrah : 24,8% Bonarda : 19,3% Malbec : 17,6%	Pedro Gimenez : 25,5% Muscat d'Alexandrie : 21,2% Torrontés Sanjuanino : 17,0%
Mendoza	Malbec : 37,3% Bonarda : 17,6% Cabernet S. : 13,0%	Pedro Gimenez : 31% Chardonnay : 19,6% Torrontés Riojanino : 14,3 %
Neuquen	Malbec : 43,9% Cabernet S. : 18,3% Merlot : 16,2%	Chardonnay : 52,2% Sauvignon : 31,3% Sémillon : 6,7%
Río Negro	Malbec : 34,0% Merlot : 27,0% Pinot Noir : 16,2%	Torrontés Mendocino : 19,5% Pedro Gimenez : 17,1% Torrontés Riojanino : 15,2%

cette altitude. Le développement récent des vignobles en altitude à Salta près de Cafayate et dans la Quebrada de Humauaca et à Mendoza notamment près de Tupungato (Quénol, 2014), sont le prémisses du déplacement des régions viticoles argentines afin d'en assurer la pérennité.

4.4 Limites de l'utilisation des indices bioclimatiques

Les indices bioclimatiques demeurent cependant uniquement des indicateurs du potentiel viti-vinicoles des différentes régions étudiées. Ils ne prennent pas en compte la physiologie de la vigne même si la température est fortement corrélée à cette dernière (Van Leeuwen *et al.*, 2013). De plus, les stations utilisées sont représentatives du climat régional. Hors, les vignobles argentins, sont pour la plupart éloignés des stations et situés à des altitudes supérieures, dans un contexte topographique variable. Ainsi, les résultats

de cette partie sont à nuancer. Enfin, certains indices ne sont pas adaptés à toutes les régions du monde. Par exemple, l'intérêt de l'indice de fraîcheur des nuits pour les régions au climats chauds est contesté par Jones (2015). En effet, d'après lui, des températures nocturnes plus élevées, supérieures à 15°C, peuvent permettre de diminuer les caractères herbacés des cépages tardifs même si la littérature sur ce sujet est limitée.

4.5 Conclusion

L'analyse des données des 10 stations météorologiques du réseau national sur la période 1964-2016 a montré une tendance à l'augmentation des températures et des indices bioclimatiques basés sur les sommes thermiques. Aucun changement des cumuls pluviométriques n'a été détecté. Ces résultats sont en accord avec les tendances modélisées par Cabré *et al.* (2016) et les travaux de Aruani (2011) basés sur les mêmes stations. Cependant, avec l'augmentation des températures, une évolution de la typologie des campagnes viticoles a été observées avec une recrudescence des saisons végétatives plus chaudes et plus humides que la moyenne. Les précipitations étant majoritairement des averses orageuses estivales parfois accompagnées de grêle, les conséquences observées sur la production viticole sont plutôt négatives dans la région viticole principale de Mendoza (Agosta *et al.*, 2010). De plus, l'augmentation des indices bioclimatiques sur la période, suggère un changement de classe dirigé vers les classes les plus élevées d'ici la fin du siècle. Néanmoins, dans un contexte de viticulture dans des conditions thermiques élevées, la grande variabilité topographique des régions viticoles est un atout pour la pérennisation de la production. Comme le montre la variabilité des quatre stations présentes dans la province de Mendoza, les conditions locales ont un impact significatif sur la variabilité du climat régional. En effet, la localisation des régions viticoles sur le piémont andin permet une relocalisation des vignobles en altitude où les températures sont inférieures et dont l'évolution climatique tend vers des conditions favorables aux cépages actuellement cultivés.

CHAPITRE 5

Variabilité spatiale des conditions agroclimatiques dans la province de Mendoza

Sommaire

5.1	Introduction	84
5.2	Matériels et méthodes	84
5.2.1	Localisation des stations	84
5.2.2	Caractéristiques vitivinicoles des aires de production	85
5.2.3	Variabilité intra-régionale des indices bioclimatiques	85
5.3	Résultats et discussion	87
5.3.1	Caractéristiques de la campagne d'étude par rapport à la moyenne de la période	87
5.3.2	Variabilité des indices bioclimatiques entre les différentes aires viticoles de la province de Mendoza	88
5.3.3	Facteurs de variabilité intra-régionale des indices bioclimatiques	93
5.4	Conclusion	96

5.1 Introduction

Mendoza est la plus importante province viticole de l'Argentine avec ses 150 000 ha de vigne en 2015 (INV, 2015b). Elle est localisée dans le centre Ouest du pays au pied de la cordillère des Andes. Environ un tiers de la province est occupé par la cordillère des Andes, l'autre moitié englobe les villes et les cultures agricoles dans les oasis et des surfaces désertiques où l'élevage et les industries minières et pétrolières sont présents (Mussetta et Barrientos, 2015). Les oasis ne représentent que 5% du territoire. Le climat est continental semi-aride avec cependant des variations intra-régionales observées avec les stations du réseau SMN dans le chapitre 4. La vigne étant sensible à des variations climatiques légères, l'étude du topoclimat est un des éléments clés (avec la géologie et l'agropédologie) permettant le zonage du potentiel viticole à l'échelle locale (Quénol, 2011, Morlat, 2010, Barbeau *et al.*, 2001). Les analyses de la variation du climat local reposent souvent des classifications (Bonnefoy, 2013, Fourment *et al.*, 2017), des modélisations (Le Roux *et al.*, 2016) ou des régressions (Bonnefoy, 2013) basées sur la relation entre le climat local et le contexte topographique (Quénol 2011).

Dans ce chapitre, c'est la variation du mésoclimat qui va être étudiée. Elle concerne l'analyse de la déclinaison du climat régional sous l'influence des éléments topographiques à une échelle de l'ordre de la dizaine ou centaine de kilomètres. Les méthodes de modélisation et de régressions ne sont pas adaptées car elles nécessitent une continuité du réseau de mesures, qui n'est pas respectée au vu de la distance entre les aires de production viticole. De plus, l'objectif est d'analyser les tendances de la variation des conditions météorologiques intra et inter zone de production, et d'exposer les sources topographiques potentielles. Une approche basée sur une analyse descriptive multivariée est donc privilégiée dans ce chapitre.

Dans un premier temps, les indices bioclimatiques sont analysés sur la campagne 2014-2015 afin d'en connaître l'évolution au cours de la saison végétative mais aussi les variations entre les stations. L'étude porte sur une seule campagne d'analyse à cause de la qualité hétérogènes des données et d'un grand nombre de données manquantes. Dans un second temps, une analyse de co-inertie met en évidence la typologie des stations en fonction de leur cumul des indices bioclimatiques. Cette méthode permet également de souligner les facteurs géographiques qui semblent être à l'origine de ces variations.

5.2 Matériels et méthodes

5.2.1 Localisation des stations

Dans ce chapitre, les données des stations du réseau du service météorologique national situées dans la province de Mendoza ainsi que les stations de la DACC ont été utilisées. Suite aux pré-traitements détaillés dans la section 3.3.2, seule la campagne 2014-2015

réunit un nombre maximal de stations aux données complètes. Parmi les stations du réseau national, seule la station de Chacras de Coria, a été retirée car les données étaient incomplètes sur la campagne 2014-2015. La figure 5.1 récapitule la localisation des stations retenues au sein des cinq aires de production.

5.2.2 Caractéristiques vitivinicoles des aires de production

Les caractéristiques de la production viticole des cinq aires de production sont détaillées dans la section 3.2.2.

5.2.3 Variabilité intra-régionale des indices bioclimatiques

La variabilité spatiale des indices bioclimatiques a été analysée à l'échelle des cinq aires de production. Pour rappel, le calcul des indices bioclimatiques est présenté dans la section 3.3.3. Concernant l'indice de fraîcheur des nuits, la région étudiée étant caractérisée par un climat régional chaud, les fréquences des intervalles de l'indice ont été calculées à la place de l'indice. Afin, de tenir compte des différences de méthodes dans le calcul de l'évapotranspiration, l'indice de sécheresse a été calculé à partir de l'évapotranspiration de référence calculée avec l'équation de Hargreaves (Hargreaves et Samani, 1985) calibrée même pour les stations du réseau SMN.

Ensuite, l'objectif est d'évaluer quels sont les facteurs géographiques pouvant expliquer les variations des indices bioclimatiques observées. Pour cela, les variables topographiques et géographiques suivantes ont été répertoriées pour chaque station : latitude, longitude, altitude, pente, exposition de la pente, distance à la cordillère. La latitude et la longitude sont fournies avec les métadonnées des stations, l'altitude, la pente est l'exposition sont extraites des données SRTM. Pour la distance à la cordillère, les limites de la cordillère ont été extraites à partir d'un seuillage du SRTM des altitudes ≥ 2000 m . Puis, les éléments isolés de petite taille ont été éliminés. Ensuite, la distance à vol d'oiseau des stations à la cordillère a été calculée.

Généralement, des régressions et modèles géostatistiques sont utilisés afin de corrélées les indices agroclimatiques aux attributs topographiques et géographiques (Bonney *et al.*, 2013, Le Roux *et al.*, 2016, Neethling, 2016). Seulement, ceci implique une continuité du réseau de mesure qui n'est pas respectée ici, ainsi qu'une distribution spatiale homogène et un plus grand nombre de points de mesures. Des classifications ascendantes hiérarchiques permettent également de regrouper les stations aux caractéristiques météorologiques proches (Bonney, 2013, Fourment *et al.*, 2017). Mais les classifications ne permettent pas directement d'étudier les effets topographiques de manière quantifiée. C'est pourquoi, une analyse par co-inertie entre le tableau des indices bioclimatiques et celui du contexte géographique dans lequel les stations sont implantées est réalisée. Cette méthode d'analyse multivariée développée par Dolédec et Chessel (1994) est très utilisée en écologie pour expliquer les relations entre les abondances d'espèces et les variables



Figure 5.1 – Localisation des stations retenues au sein des 5 aires viticoles de la province de Mendoza

d'environnement. Cependant, cette méthode a déjà été utilisée dans d'autres champ d'application comme l'étude des facteurs socio-économiques influençant la richesse en services écosystémiques (Le Clec'h, 2016). Elle est basée sur l'analyse de la covariance des analyses multivariées de chacun des tableaux d'entrée afin de trouver les axes qui maximisent la covariance des deux tableaux. Suivant l'analyse multivariée réalisée en amont, les résultats peuvent différer (Dray *et al.*, 2003). Ici, une analyse en composantes principales a été effectuée sur le tableau des indices bioclimatiques de chaque station et sur le tableau des variables géographiques et topographiques des stations. Puis, l'analyse de la co-inertie a été réalisée à partir des deux ACP. Les individus qui sont ici les stations ont été projetés sur les axes de la co-inertie selon leurs coordonnées définies par la projection des deux tableaux. Il a ainsi été possible de comparer les projections dans l'espace des variables bioclimatiques et dans l'espace des variables géographiques afin de comparer leur organisation et leur répartition. De plus, une variable statistique est renvoyée, le coefficient RV qui donne une mesure globale de la corrélation entre la structure des deux tableaux. La significativité de cette dernière a été vérifiée par le test de Monte Carlo (Dolédec *et al.*, 1996).

5.3 Résultats et discussion

5.3.1 Caractéristiques de la campagne d'étude par rapport à la moyenne de la période

Avant, d'analyser la variabilité spatiale des indices bioclimatiques, la figure 5.2 détaille les caractéristiques de la campagne 2014-2015 à partir des données des stations SMN par rapport à la moyenne sur la période 1965-2016. La saison végétative 2014-2015 a été plus chaude que la moyenne de la période pour les trois stations installées. Les mois d'octobre, janvier et avril présentent des températures mensuelles moyennes supérieures de plus de 1°C aux valeurs moyennes. A l'inverse les mois de novembre, décembre et février ont été plus frais que la moyenne. Les écarts à la moyenne sont plus marqués pour les deux stations les plus au Nord : Mendoza Aero et San Martin. Concernant les précipitations, les mois de novembre et janvier sont moins pluvieux que la moyenne alors que les mois de maturation février et mars ont été plus pluvieux que la moyenne. Ceci explique la forte pression des maladies cryptogamiques durant la maturation. Les forts orages sur certains vignobles ont aussi entraîné de nombreux dommages en particulier dans l'oasis Est (DACC, 2015) et de manière moins importante dans l'aire centrale de production dans le département de Lujan de Cuyo.

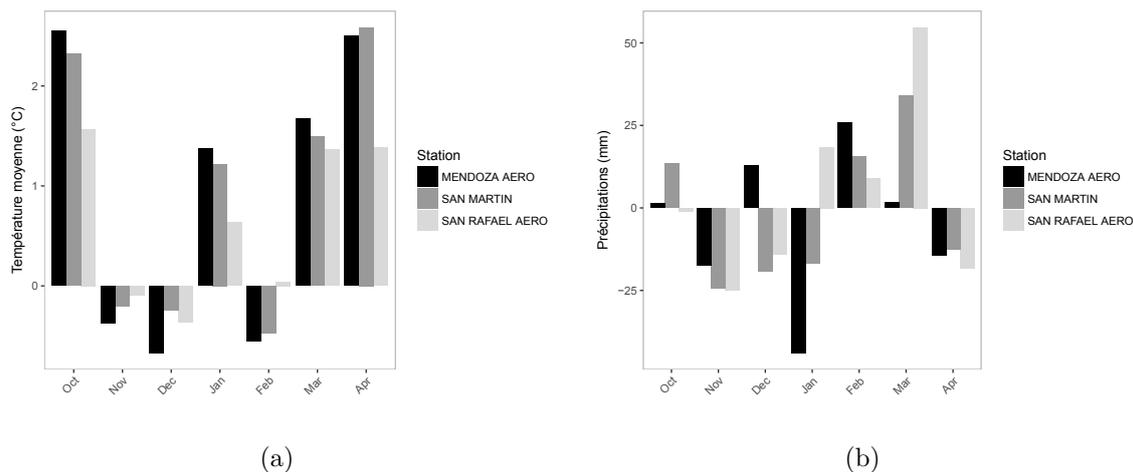


Figure 5.2 – Températures moyennes mensuelles et cumuls mensuels des précipitations des 3 stations SMN de Mendoza par rapport à la normale par station de la période 1965-2016

5.3.2 Variabilité des indices bioclimatiques entre les différentes aires viticoles de la province de Mendoza

Le tableau 5.1 présente les statistiques des indices bioclimatiques par aire de production durant la saison 2014-2015. La station située dans l'aire de production Nord présente les températures moyennes, maximales et minimales de la saison végétative les plus élevées ainsi que les valeurs des indices bioclimatiques les plus élevées. Les caractéristiques thermiques de la station de la zone centre sont plus similaires à celles de la vallée de Uco alors qu'elle est en distance plus proche des stations du Nord et de l'Est. Concernant les cumuls de précipitations, les valeurs sont plus élevées dans l'aire de production Sud. Les variations de l'indice de sécheresse entre les zones de production reflètent à la fois les différences de cumuls des précipitations (aire Sud) et des moyennes des températures (aire Nord). La variabilité des autres paramètres au sein des aires de production est faible. Elle l'est particulièrement dans la zone Nord mais seulement deux stations sont présentes.

La figure 5.3 détaille l'évolution de l'indice des degrés jour de Winkler, de l'indice de Huglin et de l'indice des jours biologiquement actifs au cours de la saison végétative 2014-2015. Les cumuls des trois indices sont très proches pour les 18 stations jusqu'à mi novembre. Les écarts s'accroissent ensuite entre mi novembre et la fin de la saison végétative. L'indice de Winkler est l'indice bioclimatique qui conduit au plus grand écart entre les stations : de 1880°C pour la station de Vista Flores très proche de Perdriel à 2783°C pour la station de Mendoza Aero suivie par Gustavo Andre. Les degrés jours de la vallée de Uco et du Sud sont proches. Seule la station de Bowen, la plus au Sud et à l'ouest de l'oasis, présente un cumul nettement supérieur de plus de 2500°C. L'indice de Huglin qui prend en compte la température moyenne et la température maximale présente une variabilité plus faible. Les stations du Nord et de l'Est ainsi que la station Bowen

Tableau 5.1 – Statistiques des indices bioclimatiques et cumuls de précipitations de la saison végétative 2014-2015 par aire de production viticole de la province de Mendoza

Aire de production		T_m (°C)	T_n (°C)	T_x (°C)	WI (°C)	HI (°C)	BEDD (°C)	DI (mm)	Cumul P (mm)
Nord	μ	23,0	16,0	30,0	2753	3118	1800	-151	172
	σ	0,2	1,0	0,6	43	33	6	0,3	30
Centre	μ	18,9	12	25,7	1888	2330	1574	-91	173
	σ	-	-	-	-	-	-	-	-
Est	μ	21,8	15,0	28,7	2513	2890	1751	-119	210
	σ	0,7	0,4	0,9	139	140	35	27,7	36,8
Vallée de Uco	μ	19,8	11,7	27,9	2088	2629	1663	-118	214
	σ	0,7	1,4	1,1	143	137	46	25,9	36,0
Sud	μ	20,7	13,0	28,5	2281	2780	1689	-98	289
	σ	0,8	0,5	1,2	173	186	50	11,7	53

présentent des valeurs proches et sont nettement supérieures à celles des autres stations. Cette observation est en accord avec les températures maximales de la saison végétative supérieures des stations de l'Est et du Nord. Les stations de la vallée de Uco et du Sud présentent une évolution de l'indice de Huglin similaires même si une variabilité importante de 500°C est observable. Enfin, l'indice des degrés jours biologiquement actifs est le moins variable sur la province de Mendoza. Les cumuls sont rangés dans le même ordre mais la variance est plus faible. Cette observation est cohérente avec la caractérisation d'un climat régional chaud (Chapitre 4) où les besoins thermiques ne sont pas limitants. De plus, l'écart entre les valeurs de l'indice de Winkler qui suit une évolution linéaire en fonction de la température moyenne s'accroît à partir du mois de Décembre quand la variance de l'indice des jours biologiquement actifs ne change pas. Ceci indique que les températures sont nettement supérieures aux besoins physiologiques dès le début de l'été. La figure 5.4 illustre la variabilité spatiale des trois indices bioclimatiques. Les stations les plus au Nord présentent les valeurs des indices les plus élevées, alors que les stations à une altitude légèrement supérieure et plus proche de la cordillère des Andes sont caractérisées par les cumuls des indices les plus faibles. Les stations de l'aire de production Sud semblent présenter un gradient de valeurs des indices. Les trois indices présentent le même schéma de variabilité spatiale. Le contexte topographique semble donc être une variable déterminante pour expliquer la variabilité spatiale des conditions agroclimatiques de la province de Mendoza.

En ce qui concerne, les températures nocturnes du mois de mars, la fréquence des températures dans les intervalles de l'indice de fraîcheur des nuits est détaillée dans la

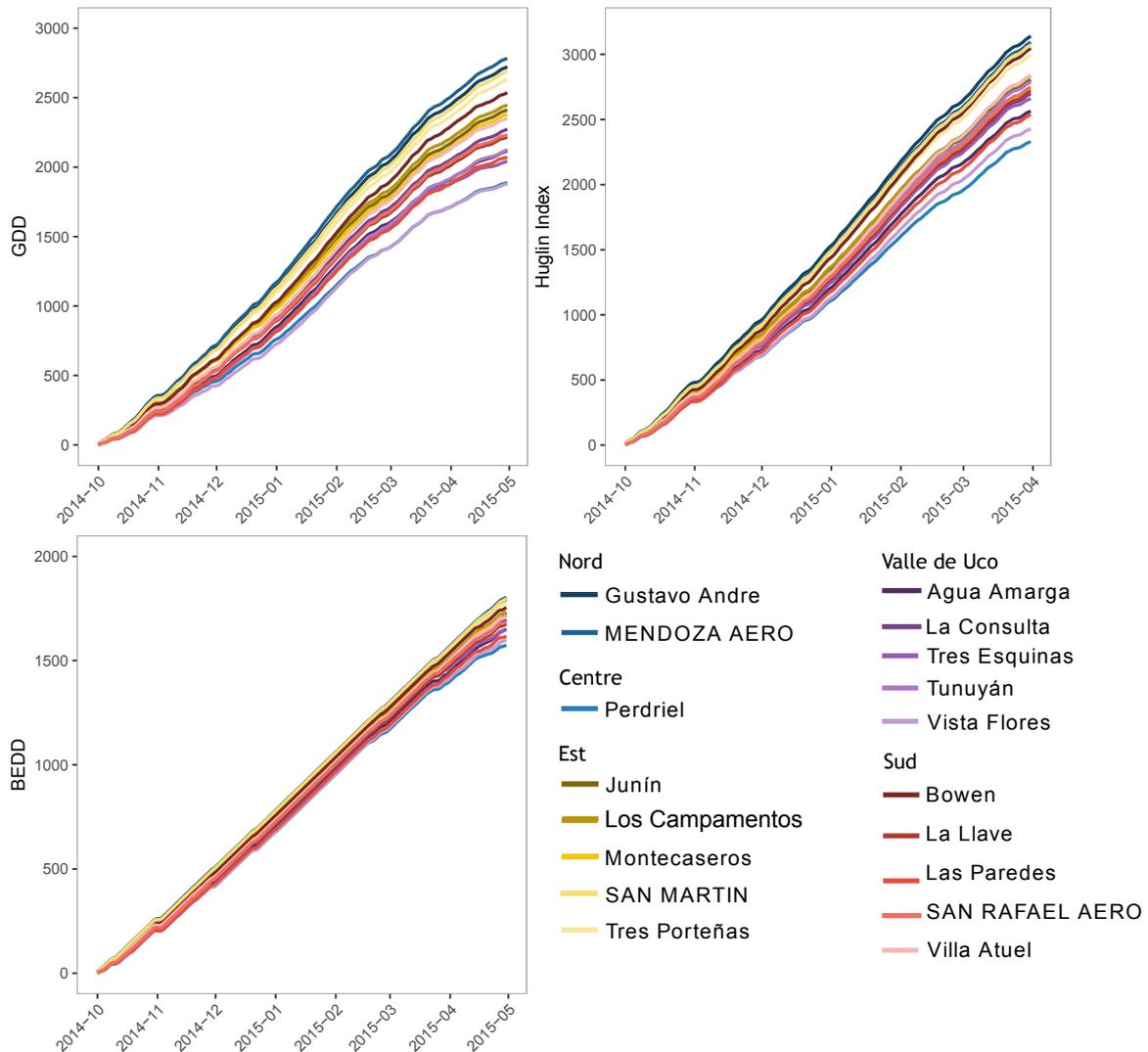


Figure 5.3 – Cumulés des degrés jours, de l'indice de Huglin et de l'indice des degrés jours biologiquement actifs des stations de la province de Mendoza

figure 5.5. Pour la zone Nord représentée par les stations de Gustavo Andre et Mendoza Aero, les nuits chaudes sont majoritaires avec une fréquence d'occurrence de 48%, suivies par les nuits tempérées 23%. Les nuits fraîches et très fraîches sont peu fréquentes et concernent respectivement 16% et 13% des nuits. Les stations de l'aire de production Est montrent aussi des proportions analogues. Cependant les nuits chaudes diminuent en fréquence en allant vers le Sud passant de 40% à 30% au profit de la classe des nuits tempérées. Les nuits fraîches et très fraîches sont moins fréquentes. Dans la zone Sud, les nuits tempérées sont majoritaires pour les stations de Las Paredes et San Rafael Aero et représentent 32% des températures nocturnes du mois de mars. Leur proportion diminuent vers l'Est et le Sud au profit de la classe des nuits chaudes. Cependant, dans cette zone de production, les nuits fraîches et très fraîches restent présentes et cumulent environ 50% des nuits du mois de mars réunies. Le dernier cas regroupe les stations de la vallée de

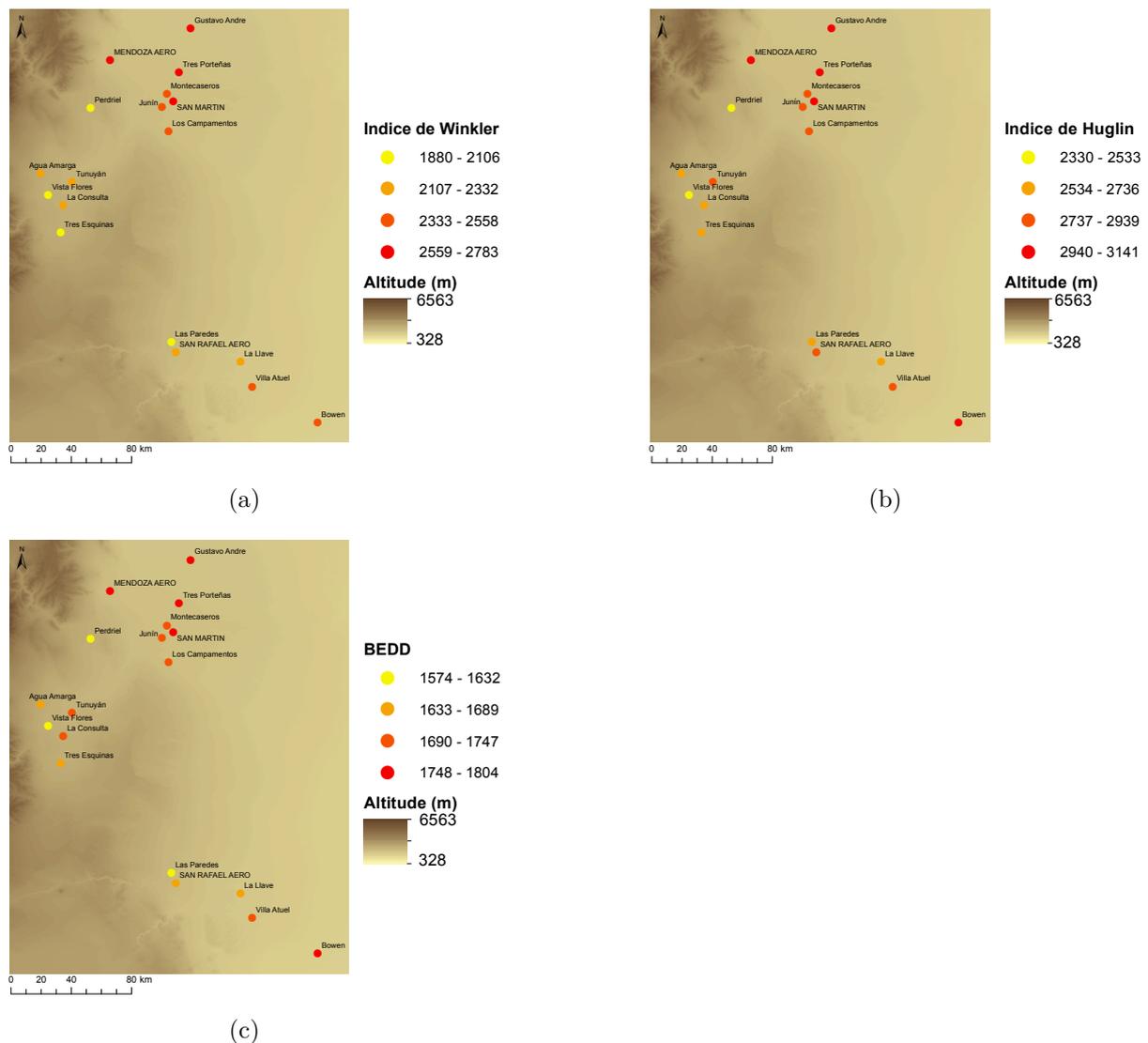


Figure 5.4 – Variabilité spatiale de l'indice de Winkler a), de l'indice de Huglin b) et de l'indice des degrés jours biologiquement actifs c)

Uco et la station de Perdriel. Les nuits très fraîches sont majoritaires avec une occurrence supérieures à 40%, suivies par les nuits tempérées avec une occurrence avoisinant les 30%. Ces différences de répartition des températures nocturnes entraînent des conditions de maturation différentes des raisins.

Les indices de sécheresse ont tous été calculés à partir de l'évapotranspiration de référence estimée à partir de l'équation de Hargreaves calibrée sur le site pour la période végétative d'étude. La figure 5.6 compare les valeurs obtenues à partir de l'équation de référence de l' ET_0 et celle de Hargreaves. Pour les stations de Mendoza Aero et San Rafael Aero, les différences sont négligeables. Pour la station de San Martin, l'équation de Hargreaves entraîne une surestimation de la sécheresse progressive pour les mois de février et mars jusqu'à 22 mm. Les résultats obtenus sur cette zone seront donc à nuancer. La figure 5.7 détaille l'évolution mensuelle de l'indice de sécheresse pour les 18 stations

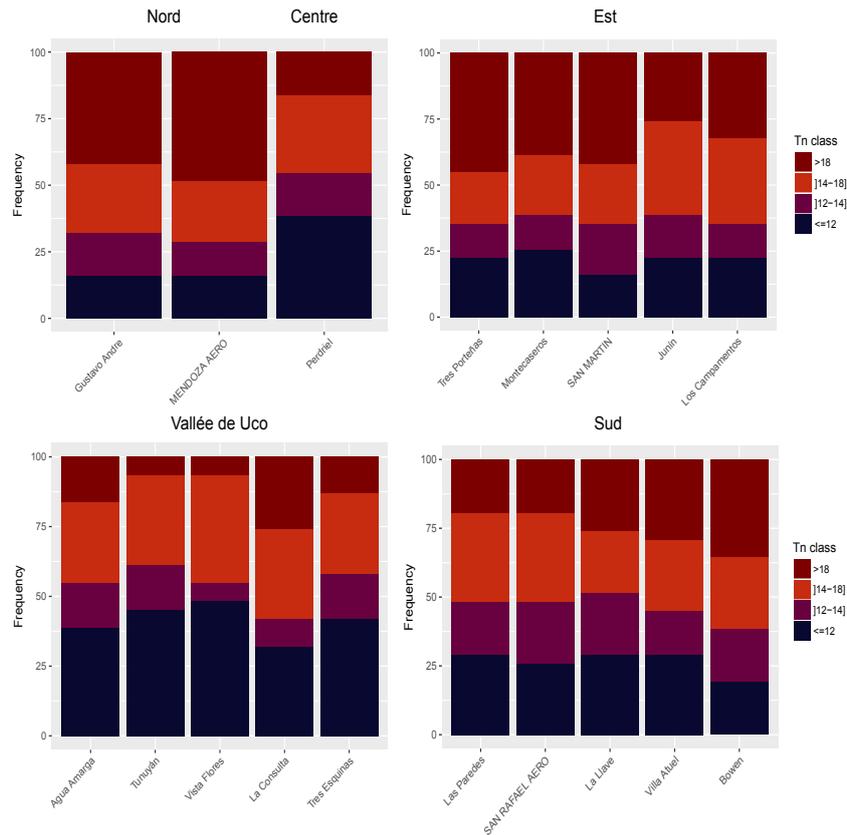


Figure 5.5 – Fréquences des intervalles des températures nocturnes du mois de mars 2015 pour les 18 stations de la province de Mendoza

au cours de la saison végétative étudiée ainsi que la variabilité spatiale de l'indice au 31 mars 2015. Les valeurs de l'indice sont proches jusqu'à début décembre. Les écarts sont plus grands dès la fin du mois de janvier et s'accroissent au cours des mois de février et mars. La zone Sud qui présente la pluviométrie la plus élevée est la moins déficitaire. La variabilité est importante dans l'Est, due à la variabilité des précipitations orageuses et de l'évapotranspiration (et donc indirectement des températures). La vallée de Uco et l'aire Sud présentent une faible variabilité de l'indice de sécheresse. La campagne 2014-2015 bien que plus humide que la moyenne en été reste tout de même aride avec des indices de sécheresse inférieurs à -85 mm. La variabilité spatiale de l'indice de sécheresse semble correspondre au schéma de la variabilité des autres indices bioclimatiques. Ceci suggère que les différences thermiques et donc d'évapotranspiration sont plus importantes que les différences de cumuls de précipitation au sein des différentes aires de production de la province de Mendoza.

L'analyse de la variabilité des indices bioclimatiques a montré pour tous les paramètres un regroupement des caractéristiques des aires Nord et Est, ainsi qu'un regroupement de la vallée de Uco et de la zone Centre. Ces résultats ne doivent pas être généralisés comme représentant les variations du climat régional car ils ne concernent qu'une seule

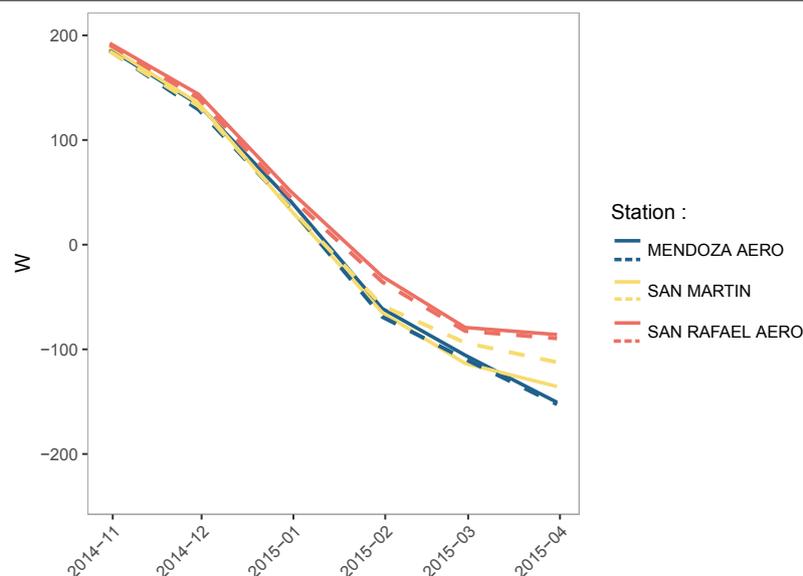
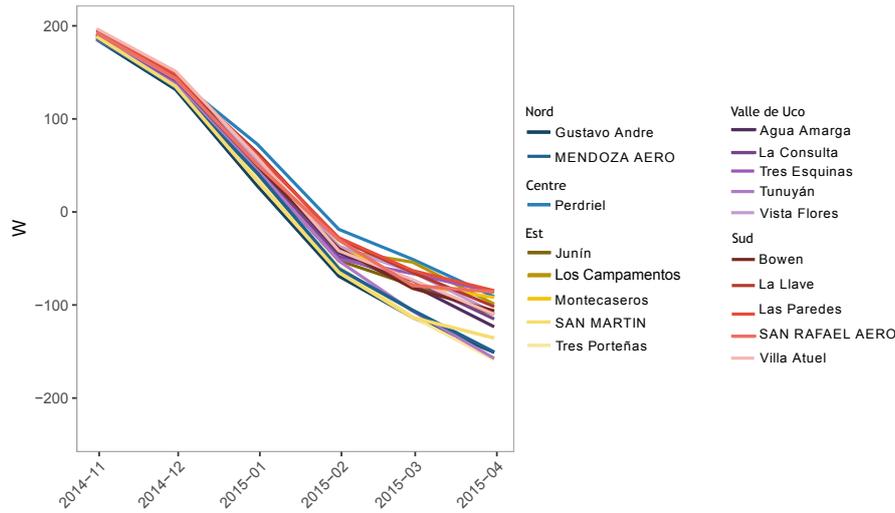


Figure 5.6 – Comparaison des valeurs de l'indice de sécheresse obtenues en fonction de la méthode de calcul de l'évapotranspiration de référence; en pointillés ET_0 à partir de l'équation de Penman Monteith FAO56, en trait plein ET_0 à partir de l'équation de Hargreaves calibrée sur la zone d'étude

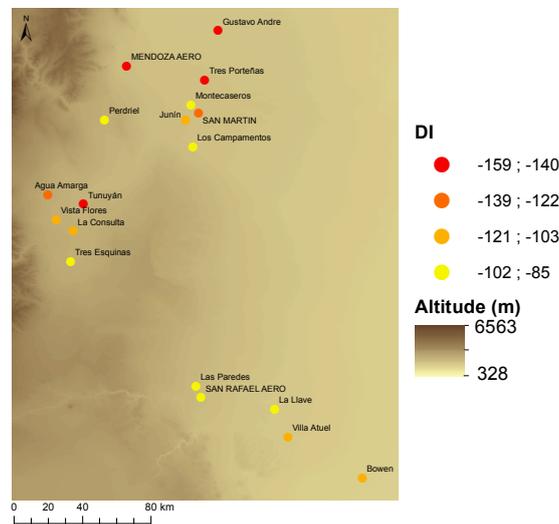
année d'étude. Cependant, les observations sont conformes aux résultats du chapitre 4 qui montre que les écarts observés entre les différentes stations du réseau SMN installées sur la province sont stables dans le temps. De plus les travaux de González *et al.* (2009) et de Borbón *et al.* (2008) sur les saisons viticoles 2004-2005 à 2007-2008, qui comportent le calcul de l'indice de Huglin, et de l'indice de fraîcheur des nuits, obtiennent des différences similaires entre les aires de production viticoles. Aussi, il faut noter que les résultats observés sur la zone centrale de production ne porte que sur la seule station de Perdriel. Cette aire de production présente des conditions topographiques variées avec notamment, les vignobles localisés à Las Compuertas qui sont à une altitude plus élevée et sur des pentes orientées Sud. La station de Perdriel est située dans la plaine. Ainsi, la variabilité au sein de la zone centre n'est pas illustrée ici.

5.3.3 Facteurs de variabilité intra-régionale des indices bioclimatiques

Les facteurs de variation géographiques des indices bioclimatiques dans les différents vignobles de la province de Mendoza sont analysés à partir de l'analyse de la co-inertie des deux tableaux de données. Plus de 97% de l'inertie est expliquée avec les deux premiers axes de la co-inertie et ont donc été retenus pour l'analyse. L'axe 1 est composé du point de vue géographique des variables d'altitude, de longitude, de distance à la cordillère et de l'exposition alors que l'axe 2 est caractérisé par la latitude et dans une moindre



(a)



(b)

Figure 5.7 – Evolution et variabilité spatiale de l'indice de sécheresse

mesure la distance à la cordillère. En ce qui concerne les variables bioclimatiques, l'axe 1 est caractérisé par les T_n du mois de mars très fraîches et tempérées d'un côté et de l'autre côté par la moyenne des températures maximales, minimales et moyennes, les indices de winkler, Huglin et jours biologiquement actifs et les T_n du mois de mars chaudes. L'axe 2 est dirigé par les variables du cumul des précipitations et dans une moindre mesure de l'indice de sécheresse. Donc, l'altitude influence la proportion des nuits du mois de mars fraîches et tempérées, alors que la longitude (de laquelle dérive une partie de la distance à la cordillère) va diriger l'augmentation des températures minimales, maximales et moyennes et donc les indices bioclimatiques basés sur des cumuls thermiques. La latitude entraîne un gradient négatif de précipitations, qui est également influencé positivement par la distance à la cordillère.

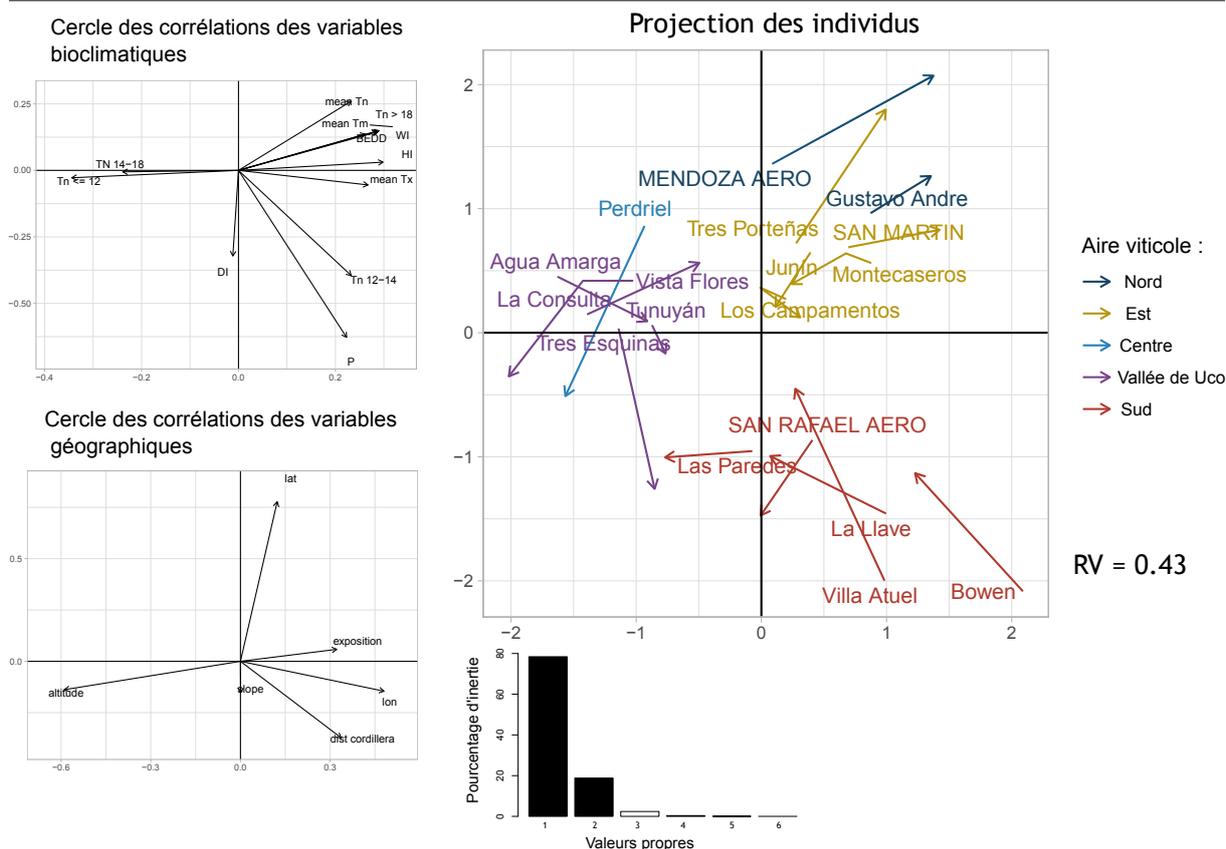


Figure 5.8 – Analyse de co-inertie effectuée entre les données bioclimatiques et les données géographiques des 18 stations ; A gauche, cercles des corrélations des variables sur les axes de la co-inertie, au centre nuage des individus projetés sur les axes 1 et 2 de la co-inertie, le départ de la flèche correspond aux coordonnées avec les variables géographiques, et la pointe aux coordonnées avec les variables bioclimatiques et éboulis des valeurs propres de la co-inertie

La position des stations projetées sur les axes de la co-inertie à l'aide des deux tableaux de variables permet de caractériser l'organisation des stations. La station de Perdriel dont la latitude la rapproche de la station de l'aéroport de Mendoza est située avec les stations de la vallée de Uco, caractérisée par des températures plus fraîches, des indices bioclimatiques moins élevés et des températures nocturnes du mois de mars majoritairement très fraîches ou tempérées. Les stations de Mendoza Aero et Gustavo Andre présentent la latitude la plus élevée, et les caractéristiques bioclimatiques de la zone Est. Cependant, dans cette zone, les stations de Junin, Montecaseros et Los Campamentos ont des caractéristiques bioclimatiques moyennes car leurs coordonnées de projection à partir des variables bioclimatiques sont proches de l'origine. Enfin, les stations de l'aire de production Sud sont les plus à l'Est, les plus éloignées de la cordillère et les plus basses en altitude. Elles sont caractérisées par des températures et cumuls d'indices relativement élevés pour la station de Bowen alors que les autres présentent des caractéristiques bioclimatiques moyennes. Un effet site reste très présent pour les stations de l'Est, du Sud et de la vallée

de Uco. Cependant, au sein de chaque aire de production, les stations ont une trajectoire différente qui rend compte des différences agroclimatiques observées. Le coefficient de la co-inertie est moyen avec une valeur de 0,43 mais reste cependant significatif.

D'un point de vue plus général, la co-inertie permet de retranscrire le groupement des stations déduit de l'analyse descriptive des données. Les tendances positives et négatives des facteurs géographiques sur les variables bioclimatiques sont également mises en évidence. Cependant, cette analyse ne tient pas compte de l'environnement local des stations : surface sur lesquelles elles sont implantées, présence de boisement aux alentours etc... De plus, le nombre important de données ou de variables manquantes a entraîné l'élimination de plus de la moitié des stations de la DACC. La prise en compte de plusieurs années d'étude et de plus de stations permettrait probablement d'améliorer la significativité de la co-inertie et de mieux comprendre les facteurs influençant les conditions bioclimatiques au sein même des aires de production.

Le regroupement des aires de production du centre et de la vallée de Uco sur le plan agroclimatique, justifie le développement de la viticulture dans la vallée de Uco avec les mêmes cépages que ceux implantés dans la zone Centre. De plus, ces deux zones de production sont caractérisées par des indices bioclimatiques aux valeurs élevées mais qui ne sont pas extrêmes, et une forte proportion de nuits fraîches et modérées. Ceci indique des conditions de maturation favorisant la synthèse des polyphénols (Keller, 2015, Kliewer et Torres, 1972) et le maintien d'une acidité suffisante pour l'équilibre du vin (Beelman et Gallander, 1979, Huglin et Schneider, 1998, Kliewer, 1971). Le choix de la production vinicole de masse dans l'oasis Est apparaît ici favorisé par les températures élevées, même si le contexte historique de la production est non négligeable. Cependant, dans le contexte du changement climatique, cette aire de production risque de dépasser les limites physiologiques permettant une production saine et en quantité suffisante. Enfin, les résultats montrent que dans le contexte d'aridité et de températures élevées, la filière qualitative de la production viticole s'est développée à des altitudes légèrement supérieures que la filière de production de masse, profitant des conditions agroclimatiques plus fraîches. Cette segmentation géographique de la filière qualitative est cohérente avec les essais en cours de la viticulture en altitude (Quénol, 2014).

5.4 Conclusion

L'étude des paramètres bioclimatiques des stations installées dans les différentes aires de production viticoles de la province de Mendoza a montré une variabilité importante des cumuls thermiques entre l'Est et l'Ouest de la province. Les zones de production les plus à l'Est sont caractérisées par des températures élevées alors qu'elles sont plus modérées à l'ouest sur le piémont andin. L'analyse croisée entre les variables bioclimatiques et le contexte topographique des stations a mis en évidence un effet positif de l'altitude sur la proportion de nuits fraîches (suivant la classification de l'indice de fraîcheur des nuits)

durant la maturation et la diminution des températures diurnes. Un effet site reste présent même si au sein des zones de production une variabilité des conditions agrométéorologiques reste présente. Le regroupement des stations de la zone centre et de la vallée de Uco qui concentrent l'essentiel de la production vinicole de qualité montre que le choix de la viticulture sur le piémont andin à une altitude supérieure à celle de la vallée, permet des conditions météorologiques favorisant la production de raisins de qualité.

La variabilité des indices bioclimatiques et les caractéristiques de la production dans les différentes zones de production de la province indiquent bien que des températures trop élevées ne favorisent pas la production de vins de qualité même si ce paramètre est à nuancer au regard de l'histoire de la viticulture à Mendoza. Cependant, l'effet positif d'une altitude modérée sur la limitation des températures extrêmes et la diminution des températures nocturnes est cohérent avec une stratégie d'adaptation de la viticulture dans la région par un déplacement plus en altitude de la production quand les températures dans les aires de production actuelles ne seront plus favorables.

PARTIE III

Caractérisation des vignobles de Mendoza par
télédétection optique et radar

INTRODUCTION

La partie précédente a montré que, depuis les cinquante dernières années, une augmentation des températures significatives sur les régions viticoles d'Argentine est observée. Dans la province de Mendoza, 1^{ère} province viticole d'Argentine, l'augmentation des températures est également associée à une augmentation de la proportion d'étés plus humides que la moyenne. Cependant, les caractéristiques topographiques et géographiques des aires de production situées dans les quatre oasis de Mendoza, accentuent ou atténuent les caractéristiques régionales du climat mendocien. Ces caractéristiques peuvent en partie expliquer le potentiel qualitatif des quatre aires de production viticoles de la province. Cependant, à l'échelle locale, les stratégies de production et les choix cultureux vont jouer un rôle significatif dans la qualité finale des raisins produits. En particulier, la gestion du stress hydrique à travers le pilotage de l'irrigation est une variable clé de la gestion de la vigueur et de l'équilibre des raisins en contexte de climat semi-aride (Ojeda *et al.*, 2002). De plus, les précipitations estivales de l'Argentine sont majoritairement sous forme orageuse régulièrement accompagnées de grêle (Maldonado, 2001, Mezher *et al.*, 2012). Le développement des systèmes de protection notamment par l'emploi des filets anti-grêle est à favoriser avec l'augmentation probables des précipitations estivales.

Dans ce contexte, le développement de méthodes de cartographies et de suivi des caractéristiques des vignobles peut apporter des outils d'aide à la décision pour les viticulteurs et les organismes de la filière. La télédétection satellitaire apparaît être une technologie adaptée à leur réalisation. De nombreuses applications de la télédétection en viticulture sont d'ores et déjà existantes pour la caractérisation des vignobles et de leur variabilité (Hall *et al.*, 2002, Vaudour *et al.*, 2014b, Hall, 2016). Néanmoins, l'utilisation des données de télédétection satellitaires pour fournir des produits à l'échelle parcellaire sur plusieurs vignobles est encore peu développée. La grande diversité géométrique et les combinaisons de pratiques culturelles des inter-rangs sont un frein probable à l'utilisation de cette échelle d'analyse.

Les travaux de cette partie visent donc à identifier les principales pratiques culturelles qui affectent les signatures temporelles des vignobles. Elles seront ensuite prises en compte dans les différentes applications développées. Parmi les pratiques culturelles concernées,

l'orientation des rangs est déterminée afin d'identifier son impact sur les variables des images RSO (Chapitre 6). De plus, cette cartographie peut contribuer à identifier les variations dans le microclimat des vignobles. Ensuite, les différences liées à la gestion des inter-rangs sont évaluées sur les images optiques et RSO ainsi que leur influence sur le potentiel de ces images pour le suivi de la croissance végétative des vignobles (Chapitre 7). Le chapitre 8 porte sur la cartographie de deux pratiques culturales d'intérêt pour la filière vitivinicole : la caractérisation des parcelles protégées par des filets anti-grêle et l'identification de la méthode d'irrigation. La première peut contribuer à une meilleure estimation des dommages suite à des épisodes de grêle. La seconde peut être utilisée à des fins de suivi de la modernisation des systèmes d'irrigation dans les plans d'optimisation de la gestion de la ressource en eau. Enfin, le chapitre 9 évalue le potentiel des images optiques pour l'estimation de l'évapotranspiration des vignobles et la spatialisation des besoins en eau des parcelles.

CHAPITRE 6

Evaluation des images Pléiades en mode multispectral et panchromatique pour la détermination de l'orientation des rangs des vignobles

Sommaire

6.1	Introduction	104
6.2	Matériels et méthodes	105
6.2.1	Site d'étude	105
6.2.2	Image satellitaire utilisée	105
6.2.3	Méthodologie	106
6.3	Résultats et discussion	109
6.4	Conclusion	111

6.1 Introduction

L'orientation des rangs est une des pratiques pérennes qui influence le climat d'une parcelle 1.6.2. Elle est partiellement contrainte par la topographie et la mécanisation du vignoble (Reynier, 2011). Pour une orientation de pente donnée, l'orientation des rangs fait varier le taux d'exposition au soleil de la canopée et des grappes ainsi que le durée d'exposition (Weiss *et al.*, 2003, Hunter *et al.*, 2016). Ces différences peuvent entraîner des variations de l'acidité totale des moûts (Giacosa *et al.*, 2015) ou générer des dommages en contexte de climat chaud avec une exposition forte au soleil (Weiss *et al.*, 2003). Par conséquent, des cartes de l'orientation des rangs à l'échelle d'un paysage viticole peuvent être un outil pertinent dans le zonage du terroir, le suivi de variables biophysiques ou la cartographie des risques de dommages. L'utilisation de la télédétection apparaît pertinente pour cartographier l'orientation des rangs des parcelles de vignes. La couverture spatiale importante des images satellitaires permet la cartographie des caractéristiques des cultures de l'échelle locale à celle du paysage tout en réduisant les besoins en mesures de terrain.

A l'échelle du paysage, les variations de l'orientation des rangs sont aussi associées à des différences de mode de gestion des inter-rangs, de systèmes de conduites, d'espacement entre les rangs et les ceps de vigne, de vigueur... Pour une bonne extraction de l'orientation des rangs, la résolution spatiale des images doit être cohérente avec la dimension des objets étudiés. Avec un écart inter-rang variant de 1 à 3 m, une résolution spatiale proche d'1 m semble recommandée. Les images satellitaires à très haute résolution spatiale ainsi que les images aéroportées ou acquises à l'aide de drones correspondent à ce critère. Cependant, la couverture spatiale des images satellitaires est plus importante et est plus adaptée pour des études à l'échelle d'un paysage.

Plusieurs méthodes existent pour l'étude des orientations basées sur l'analyse des textures (Germain *et al.*, 2003, Josso *et al.*, 2005, Lefebvre *et al.*, 2011). Ces méthodes n'ont pas toutes été appliquées dans un contexte agricole et emploient uniquement des images à la résolution spatiale submétrique. Dans ce chapitre, la méthode Marais Sicre *et al.* (2014) a été adaptée pour l'extraction de l'orientation des rangs des parcelles de vignes. C'est une méthode simple et robuste basée sur la morphologie mathématique qui a déjà été mise en place pour l'extraction de l'orientation des rangs des grandes cultures dans le Sud-Ouest de la France avec des images panchromatiques à 2 m de résolution spatiale. Cette résolution spatiale est plus grossière que la taille des objets étudiés. Les performances de la méthode pour l'extraction de l'orientation des rangs de vigne a été évaluée en utilisant des images Pléiades. Une image multispectrale à 2 m de résolution, correspondant à la résolution spatiale utilisée initialement pour la méthode, et une image panchromatique à 0,5 m de résolution ont été utilisées. L'objectif est d'évaluer le niveau de résolution nécessaire pour une adaptation de la méthode au contexte viticole. Dans un premier temps, la méthode et les adaptations effectuées sont présentées. Puis, les résultats de l'estimation de l'orientation des rangs aux deux résolutions spatiales de 0,5 m et 2 m

sont comparés et une carte de l'orientation des rangs est produite.

6.2 Matériels et méthodes

6.2.1 Site d'étude

Les travaux de ce chapitre portent sur le site d'Agrelo dont les caractéristiques sont détaillées dans la section 3.2.3 sur 2250 ha de vignes divisés en 633 parcelles (Figure 6.1). Les informations sur ce parcellaire sont présentées dans la section 3.5.1.2.



Figure 6.1 – Localisation du site d'étude et des vignobles étudiés

Le terrain est majoritairement plat et ne contraint pas le choix d'une orientation spécifique des rangs des vignobles. La majorité des vignes sont palissées et conduites verticalement. Les parcelles en pergola présentant un motif en grille n'ont pas été retenues pour l'analyse de l'orientation. L'espacement entre les rangs est variable de 1,8 m à 3 m et l'espacement entre les ceps est d'environ 1 m.

L'orientation des rangs a été mesurée manuellement à l'aide d'un rapporteur en prenant comme référence 0° pour la direction Nord-Sud. Les orientations des rangs de la zone d'étude couvrent plusieurs valeurs de l'intervalle $[0^\circ-180^\circ]$ et sont majoritairement concentrées sur l'intervalle $[0^\circ-15^\circ]$ (Figure 6.2). Trois autres pics à 90° , 150° et 168° sont également présents.

6.2.2 Image satellitaire utilisée

L'image Pléiades acquise le 23 décembre 2014 a été utilisée. A cette date les vignes sont presque au maximum de croissance végétative et d'un point de vue reproductif au

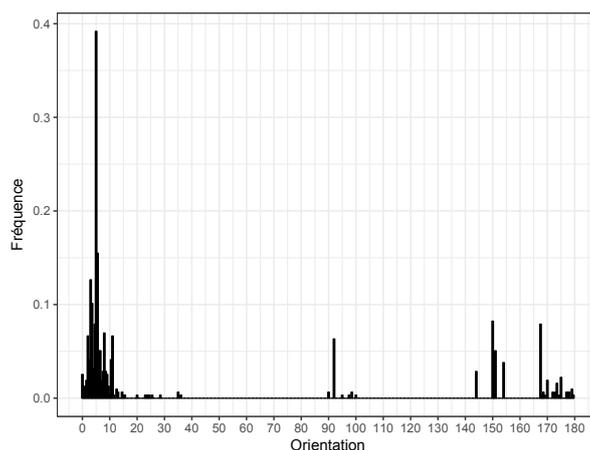


Figure 6.2 – Fréquence des angles d'orientation des rangs sur l'espace d'étude

stade de fermeture de la grappe. Les caractéristiques de l'image et des pré-traitements sont détaillés dans les sections 3.4.1 et 3.4.1.1.

6.2.3 Méthodologie

La méthode est basée sur un filtrage spatial, de la morphologie mathématique et des géotraitement. Cette méthode a été mise au point pour déterminer l'orientation des rangs des grandes cultures dans le Sud-Ouest à partir d'image panchromatique Formosat-2 (Marais Sicre *et al.*, 2014). Le schéma méthodologique de l'adaptation de la méthode est présenté dans la figure 6.3. La première étape a consisté à appliquer un filtre directionnel dans deux directions : 45° et 135° . Le filtre directionnel du logiciel ENVI 5.0 a été utilisé. La fenêtre glissante de 3×3 est adaptée à la dimension spatiale des objets étudiés et a été choisie. En effet les objets à caractériser sont des rangs d'environ 50 cm de large espacés d'environ 2 m en moyenne. Les deux filtres directionnels ont été appliqués sur l'image panchromatique et sur la bande rouge pour l'image multispectrale. Cette dernière a été choisie afin de maximiser le contraste entre les rangs et les inter-rangs (Delenne *et al.*, 2006). Chaque filtre directionnel a une sensibilité de 45° de part et d'autre de l'angle choisi et les deux filtres permettent de couvrir 180° au total. Les gradients ont été seuillés afin d'obtenir des rasters binaires. Ensuite les opérateurs morphologiques ont été utilisés afin d'améliorer la forme des segments rasters obtenus après seuillage. Dans le cas de l'image panchromatique, les rasters binaires présentaient des segments bien définis d'une largeur de 1 pixel. Les opérateurs morphologiques (érosion, reconstruction géodésique et ouverture) n'ont pas été appliqués. L'élément structurant de l'érosion et de l'ouverture est un disque avec un rayon autour du centre de 1 pixel (2 pixels dans la version originale de la méthode). Ensuite, la structure des segments a été extraite à l'aide d'un "skeletoning" qui a renvoyé les segments en mode "raster". Ces derniers ont ensuite été post-traités. La dernière étape comprenait la sélection des segments représentatifs (longueur supérieure à

15m), un lissage avec l'algorithme PAEK ("Polynomial Approximation with Exponential Kernel" paramétré avec une tolérance de 10) et le calcul des orientations.

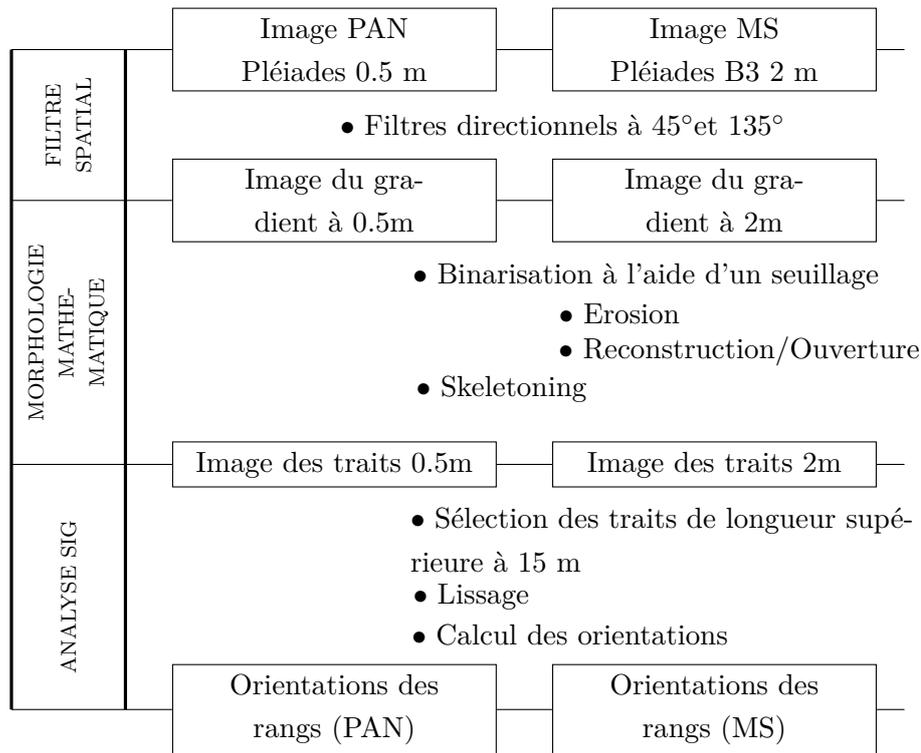


Figure 6.3 – Schéma méthodologique de l'extraction de l'orientation des rangs à partir des images multispectrale et panchromatique adapté de Marais Sicre *et al.* (2014)

Ensuite les résultats des orientations estimées à l'aide des deux filtres ont été comparés pour sélectionner le meilleur filtre. Pour cela la fréquence spatiale des segments par parcelle (i) et pour chaque filtre (α) a été calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$SF_{\alpha}^i = L_{\alpha}^i / S^i \quad (6.1)$$

où L est la longueur totale des segments contenus dans la parcelle i et S la surface de la parcelle i .

Pour chaque parcelle, le filtre qui a produit la plus grande fréquence spatiale de segments a été retenu ainsi que l'orientation estimée. Enfin, les valeurs d'orientation calculées à partir des deux images aux résolutions spatiales différentes ont été comparées aux données de validation. L'objectif était d'estimer le niveau de résolution nécessaire à une estimation précise de l'orientation des rangs. Les produits satellitaires à la résolution de l'ordre de quelques mètres sont plus nombreux et plus accessibles que ceux à la résolution sub-métrique. De plus, cette méthode a déjà permis de caractériser l'orientation de parcelles agricoles avec une résolution spatiale de 2 m, à la limite de la dimension du motif orienté. C'est pourquoi la comparaison des performances de la méthode à une résolution spatiale conforme à la dimension de l'objet et une résolution inférieure a été effectuée.

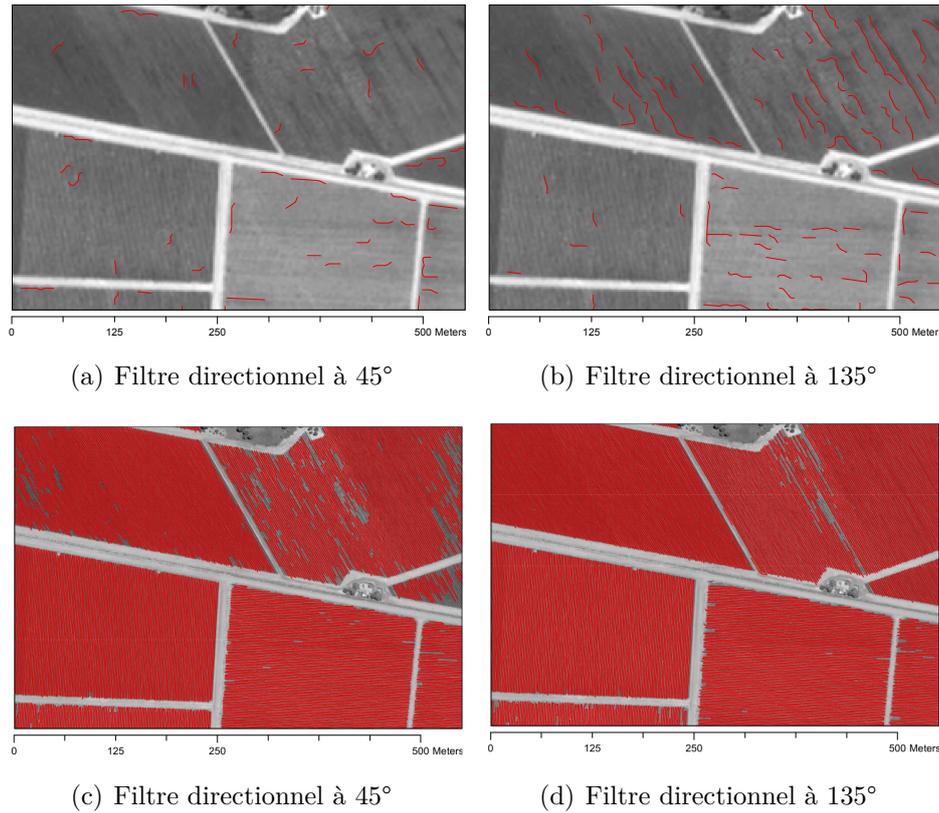


Figure 6.4 – Exemples de segments extraits par les deux filtres sur la bande rouge de l’image multispectrale (a, b) et la bande panchromatique (c, d)

Afin d’illustrer certaines étapes de la méthode, la figure 6.4 présente la densité de segments de 4 parcelles de vignes obtenue avec l’image panchromatique et la bande rouge de l’image multispectrale à partir de chaque filtre directionnel. L’image panchromatique a permis une extraction beaucoup plus dense de segments que l’image multispectrale sur l’extrait. La fréquence spatiale des segments extraits à partir des deux filtres directionnels est présentée sur la figure 6.5. L’extraction des linéaments avec la bande rouge à 2 m de résolution spatiale (fréquence spatiale moyenne de 0,02) est plus de dix fois moins dense que celle avec l’image panchromatique (fréquence spatiale moyenne de 0,29). La complémentarité des deux filtres directionnels est également illustrée sur la figure 6.5. Pour des valeurs d’orientation des rangs inférieures à 65°, le filtre directionnel à 45° permet une extraction plus dense de segments, alors que le filtre à 135° permet une meilleure extraction de segments pour des orientations supérieures à 110°. La fréquence spatiale des segments est équivalente entre les deux filtres pour des valeurs d’orientations proches de 0° et 90°. Cette observation est en accord avec les intervalles d’applications théoriques des deux filtres. En effet, le filtre directionnel à 45° est supposé être adapté pour des orientations comprises entre 0 et 90° et le filtre directionnel à 135° pour des orientations comprises entre 90 et 180°.

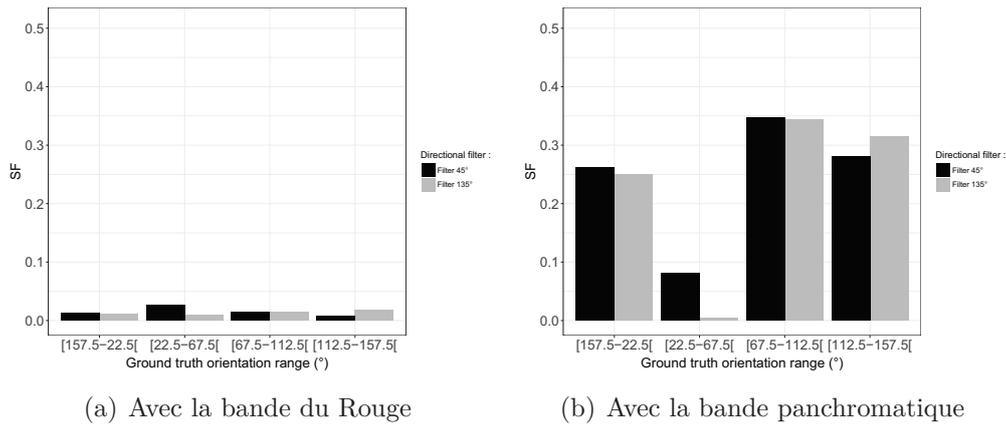


Figure 6.5 – Fréquence spatiale moyenne des segments extraits par les deux filtres en fonction de l'orientation des rangs pour les deux images testées

6.3 Résultats et discussion

La comparaison des orientations des rangs estimées aux données de validation sont présentées dans la figure 6.6.

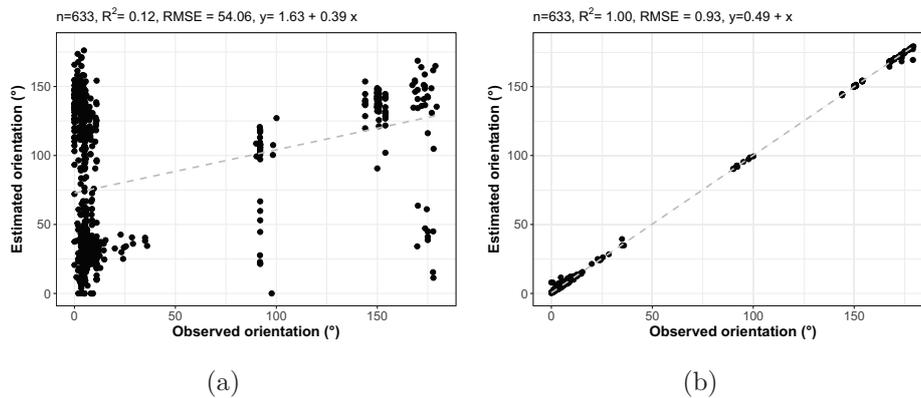
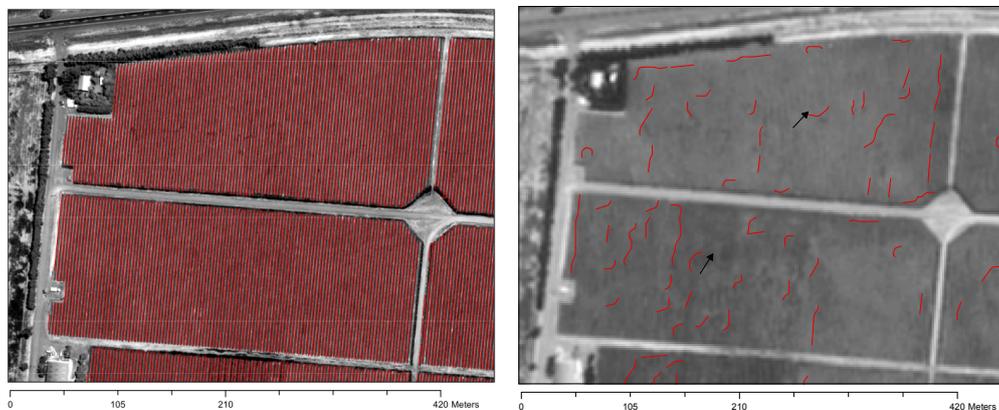


Figure 6.6 – Comparaison entre les valeurs estimées et mesurées de l'orientation des rangs à partir de la bande rouge de l'image multispectrale a) et de l'image panchromatique b)

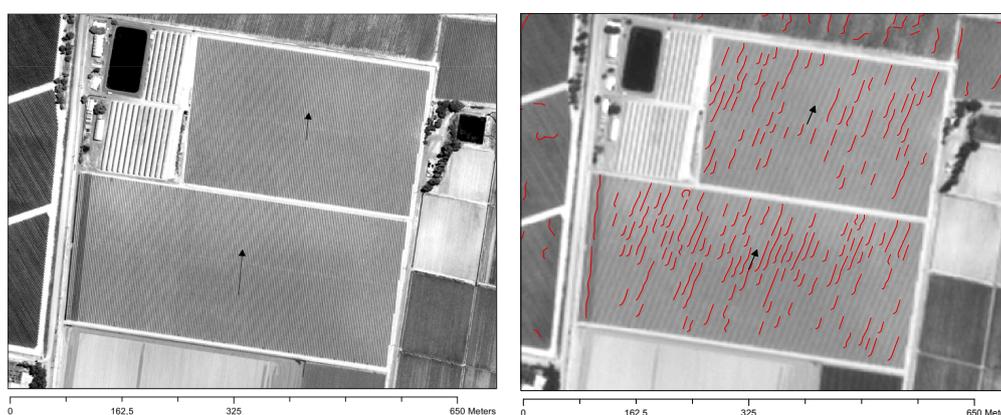
La précision est faible lorsque la bande rouge est utilisée avec un coefficient de détermination de 0,12 et une erreur relative de 54,06°. La faible fréquence spatiale des segments extraits (Figure 6.5-a)) avec les deux filtres directionnels et le bruit lié aux hétérogénéités au sein des parcelles peuvent expliquer ce taux d'erreur élevé. L'influence des hétérogénéités spatiales est illustrée dans la figure 6.7. A une résolution spatiale de 2 m, les segments dans le sens de l'orientation des rangs, sont mélangés à ceux qui révèlent les hétérogénéités intra-parcellaires et des effets de bord sont présents. Leur longueur et leur densité est similaire aux segments orientés dans la direction du rang et influencent donc la détermination de l'azimuth. Un autre effet observé est un effet d'aliasing. Pour certaines

parcelles, l'information du motif orienté enregistré à une résolution spatiale plus grossière renvoie un autre motif orienté clairement extrait par les segments. Ce motif présenté dans la figure 6.8 n'est pas orienté dans la même direction que les rangs et résulte à l'extraction du grand nombre de segments dans une direction biaisée.



(a) Lineaments extracted with PAN image (b) Lineaments extracted with Red image

Figure 6.7 – Comparaison de la direction des segments extraits avec l'image panchromatique et l'image multispectrale pour le filtre directionnel à 45°



(a) 0.5m and associated orientation (b) 2m and associated orientation

Figure 6.8 – Effet d'aliasing à 2m de résolution spatiale

Les performances de la méthode pour l'extraction de l'orientation des rangs à 0,5 m de résolution spatiale révèlent une très bonne précision de l'estimation des rangs avec la méthode. Avec un coefficient de détermination de 1,00 et une erreur relative de 0,93°, la méthode est assez précise pour mesurer l'orientation des rangs. Ce résultat s'explique par une très forte densité de segments extraits dans la bonne direction. A cette résolution, les rangs sont clairement identifiables et l'extraction du gradient entre les rangs et les inter-rangs permet d'obtenir une densité forte de segments dans la direction des rangs. Les hétérogénéités intra-parcellaires et les éventuels effets de bord ont un impact négligeable

dans l'estimation de l'orientation. Ces résultats ont montré que dans le cas des vignobles, le motif orienté doit être prédominant dans l'information spectrale pour une estimation correcte de l'orientation des rangs. Dans le cas des grandes cultures, une résolution de 2 m est particulièrement suffisante lorsque les traces des pratiques culturales opérées telles que le labour ou les traces des engins agricoles comme les moissonneuses sont de la même dimension que les pixels. Dans le cas des vignobles, la résolution spatiale de 2 m équivalente à la largeur des inter-rangs ne permet pas une discrimination spectrale suffisante des rangs, les pixels étant mélangés. De plus, les hétérogénéités parcellaires liées à des différences de type de sol, d'hétérogénéité de l'irrigation entraînent des variations de vigueur significatives spectralement qui sont donc discriminées par la méthode à la place des rangs.

Les orientations des rangs des vignobles estimées à partir de l'image panchromatique ont donc été choisies afin de produire une carte des orientations des rangs à l'échelle du paysage (Figure 6.9). Afin d'améliorer la lecture de la carte, les orientations sont divisées en quatre catégories qui représentent les quatre principales directions (N-S pour les valeurs comprises entre $[0^\circ-22,5^\circ[$ et $[157,5^\circ-180^\circ]$, NE-SO pour l'intervalle $[22,5^\circ-67,5^\circ[$, E-O pour l'intervalle $[67,5^\circ-112,5^\circ[$ et NO-SE pour l'intervalle $[112,5^\circ-157,5^\circ]$). Comme le montre la figure 6.9, l'orientation principale des vignobles est la direction Nord-Sud, suivi de l'orientation NO-SE. L'orientation Nord-Sud permet le plus haut taux d'interception d'énergie lumineuse avec un pic le matin et l'après-midi ainsi qu'une répartition uniforme de l'activité photosynthétique de la canopée. L'orientation NO-SE présente un pic d'interception de l'énergie lumineuse le matin (Hunter *et al.*, 2016). Dans cette région semi-aride présentant de hauts niveaux d'exposition solaire, les orientations N-S et NE-SO augmentent le risque de brûlures des grappes exposées l'après-midi (Weiss *et al.*, 2003). En effet, dans l'hémisphère sud, le côté Nord-Ouest de la canopée est exposé l'après-midi. Ceci peut expliquer le faible nombre de parcelles plantées dans la direction NE-SO. De plus, les viticulteurs conduisent leurs vignes de manière à maintenir les grappes exposées du côté Est afin de les protéger d'une exposition directe au soleil l'après-midi. L'exposition E-O est peu représentée sur le site et permet l'absorption d'une grande partie de l'énergie lumineuse reçue et renvoyée par le sol (Hunter *et al.*, 2016) et présente un risque plus faible de brûlures.

6.4 Conclusion

Ce chapitre avait pour but d'évaluer le potentiel des images Pléiades afin d'extraire automatiquement les orientations des rangs des vignobles. Parmi les deux résolutions spatiales testées, celle à 2 m est inappropriée pour le calcul de l'orientation ($R^2 = 0,12$ et $RMSE = 54,06^\circ$). Seule la résolution spatiale de l'image panchromatique permet une estimation précise de l'orientation des rangs ($R^2 = 1,00$ et $RMSE = 0,93^\circ$). L'enregistrement du motif orienté dans des pixels à 2 m de résolution spatiale peut entraîner un

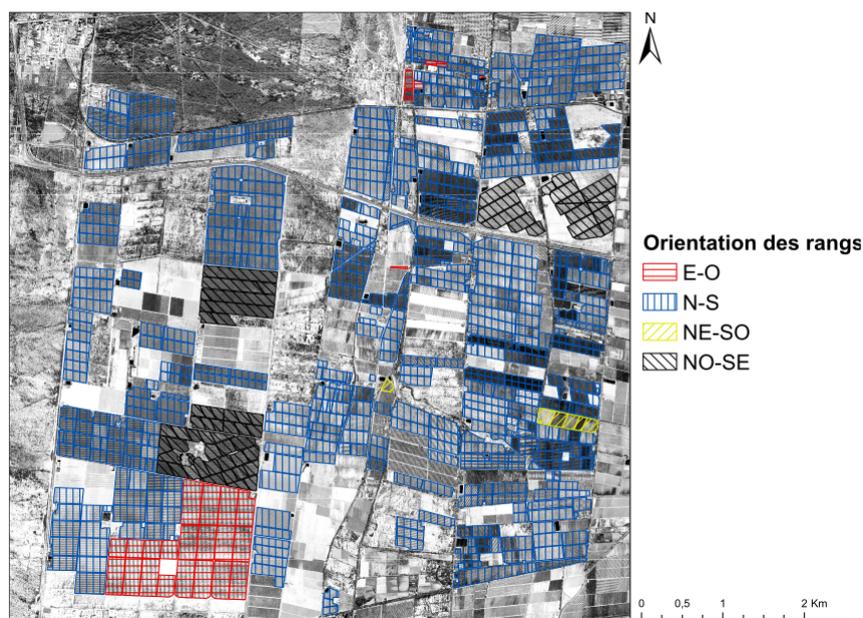


Figure 6.9 – Carte des orientations des rangs produite à partir de l’image panchromatique Pléiades

effet d’aliasing conduisant à l’estimation d’une fausse orientation. Mais surtout, à 2 m de résolution spatiale, le motif orienté n’est pas clairement visible, et les hétérogénéités intra-parcellaires biaisent l’estimation de l’orientation. Avec une résolution spatiale plus grande de 0.5 m, le motif orienté est clairement détecté et les segments liés aux hétérogénéités intra-parcellaires sont minoritaires et ne modifient pas la valeur de l’orientation calculée.

Ces résultats ont montré que la méthode, d’abord développée pour extraire l’orientation des rangs des grandes cultures à l’aide d’images à 2 m de résolution spatiale, est également performante pour le calcul de l’orientation des rangs des parcelles plantées en vigne. Seulement une résolution spatiale cohérente avec la dimension de l’objet est nécessaire pour ce type de culture. La méthode a été testée avec succès sur 2250 ha de vignes.

CHAPITRE 7

Potentiel des séries temporelles d'images optiques et radar pour le suivi de la croissance végétative

Sommaire

7.1	Introduction	114
7.2	Matériels et méthodes	115
7.2.1	Site d'étude	115
7.2.2	Images satellitaires	115
7.2.3	Mesures de terrain	115
7.2.4	Méthodologie	116
7.3	Résultats	118
7.3.1	Analyse des signatures temporelles des vignobles	118
7.3.2	Estimation de la surface foliaire et de la hauteur de la canopée des vignes par télédétection	122
7.4	Discussion	130
7.5	Conclusion	134

7.1 Introduction

La caractérisation des hétérogénéités de l'expression végétative des vignobles est un des enjeux de la viticulture de précision aujourd'hui (Hall *et al.*, 2002, 2003, Johnson *et al.*, 2003, Bramley et Hamilton, 2004). En effet, l'estimation de la vigueur et de ses variations au sein des parcelles permet de mieux piloter les pratiques culturales et de réaliser des lots de vendanges homogènes, la vigueur ayant un impact sur le potentiel de la vendange (Barbeau, 2008). La télédétection est un outil adapté à la spatialisation des caractéristiques de la canopée et les applications existantes utilisent des images acquises par drone, avion ou satellite ou même des capteurs embarqués au sol. De plus, la littérature existante sur la télédétection et la viticulture concerne majoritairement les capteurs optiques alors que les applications du radar en agriculture se développent (McNairn et Brisco, 2004). Parmi la littérature, deux échelles d'analyse sont majoritairement étudiées. Dans le premier cas, les études sont réalisées sur peu de parcelles aux pratiques culturales similaires (Johnson *et al.*, 2003, 1996, Hall *et al.*, 2003, Fraga *et al.*, 2014). Dans le second cas, les travaux concernent une région viticole entière et l'information globale de cette région (Vaudour, 2001, Vaudour *et al.*, 2010, Cunha *et al.*, 2010b). Or, pour travailler à une échelle intermédiaire comprenant plusieurs lots de parcelles, certaines sources de variabilité texturales et spectrales sont à considérer (Hall, 2016). En effet, les pratiques culturales peuvent varier sensiblement au sein même d'une région de production ou d'un domaine viticole. Cette variabilité des pratiques culturales, permet d'adapter au mieux le comportement de la plante aux caractéristiques de son environnement et aux objectifs de production du viticulteur (Reynier, 2011). La variabilité des pratiques culturales, va entraîner une variabilité spectrale et texturale des parcelles qui pourra être retrouvée sur les images satellitaires. Plusieurs études ont déjà mis en évidence un impact de certaines pratiques culturales sur l'information spectrale et texturale des données de télédétection (Delenne, 2006, Company *et al.*, 1994, Baghdadi *et al.*, 2006).

L'objectif de ce chapitre est d'analyser à l'échelle du site d'étude, les pratiques culturales qui influencent les variables satellitaires et ainsi que le potentiel de ces variables pour le suivi de la croissance végétative à travers les deux variables biophysiques suivies : la surface foliaire et la hauteur de la canopée. Dans un premier temps, les signatures temporelles des parcelles de vignes sont analysées au regard de certaines pratiques culturales et leur homogénéité à l'échelle du site d'étude vérifiée. Cette analyse permet également de déterminer les variables satellitaires qui évoluent de manière synchrone avec la croissance végétative. Ensuite, le potentiel de ces variables pour l'estimation de la surface foliaire et de la hauteur de la canopée est évaluée. Les catégories de pratiques culturales menant à des différences des signatures temporelles sont considérées séparément. Le pouvoir prédictif des différents modèles est enfin analysé et des cartes des deux paramètres quantitatifs de la vigne sont produites à l'échelle du site d'étude.

7.2 Matériels et méthodes

7.2.1 Site d'étude

Dans ce chapitre, les parcelles correspondant aux quatre domaines viticoles étudiés ont été utilisées (Section 3.5.1.1). Pour rappel, sur la campagne 2014-2015, le cycle végétatif a débuté début octobre. La floraison a eu lieu aux environs de mi-novembre et la véraison mi-janvier au moment où la canopée est complètement développée. Les vendanges se sont déroulées fin mars, début avril. Les détails supplémentaires sur le contexte de la production viticole dans la zone centre de Mendoza sont présentés dans les sections 3.2.2 et 3.2.3.

7.2.2 Images satellitaires

La série d'images optiques Landsat-8 OLI/TIRS et la série d'images radar TerraSAR-X ont été utilisées. La présentation des images est détaillée dans les sections 3.4.1 et 3.4.2. Seule une série d'images optiques a été conservée afin d'avoir le même nombre d'images optiques et radar. De plus, le calendrier d'acquisition des images Landsat-8 est le plus similaire à celui des images TerraSAR-X. Enfin, la série Landsat-8 couvre tout le cycle de développement contrairement à la série d'images Pléiades.

7.2.3 Mesures de terrain

7.2.3.1 Pratiques culturales

Les pratiques culturales ont été inventoriées sur toutes les parcelles du site (Section 3.5.2). Ceci a permis d'identifier les sources potentielles de variabilité spectrale et texturale sur le site. Les quatre vignobles présentent en particulier des différences concernant la gestion des inter-rangs et l'équipement en filets anti-grêle (Tableau 7.1 et Figure 7.1).

Tableau 7.1 – Gestion des inter-rangs et protection des vignobles avec des filets anti-grêle

Vignoble	Inter-rang Végétation	Inter-rang Rugosité	Equipement en filets anti-grêle
Septima	Bande enherbée	Lisse	97%
Decero	Bande enherbée	Lisse	60%
Los Reyunos	Sans végétation (Désherbage chimique)	Lisse	54%
Alta Vista	Enherbement spontané partiel (Labour)	Rugueux	0%

Les inter-rangs des parcelles d'Alta Vista et Los Reyunos sont désherbés de manière différente. Ceux d'Alta Vista sont labourés alors que ceux de Los Reyunos sont désherbés chimiquement. Ceci entraîne des différences de rugosité et de maîtrise des adventices. Pour les autres vignobles, les inter-rangs sont enherbés. De plus la proportion des vignobles protégés par des filets anti-grêle varie. Enfin, il est important de noter que toutes les parcelles de Los Reyunos sont plantées avec la même orientation des rangs de $167,5^\circ$. Cet angle est également perpendiculaire à l'axe de visée du signal pour les images TerraSAR-X.

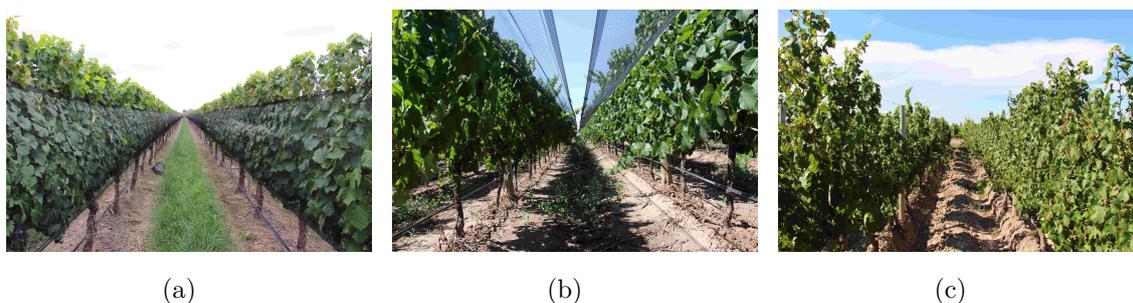


Figure 7.1 – Photos des trois types d'inter-rang : a) présence d'une bande enherbée, b) désherbage chimique, c) labour

7.2.3.2 Suivi de la croissance

Les données du suivi du GLAI (Green Leaf Area Index) et de la hauteur de la canopée ont été utilisées. Les détails concernant les mesures sont présentés dans la section 3.5.3. Parmi les 14 parcelles qui ont été suivies 6 présentent un inter-rang enherbé, 6 un inter-rang labouré et 2 un inter-rang désherbé chimiquement. Les mesures ont été effectuées à une date la plus proche possible des acquisitions. L'écart moyen entre les mesures et les acquisitions est de 1 jour pour les acquisitions TerraSAR-X et 3 jours pour les acquisitions Landsat-8.

7.2.4 Méthodologie

Dans ce chapitre, les signatures temporelles des vignobles sont analysées au regard des pratiques culturales et le potentiel des variables optiques et radar pour suivre la croissance de la vigne est évalué. La figure 7.2 présente le schéma méthodologique des analyses effectuées.

7.2.4.1 Pré-traitements des images optiques

Dans un premier temps, les images Landsat-8 ont été calibrées radiométriquement et corrigées des effets de l'atmosphère (voir section 3.4.1.1). Ensuite les indices de végétation suivants ont été calculés : NDVI, PCD, SAVI, MTVI2 (voir section 3.4.1.2). De plus, le LAI a été dérivé à l'aide d'une équation empirique présentée dans la section 3.4.1.3.

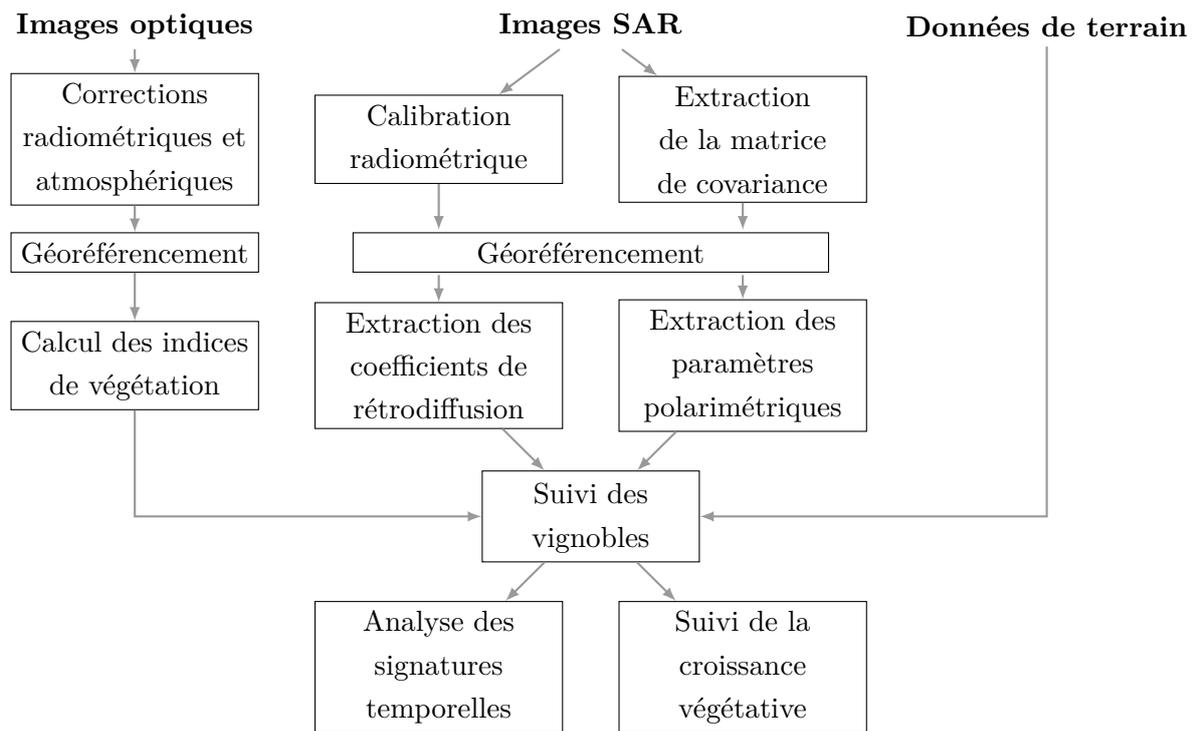


Figure 7.2 – Schéma méthodologique des traitements et analyses effectués

7.2.4.2 Pré-traitements des images radar

Les images TerraSAR-X ont été calibrées et géoréférencées. Les détails concernant les pré-traitements sont présentés dans la section 3.4.2.1. Les coefficients de rétrodiffusion convertis en décibels et deux paramètres polarimétriques : l'angle alpha et l'entropie ont été utilisés dans ce chapitre.

7.2.4.3 Analyse des signatures temporelles

Afin d'analyser l'évolution temporelle des variables optiques et radar au cours de la saison végétative, ces dernières ont été analysées à l'échelle de la parcelle en considérant la valeur moyenne de chaque variable par parcelle et par acquisition. Les signatures ont d'abord été analysées sur des parcelles témoins pour lesquelles les pratiques culturales sont connues et la croissance suivie. Les parcelles ont été choisies afin de représenter les différentes combinaisons de pratiques culturales observées sur le site. Puis, une segmentation issue de cette analyse et la signature temporelle de chaque groupe ont été présentées. La moyenne et l'écart-type de chaque groupe ont été calculés afin de caractériser l'homogénéité des signatures de chaque groupe et de discuter de leur variation et représentativité. Cette étape a également permis la mise en évidence de sources de variation des signaux optiques et radar dues aux pratiques annuelles et à des conditions météorologiques particulières.

7.2.4.4 Estimation du GLAI et de la hauteur de la canopée par télédétection

La dernière étape a consisté à évaluer le potentiel des paramètres optiques et radar pour le suivi de la croissance végétative de la vigne. Des modèles de régression ont été établis entre les variables télédéteectées et les deux variables de suivi de la croissance : le GLAI et la hauteur de la canopée. Le jeu de données a été préalablement segmenté en groupes homogènes déterminés grâce à l'analyse des signatures. Les données bruitées à cause des conditions météorologiques et des pratiques annuelles ont été retirées afin de limiter les biais supplémentaires. Ces pratiques concernent la modification de la forme et du nombre des sillons d'irrigation dans les parcelles irriguées en méthode gravitaire. Des régressions linéaires (et non-linéaires pour un cas) ont été réalisées entre les variables optiques et radar et les données de terrain. La précision globale et les erreurs relatives ont été comparées entre chaque groupe afin d'évaluer l'impact possible des pratiques pérennes sur les possibilités d'applications de la télédétection pour le suivi de la croissance des vignes. Le pouvoir prédictif des meilleurs modèles a été évalué par validation croisée (méthode "leave one out"). Chaque point du jeu de données est successivement retiré et prédit par le modèle ajusté sur les points restants. L'ajustement des valeurs prédites par rapport à la mesure indique le pouvoir prédictif du modèle. Pour chaque catégorie de vignobles, le meilleur modèle pour le suivi de la surface foliaire et de la hauteur de la canopée a été appliqué afin de réaliser des cartes de croissance. Un indicateur de confiance autour des prédictions a également été spatialisé. La différence entre la borne supérieure et inférieure de l'intervalle de confiance a été utilisée. Ainsi, plus l'indicateur de confiance présente une valeur faible, plus la valeur prédite est fiable et inversement.

7.3 Résultats

7.3.1 Analyse des signatures temporelles des vignobles

La figure 7.3 présente la signature temporelle d'une parcelle dont l'inter-rang est enherbé associée au profil moyen des parcelles enherbées du site.

Parmi les différents indices de végétation, seul le NDVI est représenté car les différentes variables sont redondantes. En septembre la parcelle enherbée servant d'exemple est caractérisée par de faibles coefficients de rétrodiffusion : -10 dB pour le canal HH et -12 dB pour le canal VV. Ils demeurent stables au cours du cycle de croissance. Cependant, deux pics à -7 dB sont observés en décembre et en mars, pouvant certainement être expliqués par les précipitations ayant eu lieu lors de ces deux jours d'acquisition. Les paramètres polarimétriques en septembre atteignent 40° pour l'angle alpha et 0,65 pour l'entropie. Durant la croissance végétative, une augmentation de l'entropie est observée jusqu'à 0,8. Cette évolution est similaire aux courbes de croissance. L'angle alpha demeure stable autour de 45° . Concernant les variables optiques, le NDVI de la parcelle est dans l'intervalle [0,4 - 0,6] tout au long du cycle végétatif. En septembre, la valeur modérée du NDVI

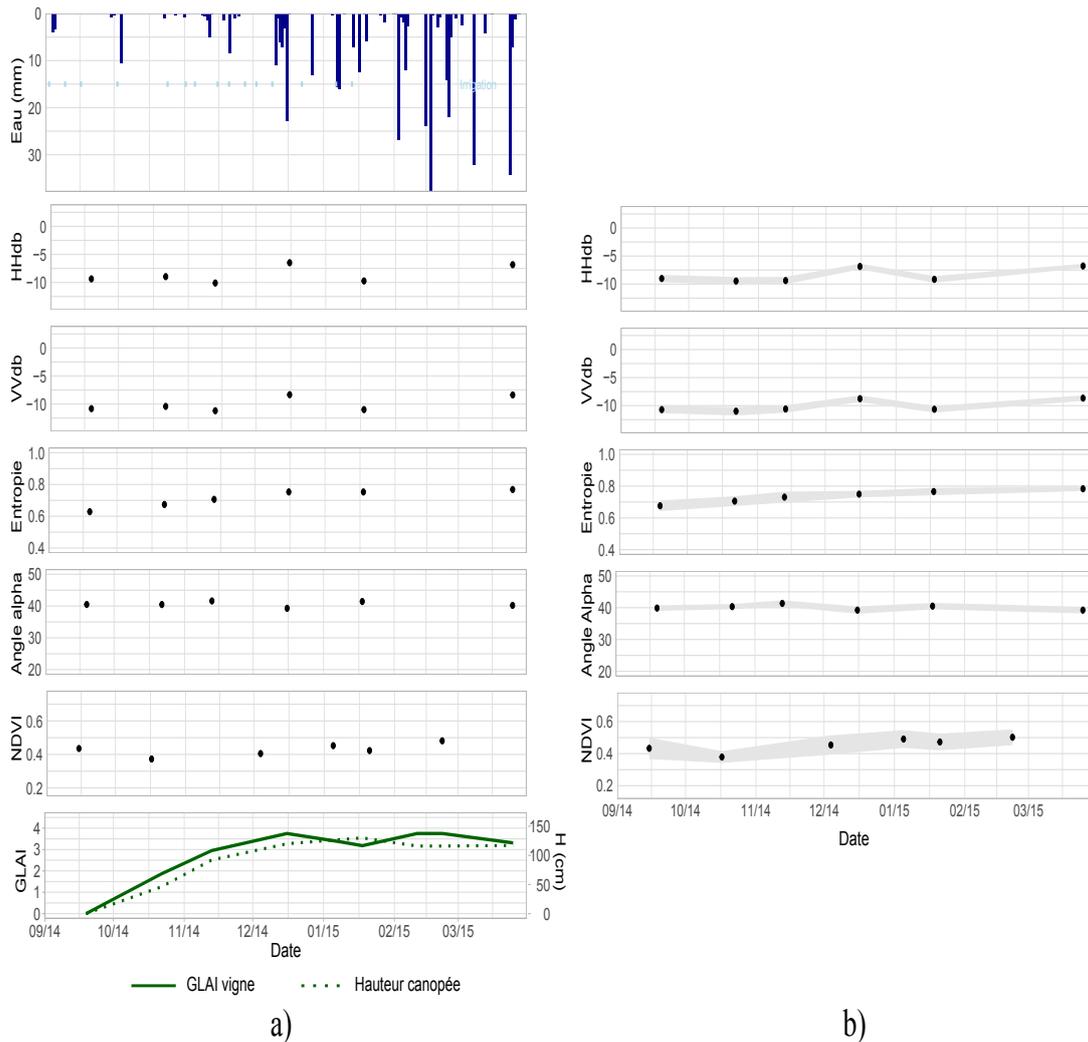


Figure 7.3 – Evolution temporelle des coefficients de rétrodiffusion, de l'entropie, de l'angle alpha et du NDVI : a) pour une parcelle témoin aux inter-rangs enherbés associé aux précipitations, au calendrier d'irrigation et au suivi de la croissance ; b) à l'échelle du site le profil moyen des parcelles enherbées et l'écart-type

de 0,4 alors que le cycle végétatif de la vigne n'est pas entamé est due à la présence de la bande enherbée. Avec la croissance végétative, une augmentation faible de l'indice de végétation est observée. De plus, une diminution de ce dernier entre les acquisitions de septembre et octobre est constatée bien que la croissance des rameaux ait démarré dans l'intervalle. Ceci peut être expliqué par la tonte de la bande enherbée qui est opérée à la fin de l'hiver et entretenue ensuite pendant toute la saison. Les points de septembre de ce jeu de données ne seront pas retenus comme origine pour le suivi de la croissance car ils ajoutent un bruit supplémentaire lié au décalage des tontes des bandes enherbées. Durant la croissance végétative, une faible augmentation des indices de végétation est détectée. Ceci suggère que dans le cas des parcelles enherbées, les pixels contiennent plus d'informations sur la bande enherbée que sur la canopée des vignes. En effet, les bandes

enherbées ont une largeur allant de 1 m à 2 m en fonction de l'écart-inter-rang alors que la canopée des vignes présente une largeur d'environ 50 cm pour ces parcelles. La proportion des rangées de vignes dans les pixels est faible et la part de l'activité photosynthétique des bandes enherbées enregistrée par le capteur optique est plus importante. A l'échelle du site, le profil temporel des parcelles aux inter-rangs enherbés est proche de la signature de la parcelle témoin pour toutes les variables optiques et radar. De plus, un faible écart-type est présent indiquant que les signatures sont proches du profil moyen pour l'ensemble du site. L'écart-type du NDVI est le plus grand. Ceci peut-être dû aux différences des largeurs des bandes enherbées et de leur vigueur ainsi qu'à des différences de vigueur de la vigne. Pour les différents paramètres analysés, aucune différence liée à la présence ou non des filets anti-grêle n'est observée.

Les signatures temporelles des parcelles désherbées, dont les rangs sont orientés perpendiculairement à l'axe de visée, sont présentées dans la figure 7.4. La parcelle témoin est caractérisée par des coefficients de rétrodiffusion plus élevés que les parcelles enherbées, avec des valeurs de 0 dB pour le canal HH et -5 dB pour le canal VV. Une diminution de 2dB des rétrodiffusions est observée entre les deux premières acquisitions de septembre et octobre qui est probablement due au début de la croissance des rameaux et donc plus de diffusion multiple. Ensuite, l'évolution temporelle des coefficients de rétrodiffusion est similaire à celle des parcelles enherbées. Ils restent stables et deux pics sont observés lorsque les acquisitions ont lieu lors d'épisodes pluvieux et que le sol est mouillé. Les valeurs plus élevées des coefficients de rétrodiffusion sont probablement liées à l'orientation des rangs dans un axe perpendiculaire à la visée du signal qui augmente les retours directs du signal. Concernant les paramètres polarimétriques, l'entropie augmente légèrement (de 0,70 à 0,77) entre les acquisitions de septembre et d'octobre. Puis elle demeure stable sauf dans le cas des acquisitions de décembre et de mars correspondant aux acquisitions lors de jours pluvieux. Dans ce cas-ci, l'entropie ne semble pas être corrélée à la croissance de la canopée. L'angle alpha augmente de 28° à 40° au cours du cycle végétatif avec une évolution similaire aux courbes de croissance. Le NDVI présente en septembre une valeur de 0,2. Cette valeur est inférieure à celles des parcelles enherbées et le profil temporel suit l'évolution des courbes de croissance. A l'échelle du site d'étude, le profil moyen des parcelles présentant les mêmes caractéristiques est similaire à celui de la parcelle témoin. De plus, l'écart-type autour du profil moyen est très faible indiquant l'homogénéité des profils pour ces parcelles.

Enfin, la figure 7.5 présente la signature des parcelles désherbées par labour. Les coefficients de rétrodiffusion de la parcelle exemple présentent des valeurs intermédiaires en comparaison des deux cas précédents avec -5 dB pour le canal HH et -7 dB pour le canal VV. Une diminution de 2 dB est observée comme dans le cas précédent entre septembre et octobre avec le début de la croissance végétative. Les deux pics correspondant aux acquisitions les jours de pluie sont également présents. L'angle alpha reste stable autour de 42°. L'entropie et le NDVI augmentent en parallèle de la courbe de croissance

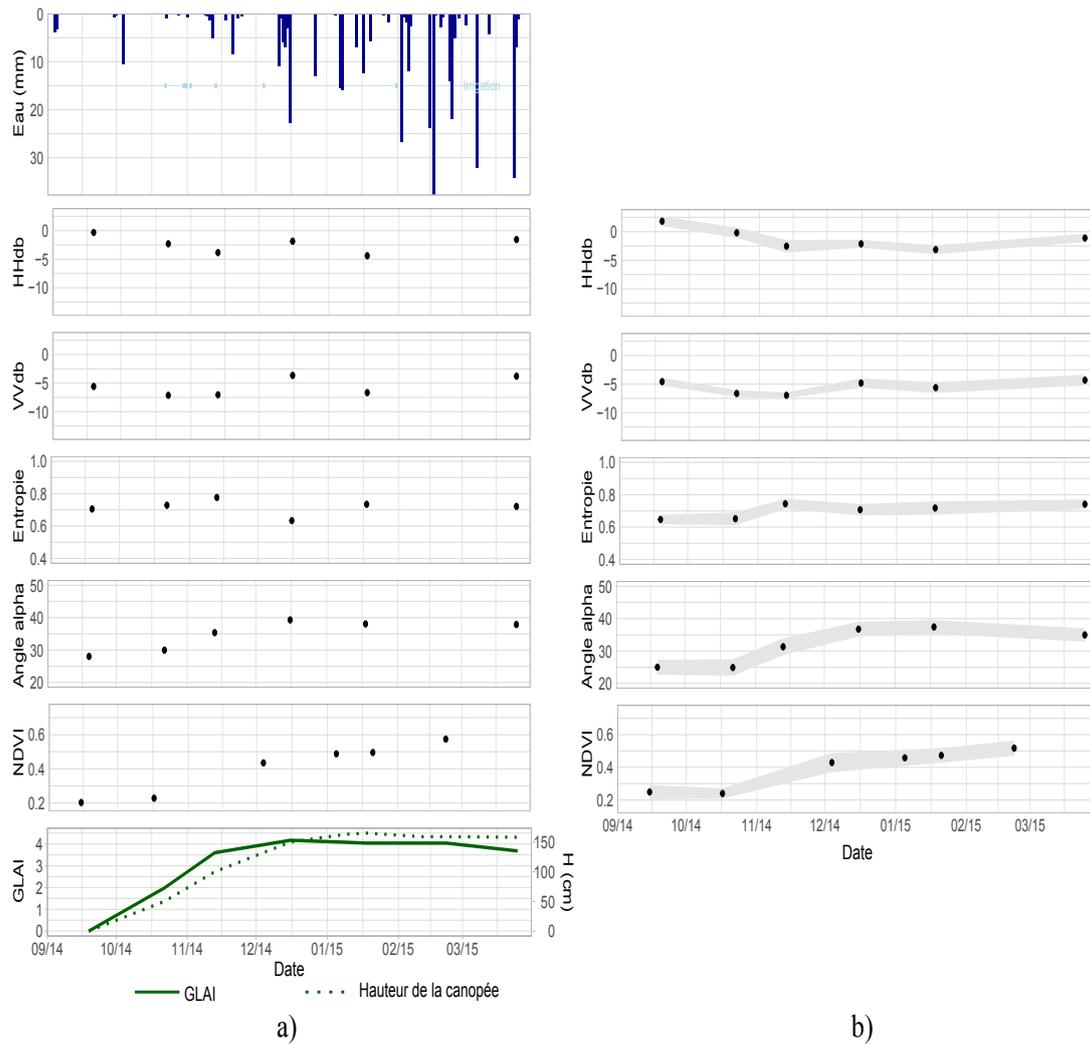


Figure 7.4 – Evolution temporelle des coefficients de rétrodiffusion, de l'entropie, de l'angle alpha et du NDVI : a) pour une parcelle aux inter-rangs désherbés chimiquement, orientée à $167,5^\circ$ associés aux précipitations, au calendrier d'irrigation et au suivi de la croissance ; b) à l'échelle du site le profil moyen des parcelles désherbées et l'écart-type

et semblent donc être corrélés à la croissance végétative. Cependant, sur ce site la surface foliaire décroît en mars. En effet, ce domaine non protégé par des filets anti-grêle, a subi des dommages sévères suite à un violent orage de grêle à la fin du mois de février. La grande majorité des feuilles des ceps ont été endommagées et la végétation dans l'inter-rang s'est développée car les pratiques mécaniques de désherbage ont été stoppées. Ceci peut expliquer pourquoi les valeurs de l'entropie et des indices de végétation sont restées élevées alors que la canopée des vignes s'est fortement réduite. Toutes les autres parcelles suivies sont équipées de filets anti-grêle. Les données du mois de mars sur ce domaine viticole n'ont pas été retenues pour la deuxième partie de l'analyse. A l'échelle du vignoble, le profil moyen des parcelles désherbées par labour est similaire à celui de la parcelle témoin. Cependant, l'écart-type autour des valeurs moyennes des coefficients

de rétrodiffusion est plus grand que dans les deux cas précédents. Ce vignoble est irrigué par la méthode traditionnelle d'irrigation gravitaire. Ainsi, à chaque irrigation, les sillons d'irrigation (creusés par le labour profond) sont remplis d'eau. Pour les acquisitions de septembre à Novembre, plusieurs parcelles étaient en cours d'irrigation ou récemment irriguées. Comme les coefficients de rétrodiffusion en bande X sont sensibles à l'humidité du sol en surface (cas des acquisitions les jours de pluie), les activités d'irrigation gravitaire peuvent expliquer cette variabilité. L'entropie et le NDVI présentent également un écart-type plus grand. Ce site est composé de parcelles plantées dans un intervalle de 40 ans. Ceci entraîne une plus grande variabilité du potentiel de vigueur pouvant contribuer à expliquer cette forte variance. De plus, avec le désherbage par labour, la maîtrise des adventices est moins homogène et peut expliquer les écarts dans une certaine mesure. Enfin, concernant l'entropie, une diminution de ce paramètre est observée pour certaines parcelles à l'acquisition du mois de janvier. Bien que les parcelles puissent avoir été effeuillées ou rognées, la diminution est plus importante. Pour ces parcelles, le calendrier des pratiques culturales indique un changement dans la géométrie de l'inter-rang qui passe de deux sillons profonds de 20 cm à un seul sillon beaucoup plus profond afin d'augmenter les apports en eau lors de l'irrigation en forme de V. Cette pratique modifie de manière importante la géométrie de l'inter-rang et peut avoir un impact non négligeable sur le caractère aléatoire de la rétrodiffusion du signal radar et donc sur l'entropie. Les échantillons du jeu de données concernés par cette pratique particulière ont été retirés pour la deuxième partie de l'analyse. En effet ces modifications de l'inter-rang ont un impact significatif et non maîtrisable sur la variable radar qui semble être corrélée à la croissance végétative.

7.3.2 Estimation de la surface foliaire et de la hauteur de la canopée des vignes par télédétection

Ensuite, les sections suivantes vont présenter les résultats statistiques de l'estimation des paramètres biophysiques de surface foliaire et de hauteur de la canopée des vignes. Les variables dont l'évolution temporelle suit la courbe de croissance végétative des parcelles ont été retenues.

7.3.2.1 Cas de la surface foliaire

La figure 7.6 présente les résultats statistiques des régressions réalisées entre les mesures de GLAI et les paramètres polarimétriques ou les indices de végétation pour les trois catégories de vignobles. Concernant les vignobles dont les inter-rangs sont enherbés, l'entropie présente une corrélation modérée avec le GLAI ($R^2=0,5$). Les indices de végétation présentent des performances similaires avec pour le MTVI2 un coefficient de détermination de 0,5 et une erreur relative de 16%. Dans le cas des parcelles désherbées dont les rangs sont orientés perpendiculairement à la visée du signal radar, l'angle alpha est la

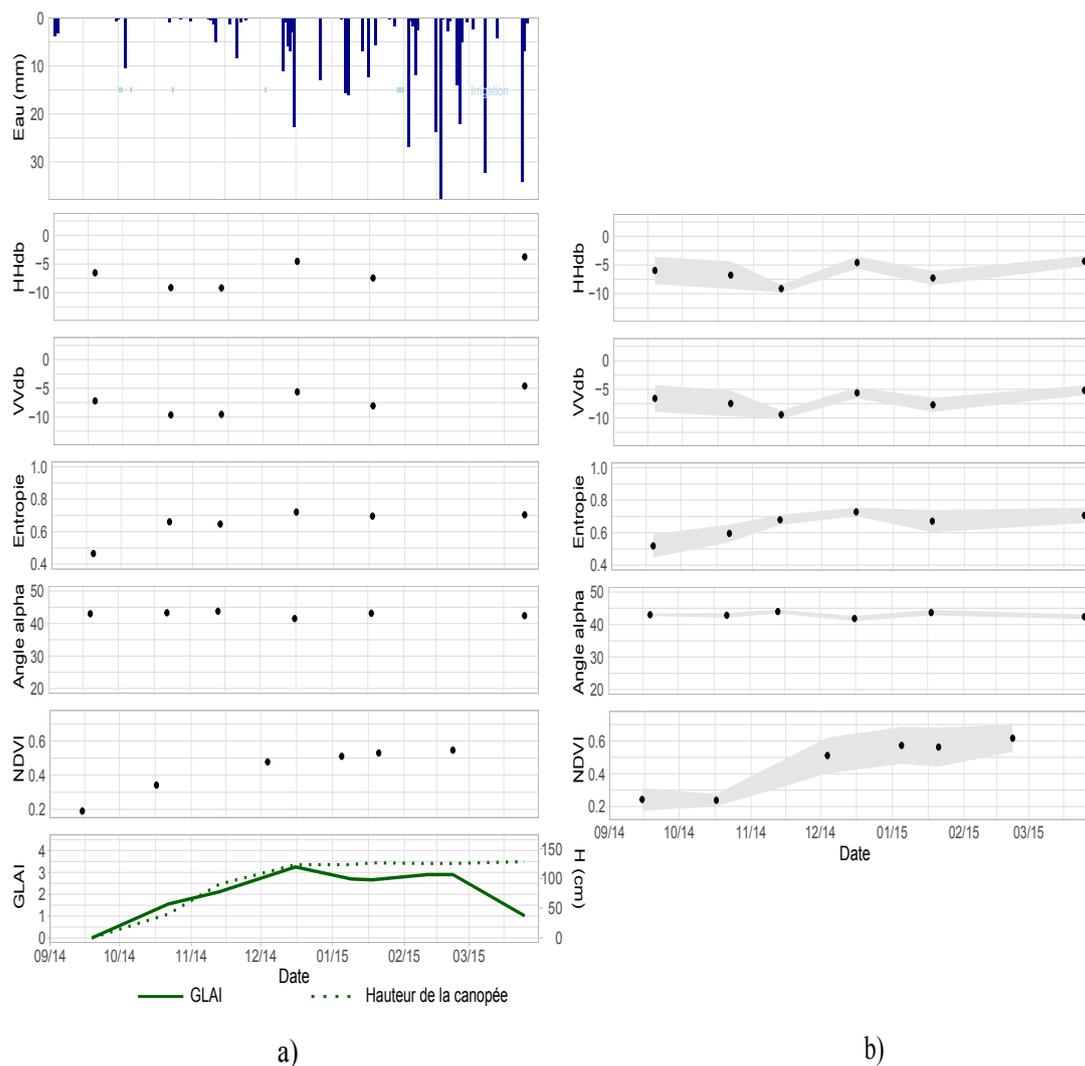


Figure 7.5 – Evolution temporelle des coefficients de rétrodiffusion, de l'entropie, de l'angle alpha et du NDVI : a) pour une parcelle labourée associés aux précipitations, au calendrier d'irrigation et au suivi de la croissance ; b) à l'échelle du site le profil moyen des parcelles labourées et l'écart-type

variable la plus performante pour le suivi de la croissance végétative avec un R^2 égale à 0,9 et une erreur relative de 19%. Les indices de végétation sont également intéressants en particulier le MTVI2 ($R^2 = 0,87$ et $rRMSE = 21\%$). Le SAVI présente des résultats similaires mais le NDVI et la PCD sont moins performants car ils saturent lorsque le GLAI s'approche du maximum de croissance. Enfin, pour les parcelles aux inter-rangs labourés, les indices de végétation sont aussi performants que dans le cas des parcelles désherbées chimiquement avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,85 et des erreurs relatives inférieures à 20% sauf pour la PCD. Dans le cas des variables radar c'est l'entropie qui est la variable corrélée à la croissance ($R^2 = 0,86$ et $rRMSE = 20\%$).

Sur la figure 7.7 les meilleures relations obtenues entre le GLAI et les variables satellitaires sont présentées pour les vignobles aux inter-rangs enherbés. Les corrélations

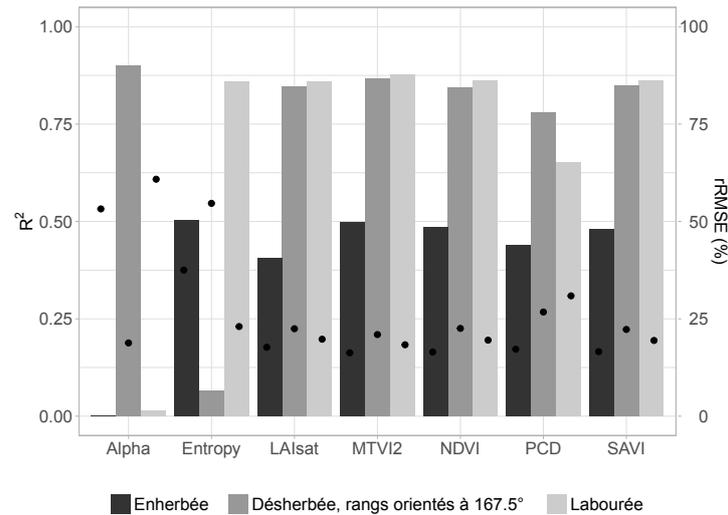


Figure 7.6 – Résumé statistiques des régressions entre les indices de végétation, les paramètres polarimétriques et la variable biophysique GLAI pour les trois catégories de parcelles

sont modérées et on peut remarquer une forte dispersion des points autour des droites de régressions. Cette observation concerne à la fois les variables optiques et l'entropie. Ce résultat suggère qu'un effet de la vigueur de la bande enherbée, qui n'est pas une constante, est présent.

La figure 7.8 présente ensuite les meilleures régressions obtenues entre le GLAI et les variables satellitaires pour les parcelles dés herbées aux rangs orientés à 167,5°. Les deux variables sont très sensibles au GLAI avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,85. Les erreurs sont également plus faibles que dans le cas précédent et peuvent s'expliquer par l'absence de végétation dans l'inter-rang et le nombre plus réduit de points dans le modèle qui diminue les sources de variations.

La figure 7.9 détaille les résultats obtenus pour les parcelles dés herbées par labour. La sensibilité des deux meilleurs paramètres : l'entropie et le MTVI2 est similaire avec des coefficients de détermination respectifs de 0,86 et 0,88. L'erreur relative est plus faible en utilisant le MTVI2 pour suivre la croissance.

Les résultats du suivi de la croissance de la vigne à l'aide de la variable de surface foliaire GLAI ont montré une performance intéressante des différentes variables satellitaires. Dans le cas des vignobles présentant des inter-rangs enherbés, la bande enherbée induit un biais non maîtrisable dans les conditions de l'expérience menée. D'un point de vue global, bien que les coefficients de détermination des régressions effectuées avec les variables radar soient équivalents à ceux obtenus avec les variables optiques, les erreurs quadratiques moyennes sont plus élevées. Ceci suggère que les variables optiques sont plus adaptées pour le suivi de la surface foliaire.

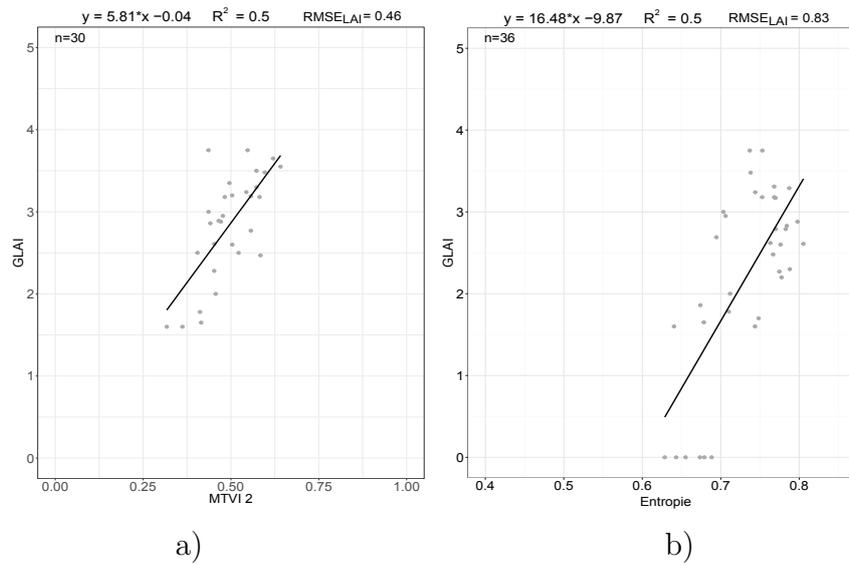


Figure 7.7 – Régressions obtenues pour les parcelles dont les rangs sont enherbés au cours de la saison végétative entre le GLAI et le MTVI2 a) ; GLAI et entropie b)

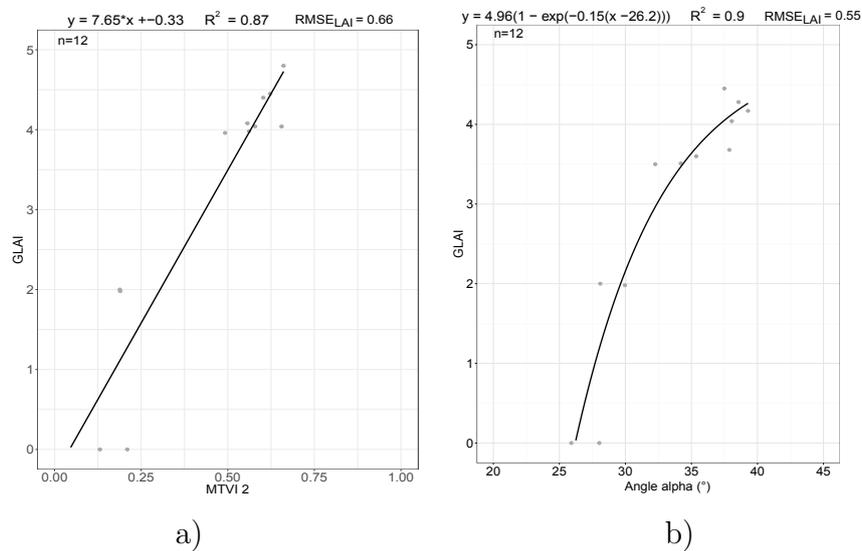


Figure 7.8 – Régressions obtenues pour les parcelles dont les rangs sont désherbés et orientés à $167,5^\circ$ au cours de la saison végétative entre le GLAI et le MTVI2 a) ; GLAI et angle alpha b)

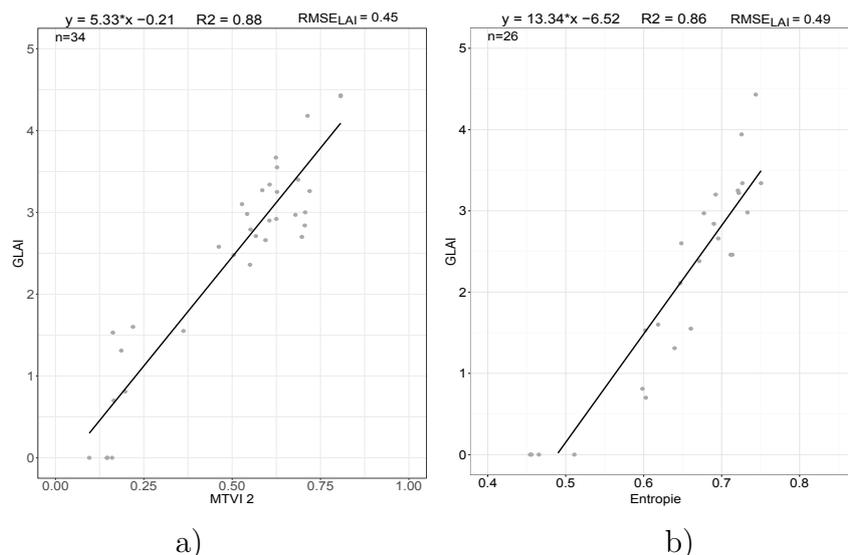


Figure 7.9 – Régressions obtenues pour les parcelles dont les rangs sont désherbés par labour au cours de la saison végétative entre le GLAI et le MTVI2 a) ; GLAI et entropie b)

7.3.2.2 Cas de la hauteur de la canopée

Sur la figure 7.10 les résultats statistiques des régressions réalisées entre les mesures de hauteur de la canopée et les variables satellitaires sont présentées pour les trois catégories de parcelles. Pour les parcelles enherbées, l'entropie est le paramètre le plus sensible à la hauteur de la canopée avec un coefficient de détermination de 0,68. Les indices de végétation sont moins performants avec un coefficient de détermination maximal de 0,35 obtenu avec le MTVI2. Les meilleurs résultats sont obtenus dans le cas des parcelles désherbées présentant les rangs orientés perpendiculairement à la visée du signal radar avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,85 pour tous les paramètres sauf la PCD. Concernant les parcelles dont les inter-rangs sont labourés, les meilleurs résultats sont obtenus avec l'entropie ($R^2 = 0,81$) suivie par le MTVI2 ($R^2 = 0,78$).

Ensuite, afin de détailler les meilleurs résultats obtenus par catégorie d'inter-rangs, la figure 7.11 présente les régressions linéaires obtenues entre la hauteur de la canopée et la MTVI2 ou l'entropie. Dans le cas des indices de végétation, une saturation du MTVI2 est observée lorsque les valeurs de hauteur de la canopée sont supérieures à 170 cm. Cette saturation n'est pas observée lorsque l'entropie est utilisée. Cette variable apparaît donc plus adaptée au suivi de la hauteur dans cette configuration.

La figure 7.12 présente les résultats du suivi de la hauteur de la canopée en utilisant le MTVI2 ou l'angle alpha dans le cas des parcelles dont les rangs sont orientés perpendiculairement à l'axe de visée du signal radar et les inter-rangs désherbés chimiquement. Leurs performances statistiques sont similaires avec des coefficients de détermination de 0,89 et une erreur quadratique moyenne de 22 cm lorsque l'angle alpha est utilisé et 24

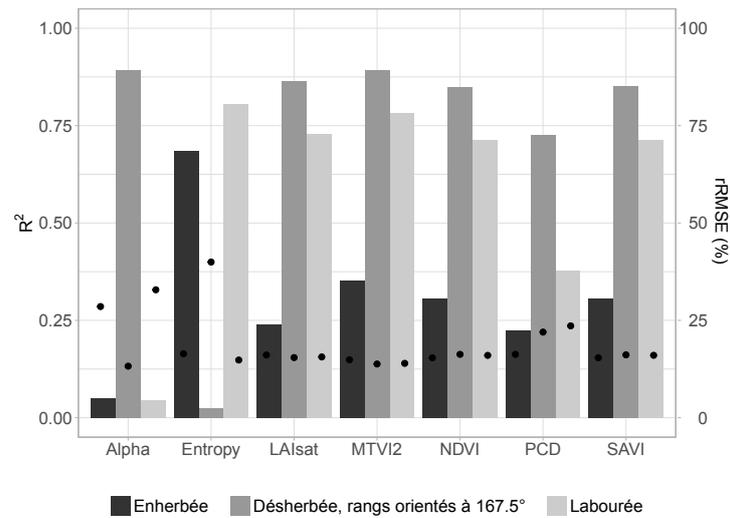


Figure 7.10 – Résumé statistiques des régressions entre les indices de végétation, les paramètres polarimétriques et la variable biophysique de hauteur de la canopée pour les trois catégories de parcelles

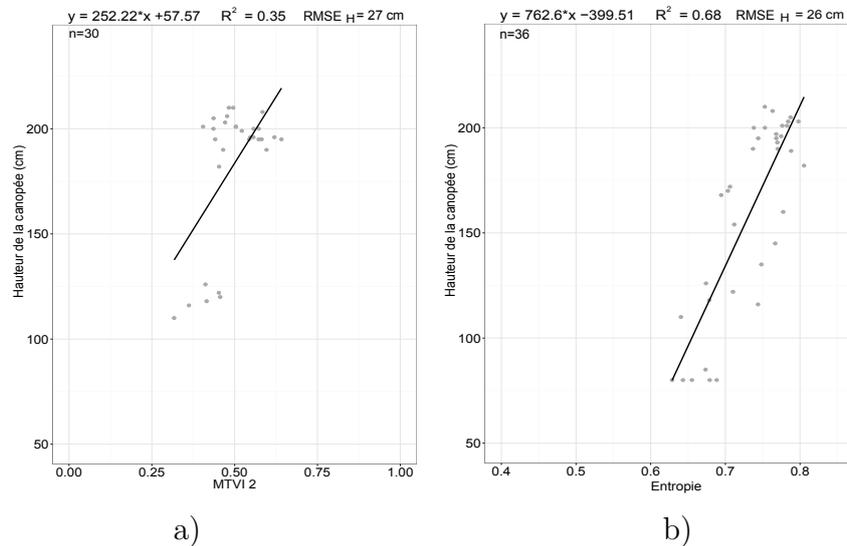


Figure 7.11 – Régressions obtenues pour les parcelles dont les rangs sont enherbés au cours de la saison végétative entre la hauteur de la canopée et le MTVI2 a) ; GLAI et entropie b)

cm avec le MTVI2.

Puis, la figure 7.13 détaille les meilleures régressions obtenues pour les vignobles dont les inter-rangs sont labourés. La sensibilité des deux variables télédéteectées à la hauteur de la canopée sont similaires ($R^2=0,78$ avec le MTVI2 et $R^2 =0,81$ pour l'entropie) ainsi que les erreurs quadratiques moyennes (RMSE= 21 cm pour le MTVI2 et RMSE=20 cm pour l'entropie). Cependant, une saturation est observée avec l'utilisation de l'indice de végétation lorsque les hauteurs de la canopée dépassent 150 cm. Dans ce cas, cet effet n'est pas observé lorsque la variable explicative choisie est l'entropie, ce qui en fait un meilleur choix.

Les résultats du suivi de la croissance de la vigne à l'aide de la variable de hauteur de la canopée ont aussi montré une performance intéressante des différentes variables satellitaires. D'un point de vue global, les indices de végétation présentent une saturation lorsque la hauteur de la canopée dépasse 150 cm. Les variables radar ne présentent pas cette saturation. Ceci suggère que les variables radar sont plus adaptées pour le suivi de la hauteur de la canopée.

7.3.2.3 Pouvoir prédictif des modèles et cartes des variables biophysiques

Enfin, le pouvoir explicatif des meilleurs modèles de régression est analysé et des cartes de croissance sont calculées sur toutes les parcelles des quatre domaines viticoles. Pour le suivi du GLAI, les modèles obtenus avec les variables optiques ont été utilisés. Pour le suivi de la hauteur de la canopée, les modèles impliquant les variables radar ont été conservés. Pour chaque variable biophysique, les modèles des trois catégories d'inter-rangs ont été considérés.

Le tableau 7.2 présente les résultats de la validation croisée avec la méthode "leave-one-out". Les valeurs prédites de chaque échantillon lorsqu'il est retiré sont comparées aux données de validation. Les modèles de régressions des deux types de parcelles désherbées présentent un bon pouvoir prédictif avec des coefficients de détermination autour de 0,8 et des erreurs quadratiques moyennes peu élevées. Dans le cas des parcelles enherbées, les capacités prédictives des modèles sont modérées et les erreurs plus importantes, ce qui est cohérent avec la qualité des modèles calculés pour ce type de parcelles. Les prédictions sur les parcelles enherbées sont à considérer avec prudence.

Enfin, les figures 7.14 et 7.15 présentent les cartes de GLAI et de hauteur de la canopée produites à l'aide des modèles de régressions définis avec le MTVI2 pour le GLAI et avec les variables polarimétriques pour la hauteur de la végétation. Une augmentation des deux paramètres entre les différentes dates est observée, ce qui indique que les différents modèles permettent de retranscrire la croissance végétative. En ce qui concerne la cartographie du GLAI, les indices de confiance des parcelles désherbées chimiquement sont les plus élevés au début de la croissance et diminuent ensuite. Le faible nombre de points qui a servi à calibrer la régression rend la cartographie particulièrement imprécise au début de la

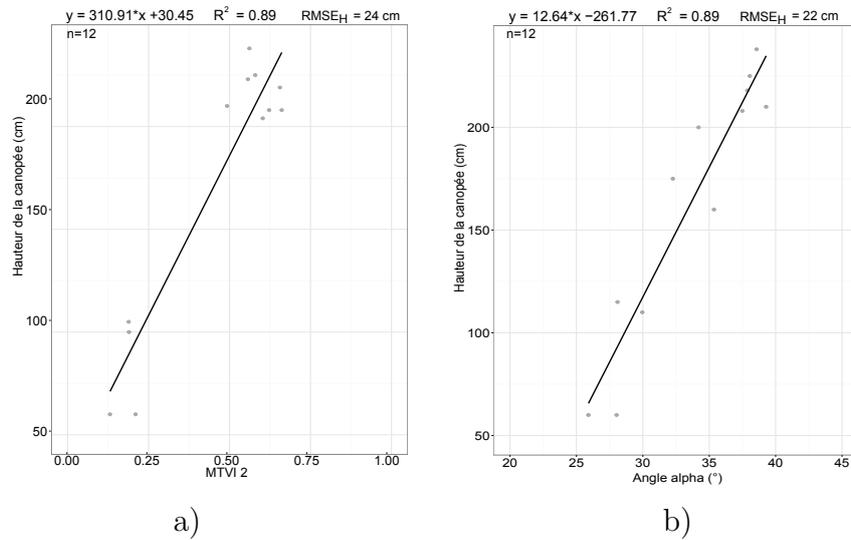


Figure 7.12 – Régressions obtenues pour les parcelles dont les rangs sont désherbés et orientés à $167,5^\circ$ au cours de la saison végétative entre la hauteur de la canopée et le MTVI2 a) ; GLAI et angle alpha b)

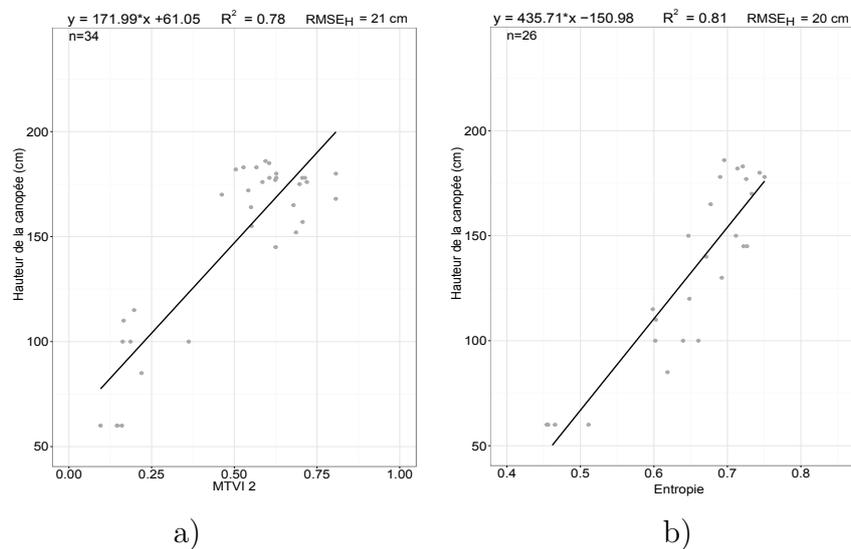


Figure 7.13 – Régressions obtenues pour les parcelles dont les rangs sont désherbés par labour au cours de la saison végétative entre la hauteur de la canopée et le MTVI2 a) ; GLAI et entropie b)

Tableau 7.2 – Résultats de la validation croisée avec la méthode "leave-one-out", les coefficients de détermination et les erreurs quadratiques moyennes correspondent aux résultats de l'ajustement des valeurs prédites aux valeurs de validation

Type de parcelles	Variable de terrain	Variable explicative	Validation croisée "leave-one-out"	
			R ²	RMSE
Enherbées	GLAI	MTVI2	0,43	0,49
Désherbées, orientation 167,5 °	GLAI	MTVI2	0,78	0,84
Labourées	GLAI	MTVI2	0,86	0,48
Enherbées	Hauteur	Entropie	0,65	27,5
Désherbées, orientation 167,5 °	Hauteur	Angle alpha	0,85	25,9
Labourées	Hauteur	Entropie	0,78	20,7

croissance. L'intervalle de confiance correct des parcelles de vigne aux rangs enherbés est à relativiser au regard du potentiel prédictif modéré du modèle.

En ce qui concerne la hauteur de la canopée, les valeurs en octobre des parcelles aux rangs désherbés et orientés perpendiculairement à la visée du signal radar, sont inférieures aux valeurs attendues et l'intervalle de confiance autour de la prévision est grand. On retrouve le même problème du faible nombre de parcelles échantillonnées qui rend difficile la spatialisation en début de cycle végétatif. Pour les parcelles labourées, on retrouve entre janvier et décembre une diminution importante de la hauteur prédite pour certaines parcelles. Ce biais est dû aux modifications de la géométrie de l'inter-rang pour optimiser l'irrigation qui est associée à une diminution de l'entropie. Il a été évoqué précédemment lors de l'analyse des signatures temporelles de ces parcelles.

7.4 Discussion

Ces travaux ont mis en évidence le potentiel des indices de végétation et des paramètres polarimétriques pour le suivi de deux variables biophysiques, le GLAI et la hauteur de la canopée. Le potentiel des indices de végétation pour l'estimation de la surface foliaire et d'autres variables concernant la canopée a déjà été étudié (Johnson *et al.*, 2003, Montero *et al.*, 1999, Dobrowski *et al.*, 2002). Cependant, ces études emploient les plus simples indices de végétation tels que le NDVI et la PCD qui sont les plus couramment utilisés en viticulture de précision (Hall *et al.*, 2002). Les résultats obtenus dans ce chapitre mettent en évidence l'intérêt des indices de végétation plus complexes comme le MTVI2 dont les problèmes de saturation lorsque la canopée est dense sont réduits. Cet indice de végétation

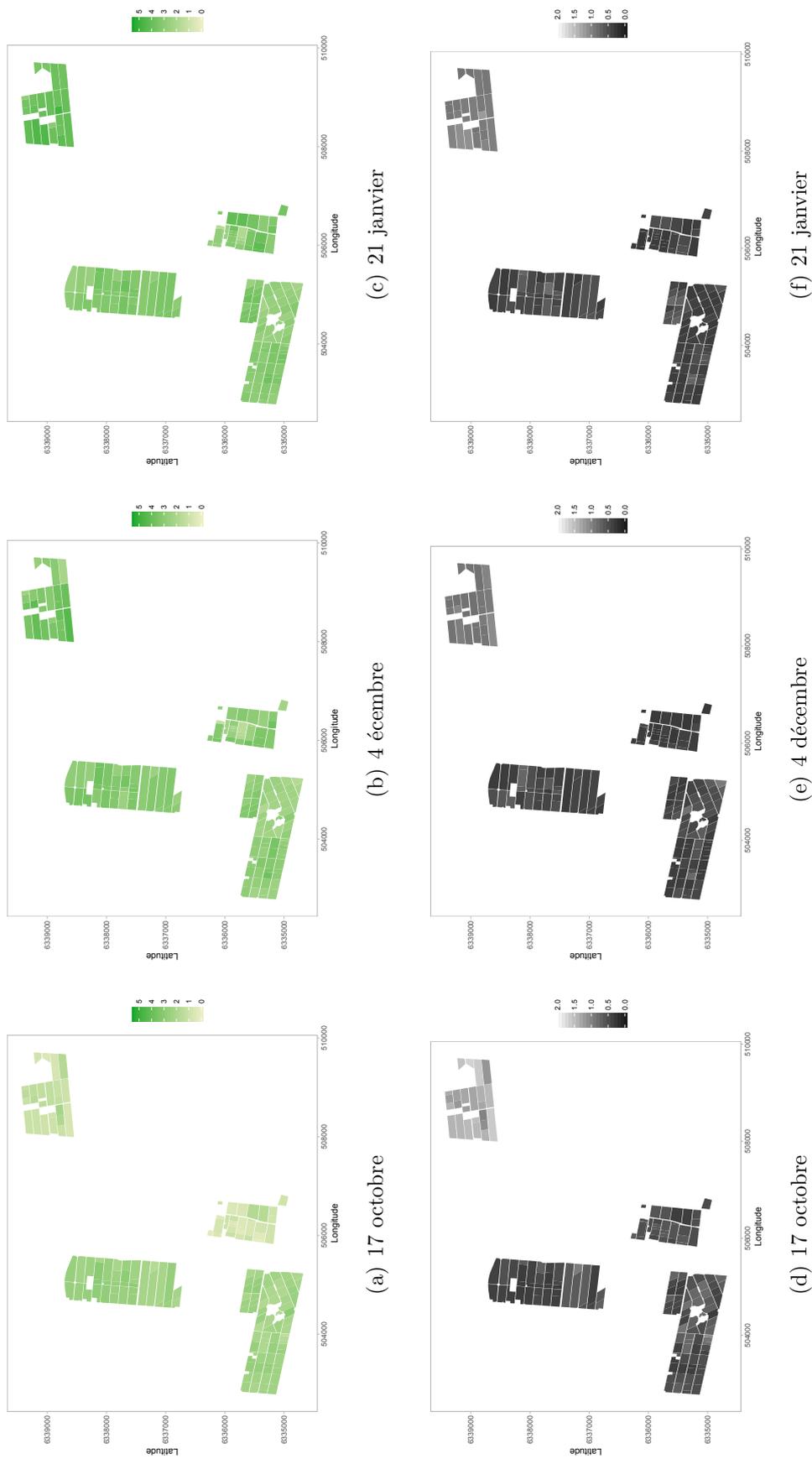


Figure 7.14 – Cartes du GLAI a) à c) et indices de confiance autour de la prédiction associés d) à f)

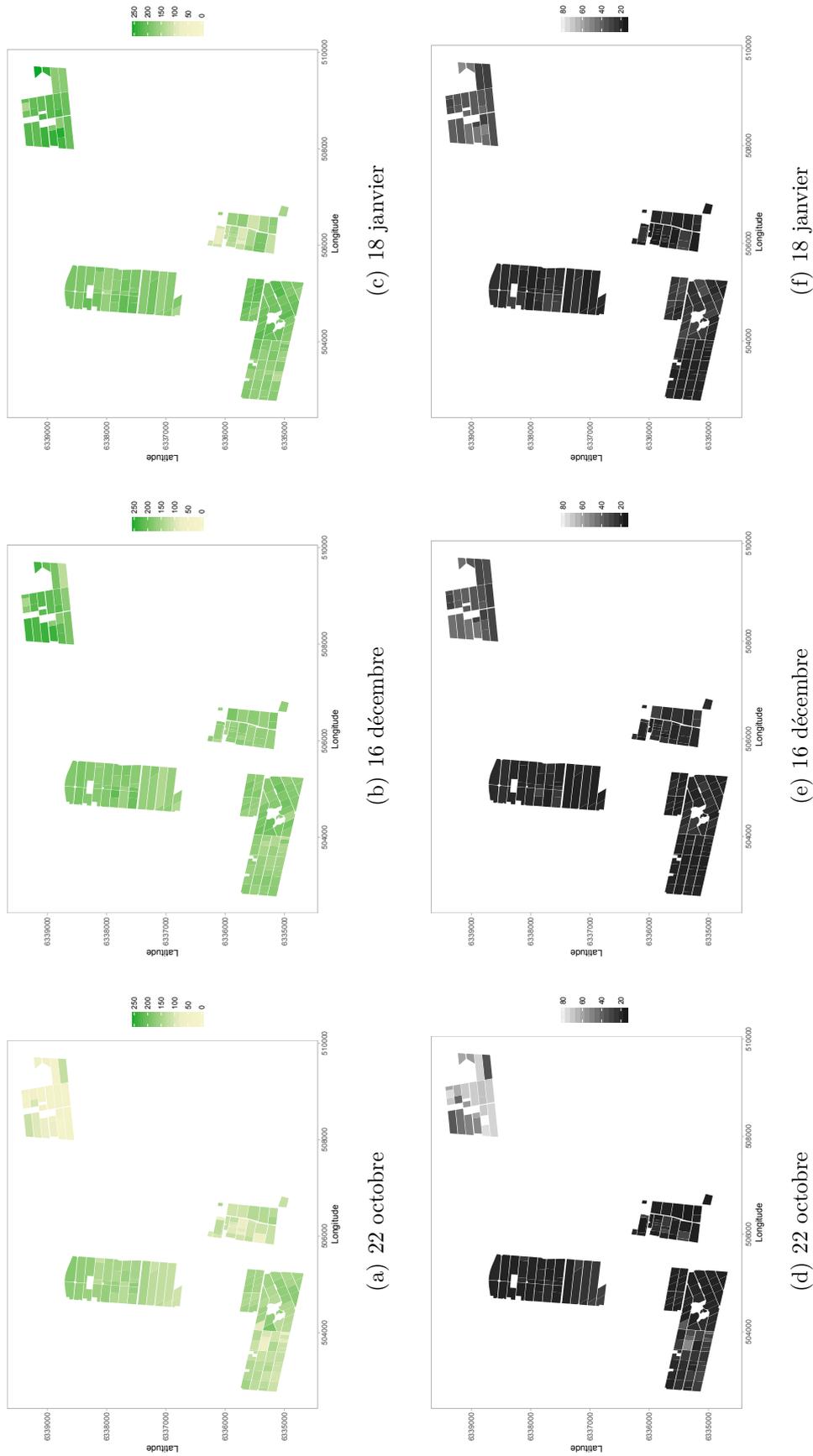


Figure 7.15 – Cartes de la hauteur de la canopée a) à c) et indices de confiance autour de la prédiction associés d) à f)

a déjà montré son potentiel pour le suivi du LAI par mesure non destructive sur plusieurs cultures (Haboudane *et al.*, 2004). La corrélation des paramètres polarimétriques, entropie et angle alpha, aux variables caractérisant la canopée des vignes est également un résultat prometteur. En effet, aucune autre étude impliquant ces variables polarimétriques et le suivi de la croissance végétative n'a été menée. Cependant, l'augmentation de l'entropie liée à l'augmentation de la diffusion volumique avec la croissance végétative a déjà été observée par David Ballester-Berman *et al.* (2012) en bande C avec des images Radarsat-2 sur des vignobles espagnols conduits en gobelet.

Néanmoins, les résultats ont également montré que certaines pratiques culturales influencent de manière non négligeable les signatures temporelles des vignobles ainsi que le potentiel des variables satellitaires pour suivre la croissance végétative. En particulier, l'enherbement de l'inter-rang va ajouter un bruit lié aux caractéristiques de la bande enherbée. Dans le cas des variables radar, l'orientation des rangs perpendiculaire à la visée du signal va également influencer les valeurs des paramètres radar. Le NDVI présente des valeurs supérieures pour les parcelles enherbées et elles augmentent avec la croissance végétative même si la bande enherbée reste dominante dans l'information contenue dans les pixels. L'entropie qui est dans le cas d'une orientation quelconque la variable corrélée à la végétation est également influencée par les bandes enherbées. L'augmentation de l'entropie avec la croissance végétative est en accord avec l'augmentation de la diffusion volumique du signal avec la croissance qui augmente la part d'aléatoire dans les mécanismes de diffusion du signal. En ce qui concerne les signatures des coefficients de rétrodiffusion, leurs valeurs sont supposées être plus élevées lorsque la surface est plus rugueuse (Aubert *et al.*, 2011, Ulaby *et al.*, 1978). Ici, l'influence de l'orientation particulière des parcelles désherbées chimiquement aux inter-rangs lisses semble être prédominante. Cependant, Company *et al.* (1994) n'ont pas observé d'augmentation progressive des coefficients de rétrodiffusion avec l'augmentation de l'angle azimutal en bande X. Ils en ont conclu que l'orientation des rangs n'avait pas d'effet en bande X. Or, dans leur jeu de données, l'orientation perpendiculaire à l'axe de visée du signal n'est pas présente et elle semble être la seule à avoir une influence.

Bien que ces résultats semblent prometteurs plusieurs limites sont à prendre en compte. Les données de validation qui ont été utilisées pour mesurer la surface foliaire devraient être calibrées avec des mesures destructives afin de considérer des vraies mesures de surface foliaire à la place du GLAI. De plus, cette étude ne concerne qu'une seule saison végétative et une validation des résultats sur plusieurs campagnes viticoles serait pertinente. En effet, le cycle de croissance est fortement dépendant des conditions météorologiques (Huglin et Schneider, 1998) et la gestion de l'irrigation dans le cas d'un climat semi-aride. La variabilité intra-annuelle du climat pourrait faire évoluer les modèles ainsi que les valeurs des indices car les calibrations des images dépendent des conditions atmosphériques (Borgogno-Mondino *et al.*, 2017). Aussi, une plus grande résolution temporelle pourrait permettre d'utiliser les modèles afin de déterminer les stades phénologiques du

cycle reproductif grâce au taux de croissance (Cunha *et al.*, 2010b, Fraga *et al.*, 2014). Enfin, le jeu de parcelles étudiées ne couvre pas toutes les pratiques pérennes et pluri-annuelles existantes. Une étude plus large avec une plus grande variabilité de densité de plantation, de système de conduite et de pratiques de gestion des inter-rangs serait utile afin de mieux comprendre le rôle de chacun de ces paramètres dans les signatures des vignobles. Par exemple dans ce chapitre, par manque d'échantillonnage sur les parcelles conduites en pergola, elles n'ont pas été incluses dans l'étude et représentent cependant un mode de conduite répandu dans la région. Enfin, l'utilisation d'autres images radar couvrant les autres bandes C et L pourrait permettre de comparer les résultats à la littérature existante (Schiavon *et al.*, 2007, Baghdadi *et al.*, 2006, David Ballester-Berman *et al.*, 2012, Burini *et al.*, 2006).

7.5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'analyser l'impact de certaines pratiques culturales sur les signatures temporelles des vignobles et le potentiel des variables satellitaires pour le suivi de la croissance végétative sur une zone viticole. Les résultats ont mis en évidence l'impact de la gestion de l'inter-rang sur les signatures des images radar et sur les indices de végétation. De plus, l'orientation des rangs lorsqu'elle est perpendiculaire à la visée du signal radar affecte les coefficients de rétrodiffusion et les variables polarimétriques.

De plus, cette étude a souligné les corrélations entre les indices de végétation, les paramètres polarimétriques et les variables liées à la croissance de la canopée des vignobles. Les indices de végétation sont cependant moins adaptés au suivi de la hauteur de la canopée car une saturation est observée au-delà de 150 cm. Les variables radar sont quant à elles plus performantes pour le suivi de la hauteur que de la surface foliaire. Enfin, l'enherbement de l'inter-rang ajoute un bruit qui diminue de manière importante le potentiel des variables satellitaires pour le suivi des caractéristiques de la canopée des vignobles sans information supplémentaire sur les bandes enherbées. Les résultats ont permis de comprendre l'impact de certains paramètres dont la connaissance est nécessaire pour cartographier les caractéristiques de la canopée des vignes sur un site aux pratiques hétérogènes. Avec la disponibilité des images capteurs satellitaires à haute revisite temporelle tels que les satellites Sentinel 1 et 2, une meilleure connaissance des interactions entre caractéristiques des parcelles et information spectrale pourrait permettre de fournir des produits satellitaires fiables de suivi du cycle végétatif à l'échelle d'une zone de production. Ces applications pourraient contribuer aux analyses régionales des terroirs des appellations et des régions de production.

CHAPITRE 8

Potentiel des images optiques et radar pour la classification des pratiques culturelles des vignobles

Sommaire

8.1	Introduction	136
8.2	Matériels et méthodes	137
8.2.1	Site d'étude et inventaire des pratiques culturelles	137
8.2.2	Images satellitaires	138
8.2.3	Méthodologie	138
8.3	Résultats	142
8.3.1	Cartographie des modes de gestion des inter-rangs et de l'équipement en filets anti-grêle	142
8.3.2	Cartographie des modes d'irrigation	147
8.4	Discussion	150
8.5	Conclusion	154

8.1 Introduction

La viticulture à Mendoza est soumise à plusieurs contraintes climatiques : sécheresse, risque de gel, risque de dommages dus à la grêle. Pour faire face à l'aridité, deux méthodes peuvent être employées pour irriguer les vignobles : l'irrigation gravitaire ou par goutte à goutte. L'irrigation par goutte à goutte comprend l'installation de tuyaux et des goutteurs sous les rangs et ne contraint donc pas à des pratiques culturales particulières des inter-rangs. L'irrigation par méthode gravitaire quant à elle impose la présence de canaux d'irrigation qui sont creusés par labour. Dans le cas d'un risque important de grêle (Mezher *et al.*, 2012), certaines parcelles sont équipées de filets anti-grêle. Ces derniers sont composés d'un maillage en fibres plastiques qui protège la canopée des grêlons. Cependant, toutes les parcelles n'en sont pas équipées, car en plus de leur coût, l'interception des rayons lumineux est modifiée entraînant des conséquences sur l'alimentation hydrique, les rendements et la qualité des raisins (Carbonneau, 1984, Smart, 1985, Reynolds *et al.*, 1996, Rana *et al.*, 2004).

De part sa couverture spatiale, la diversité des capteurs et des résolutions spatiales, la télédétection apparaît être un outil adapté pour la cartographie des pratiques culturales. Différents capteurs ont été évalués pour la cartographie des pratiques de labour en particulier sur sol nu (Zheng *et al.*, 2014). Les images optiques sont couramment utilisées dans les études sur le labour. La caractérisation spectrale des pratiques de labour est basée sur les différences de résidus de cultures laissés (Huggins et Reganold, 2008). L'intérêt des capteurs radar pour la détection du labour a également été mis en évidence. En effet, le labour entraîne des variations dans la rugosité du sol qui influencent les valeurs des coefficients de rétrodiffusion (Brisco *et al.*, 1991, McNairn *et al.*, 1996). La sensibilité du signal radar aux différences de rugosité est plus élevée pour des angles d'incidences élevés (Baghdadi *et al.*, 2002, 2008). Des travaux récents ont couplé les images optiques et radar pour la détection du labour (Vaudour *et al.*, 2014a, Hadria *et al.*, 2009). Pour ce type de détection, les résultats les plus performants sont obtenus avec des algorithmes basés sur des arbres de décision (Hadria *et al.*, 2009, Watts *et al.*, 2009, 2011) et des SVM (Séparateurs à Vastes Marges) (Vaudour *et al.*, 2015, Samui *et al.*, 2012). Cependant, dans le cas de l'irrigation gravitaire de la vigne, le labour est présent à intervalle régulier entre les rangs où la canopée des vignes est présente. Cette configuration est différente de la détection du labour sur sol nul. Concernant la détection des filets anti-grêle, il y a peu de littérature spécifique sur le sujet en télédétection. Cependant, quelques travaux se sont penchés sur la détection du plastique dans les paysages agricoles (Picuno *et al.*, 2011, Tarantino et Figorito, 2012) qui comprennent la détection de filets.

Les chapitres précédents ont également montré qu'à l'échelle d'un paysage viticole, d'autres pratiques culturales telles que l'enherbement de l'inter-rang et l'orientation des rangs impactaient les caractéristiques spectrales des vignobles sur les images satellitaires optiques et radar. Dans les travaux du chapitre précédent (Chapitre 7), les filets anti-grêle

n'ont pas été identifiés comme une source de variation des signatures temporelles des vignobles en considérant les indices de végétation et les variables radars. La détection des filets anti-grêle n'apparaît donc pas intuitive. De plus, la cartographie des modes d'irrigation est-elle uniquement identifiable lorsqu'une irrigation est en cours ? Les différences de rugosité des inter-rangs liées à la pratique du labour pour l'irrigation sont-elles suffisantes pour une cartographie précise du mode d'irrigation ?

L'objectif de ce chapitre est donc d'évaluer le potentiel et la complémentarité des séries d'images optiques et radar disponibles sur la campagne 2014-2015 pour la cartographie des pratiques pluri-annuelles. Ces cartographies vont permettre d'estimer les surfaces protégées en filets anti-grêle et la proportion des différents modes d'irrigation sur la zone d'étude. L'algorithme de classification Random Forest (Breiman, 2001) a été retenu pour l'analyse. Son adaptation aux traitements de jeux de données comprenant un grand nombre de variables ainsi que les métriques permettant d'identifier l'importance des variables et la confiance dans la prédiction ont orienté le choix. La première partie du chapitre s'attache à la détection de la présence des filets anti-grêle sur les parcelles. Ensuite, les images optiques et radar sont évaluées pour la détection des modes d'irrigation. Afin d'évaluer la complémentarité des images et le nombre d'images nécessaires à l'obtention d'une classification performante, toutes les combinaisons d'images ont été testées et évaluées. Les classifications retenues sont également généralisées à l'ensemble de la zone d'étude.

8.2 Matériels et méthodes

8.2.1 Site d'étude et inventaire des pratiques culturales

Ce chapitre porte sur le site d'Agrelo, principalement sur les parcelles des 4 domaines viticoles partenaires. Les parcellaires des quatre domaines viticoles sont détaillés dans la section 3.5.1.1. Un inventaire des pratiques culturales sur chacune des parcelles a été réalisé (Section 3.5.2). Les pratiques concernant la gestion des inter-rangs, l'équipement en filet anti-grêle et le mode d'irrigation choisi ont été retenues pour l'analyse. Les différences des pratiques de gestion des inter-rangs ont été détaillées dans le chapitre 7. Sur le site d'étude, deux types de filets anti-grêle sont utilisés (Figure 8.1). Les deux types de filets sont de couleur noire, seule leur forme est différente. La différenciation des deux types de filets anti-grêle n'est pas évoquée dans ce chapitre.

Pour la généralisation de la classification, le parcellaire de la zone d'étude présenté dans la section 3.5.1.2 a été utilisé. Comme la fauchée de TerraSAR-X ne couvre pas exactement toute la zone d'étude, les parcelles hors de la fauchée ne sont pas prises en compte dans ce chapitre car les données optiques et radar sont utilisées.



Figure 8.1 – Types de filets anti-grêle employés sur le site d'étude

8.2.2 Images satellitaires

Les trois séries d'images satellitaires acquises en 2014-2015 ont été utilisées. Les caractéristiques des séries d'images optiques sont présentées dans la section 3.4.1. La série d'images TerraSAR-X est présentée dans la section 3.4.2.

8.2.3 Méthodologie

Le schéma méthodologique des traitements effectués dans ce chapitre est présenté dans la figure 8.2. Cette méthode a été appliquée afin de réaliser deux classifications complémentaires. Une première classification des pratiques culturales liées à la gestion des inter-rangs et à la protection anti-grêle a été réalisée. La seconde classification concerne la détection du mode d'irrigation. Pour la première classification, les classes des pratiques de gestion des inter-rangs et les équipements en filets anti-grêle ont été considérées ensemble. En effet, Castellano *et al.* (2008) ont entre autre mesuré la transmissivité des filets utilisés en agriculture en fonction de leur couleur. Les filets noirs et verts correspondant aux couleurs des filets utilisés sur le site présentent une transmissivité constante dans le spectre du visible d'environ 0,5. L'intensité lumineuse incidente sur la canopée sera réduite ainsi que l'intensité réfléchi. Afin d'éviter des confusions sur les détections des filets anti-grêle liées au biais ajouté concernant les différences de réflectance/rétrodiffusion dues aux pratiques des inter-rangs, ces deux types de pratiques culturales ont été combinées.

Le jeu de données comprend 17 images satellitaires. Ces images ont été acquises tout au long du cycle de croissance des vignobles. Ceci peut permettre d'évaluer le moment où les pratiques de gestion des inter-rangs et l'équipement en filets anti-grêle sont les plus détectables. De plus, à chaque date d'acquisition, certaines parcelles vont être en cours d'irrigation.

Un des objectifs de ce travail est d'évaluer quelle(s) combinaison(s) d'images sont les plus pertinentes pour discriminer dans un premier temps les pratiques de gestion de l'inter-rang associées à l'équipement en filets anti-grêle des parcelles. Dans un second temps le

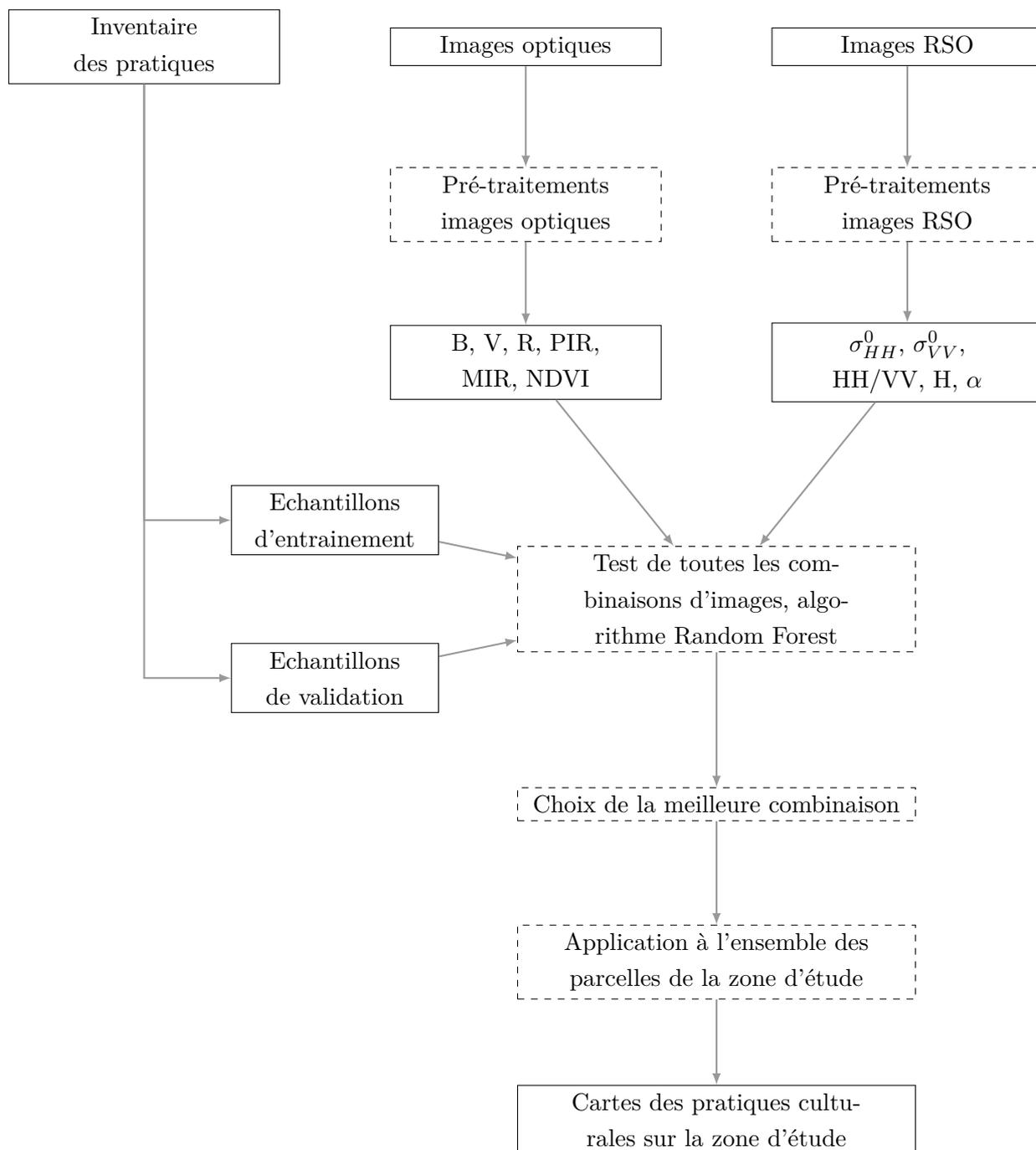


Figure 8.2 – Diagramme méthodologique de la classification des pratiques culturales

mode d'irrigation choisi est cartographié. Ainsi toutes les combinaisons des 17 images ont été testées pour les deux classifications. Afin de s'affranchir des différences de résolution spatiale entre les capteurs, l'analyse a été effectuée à l'échelle parcellaire en considérant la valeur moyenne de chaque variable par parcelle.

8.2.3.1 Pré-traitements des images optiques

Les calibrations radiométriques, atmosphériques et géométriques concernant les images optiques sont détaillées dans la section 3.4.1.1. Après les calibrations, les réflectances des différents canaux du visible et du moyen infra-rouge pour Landsat-8 ont été utilisées ainsi qu'un indice de végétation le NDVI. Les différents indices de végétation sont très corrélés entre eux (cf Chapitre 7) et contiennent une grande part de redondance de l'information. C'est pourquoi seul le NDVI, qui est l'indice de végétation le plus couramment utilisé, a été retenu dans ce chapitre.

8.2.3.2 Pré-traitements des images radar

Les pré-traitements effectués sur les images TerraSAR-X sont présentés dans la section 3.4.2.1. Les coefficients de rétrodiffusion, le ratio HH/VV et les paramètres polarimétriques (angle alpha et entropie) ont été utilisés.

8.2.3.3 Choix du jeu d'entraînement

Ensuite, avant de réaliser la classification, le jeu de données a été séparé en un jeu de données d'entraînement comprenant 1/3 des parcelles et un jeu de données de validation comprenant les 2/3 tiers restants. Le choix de l'échantillon peut avoir un impact sur le résultat de la classification. Ainsi, dix échantillons équilibrés d'entraînement ont été tirés aléatoirement et les échantillons de validation associés ont été déterminés. Leurs performances de classification sur les différentes images considérées séparément ont été comparées. En effet, les temps de calculs sur toutes les combinaisons possibles d'images étant longs, seules les performances sur les combinaisons d'une image ont été comparées. L'indice de kappa moyen des classifications de chaque image a été calculé et l'écart au kappa moyen calculé pour chaque échantillon en suivant la formule de l'écart quadratique moyen. L'échantillon le plus proche du kappa moyen de chaque image a été retenu pour chaque classification afin d'entraîner les classifications sur un échantillon aux performances moyennes.

8.2.3.4 Classification des pratiques culturales

Ensuite, les classifications ont été effectuées sur les jeux de données d'entraînement. Afin de pouvoir évaluer la meilleure combinaison d'images et la complémentarité éventuelle des capteurs optiques et radar, les classifications ont été testées sur toutes les combinaisons possibles de 1 à 17 images.

L'algorithme de classification Random Forest a été utilisé (Breiman, 2001). Cette méthode de classification est adaptée au traitements de grands jeux de données. De plus, elle peut gérer un grand nombre de variables en entrée et évalue l'importance de chacune dans la classification. Deux métriques sont utilisées pour illustrer l'importance des variables : la diminution moyenne de la précision et la diminution moyenne de l'impureté (appelée respectivement importance des variables et indice de Gini). La première est calculée en permutant les OOB ("out of bag errors"). Pour chaque arbre, les OOB sont calculés puis recalculés en permutant chaque variable utilisée dans la classification. Les différences des proportions de mauvaise classification sont moyennées sur tous les arbres puis normalisées. Plus la diminution de la précision est importante lorsqu'une variable est permutée, plus elle est importante dans la classification. La deuxième variable d'importance mesure, sur tous les arbres, la diminution moyenne de l'impureté des noeuds lorsque cette variable est utilisée pour la séparation.

Cet algorithme est particulièrement intéressant pour appliquer une généralisation de la classification aux parcelles hors du site d'étude. En effet, une proportion des votes pour chaque classe est renvoyée et permet de donner un indicateur de confiance sur la classe attribuée via sa probabilité.

L'algorithme a été utilisé pour chaque combinaison d'images, testé avec le jeu d'entraînement choisi et validé avec le même jeu de validation pour pouvoir comparer leurs performances. Le nombre de variables à chaque noeud a été calibré pour chaque combinaison. Le nombre maximal d'arbres a été fixé à 500. De plus, pour chaque combinaison testée, l'indice de kappa a été calculé afin d'évaluer la performance de la classification (Congalton, 1991). Cet indice est calculé à partir de la matrice de confusion et il est sensible aux erreurs de commission et d'omission :

$$K = \frac{P_o - P_m}{1 - P_m} \quad (8.1)$$

où P_o est la proportion correcte observée et P_m la proportion marginale attendue due au hasard.

Puis les performances de chaque combinaison ont été comparées afin de déterminer la meilleure combinaison d'images.

Une fois que la meilleure combinaison a été déterminée, la complémentarité des images qui la compose (dans le cas où la combinaison contient au moins deux images) a été testée. Pour cela, les matrices de confusion de chaque image considérée séparément ont été comparées.

8.2.3.5 Application aux parcelles extérieures au site principal

Enfin la dernière étape a consisté à appliquer l'algorithme avec les paramètres et la combinaison choisie sur l'ensemble des parcelles de la zone d'étude. Deux cartes des pratiques culturales ont été produites. Chacune des deux cartes est associée à la carte de probabilité de la classe. Cette carte a été calculée en fonction de la proportion des votes

pour la classe déterminée. Plus elle est proche de 1 et plus les votes pour cette classe étaient nombreux. La carte des probabilités des classes peut donc être utilisée comme un indicateur de confiance de la classe déterminée. Ceci est particulièrement adapté dans ce cas où à l'échelle de la zone d'étude, des échantillons de validation supplémentaires ne sont pas disponibles.

8.3 Résultats

8.3.1 Cartographie des modes de gestion des inter-rangs et de l'équipement en filets anti-grêle

8.3.1.1 Choix du jeu d'entraînement

La figure 8.3 présente les résultats des classifications réalisées à partir des 10 jeux d'échantillons équilibrés définis aléatoirement. Le jeu d'échantillons numéro 6 parmi les 10 testés présente les performances les plus proches du kappa moyen de chaque image.

ID échantillon	Ecart quadratique au kappa moyen
6	0,035
5	0,36
7	0,042
10	0,046
2	0,048
3	0,049
8	0,050
9	0,052
4	0,068
1	0,068

(a)



(b)

Figure 8.3 – Performances des 10 échantillons d'entraînement (et validation) testés sur les images considérées une à une ; a) Ecart quadratique moyen au kappa moyen de chaque image par échantillon testé, b) Localisation des parcelles d'entraînement retenues

8.3.1.2 Choix de la meilleure combinaison et évaluation de la classification des pratiques culturales des inter-rangs et de l'équipement en filets anti-grêle

Ensuite, la classification combinée du mode de gestion de l'inter-rang et des filets anti-grêle a été testée avec toutes les combinaisons possibles des 17 images. La figure 8.4 détaille les performances des classifications par nombre d'images utilisées en entrée de la

classification sous la forme de boîtes à moustaches. La variabilité des kappas par nombre d'images utilisées dans la classification décroît fortement entre 1 et 7 images utilisées. Le kappa des 17 images réunies pour la classification est de 0,93. Lorsque 3 images sont utilisées, quatre combinaisons permettent d'obtenir un kappa supérieur ou égal à 0,93.

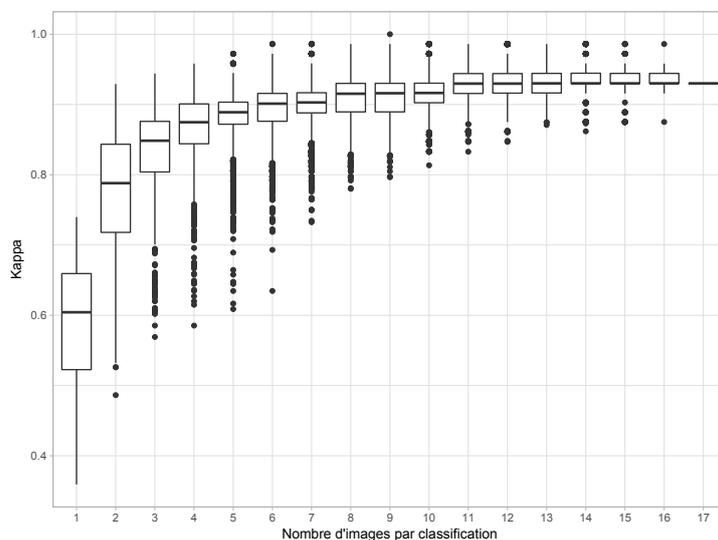


Figure 8.4 – Valeurs de kappa obtenues en utilisant différentes combinaisons d'images présentées en fonction du nombre impliquées dans la classification

La figure 8.5 présente la fréquence d'utilisation des images retrouvées dans ces quatre combinaisons. Ces dernières présentent des valeurs de kappa comprises entre 0,93 et 0,94. Hormis l'image Landsat-8 acquise le 15 septembre 2014, toutes les images retenues dans les combinaisons de 3 images performantes ont été acquises entre décembre et la fin des acquisitions. Ce résultat suggère que les pratiques culturales concernant à la fois la canopée et les inter-rangs sont mieux discriminées lorsque la croissance végétative est proche de son niveau maximal. La sélection de l'image Landsat-8 acquise le 15 septembre 2014 dans une des quatre combinaisons est probablement lié à son potentiel pour discriminer les parcelles aux inter-rangs enherbés car à cette période de l'année, le cycle de croissance n'a pas commencé mais les bandes enherbées sont présentes et pour la plupart pas encore tondues comme il a été vu dans le chapitre 7.

La combinaison la plus performante a ensuite été sélectionnée. Elle est composée des images suivantes : TerraSAR-X du 18 janvier 2015, Pléiades du 9 janvier 2015, et Pléiades du 25 janvier 2015. L'importance des variables est illustrée dans la figure 8.6. Les coefficients de rétrodiffusion de l'image TerraSAR-X sont les deux variables les plus importantes suivies des bandes du proche infra-rouge des images Pléiades. Les variables les plus importantes pour la classification d'un point de vue statistique sont issues des trois images utilisées. Ceci indique également que les trois images choisies ont un niveau d'importance relativement similaire.

Les résultats de la validation de la classification sont présentés avec la matrice de

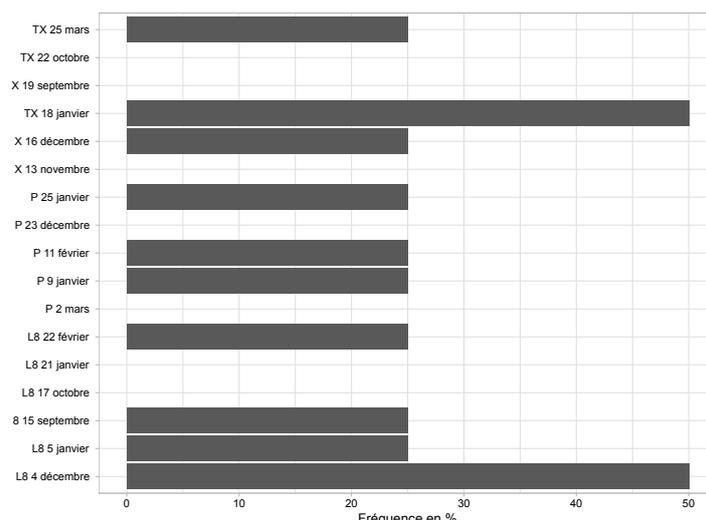


Figure 8.5 – Fréquence d’utilisation des différentes images dans les quatre combinaisons à trois images dont le kappa est supérieur ou égal à 0,93

confusion (Tableau 8.1). Avec un kappa de 0,94, cette classification est très performante. L’analyse de la matrice de confusion montre que les pratiques culturales des inter-rangs sont correctement prédites. Les confusions concernent l’équipement en filet anti-grêle des parcelles enherbées. Les parcelles labourées échantillonnées sur le site ne présentant pas de filets anti-grêle, cette classe n’est donc pas disponible dans la classification.

Tableau 8.1 – Matrice de confusion issue de la classification réalisée à partir des 3 images : TerraSAR-X 18 janvier, Pléiades 9 janvier et Pléiades 25 janvier

		Référence					Erreurs d’omission
		D-A	D-S	E-A	E-S	L	
Prédiction	D-A	9	1	0	0	0	0,1
	D-S	0	6	0	0	0	0
	E-A	0	0	49	2	0	0,04
	E-S	0	0	1	17	0	0,06
	L	0	0	0	0	19	0
Erreurs de commission		0	0,14	0,02	0,11	0	Kappa = 0,94

D-A : désherbée chimiquement avec filets anti-grêle

D-S : désherbée chimiquement sans filets anti-grêle

E-A : enherbée avec filets anti-grêle

E-S : enherbée sans filets anti-grêle

L : labourée

Afin d’analyser la complémentarité des trois images et leurs sources de confusion individuelles, la classification a été réalisée pour chacune des trois images considérées séparément. Le tableau 8.2 détaille les performances de l’image TerraSAR-X du 18 janvier

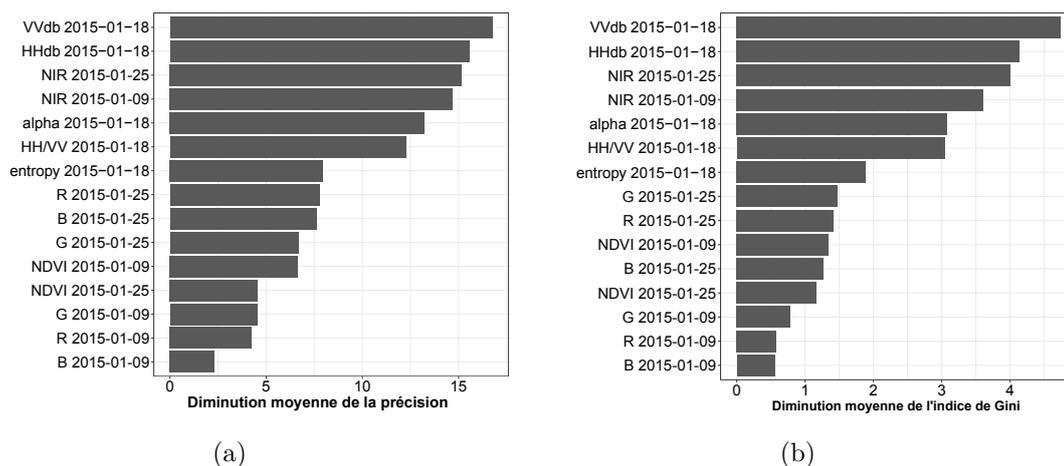


Figure 8.6 – Importance des variables dans la classification : a) Diminution moyenne de la précision, b) Diminution moyenne de l'indice de Gini

2015 lorsqu'elle est utilisée seule pour la classification. La matrice de confusion révèle qu'en utilisant seule l'image TerraSAR-X dans la classification, les modes de gestion des inter-rangs sont correctement classés. Par contre, les confusions sur l'équipement des parcelles en filets anti-grêle sont nombreuses. On peut donc en déduire que les coefficients de rétrodiffusion, qui sont les deux variables les plus importantes de la classification lorsque les 3 images sont utilisées, servent principalement à détecter les types d'inter-rangs. En effet l'analyse des signatures temporelles des vignes présentée dans le chapitre 7 a mis en évidence les différences d'intervalles de valeurs des coefficients de rétrodiffusion pour ces trois classes.

Le tableau 8.3 représente la matrice de confusion de la classification issue de l'image Pléiades du 9 janvier 2015. Des trois images, c'est celle qui conduit au kappa le plus faible. De nombreuses confusions sont retrouvées dans toutes les classes. Son utilisation seule ne permet pas de discriminer correctement une seule des classes étudiées.

Le tableau 8.4 présente la matrice de confusion issue de la classification de l'image Pléiades du 25 janvier. Dans ce cas aussi de nombreuses confusions sont présentes pour toutes les classes bien que les erreurs soient en proportion plus faibles. Ainsi, la classification en utilisant cette image aboutit à un kappa modéré de 0,58.

L'analyse des quatre matrices de confusion montre bien que c'est l'utilisation des trois images conjointes qui permet d'atteindre ces performances de classification. L'image TerraSAR-X du 18 janvier est déterminante car elle permet de discriminer les pratiques culturales des inter-rangs. Les deux images optiques quant à elles permettent de dissocier les parcelles qui sont équipées de filets anti-grêle de celles qui ne le sont pas. Comme la variable majoritaire pour cette discrimination est le proche infra-rouge, il est possible d'en déduire que la présence des filets anti-grêle va influencer en proportion la réflectance dans ce canal.

Tableau 8.2 – Matrice de confusion issue de la classification réalisée à partir de l’image TerraSAR-X du 18 janvier

		Référence					Erreurs d’omission
		D-A	D-S	E-A	E-S	L	
Prédiction	D-A	8	4	0	0	0	0,33
	D-S	1	3	0	0	0	0,25
	E-A	0	0	37	12	0	0,24
	E-S	0	0	13	7	0	0,65
	L	0	0	0	0	19	0
Erreurs de commission		0,11	0,57	0,26	0,63	0	Kappa = 0,58

Tableau 8.3 – Matrice de confusion issue de la classification réalisée à partir de l’image Pléiades du 9 janvier

		Référence					Erreurs d’omission
		D-A	D-S	E-A	E-S	L	
Prédiction	D-A	4	0	1	0	0	0,2
	D-S	0	1	1	0	2	0,75
	E-A	5	3	39	4	3	0,28
	E-S	0	0	2	11	7	0,45
	L	0	3	7	4	7	0,67
Erreurs de commission		0,56	0,86	0,22	0,42	0,63	Kappa = 0,4

Tableau 8.4 – Matrice de confusion issue de la classification réalisée à partir de l’image Pléiades du 25 janvier

		Référence					Erreurs d’omission
		D-A	D-S	E-A	E-S	L	
Prédiction	D-A	6	0	1	0	0	0,14
	D-S	0	3	0	4	2	0,67
	E-A	3	0	46	4	2	0,16
	E-S	0	2	3	5	2	0,58
	L	0	2	0	6	13	0,38
Erreurs de commission		0,33	0,57	0,08	0,74	0,32	Kappa = 0,54

D-A : désherbée chimiquement avec filets anti-grêle

D-S : désherbée chimiquement sans filets anti-grêle

E-A : enherbée avec filets anti-grêle

E-A : enherbée sans filets anti-grêle

L : labourée

8.3.1.3 Pratiques culturales à l'échelle de la zone d'étude

La figure 8.7 détaille les résultats de la cartographie des pratiques culturales lorsqu'elle est appliquée à toute la zone d'étude. Les parcelles classées comme labourées sont prédominantes et représentent un total de 975 ha sur le site. De plus, cette carte permet également d'estimer les superficies protégées par des filets anti-grêle qui s'élèvent à 750 ha sur le site soit 39% de la surface totale des vignes conduites en rangs.

En ce qui concerne les probabilités des classes, elles sont beaucoup plus élevées pour les parcelles des quatre domaines ayant servi à l'entraînement et à la validation de la classification. Or, les relevés des pratiques culturales sur le site d'étude ne couvrent pas toute la diversité de leurs possibles associations, d'où une plus haute incertitude sur des parcelles où d'autres combinaisons de pratiques culturales peuvent être présentes.

8.3.2 Cartographie des modes d'irrigation

8.3.2.1 Choix du jeu d'entraînement

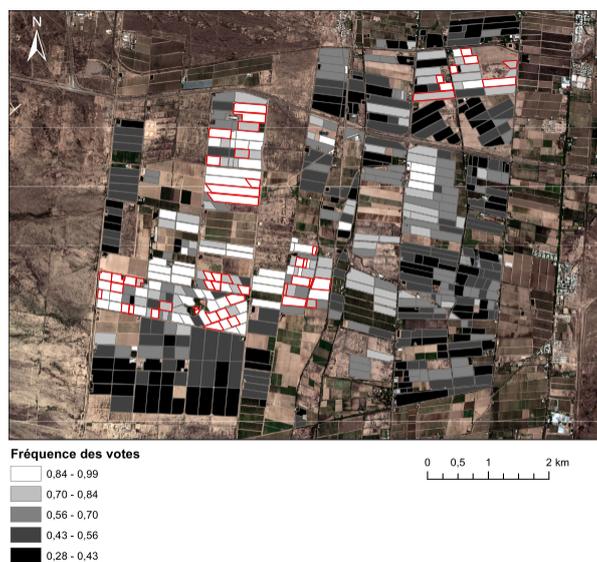
Les performances des dix échantillons testés pour la classification des modes d'irrigation ainsi que leur écart au kappa moyen de chaque image est présenté dans la figure 8.8. Le jeu d'échantillon numéro 7 est le plus proche du kappa moyen pour la plupart des images et a été retenu pour l'analyse. De plus, les images TerraSAR-X semblent être très performantes pour la classification. Elles présentent des valeurs de kappa entre 0,9 et 1 pour la plupart des échantillons testés.

8.3.2.2 Choix de la meilleure combinaison et évaluation de la classification des modes d'irrigation

Afin de déterminer le nombre d'images minimum pour obtenir une classification satisfaisante, les performances des différentes combinaisons d'images sont présentées dans la figure 8.9. Dès l'utilisation d'une image, celle de TerraSAR-X du 18 janvier, les performances de la classification sont maximales. Les autres images TerraSAR-X permettent également une bonne séparation des classes avec des kappa compris entre 0,90 (image du 22 octobre) et 0,97 (images du 19 septembre et du 25 mars). Ceci indique que toutes les images TerraSAR-X sont performantes pour la classification des modes d'irrigation. L'image TerraSAR-X acquise le 18 janvier 2015 a été retenue pour la suite de l'analyse. La classification ne contenant pas d'erreurs, la réalisation de la matrice de confusion n'est pas nécessaire dans ce cas. L'analyse de l'importance des variables montre que quatre des cinq variables sont déterminantes pour la classification (Figure 8.10) : les coefficients de rétrodiffusion dans les canaux HH et VV, l'angle alpha et le ratio HH/VV.



(a) Cartes des pratiques culturales



(b) Cartes des probabilités des classes

Figure 8.7 – Cartes des pratiques culturales à l'échelle de la zone d'étude et probabilités des classes associées. Sont entourées en rouge les parcelles du jeu d'entraînement

ID échantillon	Ecart quadratique au kappa moyen
7	0,061
10	0,074
6	0,079
8	0,080
2	0,085
3	0,085
5	0,089
1	0,089
9	0,101
4	0,145



(a)

(b)

Figure 8.8 – Performances des 10 échantillons d’entraînement (et validation) testés sur les images considérées une à une ; a) Ecart quadratique moyen au kappa moyen de chaque image par échantillon testé, b) Localisation des parcelles d’entraînement retenues

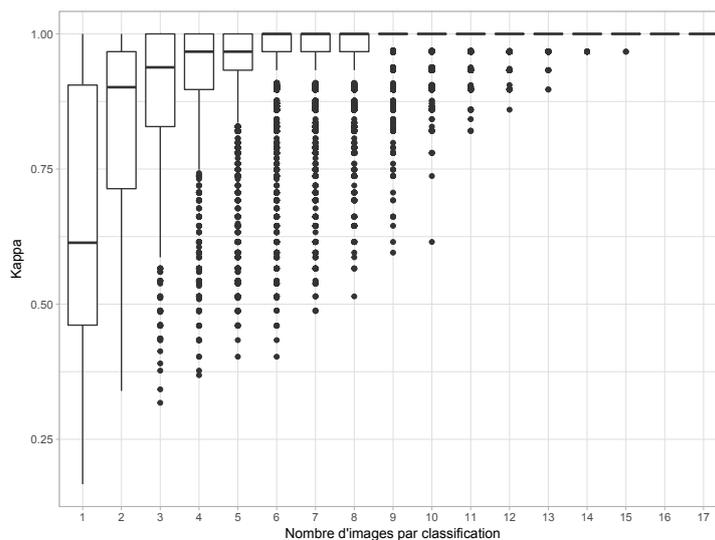


Figure 8.9 – Valeurs de kappa obtenues en utilisant différentes combinaisons d’images présentées en fonction du nombre d’images impliquées dans la classification

8.3.2.3 Modes d’irrigation à l’échelle de la zone d’étude

Ensuite, l’algorithme a été appliqué sur toutes les parcelles de la zone d’étude. La figure 8.11 présente la carte des modes d’irrigation ainsi que la fréquence des votes de la classe retenue pour chaque parcelle. Sur la zone d’étude, ont été classés 1028 ha de vignes comme irrigués en méthode gravitaire et 898 ha avec un système de goutte à goutte. Une forte variabilité des probabilités des classes est observée variant de 0,5 à 1. Les parcelles appartenant aux domaines viticoles échantillonnés présentent globalement des probabilités

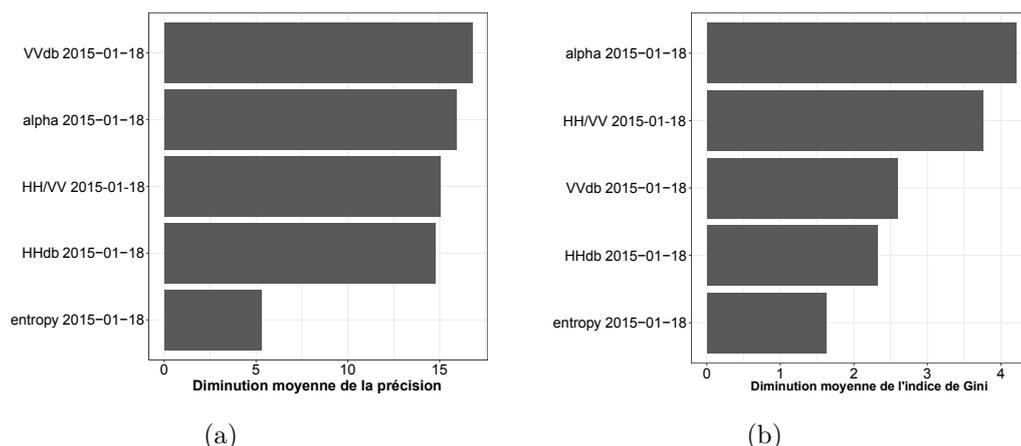


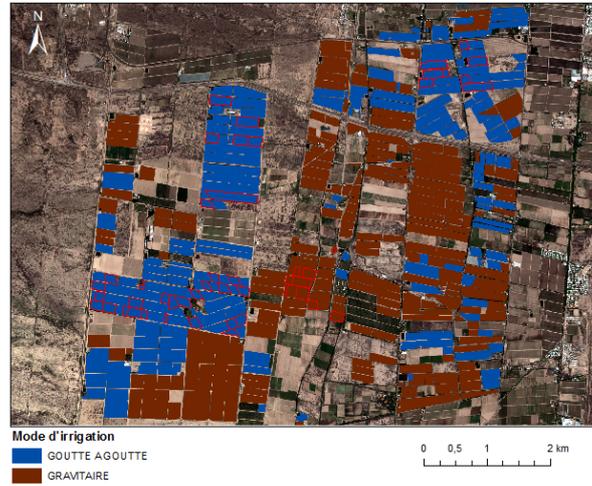
Figure 8.10 – Importance des variables dans la classification : a) Diminution moyenne de la précision, b) Diminution moyenne de l'indice de Gini

de classe plus élevées. Les probabilités les plus faibles sont retrouvées sur les parcelles hors des quatre domaines suivis. Cette observation suggère donc que toutes les caractéristiques spectrales des vignobles ne sont pas comprises dans les sites échantillonnés.

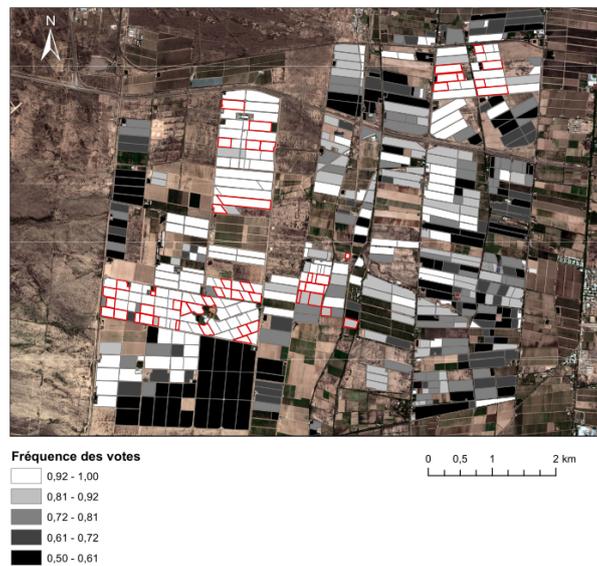
8.4 Discussion

L'étude menée dans ce chapitre a montré la complémentarité de l'utilisation combinée d'images optiques et radar pour caractériser des pratiques culturales pluri-annuelles sur une zone viticole. Bien qu'aucune autre étude de ce type n'est été réalisée sur la vigne, la littérature existante sur la détection de pratiques culturales sur les sols nus ou présentant une culture naissante a également montré un intérêt quant à l'utilisation couplée d'images optiques et radar (Vaudour *et al.*, 2014a, Hadria *et al.*, 2009). En radar, ces deux études concernent l'utilisation de la bande C mais la bande X est également sensible aux variations de rugosité de l'inter-rang (Aubert *et al.*, 2011). Dans le cas des vignobles, les pratiques culturales de labour ou de désherbage chimique vont influencer la rugosité de l'inter-rang. Company *et al.* (1994) ont montré que la bande X est sensible à la variation de rugosité du sol pour les vignobles. Ce qui peut expliquer l'intérêt de la bande X pour cartographier ces pratiques.

Cependant, dans l'échantillonnage terrain, les parcelles concernées par le désherbage chimique sont orientées perpendiculairement à la visée du signal radar ce qui ajoute une particularité supplémentaire dans l'interaction signal-cible de cette catégorie de vignobles. Bien que Company *et al.* (1994) n'aient pas trouvé d'effets significatifs de l'orientation des rangs sur le signal radar, leur jeu de données ne contient pas l'angle azimutal à 90°. De plus, le chapitre précédent 7 a montré que ces parcelles présentaient des coefficients de rétrodiffusion plus élevés que pour toutes les autres parcelles en accord avec la bibliographie théorique sur l'effet des motifs orientés perpendiculairement à la visée du



(a) Cartes des modes d'irrigation



(b) Cartes des probabilités des classes

Figure 8.11 – Cartes des modes d'irrigation à l'échelle de la zone d'étude et probabilités des classes associées. Sont entourées en rouge les parcelles du jeu d'entraînement

signal (Ulaby *et al.*, 1979). Dans le cas particulier de l'orientation des parcelles dés herbées chimiquement, il reste à savoir si toutes les parcelles hors du site d'étude qui ont été classées dans cette catégorie possèdent la même orientation. Parmi les 54 parcelles hors des domaines suivis dont les inter-rangs ont été classés comme dés herbés par traitement chimique, seules 5 autres parcelles possèdent une orientation des rangs comprise entre 165° et 170° et des caractéristiques des coefficients de rétrodiffusion similaires. Ces derniers sont les variables radar majoritaires pour la classification. La signature moyenne des parcelles classées comme dés herbées chimiquement est présentée dans la figure 8.12 avec les images utilisées dans ce chapitre. Ces signatures sont équivalentes à celles des parcelles dont l'inter-rang est labouré (cf Chapitre 7). Cette observation met en évidence deux hypothèses. Soit ces parcelles sont effectivement dés herbées chimiquement. Il y a donc un effet de la différence de rugosité en plus de celle liée à l'orientation des rangs des parcelles de l'échantillon. Soit elles représentent des erreurs de classification. La fréquence des votes sur ces parcelles est comprise entre $[0,32 - 0,72]$. Les 5 parcelles orientées perpendiculairement ont des fréquences de vote élevées, mais c'est également le cas de certaines autres parcelles. La réalisation d'un échantillonnage de validation supplémentaire permettrait de confirmer ces hypothèses.

Concernant, l'équipement en filets anti-grêle, la classification a été réalisée de manière combinée à l'identification des pratiques des inter-rangs. D'après les résultats sur les classifications réalisées à partir d'une seule image, ce sont les images optiques qui jouent un rôle dans la détection des filets anti-grêle. Néanmoins, une segmentation préalable des pratiques de l'inter-rang est nécessaire afin d'aboutir à une classification performante. Ce résultat suggère que l'impact des filets anti-grêle sur la réflectance des parcelles est du même ordre de grandeur que les différences inter-parcelles dues aux variations des modes de gestion des inter-rangs.

De plus, bien que la classification effectuée permette de séparer certaines pratiques culturales, les échantillons ne couvrent pas toute la variabilité possible de pratiques pluri-annuelles combinées. Les parcelles labourées échantillonnées ne sont pas équipées de filets anti-grêle et les cas d'enherbement alternés 1 rang sur 2 ou 3 etc... ne sont pas présents dans l'échantillonnage. En particulier, les parcelles conduites en pergola n'ont pas été prises en compte par manque d'un nombre suffisant de parcelles sur les sites échantillonnés. Ce mode de conduite n'est pas majoritaire dans le département de Lujan de Cuyo. En effet, en 2015, les vignes conduites en pergola représentent 21% des surfaces pour 78% de parcelles conduites avec un palissage (INV, 2015c). Des données annexes sur les parcelles de la zone d'étude pourraient ainsi permettre de couvrir une plus large gamme de pratiques. Néanmoins, la classification permet de rendre compte des pratiques culturales majoritaires sur le site. Elle indique aussi un ordre de grandeur de la protection des vignobles avec des filets anti-grêle. La carte des fréquences des votes permet également, d'identifier les parcelles potentiellement mal classées et ainsi guider le choix pour un nouvel échantillonnage des pratiques culturales.

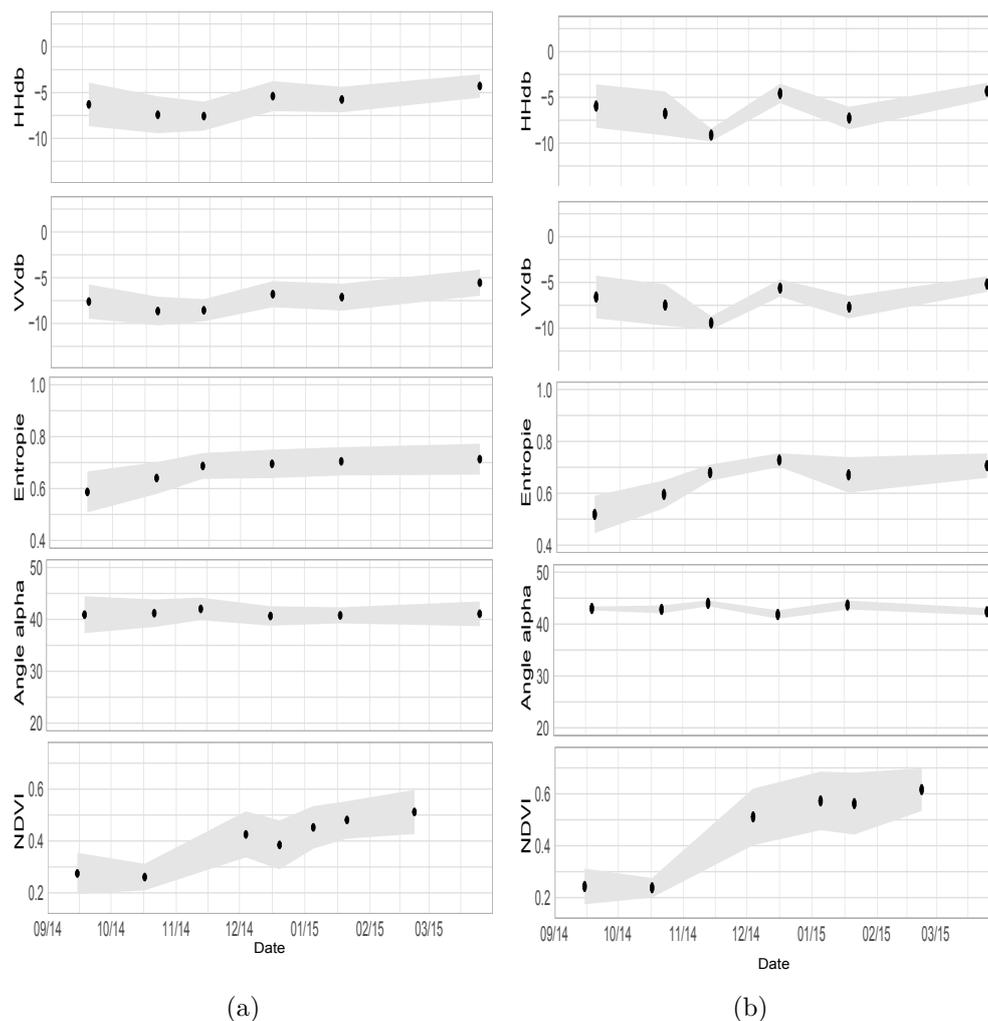


Figure 8.12 – Signatures temporelles moyennes : a) des parcelles classées comme désherbées chimiquement hors des quatre domaines d'étude et les écart-types associés ; b) des parcelles labourées du site d'étude du chapitre 7

L'autre classification réalisée visait à déterminer le type d'irrigation pratiqué sur les différentes parcelles. La classification comportant uniquement deux classes est très performante lorsque les images TerraSAR-X sont utilisées. Les indices de Kappa compris entre 0,9 et 1 pour toutes les images y compris les images du 18 décembre et du 25 mars qui ont été acquises lors d'épisodes pluvieux. Durant ces deux acquisitions, les sols étant mouillés, les différences d'humidité de surface des parcelles sont moindres. Ce résultat suggère que ce ne sont pas les différences d'humidité qui ont été prédominantes dans la classification. La rugosité des inter-rangs liée à la pratique du labour profond dans le cas de l'irrigation par méthode gravitaire peut donc être à l'origine de la très bonne segmentation. Cette hypothèse est conforme à la sensibilité de la bande X à la rugosité du sol même sur les parcelles viticoles (Company *et al.*, 1994). Ainsi, la carte des modes d'irrigation peut-être comparée à celle des pratiques culturales afin de comparer les classes

inter-rang labouré et mode d'irrigation gravitaire. Le tableau 8.5 présente les pratiques d'inter-rangs des parcelles classées comme présentant un mode d'irrigation gravitaire. La majorité des parcelles classées comme étant irriguées par méthode gravitaire présentent une catégorie d'inter-rangs classée comme étant labourés. Cependant, deux autres classes sont présentes : inter-rangs enherbés et rangs équipés avec des filets anti-grêle, inter-rangs désherbés chimiquement et rangs équipés de filets anti-grêle. Le labour des inter-rangs entraîne un entretien moins régulier de ces derniers et une probabilité forte de développement spontané de la végétation dans l'inter-rang. De plus, comme l'échantillonnage ne présente pas de parcelles dont les inter-rangs sont labourés et qui sont équipés de filets anti-grêle, l'algorithme peut les positionner dans d'autres classes. Des erreurs de commissions de la classe irrigation en goutte à goutte peuvent également être comprises dans ces parcelles. A l'inverse, 133 ha (soit 40 parcelles) dont le mode d'irrigation prédit est par goutte à goutte présentent des inter-rangs classés comme labourés. Bien que des différences de rugosité du sol peuvent avoir abouties à cette classe d'inter-rang, des confusions dans l'une des deux classifications sont à envisager.

Tableau 8.5 – Classes des pratiques culturales des parcelles de la zone d'étude non échantillonnées dont le mode d'irrigation a été classé comme gravitaire

Gestion de l'inter-rang prédite	Filets anti-grêle	Nombre de parcelles	Surface (ha)
Labourée	N/A	211	775
Enherbée	avec	22	112
Désherbée chimiquement	avec	25	74

8.5 Conclusion

Les travaux de ce chapitre ont permis de mettre en évidence le potentiel des images optiques et radar afin de déterminer les pratiques culturales pluri-annuelles telles que la gestion des inter-rangs associée à la protection par des filets anti-grêle mais aussi la méthode d'irrigation pratiquée. Bien que le jeu de données ne couvre pas toute la diversité des pratiques culturales existantes, il a mis en évidence l'existence de différences spectrales marquées en particulier concernant le signal radar en bande X. La complémentarité des images optiques et radar pour la cartographie de ces pratiques a également été montrée.

La production des deux cartes apparaît être une source d'informations intéressantes pour les acteurs de la filière viticole. Dans un contexte viticole où le risque d'orages de grêle violent est important, une estimation des surfaces protégées par les filets anti-grêle est un outil utile pour l'estimation des dommages. De plus, la gestion de l'eau

est un des enjeux principaux d'adaptation de la viticulture à court et moyen terme au changement climatique. Le mode d'irrigation par goutte à goutte est plus efficace et permet une meilleure répartition de l'eau sur les parcelles. La cartographie et le suivi des modes d'irrigation peut contribuer au suivi de la modernisation des pratiques viticoles.

CHAPITRE 9

Estimation de l'évapotranspiration des vignobles à partir des séries d'images satellitaires optiques

Sommaire

9.1	Introduction	158
9.2	Matériel et méthodes	159
9.2.1	Données utilisées	159
9.2.2	Méthodologie	159
9.2.3	Performances des deux méthodes pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle des vignobles	164
9.2.4	Estimation des besoins en eau	164
9.3	Résultats et discussion	165
9.3.1	Effet du capteur sur les estimations de l'albédo	165
9.3.2	Variabilité spatio-temporelle des paramètres estimés pour la méthode analytique	166
9.3.3	Comparaison des deux méthodes de calcul de l'évapotranspiration à partir des images satellitaires	167
9.3.4	Evolution temporelle de l' ET_c	172
9.3.5	Cartographie de l'évapotranspiration potentielle et des besoins en eau de la vigne	174
9.4	Conclusion	176

9.1 Introduction

Sous un climat semi-aride tel que celui de Mendoza, la viticulture est dépendante de l'irrigation. Or, le pilotage de l'irrigation et la gestion du stress hydrique est une variable déterminante du potentiel de vigueur et de la qualité des raisins (Matthews et Anderson, 1988, Tesic *et al.*, 2002, Ojeda *et al.*, 2002). Ainsi, une bonne gestion de la fréquence des apports et des quantités est un outil pour optimiser l'alimentation hydrique de la vigne et la qualité potentielle des raisins. Aguilera et Morábito (2016) ont montré, à travers leurs enquêtes auprès des agriculteurs et des gestionnaires de l'eau, que 100% des enquêtés sont conscients des problèmes de sécheresse et du besoin d'améliorer l'efficacité des stratégies et des systèmes d'irrigation. Également 94% des enquêtés seraient prêts à utiliser un outil leur permettant de mieux connaître les besoins en eau de leurs cultures.

Or, le pilotage de la demande en eau de la vigne passe par l'estimation de l'évapotranspiration. De nombreux travaux portent sur le calcul précis de l'évapotranspiration réelle des vignes en utilisant des lysimètres ou des mesures de covariance des turbulences et la méthode du ratio de Bowen (Teixeira *et al.*, 2007, López-Urrea *et al.*, 2012, Poblete-Echeverría et Ortega-Farias, 2013). Cependant, ces méthodes sont limitées par leur étendue spatiale (Carrasco-Benavides *et al.*, 2014). Le modèle de la FAO, est très couramment utilisé pour estimer les besoins en eau des cultures (Allen *et al.*, 1998). Il permet d'estimer l'évapotranspiration des cultures à partir des données d'évapotranspiration de référence (ET_0) et d'un coefficient cultural (K_c). Ce dernier représente les conditions de la culture en terme de développement végétatif et du sol (Allen *et al.*, 1998). Cependant, il est important de noter que les valeurs d'évapotranspiration calculées avec ce modèle représentent la valeur maximale possible dans le cas de conditions sanitaires et hydriques optimales de la plante. De plus, l'utilisation de ce modèle est dépendante de la disponibilité de données météorologiques fiables.

Grâce à la corrélation entre les indices de végétation et les paramètres biophysiques des cultures, de nombreux travaux ont évalué les produits satellitaires pour l'estimation de l'évapotranspiration et l'estimation des besoins en eau des cultures (Heilman *et al.*, 1982, Belmonte *et al.*, 2005, Campos *et al.*, 2012, Akdim *et al.*, 2014, Vanino *et al.*, 2015, Vuolo *et al.*, 2015). Certains d'entre eux sont réalisés afin d'envisager une utilisation opérationnelle pour l'agriculture (Vuolo *et al.*, 2015). Ces travaux utilisent soit une estimation des coefficients culturaux à partir d'indices de végétation, soit l'albédo, la résistance aérodynamique et la résistance de la canopée qui sont dérivés des images et intégrés dans l'équation de Penman-Monteith version FAO-56 (Allen *et al.*, 1998). Ces deux approches ont déjà été utilisées avec succès pour estimer l'évapotranspiration des vignes (Consoli et Barbaggio, 2012, Vanino *et al.*, 2015).

Dans ce chapitre, les deux types d'associations des données satellitaires aux données météorologiques sont comparées pour l'estimation de l'évapotranspiration de la vigne et des besoins en eau. L'objectif est d'évaluer le potentiel de chacune sur la vigne dans

le contexte climatique et viticole de Mendoza. Les données et les détails de l'approche méthodologique sont tout d'abord expliqués. Puis les performances des deux méthodes sont présentées et discutées au regard de la littérature existante. Enfin, avec la méthode retenue, des cartes de l'évapotranspiration sont produites associées à spatialisation des besoins en eau sur la zone d'étude.

9.2 Matériel et méthodes

9.2.1 Données utilisées

Les travaux de ce chapitre portent sur les parcelles du site d'étude dans un premier temps, puis l'estimation des besoins en eau est réalisée à l'échelle de toute la zone d'étude. Les parcelles utilisées sont présentées dans les sections 3.5.1.1 et 3.5.1.2. Afin de spatialiser l' ET_c des parcelles, les deux séries d'images satellitaires optiques des satellites Landsat-8 et Pléiades ont été utilisées (Tableau 3.3). Les pré-traitements ont été effectués selon la démarche présentée en section 3.4.1.1. Les données météorologiques de la station présente sur le site ont été utilisées. Les images satellitaires optiques et leurs pré-traitements sont présentés dans la section 3.4.1. Les données de GLAI obtenus par photographies hémisphériques ont également été utilisées comme données de validation (Section 3.5.3.1).

9.2.2 Méthodologie

Dans ce chapitre, deux méthodes de calcul de l' ET_c sont comparées. La figure 9.1 détaille la méthodologie adoptée. La première méthode évaluée estime l' ET_c à partir des données météorologiques et le coefficient cultural K_c dérivé du NDVI. La seconde est la méthode analytique qui intègre à la formule de l' ET_c FAO-56 l'albédo, la résistance de la canopée et la résistance aérodynamique des parcelles dérivés des images satellitaires. L' ET_c calculée à partir du coefficient cultural dérivé des relevés de GLAI constitue la base de données de validation. Toutes les données ont été agrégées à l'échelle de la parcelle en considérant la moyenne.

9.2.2.1 Calcul de l'évapotranspiration de référence

Pour le jeu de données de validation et la méthode utilisant le K_c -NDVI, le calcul de l'évapotranspiration de référence (ET_0) est nécessaire. Elle a été calculée à partir des données de la station comme présenté dans la section 3.3.4.

9.2.2.2 Calcul du coefficient cultural à partir des relevés terrain

Afin de calculer l'évapotranspiration des parcelles, il est nécessaire de multiplier l' ET_0 par le coefficient cultural. Deux approches peuvent être choisies. La première utilise un

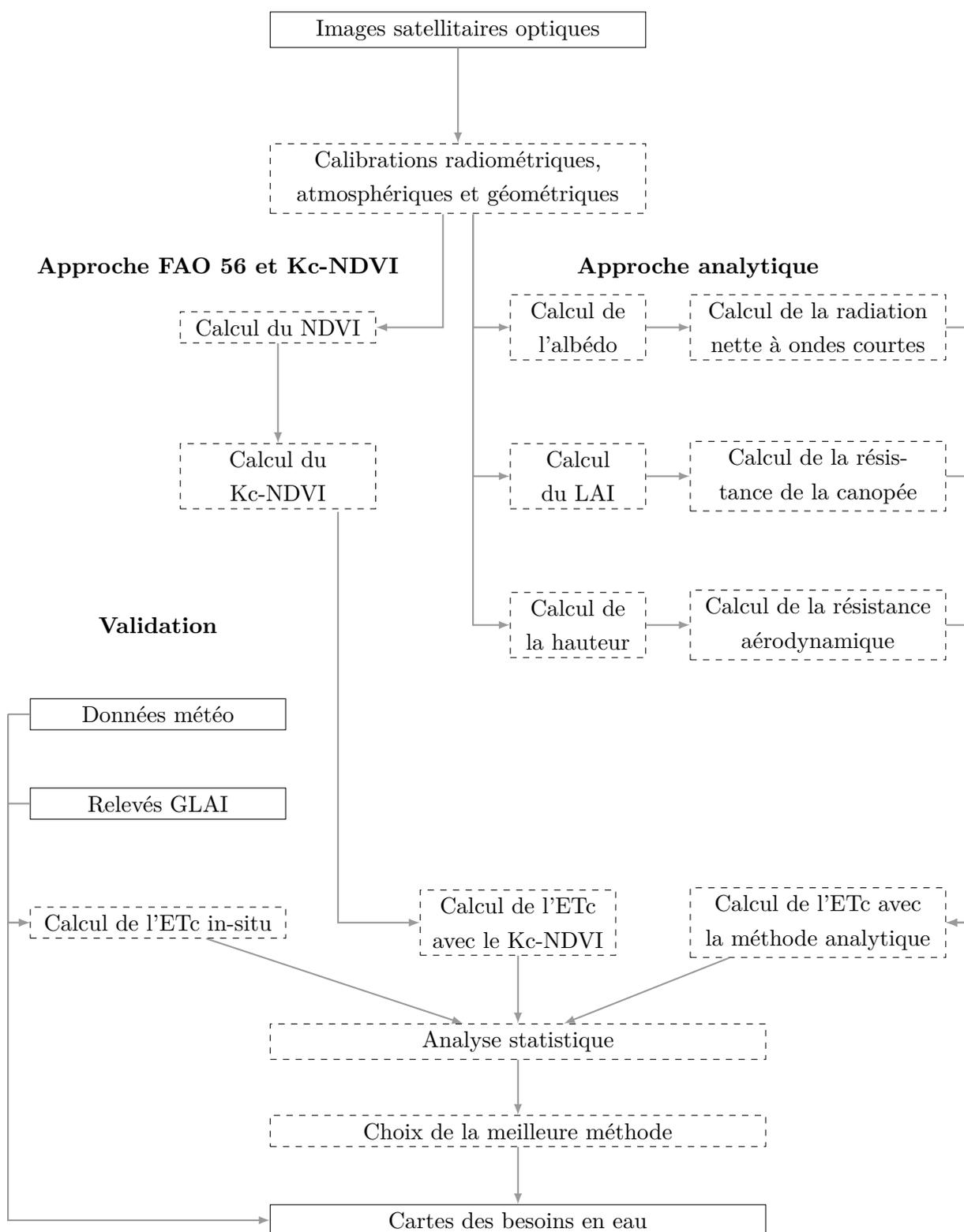


Figure 9.1 – Méthodologie générale appliquée pour comparer des méthodes d'estimation de l'évapotranspiration potentielle des vignobles et des besoins en eau

coefficient cultural unique K_c qui englobe la transpiration du couvert végétal et l'évaporation du sol. La seconde, l'approche duale, est composée de deux coefficients : le coefficient cultural qui comprend la transpiration de la culture K_{cb} et le facteur d'évaporation du sol K_e . La première méthode est conseillée pour les estimations générales ou si le sol est peu fréquemment mouillé (irrigations et précipitations peu fréquentes). La seconde est recommandée pour une gestion fine de l'irrigation. Considérant les données terrain disponibles et la fréquence faible des opérations d'irrigation, toutes les deux semaines environ, le calcul du coefficient unique a été privilégié. Des valeurs théoriques du coefficient cultural sont disponibles dans le manuel de la FAO par culture et par stade de développement permettant de construire la courbe du coefficient cultural durant la saison végétative (Allen *et al.*, 1998). Cependant, elles ne permettent pas de prendre en compte la diversité de vigueur, d'avancée ou de retard de croissance de la culture étudiée. C'est pourquoi le coefficient cultural a été calculé à partir d'une équation permettant d'inclure des relevés de terrain (Equation 9.1, Allen *et al.* (1998)). Cette dernière est prévue pour calculer le K_{cb} . Mais il peut-être converti en K_c en ajoutant 0,05 pour inclure l'évaporation du sol. Dans le cas des parcelles enherbées ou l'inter-rang est en grande partie couvert, 0,35 est ajouté au résultat de l'équation (9.1) (Snyder *et al.*, 2012).

$$K_{cb_{mid}} = K_{c_{min}} + (K_{cb_{full}} - K_{c_{min}})(1 - e^{-0,7LAI}) \quad (9.1)$$

$K_{cb_{mid}}$ est le coefficient cultural intermédiaire quand la végétation n'est pas encore totalement développée ;

$K_{c_{min}}$ est le coefficient cultural minimum issu des tables de la FAO. Il correspond au coefficient du sol nu dans les conditions climatiques du site, ici $K_{c_{min}} = 0,15$;

$K_{cb_{full}}$ est le coefficient cultural maximum issu des tables de la FAO quand la culture est au maximum de sa croissance ici, $K_{cb_{full}} = 0,65$;

LAI correspond à la surface foliaire de la culture correspondant ici aux relevés de GLAI.

Une fois les K_c estimés sur les 14 parcelles suivies, l' ET_c a été calculée. Les données ont été interpolées quotidiennement afin d'avoir des valeurs d' ET_c pour chaque jour de la saison végétative. Ces données ont servi à valider les estimations satellitaires de l' ET_c en utilisant les valeurs correspondant aux dates d'acquisition des images.

9.2.2.3 Calcul du coefficient cultural à partir du NDVI

Les images satellitaires sont adaptées pour dériver un coefficient cultural unique étant donné que les pixels contiennent à la fois de l'information sur la végétation et la part de sol non recouverte (Choudhury *et al.*, 1994). La méthode la plus simple dérive le K_c suivant une relation linéaire entre ce dernier et le NDVI. Cette approche a été développée par Heilman *et al.* (1982). Dans ce chapitre, l'équation utilisée par Belmonte *et al.* (2005), D'Urso (2010), Akdim *et al.* (2014) a été choisie ((9.2)). Elle a été définie pour des valeurs

de NDVI entre 0,16 et 0,8 et des K_c correspondants entre 0,4 et 1,2.

$$K_c = 1,25 \times NDVI + 0,2 \quad (9.2)$$

9.2.2.4 Présentation de l'approche analytique

L'approche analytique repose sur une application directe de l'équation de Penman-Monteith (9.3) comme proposé par la FAO (Allen *et al.*, 1998). Cependant, ici certains paramètres sont issus des images satellitaires.

$$ET_c = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta(R_{ns} - R_{nl} - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_{c,min}}{r_a})} \quad (9.3)$$

λ est la chaleur latente de vaporisation ($MJ.kg^{-1}$);

R_{ns} et R_{nl} sont respectivement les radiation nettes à ondes courtes et longues ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$);

G est le flux de chaleur du sol ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$);

ρ_a est la densité moyenne de l'air à pression constante ($kg.m^{-3}$);

c_p est la chaleur spécifique de l'air ($MJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$);

$e_s - e_a$ est le déficit de pression de vapeur de l'air (kPa);

Δ est la pente de la courbe reliant la saturation de la pression de vapeur et la température ($kPa.^{\circ}C^{-1}$);

$r_{c,min}$ et r_a sont respectivement la résistance de la surface et la résistance aérodynamique ($s.m^{-1}$).

L'albédo de la surface (r), la surface foliaire (LAI) et la hauteur de la canopée permettent d'obtenir certains paramètres de l'équation (9.3).

$$R_{ns} = (1 - r)R_s \quad (9.4)$$

$$r_{c,min} = \frac{100}{0,5 \times LAI} \quad \forall LAI \leq 4$$

$$r_{c,min} = \frac{100}{2 \times LAI} \quad \forall LAI > 4 \quad (9.5)$$

$$r_a = \frac{\ln(\frac{Z_m - d}{Z_{0m}}) \ln(\frac{Z_h - d}{Z_{0h}})}{0,168u_z} \quad (9.6)$$

R_s est la radiation solaire ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$);

Z_m et Z_h sont les hauteurs de mesure du vent et de l'humidité respectivement;

Z_{0m} est la longueur de rugosité qui détermine le transfert de la quantité de mouvement

(m). Elle peut-être approximée par $Z_{0m} = 0,123h_c$ où h_c est la hauteur de la canopée ; Z_{0h} est la longueur de rugosité déterminant le transfert de chaleur et de vapeur (m). Elle peut être approximée par $Z_{0h} = 0,1Z_{0m}$; u_z est la vitesse du vent à la hauteur de mesure ($m.s^{-1}$).

Calcul de l'albédo

L'albédo désigne la capacité d'une surface à réfléchir l'énergie solaire. Une approximation est possible à partir des images satellitaires optiques en utilisant les réflectances dans les différentes bandes spectrales corrigées des effets de l'atmosphère et pondérées d'un coefficient (Equation (9.7)) (Menenti *et al.*, 1989). Les coefficients correspondent aux valeurs de l'irradiance solaire extraterrestre des différentes bandes spectrales (E°_λ) divisées par la somme de ces valeurs de toutes les bandes spectrales

$$r = \sum_{\lambda} w_{\lambda} \rho_{\lambda} \quad (9.7)$$

λ correspond aux différentes bandes spectrales ; ρ_{λ} est la réflectance dans une bande λ donnée ; w_{λ} est le coefficient de pondération de la bande λ .

Le tableau 9.1 présente les coefficients de pondération utilisés dans l'équation (9.7) pour les deux capteurs utilisés.

Tableau 9.1 – Coefficients de pondération nécessaires pour estimer l'albédo pour les deux capteurs utilisés

Capteur	Bande spectrale	Coefficient de pondération
Landsat-8 OLI	Bleu : 0,450 - 0,515 μm	0,2727
	Vert : 0,525 - 0,600 μm	0,2687
	Rouge : 0,630 - 0,680 μm	0,2437
	PIR : 0,845 - 0,885 μm	0,1616
	MIR : 1,560 - 1,660 μm	0,0404
	MIR : 2,100 - 2,300 μm	0,0132
Pléiades	Bleu : 0,430 - 0,560 μm	0,2879
	Vert : 0,500 - 0,617 μm	0,2889
	Rouge : 0,500 - 0,617 μm	0,2564
	PIR : 0,740 - 0,945 μm	0,1668

Calcul du LAI

Dans cette partie, les données de LAI des vignes doivent être estimées. A cela s'ajoute lorsqu'une couverture végétative est présente sur l'inter-rang, le LAI de l'inter-rang. Au-

cun relevé de la surface foliaire de l'inter-rang n'a été réalisé. Les relations empiriques déterminées dans le chapitre 7 ne concernent que le LAI des vignes et ne peuvent pas être utilisées pour les parcelles avec un enherbement de l'inter-rang dans ce chapitre. Afin d'homogénéiser et de simplifier les calculs, le LAI dérivé du MTVI2 dans l'étude de Liu *et al.* (2010) a été utilisé. Il était de plus fortement corrélé aux mesures de *GLAI* pour les parcelles aux inter-rangs désherbés.

Calcul de la hauteur

Enfin, pour le calcul de la hauteur, les relations empiriques dérivées des images TerraSAR-X dans le chapitre 7 auraient pu être utilisées. Cependant, la hauteur influence de manière plus faible le coefficient cultural que le LAI et l'albédo (Akdim *et al.*, 2014, Vanino *et al.*, 2015, Vuolo *et al.*, 2015). De plus, les relations empiriques dérivées dans le chapitre précédent ont des potentiels prédictifs très hétérogènes pouvant conduire à de fortes imprécisions. Il a donc été choisi d'utiliser la valeur de 0,4 m conseillée par Akdim *et al.* (2014) et utilisée dans les travaux de Vanino *et al.* (2015).

9.2.3 Performances des deux méthodes pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle des vignobles

Les différentes équations présentées dans cette partie ont été appliquées aux deux séries d'images satellitaires optiques. Les valeurs d' ET_c des deux approches testées ont été calculées et confrontées aux valeurs in-situ calculées à l'aide des relevés de terrain. Les K_c calculés à partir des relevés ont été interpolés au pas de temps quotidien, afin d'avoir des données de validation à chaque acquisition d'image satellitaire.

Les estimations de l'évapotranspiration potentielle des vignobles sur les 14 parcelles de validation sont comparées aux estimations à l'aide des deux méthodes utilisant les images satellitaires. La cohérence des estimations avec les cumuls mensuels théoriques de la région disponibles dans la bibliographie (Morábito *et al.*, 2002) a également été vérifiée.

9.2.4 Estimation des besoins en eau

Ensuite, la méthode d'estimation de l'évapotranspiration potentielle la plus performante a été utilisée afin de spatialiser les besoins en eau des parcelles à l'échelle de la zone d'étude. Les besoins nets en eau sont calculés en retranchant les valeurs des précipitations nettes au valeurs d'évapotranspirations potentielles (Allen *et al.*, 1998). Le calcul des précipitations nettes permet de prendre en compte la quantité de précipitations qui est interceptée par la canopée et qui ne s'infiltré pas. Braden (1985) propose l'équation

empirique suivante :

$$P_n = P - aLAI \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{f_{cover} \times P}{aLAI}} \right) \quad (9.8)$$

avec P correspond aux précipitations ; a est un coefficient empirique de saturation de la plante par unité de surface foliaire fixé à $2,8 \text{ mm.j}^{-1}$; LAI est le LAI de la culture et f_{cover} représente la fraction de sol couverte par la culture.

La fraction de couverture f_{cover} est dérivée du LAI par l'équation suivante définie par Vuolo *et al.* (2015) :

$$f_{cover} = -0,0038LAI^4 + 0,054LAI^3 - 0,30LAI^2 + 0,82LAI \quad (9.9)$$

Les estimations des besoins en eau ont été estimés au pas de temps bimensuel. En effet, les calendriers des pratiques culturales annuelles fournis par les viticulteurs indiquent que les opérations d'irrigation sont réalisées toutes les deux semaines lorsque le système d'irrigation est par goutte à goutte. Les intervalles d'irrigation en méthode gravitaire sont plus variables.

Les coefficients culturaux calculés à chaque acquisition par la méthode d'estimation retenue ont été interpolés au pas de temps quotidien afin de pouvoir calculer l'évapotranspiration potentielle des vignes quotidiennement. Les données ont été sommées bimensuellement et les précipitations nettes associées ont été retranchées afin d'obtenir les quantités d'eau théoriques à apporter. Ces données ont ensuite été cartographiées à l'échelle de la zone d'étude.

9.3 Résultats et discussion

9.3.1 Effet du capteur sur les estimations de l'albédo

Les valeurs de l'albédo ont été estimées à l'aide de deux capteurs optiques dont les caractéristiques spectrales diffèrent. En effet, le nombre de bandes et leur largeur ne sont pas identiques entre les deux capteurs. Les acquisitions des deux capteurs montrent aussi des différences de conditions d'acquisitions qui sont prises en compte lors des calibrations radiométriques (angle de visée et élévation solaire). Pour évaluer l'impact du capteur sur les estimations de l'albédo, les valeurs de l'albédo sur les parcelles du site d'étude ont été comparées entre les deux capteurs pour des acquisitions réalisées à des dates proches. C'est le cas pour les acquisitions du 5 (Landsat-8) et du 9 (Pléiades) janvier et du 21 (Landsat-8) et 25 (Pléiades) janvier. Les acquisitions étant séparées de 4 jours, les parcelles ayant été irriguées à des dates proches des acquisitions n'ont pas été prises en compte. Ceci permet de limiter les écarts liés à des différences d'humidité du sol et de teneur en eau des plantes pouvant impacter les estimations de l'albedo notamment pour Landsat-8 qui comportent

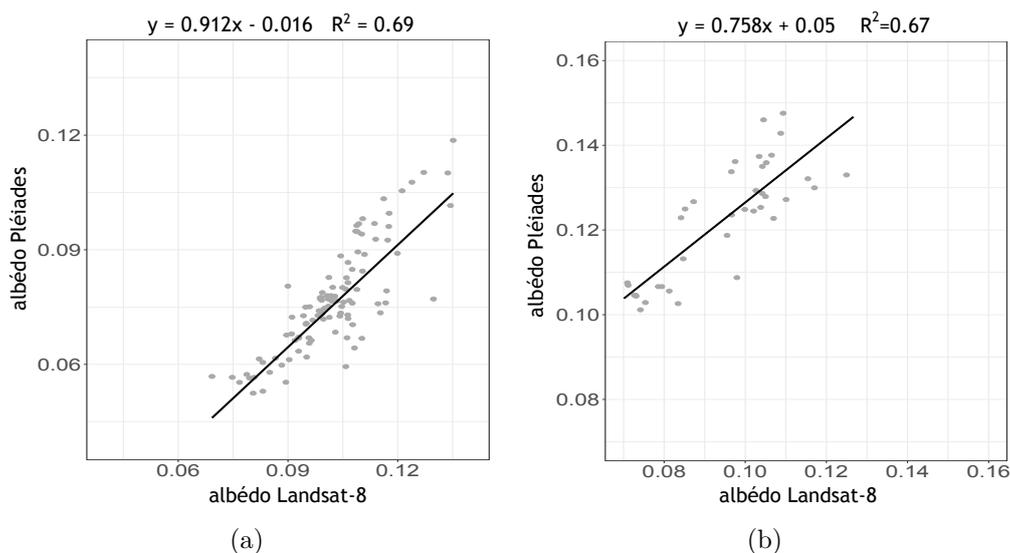


Figure 9.2 – Comparaison des valeurs d’albédo estimées par les deux capteurs optiques utilisés : a) Images du 5 janvier (Landsat-8) et du 9 janvier (Pléiades) ; b) Images du 21 janvier (Landsat-8) et du 25 janvier (Pléiades)

deux bandes dans le moyen infra-rouge même si la pondération faible de ces deux bandes dans le calcul de l’albédo devrait limiter les écarts. Une régression linéaire a été effectuée à ces deux périodes entre les valeurs d’albédo calculées avec les deux capteurs optiques (Figure 9.2). Les valeurs d’albédo estimées par les deux capteurs sont corrélées même si de nettes différences sont notables. Les valeurs d’albédo de Landsat-8 sont légèrement supérieures à celles de Pléiades pour les deux images acquises début janvier (Figure 9.2(a)) alors qu’elles sont plus faibles que celles de Pléiades dans le second cas (Figure 9.2(b)). Dans ce dernier cas de nombreuses parcelles ont été retirées car elles ont été irriguées peu de temps avant les acquisitions. De plus, les relevés météo de la station indiquent 5mm de précipitations le 20 janvier 2015. Ceci peut avoir impacté de manière globale sur le site, les conditions d’humidité du sol et de teneur en eau des parcelles et expliquer l’albédo plus faible et l’ordonnée à l’origine plus élevée que dans le cas des deux images acquises début janvier. Cependant, des différences d’estimations inhérentes aux caractéristiques des deux capteurs semblent être présentes.

9.3.2 Variabilité spatio-temporelle des paramètres estimés pour la méthode analytique

Les figures 9.3 et 9.4 présentent la variabilité spatiale ainsi que l’évolution temporelle de l’albédo au cours de la saison végétative étudiée. Ce dernier augmente au cours de la saison végétative. Cette évolution semble corrélée au cycle végétatif des vignes. Cependant, une diminution est observée au mois de février probablement liée aux précipitations des jours précédents.

Les cartes de LAI indiquent une forte variabilité spatiale de ce paramètre au début du cycle végétatif. En effet, les sites dont les parcelles sont enherbées ou dont l'entretien de l'inter-rang n'a pas encore été effectué en septembre présentent des valeurs nettement supérieures. Les différentes cartes retranscrivent le processus de croissance avec l'augmentation progressive du LAI pour chaque parcelle. Les valeurs se stabilisent à partir de décembre correspondant à la fin de la croissance végétative.

9.3.3 Comparaison des deux méthodes de calcul de l'évapotranspiration à partir des images satellitaires

Puis, les valeurs de l' ET_c calculées à partir des deux méthodes indirectes sont comparées à la méthode incluant les données de terrain sur la figure 9.5. Les deux méthodes sont significativement corrélées aux données de l' ET_c du jeu de données de validation avec un $R^2 = 0,56$ pour la méthode K_c -NDVI et $R^2 = 0,70$ pour la méthode analytique. La dispersion autour de la courbe de régression est plus importante dans le cas de la méthode K_c -NDVI (Figure 9.5(a)) et la RMSE de 1,03 mm est légèrement plus élevée que pour la méthode analytique. Cependant, la méthode analytique entraîne une surestimation non négligeable de l' ET_c d'environ 2 mm. Ceci laisse supposer que cette méthode surestime le coefficient cultural. Même si le coefficient de détermination de la régression incluant l' ET_c calculée avec le K_c -NDVI a une valeur moyenne, les ordres de grandeur de l' ET_c estimée avec cette méthode sont équivalents à celui des données de validation.

Les corrélations des deux méthodes de calcul de l' ET_c à partir des images satellitaires sont plus faibles que celles obtenues par Akdim *et al.* (2014) sur deux oasis marocaines incluant plusieurs cultures notamment betterave à sucre, blé, maïs, luzerne. En ce qui concerne le potentiel du K_c -NDVI en viticulture, Er-Raki *et al.* (2013) obtiennent des performances similaires entre l' ET_c calculée avec la méthode des covariances de turbulences et l' ET_c dérivée à partir d'un K_c -NDVI avec une relation exponentielle (R^2 variant de 0,59 à 0,77 suivant l'année pour des RMSE de 0,69 à 0,79 mm).

Ensuite, la variabilité spatiale du coefficient cultural des données de validation a été comparée à celles des K_c estimés grâce au NDVI ou à la méthode analytique. Le tableau 9.2 présente des exemples de valeurs à quelques dates. Dans le cas de la méthode analytique, le coefficient cultural a été obtenu en divisant l' ET_c estimée par l' ET_p calculée avec la méthode FAO-56. L'écart-type des K_c du jeu de données de validation est stable autour de 0,15 au cours de la saison végétative. Les valeurs de K_c ainsi que les variations du K_c -NDVI sont plus proches des valeurs de validation que celles calculées avec la méthode analytique. En effet, avec cette dernière méthode les coefficients culturaux sont autour de 1 dès le mois d'octobre et présentent une très faible variabilité spatiale sur les 14 parcelles de validation avec un écart-type autour de 0,05. Seule la date d'octobre présente une variabilité équivalente à celle des données de validation. A cette date, la canopée des vignes est peu développée et les différences entre les parcelles enherbées et désherbées sont marquées.

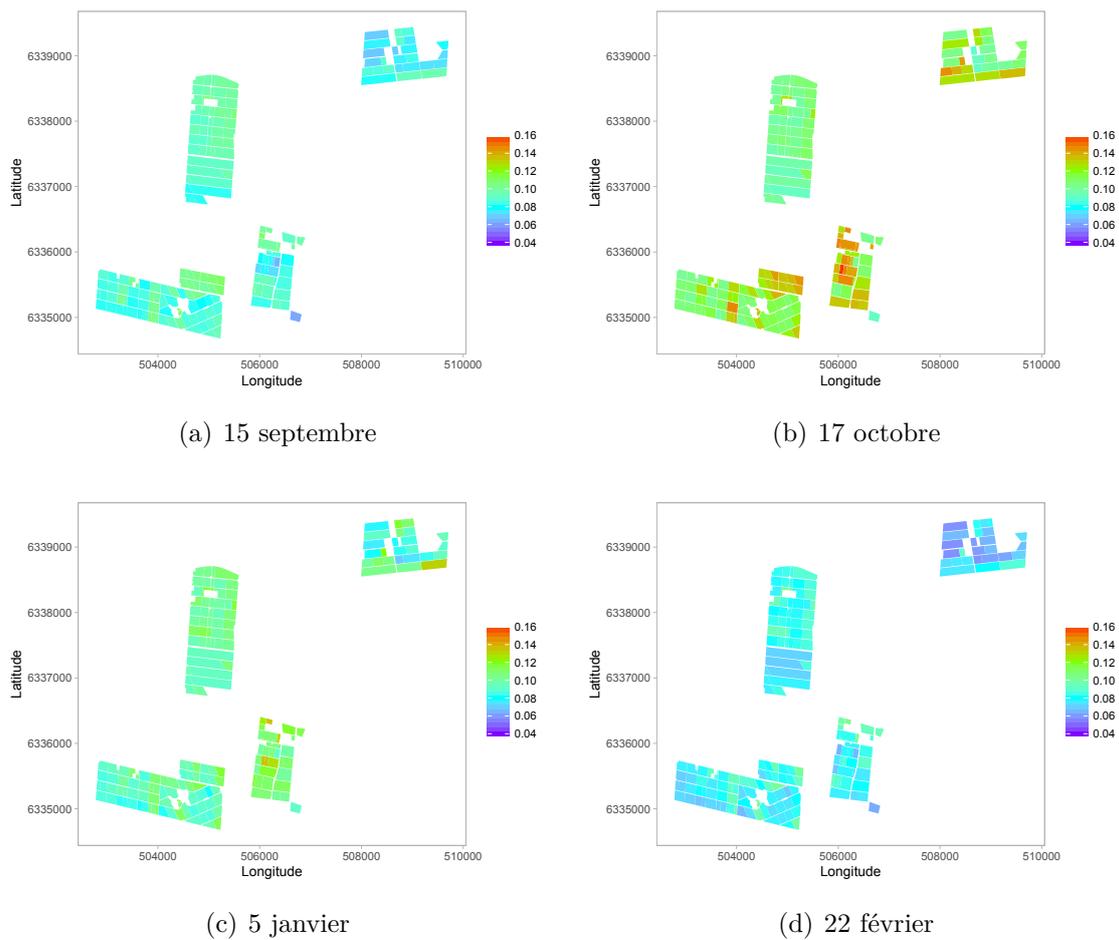


Figure 9.3 – Variabilité spatiale et évolution temporelle de l'albédo au cours de la saison végétative

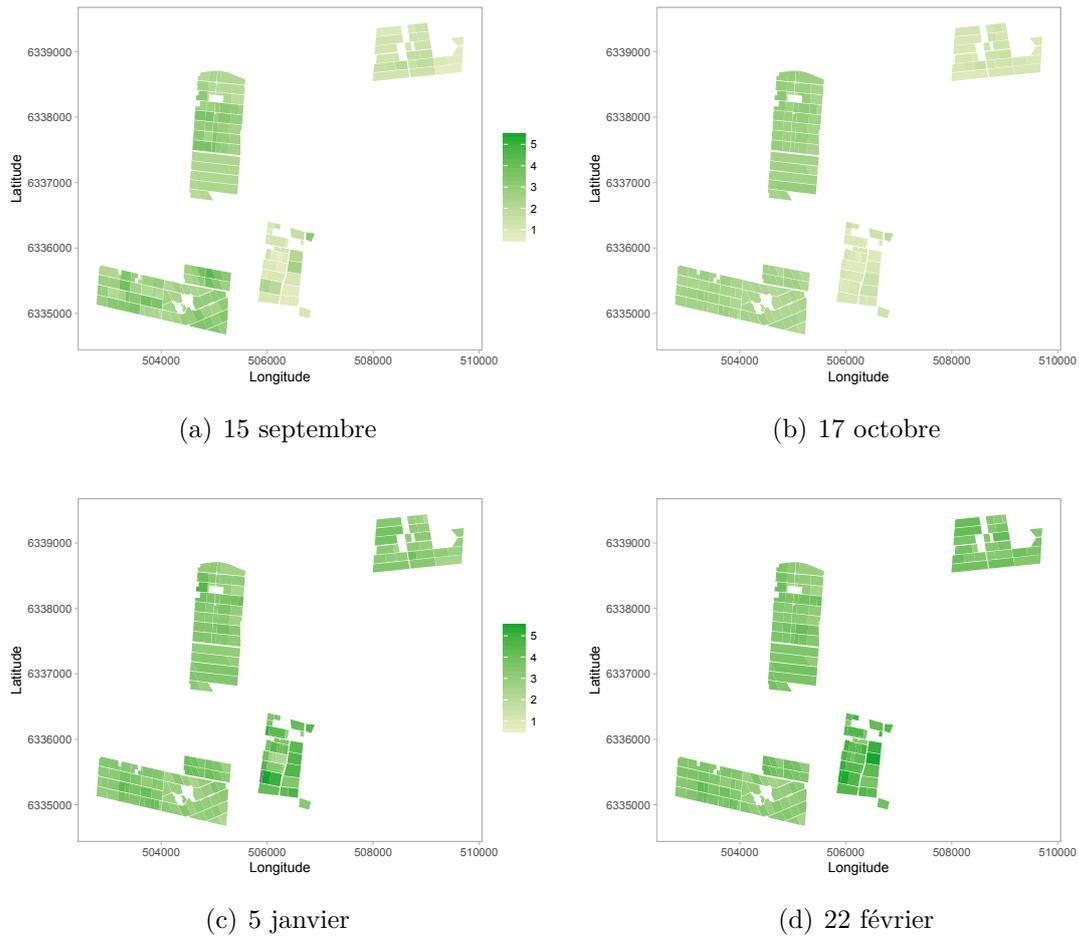


Figure 9.4 – Variabilité spatiale et évolution temporelle du LAI calculé à partir du MTVI2 au cours de la saison végétative

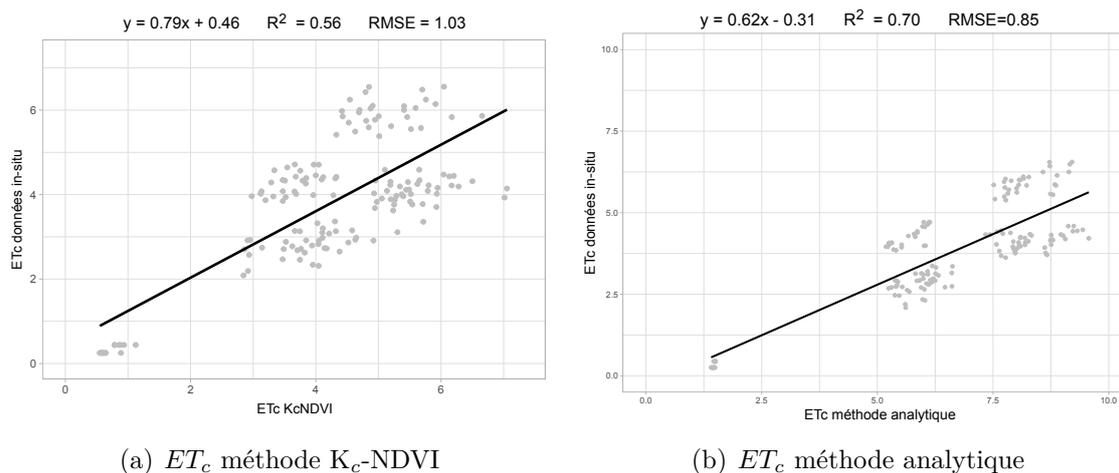


Figure 9.5 – Comparaison de l' ET_c incluant les données in-situ pour le calcul du K_c avec le calcul de l' ET_c à partir du K_c -NDVI a) ; avec le calcul de l' ET_c par méthode analytique b)

Tableau 9.2 – Variation statistiques des valeurs des coefficients culturaux calculés avec les différentes méthodes sur les 14 parcelles de validation

K_c		17 Oct.	04 Déc.	05 Janv.	22 Fév.
K_c in-situ	min	0,35	0,61	0,60	0,62
	max	0,74	0,95	0,96	0,96
	moyen	0,56	0,77	0,77	0,78
	écart-type	0,16	0,15	0,15	0,15
K_c -NDVI	min	0,47	0,66	0,69	0,72
	max	0,72	0,90	1,01	1,16
	moyen	0,56	0,80	0,84	0,90
	écart-type	0,10	0,08	0,09	0,11
K_c analytique	min	0,93	1,25	1,23	1,24
	max	1,31	1,37	1,39	1,38
	moyen	1,11	1,32	1,29	1,31
	écart-type	0,15	0,04	0,05	0,04

Les cartes des coefficients culturaux calculés avec les deux méthodes sont présentées dans la figure 9.6. Ces cartes indiquent que l'ordre de grandeur des coefficients culturaux estimés sur les parcelles de validation est valable sur l'ensemble des parcelles étudiées. La variabilité spatiale plus importante du K_c -NDVI est aussi notable. De plus, la réduction de la variabilité spatiale du coefficient culturel de la méthode analytique avec la croissance de la vigne est retrouvé à l'échelle du site.

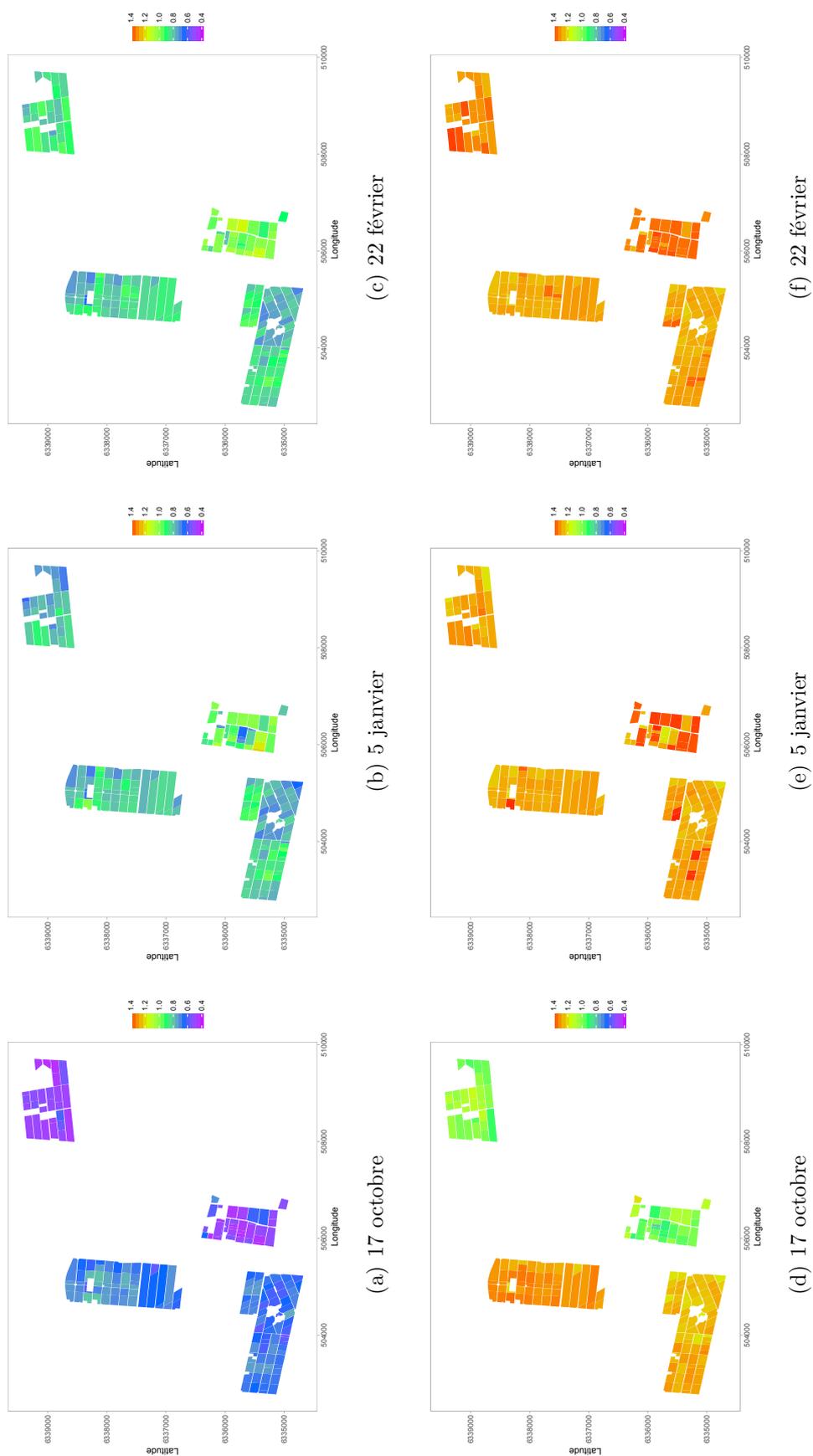


Figure 9.6 – Variabilité spatiale et évolution temporelle des K_c calculés à partir du NDVI (a) à d)) et à partir de la méthode analytique (e) à h)) au cours de la saison végétative

Vanino *et al.* (2015) ont également utilisé la méthode analytique pour estimer l' ET_c . Ils obtiennent également des valeurs de K_c élevées (autour de 1) et relativement stables dans le temps sur une des deux saisons végétatives qu'ils ont étudiées pour des vignes conduites en treille. Ils expliquent ce facteur par une croissance rapide de la végétation liée à une année plus chaude car présentant des cumuls de degrés-jours élevés. Cependant, ils comparent leurs résultats aux courbes théoriques du K_c sans utiliser de relevés terrain. Il est possible que les relations empiriques utilisées pour extraire la résistance de la canopée et la résistance aérodynamique ne soient pas adaptées dans certains cas de valeurs des paramètres météorologiques et de terrain et que des calibrations soient nécessaires.

De plus, les valeurs de l' ET_c sont en grande partie influencées par les variations du LAI en été (Akdim *et al.*, 2014). La calibration de l'équation déterminant la résistance de la canopée nécessite peut-être une adaptation car les données de LAI dérivées des images satellitaires présentent une variabilité spatiale cohérente avec les écarts de vigueur présents sur le site d'étude.

Afin de confronter les coefficients cultureux obtenus avec d'autres méthodes, les valeurs de la littérature du K_c initial et lorsque la croissance est au maximum ont été répertoriées sur les vignobles destinés à la production de vins (Tableau 9.3). Les valeurs du $K_{c_{ini}}$ varient de 0,2 à 0,38 pour les vignes désherbées au système de conduite similaires et 0,5 pour des vignes enherbées. Ces valeurs sont accord avec les valeurs estimées avec la méthode du K_c -NDVI (cf Figure 9.6) mais la méthode analytique aboutit à des valeurs nettement supérieures. Au niveau de croissance maximal, les valeurs de K_c obtenues sur d'autres vignobles varient de 0,53 à 0,8 et 1,25 dans le cas des parcelles enherbées. Dans ce cas encore, seules les estimations de la méthode du K_c -NDVI se trouvent dans le même ordre de grandeur. La réalisation des calculs sur une autre campagne viticole avec la méthode analytique permettrait d'évaluer si ce sont les conditions de l'année qui ont entraîné la surestimation ou si les équations empiriques pour le calcul des différents paramètres ne sont pas adaptées aux caractéristiques des vignobles du site étudié.

9.3.4 Evolution temporelle de l' ET_c

Les valeurs des coefficients cultureux obtenus par la méthode K_c -NDVI et la méthode analytique ont été interpolées quotidiennement afin de pouvoir calculer l' ET_c quotidienne. Les cumuls mensuels de l' ET_c obtenus sur les 14 parcelles suivies avec les coefficients cultureux estimés et ceux servant à la validation sont présentés dans la figure 9.7. La surestimation importante de l' ET_c quotidienne avec la méthode analytique entraîne des écarts importants d'environ 50 mm des cumuls mensuels de l' ET_c . L'estimation de l'évapotranspiration par la méthode K_c -NDVI aboutit à une légère surestimation des cumuls mensuels de l' ET_c . Les écarts entre la méthode K_c -NDVI et les données de validation s'accroissent à la fin de l'été. La dernière acquisition d'images optiques ayant eu lieu le 2

Tableau 9.3 – Coefficients cultureux des vignobles rapportés dans la littérature

$K_{c_{ini}}$	$K_{c_{mid}}$	Cépage	Système de conduite	Saison	Pays	Référence
0,63	0,87	Petite Syrah	Vertical sans palissage	2002 saison sèche	Brésil	Teixeira <i>et al.</i> (2007)
0,35	0,75	Tempranillo	Vertical avec palissage	2007 à 2009	Espagne	López-Urrea <i>et al.</i> (2012)
0,2	0,8	-	-	2007	Espagne	Campos <i>et al.</i> (2012)
0,34	0,64	Merlot	Vertical avec palissage	2008/2009	Chili	Poblete-Echeverría et Ortega-Farias (2013)
0,38	0,53	Cabernet S, Syrah, Merlot	Vertical avec palissage	2010	Italy	Consoli et Barbagallo (2012)
0,34	0,65	Merlot	Vertical avec palissage	2007/2008-2009	Chili	Carrasco-Benavides <i>et al.</i> (2012)
0,50 ^a	1,25 ^a	Albariño	Vertical avec palissage	2008 à 2010	Espagne	Fandiño <i>et al.</i> (2012)

a. K_c vignes enherbées calculé à partir des K_{cb} de l'article et de leurs estimations moyennes du K_e

mars, les valeurs de K_c -NDVI de cette date ont été utilisées pour tout le mois de mars, pouvant expliquer une partie de l'écart.

De plus, les totaux calculés avec les coefficients cultureux de validation sont cohérents avec ceux estimés par Morábito *et al.* (2002) avec les données de la station de Chacras de Coria. Il apparaît donc que la méthode analytique n'est pas adaptée pour l'estimation de l' ET_c dans ces conditions. Une analyse sur une autre campagne d'étude permettrait de confirmer ce résultat. Une calibration de certaines équations empiriques utilisées dans les calculs des résistances aérodynamiques et de la canopée peut être nécessaire. La méthode du K_c -NDVI, qui est la plus simple à mettre en oeuvre produit des résultats cohérents avec les estimations attendues sur le site. Cependant, les corrélations modérées impliqueraient une calibration de l'équation empirique et des tests sur une autre saison végétative pour vérifier la stabilité de la relation.

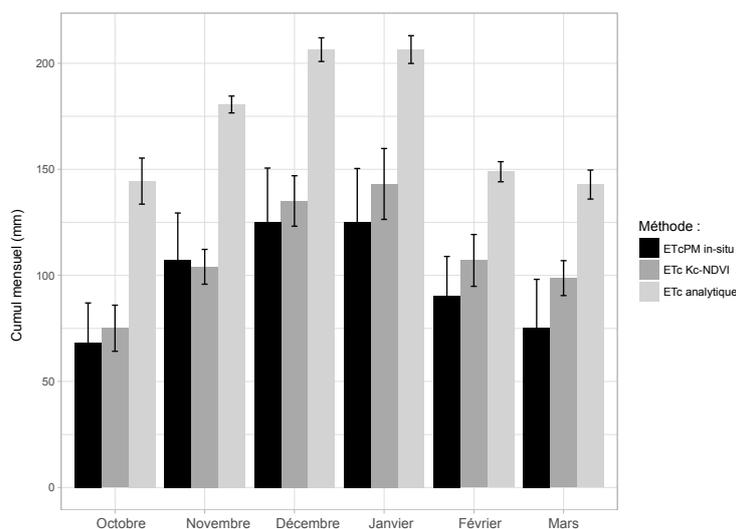


Figure 9.7 – Cumuls mensuels moyens de l'évapotranspiration potentielle et écart-types associées

9.3.5 Cartographie de l'évapotranspiration potentielle et des besoins en eau de la vigne

Les estimations de l'évapotranspiration potentielle par la méthode du K_c -NDVI ont été utilisées pour spatialiser à l'échelle de la zone d'étude les cumuls bi-mensuels de l'évapotranspiration potentielle des vignobles et l'estimation des besoins en eau. La figure 9.8 présente la spatialisation sur les parcelles de l'ensemble de la zone d'étude de l'évapotranspiration potentielle et des besoins en eau pour quelques dates exemples.

Ces cartes mettent en évidence, l'augmentation de l'évapotranspiration avec la croissance végétative et permettent d'estimer les besoins à l'échelle parcellaire à partir des précipitations nettes calculées pour chaque parcelles à partir des données de LAI dérivées du MTVI2. L'estimation des besoins en eau dépend en plus d'estimations de l' ET_c précises et de données fiables de précipitations. Dans ce chapitre, les données d'une station sur le site d'étude ont été utilisées. Bien que les données de température et de radiation solaire soient de bonne qualité, les données de précipitations présentent des valeurs supérieures aux données des stations officielles pour le mois de février 2015. Cependant, ne disposant pas de l'historique de la station et de données suffisantes d'une autre station proche, les données n'ont pas été corrigées. De plus, la répartition des précipitations sous forme d'orages pouvant être très localisés rend difficile la comparaison des données de précipitations entre elles lorsque les stations sont éloignées de plusieurs dizaines de kilomètres.

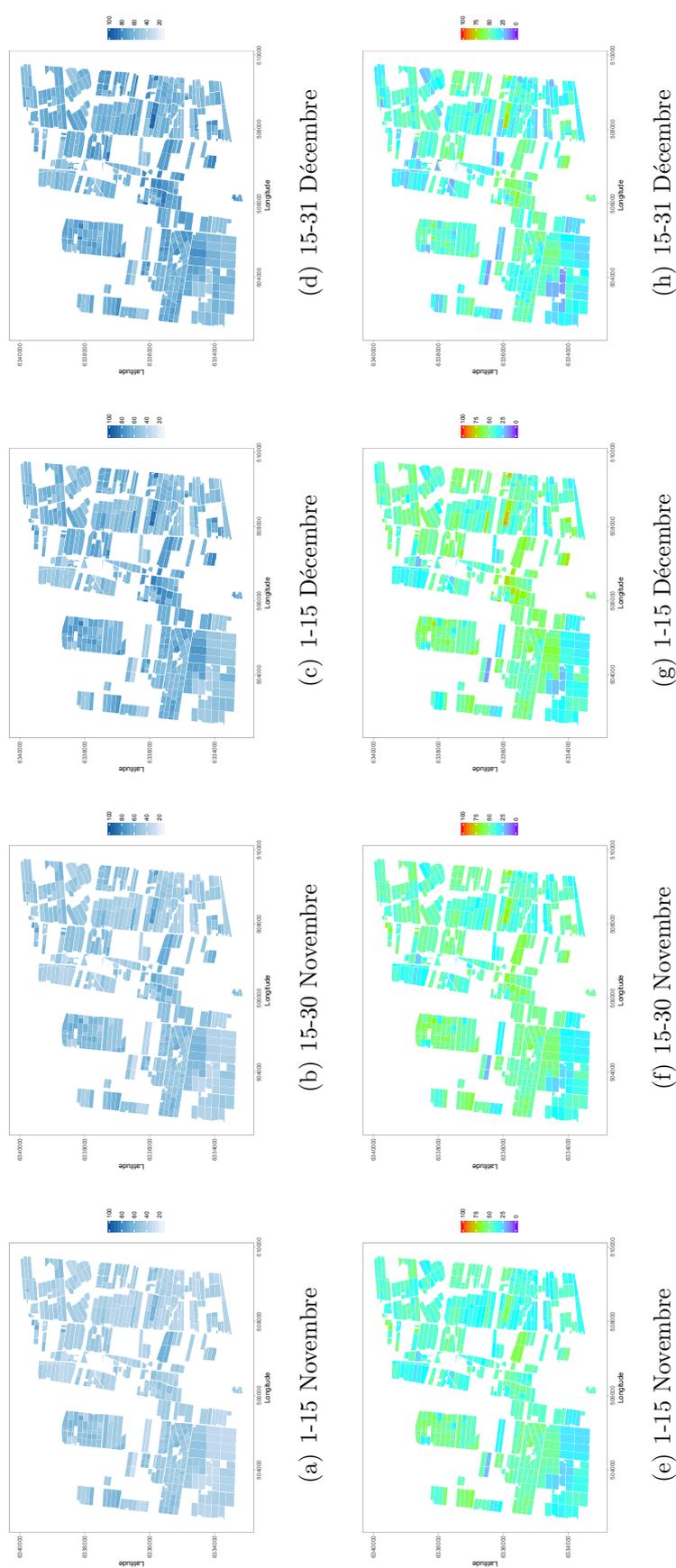


Figure 9.8 – Estimations bimensuelles de l'évapotranspiration potentielle des vignes calculées à partir du K_c -NDVI (a) à (d)) et des besoins en eau associés (a) à (d)) et à partir de la méthode analytique (e) à (h) durant les mois de novembre et décembre 2014

9.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer les performances de deux méthodes classiques d'estimation de l'évapotranspiration à partir de données satellitaires optiques associées à des relevés météorologiques. Les résultats ont révélé que la méthode la plus simple du K_c -NDVI fournit les données les plus cohérentes dans le contexte climatique local et des données de terrain disponibles. Cependant, il serait pertinent de refaire l'analyse sur plusieurs campagnes d'étude afin de vérifier la stabilité de la relation. De plus, les données de validation utilisées sont basées sur des équations empiriques. Des mesures directes à l'aide d'un lysimètre seraient nécessaires avant d'envisager une opérationnalisation de la méthode. Enfin, la méthode analytique, si elle était calibrée de manière à adapter les équations au contexte viticole et aux caractéristiques du site, pourrait être une option pertinente.

La spatialisation des besoins en eau avec la méthode du K_c -NDVI demeure un résultat préliminaire prometteur. Basé sur une méthode simple, un outil d'aide à la décision pourrait être fourni aux viticulteurs afin de contribuer à l'optimisation des apports en eau. Ceci pourrait ainsi contribuer à réaliser des économies d'eau. Cependant, actuellement le frein majeur au déploiement d'un tel outil reste la mise à disposition de données météorologiques de qualité sur la province. Bien que la DACC mette à disposition sa base de données en ligne, la qualité n'est pas encore suffisante.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Dans le contexte du changement climatique, les pratiques culturales sont un des leviers principaux d'adaptation à court et moyen termes au changement climatique. En Argentine, la caractérisation des tendances d'évolution du climat et de sa variabilité intra-régionale contribue à identifier les possibilités d'adaptation à travers l'optimisation des pratiques culturales à l'échelle locale. C'est pourquoi cette thèse visait à répondre aux questions suivantes : Quelles sont les trajectoires d'évolution du climat en Argentine et les facteurs d'atténuation à l'échelle locale ? Quel est le potentiel des images satellitaires optiques et radar pour la cartographie et le suivi de la croissance de la vigne et des pratiques culturales d'intérêt dans le contexte du changement climatique ? Enfin, les données satellitaires peuvent-elles contribuer à évaluer les besoins en eau de la vigne et aboutir à une meilleure gestion de l'eau en viticulture ?

La première partie de la thèse a dressé un état des lieux des connaissances sur la physiologie de la vigne. L'impact du climat sur le contrôle de la physiologie en fait la variable majeure de la définition du potentiel viticole d'une région. La variabilité climatique annuelle caractérise quant à elle l'effet millésime. La dépendance des différents niveaux d'échelles du climat dans la définition du potentiel viticole a également été présentée ainsi que les rôles modérateurs ou accentuateurs du sol et des pratiques culturales. L'état de l'art des recherches menées en télédétection pour les applications viticoles a mis en évidence les nombreux travaux déjà réalisés en télédétection optique appliqués aux problématiques viticoles. En particulier, les recherches sur l'utilisation des indices de végétation pour l'estimation des paramètres quantitatifs de la vigne tels que la vigueur et les rendements justifient leur utilisation dans cette thèse. L'échelle régionale ou intra-parcellaire majoritaire dans les travaux existants ouvre également la voie à l'élaboration de produits à une échelle intermédiaire. Néanmoins, dans ce cas des effets liés à la diversité des combinaisons de pratiques culturales sont à considérer. De plus, le faible nombre de travaux portant sur l'emploi des données RSO en viticulture semble s'expliquer en partie

par le fort impact du sol sous-jacent et des pratiques culturales comme l'orientation des rangs et la rugosité du sol sur le signal. Ces effets varient également en fonction des fréquences utilisées. Ainsi, le choix des bandes X et C apparaît pertinent pour diminuer les effets dus à l'orientation des rangs.

La deuxième partie de la thèse a été consacrée à deux objectifs. Le premier concernait l'analyse de l'évolution du climat des différentes régions viticoles d'Argentine. Il a été montré qu'une augmentation des températures est présente avec une rupture statistique de l'homogénéité de la série autour de l'année 1985. Après cette rupture, la proportion de saisons végétatives plus chaudes et plus humides que la moyenne augmente. Les indices bioclimatiques, corrélés avec la physiologie de la vigne, augmentent également sur la période. Les résultats de ce chapitre sont cohérents avec les modélisations des scénarios RCP 4.5 et 8.5 (correspondant au scénario le plus optimiste et le plus pessimiste). Les deux scénarios projettent respectivement une augmentation de la température moyenne annuelle de 1.5°C et 3°C. Néanmoins, ces résultats caractérisent l'évolution du climat régional dans son ensemble et sont basés sur les données des stations officielles du réseau SMN. Or, les vignobles sont dans la plupart des provinces viticoles localisés à une altitude plus élevée et dans un contexte topographique variable.

C'est pourquoi le deuxième objectif visait à analyser les facteurs de variabilité spatiale du mésoclimat dans la province de Mendoza à partir des données du réseau de la DACC installées dans les différentes oasis de la province. Cependant, le grand nombre de données incomplètes et leur qualité hétérogène a réduit le jeu de données à la moitié des stations sur une campagne végétative. Ainsi une approche d'analyse par co-inertie a été réalisée afin de déterminer les facteurs topographiques et géographiques de variabilité des indices agroclimatiques au sein des cinq aires de production viticoles de Mendoza. Les résultats ont mis en évidence le rôle de l'altitude des stations dans la diminution des températures et l'augmentation de la fraîcheur nocturne durant la maturation. D'autre part, l'éloignement à la cordillère semble jouer un rôle dans l'augmentation des précipitations durant la saison végétative. La variation des conditions agroclimatiques observées a mis en évidence une cohérence théorique entre l'orientation qualitative des aires de production et leur positionnement en altitude à proximité de la cordillère des Andes. Toutefois, l'analyse mériterait d'être réalisée en prenant en compte un plus grand nombre de stations et d'années d'études. Avec un tel jeu de données, une quantification plus précise de l'effet des conditions topographiques sur les variables agroclimatiques serait possible. La volonté de la DACC d'améliorer la maintenance de ses stations et d'agrandir le réseau, rend cette analyse possible dans le futur.

La troisième partie de l'analyse a été réalisée à l'échelle locale. Cette dernière correspond à l'échelle de mise en place des stratégies d'adaptation par l'intermédiaire des pratiques culturales. L'objectif de cette partie était d'identifier le potentiel des images

optiques et radar pour caractériser les pratiques culturales des vignobles et réaliser un suivi de la croissance végétative et des besoins en eau de la vigne.

Le premier objectif de cette partie a consisté à estimer l'orientation des rangs des vignes à partir des images Pléiades. Une méthode employée avec succès sur les grandes cultures dans le Sud-Ouest de la France a été utilisée (Marais Sicre *et al.*, 2014). L'application de cette méthode aux deux résolutions spatiales offertes par les images Pléiades a permis de déterminer qu'une résolution spatiale supérieure à 2 m est nécessaire afin d'obtenir une estimation précise. A une échelle inférieure, lorsque le motif orienté n'est pas clairement discernable, les hétérogénéités intra-parcellaires biaisent de manière trop importante la détection du gradient. Il faut également souligner que cette méthode ne peut pas s'adapter aux cas des vignobles présentant des rangs non linéaires car elle considère une orientation globale sur la parcelle et non locale. En plus de ses applications dans la caractérisation du micro-climat des vignes, la cartographie de l'orientation des rangées de vignes a permis d'identifier l'influence de l'orientation des rangs sur les variables issues des images RSO en bande X.

En effet, bien que l'état de l'art n'ait pas indiqué d'augmentation des coefficients de rétrodiffusion en bande X avec l'augmentation de l'angle azimutal, les résultats sur le site d'étude sont en partie contradictoires. Un effet de l'angle azimutal, lorsque sa valeur est égale à 90°, est mis en évidence. Cet effet a également un impact sur la signature temporelle des variables polarimétriques (entropie et angle alpha). L'autre pratique culturale identifiée ayant un impact significatif sur les signatures est l'enherbement de l'inter-rang. Ce dernier ajoute en optique un bruit lié au supplément variable d'activité photosynthétique dû à leur vigueur variable. Sur les images RSO, l'enherbement des inter-rangs ajoute une source supplémentaire de diffusion volumique. Ainsi, l'évaluation du potentiel des images optiques et radar pour le suivi de la croissance de la vigne a tenu compte de l'effet de ces pratiques culturales sur les signatures temporelles. Les résultats ont montré que le MTVI2 est l'indice de végétation le plus corrélé à la croissance végétative. Ses performances atteignent un coefficient d'ajustement de 0.88 dans le cas des parcelles désherbées par labour, 0.87 pour les parcelles désherbées par traitement chimique et 0.5 pour les parcelles enherbées. Les variables RSO sont également performantes, particulièrement pour l'estimation de la hauteur. L'entropie est la variable la plus corrélée ($R^2=0.81$ pour les parcelles aux inter-rangs labourés et 0.68 pour les parcelles aux rangs enherbées) sauf dans le cas des parcelles désherbées chimiquement qui présentent un angle azimutal de 90°. Pour ces dernières l'angle alpha est la variable corrélée. Bien que ces résultats soient prometteurs, il serait pertinent d'évaluer ces relations sur plusieurs campagnes d'étude. Un échantillonnage plus important pourrait aussi permettre de tenter d'évaluer l'impact séparé de l'inter-rang lisse et de l'angle azimutal à 90°.

Ensuite, la classification des types d'inter-rangs combinée à la détection des filets anti-grêle a été réalisée ainsi que celle du mode d'irrigation des parcelles. La première classification a montré l'importance des données RSO et de la segmentation préalable

de la gestion des inter-rangs pour cartographier les surfaces protégées par des filets anti-grêles. Ces derniers sont détectés par les images optiques et en particulier les variations de réflectance qu'ils entraînent dans le proche infra-rouge. Concernant la cartographie des modes de gestion de l'irrigation, les images RSO sont les plus pertinentes, quelque soit leur date d'acquisition. Les résultats ont mis en évidence la forte corrélation entre le système d'irrigation choisi et la gestion de l'inter-rang qui en dépend. En effet, les parcelles irriguées par méthode gravitaire présentent un inter-rang labouré. Ces classifications ont permis la cartographie de ces pratiques à l'échelle de toute la zone d'étude. Cependant, toutes les combinaisons de pratiques possibles n'ont pas été échantillonnées sur le site d'étude principal, comme l'équipement en filet anti-grêle des parcelles labourées et le cas des pratiques culturales alternées dans les inter-rangs. Ainsi, un indicateur de confiance basé sur la proportion des votes de chaque classe choisie a été spatialisé afin de déterminer, les éventuelles erreurs de classification et d'aiguiller un nouvel échantillonnage de pratiques culturales pour compléter l'analyse.

Enfin, le potentiel des données optiques pour l'estimation de l'évapotranspiration des vignobles et la cartographie des besoins en eau a été évalué. Deux méthodes basées sur le couplage des relevés météorologiques et des variables satellitaires ont été comparées. La méthode analytique entraîne une surestimation importante de l'évapotranspiration et une calibration des équations empiriques qu'elle intègre apparaît nécessaire pour une utilisation de la méthode. La méthode K_c -NDVI aboutit à des valeurs d'évapotranspiration de l'ordre de grandeur des données de validation. La corrélation moyenne entre les deux mesures suggère qu'une calibration de la méthode serait préférable pour une application véritable en viticulture. A partir de l'estimation de l'évapotranspiration, les besoins en eau de la vigne ont été estimés à l'échelle de toute la zone d'étude. Ces cartes peuvent permettre aux viticulteurs d'adapter leurs apports d'eau sur les parcelles en fonction des besoins et du stade de développement des vignes. Dans le contexte de la réduction des quantités d'eau disponibles pour la viticulture modélisées par les scénarios du changement climatique, la meilleure gestion de l'irrigation est un enjeu majeur de la filière viticole. Mais l'estimation des besoins en eau nécessite des données de précipitations de bonne qualité qui représente un facteur limitant supplémentaire dans le contexte actuel de disponibilités des données sur la province de Mendoza.

L'originalité de cette thèse réside en premier lieu dans son positionnement disciplinaire à l'interface entre l'agronomie, la télédétection et la climatologie. Dans le contexte du changement climatique, la détermination de la trajectoire d'évolution du climat est un élément essentiel pour identifier les leviers d'adaptation à l'échelle locale. Toutefois, pour mettre en place les stratégies d'adaptation, un état des lieux du système actuel et le suivi de son évolution est également nécessaire. L'utilisation des données de télédétection et la production de produits thématiques pour les différents membres de la filière apparaît donc ici pertinente.

L'autre nouveauté de ces travaux consiste en l'évaluation des données RSO pour l'étude des vignobles. Les différents chapitres ont permis d'améliorer les connaissances sur l'interaction signal cible entre la vigne et les paramètres dérivés des images RSO en bande X.

Enfin, la spatialisation de l'information à l'échelle parcellaire sur toute une zone d'étude, en tenant compte des biais liés à la variété des pratiques culturales, est également une avancée des applications de la télédétection en viticulture. Bien entendu, les travaux de cette thèse ne sont pas exhaustifs en matière de combinaison des pratiques culturales. Mais ils constituent notamment une première analyse comparée du potentiel des données satellitaires pour le suivi de la croissance de la vigne en fonction de l'enherbement ou non des inter-rangs.

Ce travail de thèse ouvre ainsi plusieurs perspectives pour contribuer à aider les acteurs de la filière vitivinicole mendocienne à s'adapter à court et moyen termes au changement climatique et à mieux gérer la ressource en eau sur les oasis.

Tout d'abord avec la disponibilité des données optiques et radar de la constellation de satellites Sentinel, le développement de nouveaux produits pour l'agriculture, à haute revisite temporelle et sur une emprise spatiale importante, est possible. L'évaluation des données des capteurs Sentinel-1 et 2 pour la cartographie de l'équipement en filets anti-grêle contribuerait à mieux estimer les dommages dus aux orages de grêle sur les différentes aires de production. De plus, une cartographie répétée des modes d'irrigation permettrait de suivre la modernisation des systèmes d'irrigation.

Ensuite, à partir de l'évaluation des pratiques culturales qui ont un impact sur les signatures temporelles et des données Sentinel-1 et 2, il est envisageable de réaliser un suivi de la croissance végétative de la vigne sur les différentes aires de production. Avec une haute fréquence de revisite temporelle, il serait possible de dériver des indicateurs de la croissance de la vigne. L'utilisation de ces données pourraient également être assimilées dans des modèles agroclimatiques tels que le modèle multi-agents SEVE (Tissot *et al.*, 2017). Celui-ci simule le cycle de développement des vignes et les pratiques culturales afin d'évaluer l'impact des différentes stratégies sur le rendement et la qualité des raisins en fonction des conditions météorologiques. Il a été développé dans le cadre des projets GICC-TERRADCLIM et LIFE ADVICLIM.

Enfin, l'enjeu majeur de la province de Mendoza dans les décennies à venir est la gestion de la ressource en eau. Dans ce contexte, le suivi de la croissance des vignes et l'estimation de leurs besoins en eau, constitue un outil potentiel très intéressant pour les viticulteurs. Mais, le développement d'un tel outil est aussi dépendant de l'existence de données météorologiques de qualité sur la province. Les données de radiation solaire disponibles sur quelques stations du réseau de la DACC sont de mauvaise qualité et sur place la Catédra de Meteorología Agrícola travaille sur une régionalisation des coefficients de Hargreaves pour mieux estimer l' ET_p à partir des données de températures. Associés

à une bonne maintenance des stations du réseau de la DACC et à la spatialisation des besoins en eau des cultures par télédétection, un vrai service pourrait être proposé aux viticulteurs pour améliorer leurs stratégies d'irrigation.

BIBLIOGRAPHIE

- ACEVEDO-OPAZO, C., TISSEYRE, B., GUILLAUME, S. et OJEDA, H. (2008). The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status. *Precision Agriculture*, 9(5):285–302.
- ADAMS, D. O. (2006). Phenolics and ripening in grape berries. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57(3):249–256.
- AGOSTA, E., CANZIANI, P. et CAVAGNARO, M. (2012). Regional climate variability impacts on the annual grape yield in Mendoza, Argentina. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(6):993–1009.
- AGOSTA, E., CAVAGNARO, M. et CANZIANI, P. (2010). El rendimiento de vid y las variaciones de temperatura y precipitación en Mendoza. *Revista Enología*, 2:12 p.
- AGUILERA, R. et MORÁBITO, J. A. (2016). Encuesta a técnicos sobre el uso de la información meteorológica y manejo del riesgo en el oasis norte de Mendoza. *In Recursos Hídricos, Evaluación, Planificación y Gestión*.
- AKDIM, N., ALFIERI, S. M., HABIB, A., CHOUKRI, A., CHERUIYOT, E., LABBASSI, K. et MENERTI, M. (2014). Monitoring of irrigation schemes by remote sensing : Phenology versus retrieval of biophysical variables. *Remote Sensing*, 6(6):5815–5851.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. et OTHERS (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome*.
- AMERINE, M. et WINKLER, A. (1944). Composition and quality of musts and wines of California grapes. *California Agriculture*, 15(6):493–675.
- ANTCLIFF, A. J. (1988). Taxonomy-the grapevine as a member of the plant kingdom. *Viticulture*, 1:107–118.
- ARUANI, C. (2011). *Cambio Climático y Vitivinicultura En Argentina : Evaluación de La Situación Actual y Proyecciones Futuras, En Base a Datos Empíricos y Opiniones de Los Diferentes Sectores de La Industria*. Informe final–Beca de investigación Organización Internacional del Vino.

- ASSELIN, C., BARBEAU, G. et MORLAT, R. (2001). Approche de la composante climatique à diverses échelles dans le zonage viticole. *Bulletin de l'OIV*, 74(843-44):301–318.
- ATZBERGER, C. (2013). Advances in remote sensing of agriculture : Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote Sensing*, 5(2):949–981.
- AUBERT, M., BAGHDADI, N., ZRIBI, M., DOUAOUI, A., LOUMAGNE, C., BAUP, F., EL HAJJ, M. et GARRIGUES, S. (2011). Analysis of TerraSAR-X data sensitivity to bare soil moisture, roughness, composition and soil crust. *Remote Sensing of Environment*, 115(8):1801–1810.
- AVENANT, J. H. (1995). The effect of hail netting on the performance of table grapes *Vitis vinifera* (L.) in the summer rainfall region. *Suid-Afrikaanse Tydskrif vir Natuurwetenskap en Tegnologie*, 14(3):85–91.
- BAGGIOLINI, M. (1952). Les stades repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. *Revue romande d'Agriculture et d'Arboriculture*, 8(1):4–6.
- BAGHDADI, N., BERNIER, M., GAUTHIER, R. et NEESON, I. (2001). Evaluation of C-band SAR data for wetlands mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 22(1):71–88.
- BAGHDADI, N., HOLAH, N., DUBOIS-FERNANDEZ, P., DUPUIS, X. et GARESTIER, F. (2006). Evaluation of polarimetric L-and P-bands RAMSES data for characterizing Mediterranean vineyards. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(6):380–389.
- BAGHDADI, N., KING, C., BOURGUIGNON, A. et REMOND, A. (2002). Potential of ERS and RADARSAT data for surface roughness monitoring over bare agricultural fields : Application to catchments in Northern France. *International journal of remote sensing*, 23(17):3427–3442.
- BAGHDADI, N., ZRIBI, M., LOUMAGNE, C., ANSART, P. et ANGUELA, T. P. (2008). Analysis of TerraSAR-X data and their sensitivity to soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sensing of Environment*, 112(12):4370–4379.
- BARBEAU, G. (2008). Influence du fonctionnement de la vigne sur la qualité du vin. *Proceedings of VI Foro Mundial del Vino. Logroño, España*, 24.
- BARBEAU, G., MORLAT, R., ASSELIN, C., JACQUET, A. et PINARD, C. (1998). Comportement du cépage Cabernet franc dans différents terroirs du Val de Loire. Incidence de la précocité sur la composition de la vendange en année climatique normale (exemple de 1988). *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 32(2):69–81.
- BARBEAU, G., REBRETEAU, A., BOUVET, M.-H., MEGE, A., COSNEAU, M., ASSELIN, C. et CADOT, Y. (2001). Influence des composantes du terroir et du climat sur la

- surmaturation des baies de chenin (*Vitis vinifera*). Relations avec l'analyse sensorielle des vins. *Revue Française d'Oenologie*, 188:22–28.
- BARROS, V. R., BONINSEGNA, J. A., CAMILLONI, I. A., CHIDIAC, M., MAGRÍN, G. O. et RUSTICUCCI, M. (2015). Climate change in Argentina : Trends, projections, impacts and adaptation. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change*, 6(2):151–169.
- BELLMAN, R. B. et GALLANDER, J. F. (1979). Wine deacidification. *Advances in Food Research*, 25:1–53.
- BELLVERT, J., MARSAL, J., GIRONA, J. et ZARCO-TEJADA, P. J. (2015). Seasonal evolution of crop water stress index in grapevine varieties determined with high-resolution remote sensing thermal imagery. *Irrigation science*, 33(2):81–93.
- BELLVERT, J., ZARCO-TEJADA, P. J., GIRONA, J. et FERERES, E. (2014). Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard : Comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision agriculture*, 15(4):361–376.
- BELMONTE, A. C., JOCHUM, A. M., GARCÍA, A. C., RODRÍGUEZ, A. M. et FUSTER, P. L. (2005). Irrigation management from space : Towards user-friendly products. *Irrigation and Drainage Systems*, 19(3):337–353.
- BETBEDER, J. (2015). *Evaluation Des Données de Télédétection Pour l'identification et La Caractérisation Des Continuités Écologiques*. Thèse de doctorat, Université Rennes 2.
- BETBEDER, J., FIEUZAL, R., PHILIPPETS, Y., FERRO-FAMIL, L. et BAUP, F. (2016). Contribution of multitemporal polarimetric synthetic aperture radar data for monitoring winter wheat and rapeseed crops. *Journal of applied remote sensing*, 10(2):026020.
- BIANCHI, A. et CRAVERO, A. (2010). Atlas climático de la República Argentina. *Ed. INTA. Buenos Aires*.
- BLOUIN, J. (2007). *Le Dictionnaire de La Vigne et Du Vin*. Dunod.
- BONNARDOT, V., PLANCHON, O. et CAUTENET, S. (2005). Sea breeze development under an offshore synoptic wind in the South-Western Cape and implications for the Stellenbosch wine-producing area. *Theoretical and Applied Climatology*, 81(3):203–218.
- BONNEFOY, C. (2013). *Observation et Modélisation Spatiale de La Température Dans Les Terroirs Viticoles Du Val de Loire Dans Le Contexte Du Changement Climatique*. Thèse de doctorat, Université Rennes 2.

- BONNEFOY, C., QUÉNOL, H., BONNARDOT, V., BARBEAU, G., MADELIN, M., PLANCHON, O. et NEETHLING, E. (2013). Temporal and spatial analyses of temperature in a French wine-producing area : The Loire Valley. *International Journal of Climatology*, 33(8):1849–1862.
- BORGOGNO-MONDINO, E., LESSIO, A., TARRICONE, L., NOVELLO, V. et DE PALMA, L. (2017). A comparison between multispectral aerial and satellite imagery in precision viticulture. *Precision Agriculture*, pages 1–23.
- BRADEN, H. (1985). Ein energiehaushalts-und verdunstungsmodell for wasser und stoffhaushaltsuntersuchungen landwirtschaftlich genutzer einzugsgebiete. *Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 42:294–299.
- BRAMLEY, R. G. V. (2001). Progress in the development of Precision Viticulture - variation in yield, quality and soil properties in contrasting Australian vineyards. In *Precision Tools for Improving Land Management*, pages 25–43, Palmerston North, New Zealand. Currie, LD ; Loganathan, P.
- BRAMLEY, R. G. V. (2005). Understanding variability in winegrape production systems 2. Within vineyard variation in quality over several vintages. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 11(1):33–42.
- BRAMLEY, R. G. V. et HAMILTON, R. P. (2004). Understanding variability in winegrape production systems. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 10(1):32–45.
- BRANAS, J., BERNON, G. et LEVADOUX, L. (1946). *Eléments de Viticulture Générale*. Ecole Nationale d'Agriculture de Montpellier, Montpellier.
- BREIMAN, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1):5–32.
- BRICHE, É. (2011). *Changement Climatique Dans Le Vignoble de Champagne : Modélisation Thermique à Plusieurs Échelles Spatio-Temporelles (1950-2100)*. Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot-Paris VII.
- BRISCO, B., BROWN, R. J., SNIDER, B., SOFKO, G. J., KOEHLER, J. A. et WACKER, A. G. (1991). Tillage effects on the radar backscattering coefficient of grain stubble fields. *Remote Sensing*, 12(11):2283–2298.
- BURINI, A. (2009). *Vineyard Precision Farming by Means of Satellite Data : Optical and Polarimetric Radar Data Safeguarding the Frascati d.o.c. Area*. Thèse de doctorat, Tor Vergata University, Rome.
- BURINI, A., DEL FRATE, F., MINCHELLA, A., SCHIAVON, G., SOLIMINI, D., BIANCHI, R., FUSCO, L. et HORN, R. (2006). Multi-temporal high-resolution polarimetric L-band SAR observation of a wine-producing landscape. In *Geoscience and Remote Sensing*

- Symposium, 2006. IGARSS 2006. IEEE International Conference On*, pages 501–503, Denver. IEEE.
- BUSTOS, R. M. (2013). Disputas por el agua en Mendoza y persistencia de las explotaciones familiares vitícolas. *In Jornadas de Sociología de La Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de La Universidad Nacional de Cuyo*, pages 1–15, Mendoza, Argentina.
- BUTTROSE, M. S., HALE, C. R. et KLEWER, W. M. (1971). Effect of temperature on the composition of 'Cabernet Sauvignon' berries. *American Journal of Enology and Viticulture*, 22(2):71–75.
- CABRÉ, M. F., QUÉNOL, H. et NUÑEZ, M. (2016). Regional climate change scenarios applied to viticultural zoning in Mendoza, Argentina. *International journal of biometeorology*, 60(9):1325–1340.
- CAMPBELL-CLAUDE, J. M. (1998). Stomatal response of grapevines to wind. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38(1):77–82.
- CAMPOS, I., BOTETA, L., BALBONTÍN, C., FABIÃO, M., MAIA, J. et CALERA, A. (2012). Remote sensing based water balance to estimate evapotranspiration and irrigation water requirements. Case study : Grape vineyards. *Options Méditerranéennes*, pages 85–94.
- CANZIANI, P. O. et SCAREL, E. A. (2010). South American Viticulture, Wine Production, and Climate Change.
- CARBONNEAU, A. (1984). Place du microclimat de la partie aérienne parmi les facteurs déterminant les productions viticoles. *Bulletin de l'OIV*, 1:473–477.
- CARBONNEAU, A., DELOIRE, A. et JAILLARD, B. (2007). *La Vigne : Physiologie, Terroir, Culture*. Dunod Paris.
- CARRASCO-BENAVIDES, M., ORTEGA-FARÍAS, S., LAGOS, L. O., KLEISSL, J., MORALES, L., POBLETE-ECHEVERRÍA, C. et ALLEN, R. G. (2012). Crop coefficients and actual evapotranspiration of a drip-irrigated Merlot vineyard using multispectral satellite images. *Irrigation Science*, 30(6):485–497.
- CARRASCO-BENAVIDES, M., ORTEGA-FARÍAS, S., LAGOS, L. O., KLEISSL, J., MORALES-SALINAS, L. et KILIC, A. (2014). Parameterization of the Satellite-Based Model (METRIC) for the Estimation of Instantaneous Surface Energy Balance Components over a Drip-Irrigated Vineyard. *Remote Sensing*, 6(11):11342–11371.
- CASTELLANO, S., MUGNOZZA, G. S., RUSSO, G., BRIASSOULIS, D., MISTRITOTIS, A., HEMMING, S. et WAAIJENBERG, D. (2008). Plastic nets in agriculture : A general review of types and applications. *Applied Engineering in Agriculture*, 24(6):799–808.

- CHAMPAGNOL, F. (1997). Caractéristiques édafiques et potentialités qualitatives des terroirs du vignoble languedocien. *Progr. Agric. Vitic*, 114(7):157–166.
- CHEN, J. M. et BLACK, T. A. (1992). Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment*, 15(4):421–429.
- CHOISNEL, E. (1986). Aspects topoclimatiques : Une méthodologie d'étude en région de moyenne montagne. *Agrométéorologie des régions de moyenne montagne*, 39:177–195.
- CHOISNEL, E. (1996). Les échelles d'espace et de temps en climatologie. *Rubrique : Climatologie*.
- CHOU, S. C., LYRA, A., MOURÃO, C., DEREZYNSKI, C., PILOTTO, I., GOMES, J., BUSTAMANTE, J., TAVARES, P., SILVA, A., RODRIGUES, D. et OTHERS (2014). Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3(5):512–525.
- CHOUDHURY, B. J., AHMED, N. U., IDSO, S. B., REGINATO, R. J. et DAUGHTRY, C. S. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote sensing of environment*, 50(1):1–17.
- CLOUDE, S. (2007). The dual polarization entropy/alpha decomposition : A PALSAR case study. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry*, pages 1–6, Frascati. ESA Publications.
- CLOUDE, S. R. et POTTIER, E. (1996). A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2):498–518.
- COMPANY, A., KING, C. et DELPONT, G. (1994). Potentiel des hyperfréquences pour la discrimination des rugosités de surface : Campagne E-sar sur le vignoble du Réart (Roussillon). Rapport technique, BRGM.
- CONGALTON, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment*, 37(1):35–46.
- CONSOLI, S. et BARBAGALLO, S. (2012). Estimating water requirements of an irrigated mediterranean vineyard using a satellite-based approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(10):896–904.
- COOMBE, B. G. et MCCARTHY, M. G. (2000). Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6(2):131–135.

- COULON, C. (2012). *Méthode de Caractérisation Systémique Du Fonctionnement de La Vigne à Partir de l'évaluation Des Effets Combinés Du Milieu et Des Pratiques Culturelles Pour Prévoir Les Types de Vins*. Thèse de doctorat, Université d'Angers.
- CUNHA, M., MARCAL, A. R. et SILVA, L. (2010a). Very early prediction of wine yield based on satellite data from VEGETATION. *International Journal of Remote Sensing*, 31(12):3125–3142.
- CUNHA, M., MARCAL, A. R. et RODRIGUES, A. (2010b). A comparative study of satellite and ground-based vineyard phenology. *In Proc. 29th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories*, pages 68–77, Muenster.
- DACC (2015). Análisis agrometeorológico, Oasis Este, Campaña vitícola 2014-2015. http://www.contingencias.mendoza.gov.ar/web1/agrometeorologia/pdf/este/tempvit_2014-2015_e.pdf.
- DAMI, I. E., ENNAHLI, S. et ZHANG, Y. (2012). Assessment of winter injury in grape cultivars and pruning strategies following a freezing stress event. *American journal of enology and viticulture*, 63(1):106–111.
- DAVID BALLESTER-BERMAN, J., GARMENDIA-LOPEZ, I., LOPEZ-SANCHEZ, J. M. et MANGAS-MARTIN, V. J. (2012). Analysis of the polarimetric response of vineyards at C-band. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 38(3):223–239.
- DE BORBÓN, L., MERCADO, L. et LÓPEZ, M. (2008). Influencia del clima en bayas y mostos de las variedades Bonarda y Syrah Mendoza (Argentina). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 40(2):83–89.
- DELENNE, C. (2006). *Extraction et Caractérisation Des Vignes à Partir de Données de Télédétection à Très Haute Résolution Spatiale : Application En Languedoc-Roussillon Pour La Constitution de Bases de Données Géographiques*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (Paris ; Nancy).
- DELENNE, C., DURRIEU, S., RABATEL, G. et DESHAYES, M. (2010). From pixel to vine parcel : A complete methodology for vineyard delineation and characterization using remote-sensing data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70(1):78–83.
- DELENNE, C., DURRIEU, S., RABATEL, G., DESHAYES, M., BAILLY, J. S., LELONG, C. et COUTERON, P. (2008). Textural approaches for vineyard detection and characterization using very high spatial resolution remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4):1153–1167.
- DELENNE, C., RABATEL, G., AGURTO, V. et DESHAYES, M. (2006). Vine plot detection in aerial images using fourier analysis. *In 1st International Conference on Object-Based Image Analysis (OBIA 2006)*.

- DELOIRE, A. (2007). Le raisin : Les composés phénoliques. http://www.obs-viti-cg34.com/viti/download_file.jsp?id_doc=1021.
- DEMAREZ, V., DUTHOIT, S., BARET, F., WEISS, M. et DEDIEU, G. (2008). Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(4):644–655.
- DEREUDDRE, J., AUDRAN, J., LEDDET, C., BARKA, E. A., BRUN, O. et OTHERS (1993). Réponse de la vigne (*Vitis vinifera* L) aux températures inférieures à 0 ° C. III. Effets d'un refroidissement contrôlé sur des bourgeons au cours du débourrement. *Agronomie*, 13(6):509–514.
- DOBROWSKI, S. Z., USTIN, S. L. et WOLPERT, J. A. (2002). Remote estimation of vine canopy density in vertically shoot-positioned vineyards : Determining optimal vegetation indices. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 8(2):117–125.
- DOBROWSKI, S. Z., USTIN, S. L. et WOLPERT, J. A. (2003). Grapevine dormant pruning weight prediction using remotely sensed data. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 9(3):177–182.
- DOLÉDEC, S. et CHESSEL, D. (1994). Co-inertia analysis : An alternative method for studying species environment relationships - Google Scholar. *Freshwater Biology*, 31(3): 277–294.
- DOLÉDEC, S., CHESSEL, D., TER BRAAK, C. J. F. et CHAMPELY, S. (1996). Matching species traits to environmental variables : A new three-table ordination method. *Environmental and Ecological Statistics*, 3(2):143–166.
- DOWNEY, M. O., DOKOOZLIAN, N. K. et KRSTIC, M. P. (2006). Cultural practice and environmental impacts on the flavonoid composition of grapes and wine : A review of recent research. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57(3):257–268.
- DRAY, S., CHESSEL, D. et THIOULOUSE, J. (2003). Co-inertia analysis amd the linking of ecological tables. *Ecology*, 84(11):3078–3089.
- DRY, P. R., REED, S. et POTTER, G. (1988). The effect of wind on the performance of Cabernet Franc grapevines. *In Australian Temperate Fruits Review Conference 240*, pages 143–146.
- DUMAS, V., LEBON, E. et MORLAT, R. (1997). Différenciations mésoclimatiques au sein du vignoble alsacien. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 31:1–10.
- D'URSO, G. (2010). Current status and perspectives for the estimation of crop water requirements from Earth Observation. *Italian Journal of Agronomy*, 5(2):107–120.

- EICHHORN, K. W. et LORENZ, D. H. (1977). Phanologische entwicklungsstadien der rebe. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*.
- ER-RAKI, S., RODRIGUEZ, J. C., GARATUZA-PAYAN, J., WATTS, C. J. et CHEHBOUNI, A. (2013). Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. *Agricultural water management*, 122:12–19.
- FANDIÑO, M., CANCELA, J. J., REY, B. J., MARTÍNEZ, E. M., ROSA, R. G. et PEREIRA, L. S. (2012). Using the dual-K c approach to model evapotranspiration of Albarino vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. Albarino) with consideration of active ground cover. *Agricultural Water Management*, 112:75–87.
- FERREIRO-ARMÁN, M., COSTA, J.-P. D., HOMAYOUNI, S. et MARTÍN-HERRERO, J. (2006). Hyperspectral Image Analysis for Precision Viticulture. *In Image Analysis and Recognition*, Lecture Notes in Computer Science, pages 730–741. Springer, Berlin, Heidelberg.
- FIEUZAL, R., BAUP, F. et MARAIS-SICRE, C. (2013). Monitoring wheat and rapeseed by using synchronous optical and radar satellite data—From temporal signatures to crop parameters estimation. *Advances in Remote Sensing*, 2(2):162–180.
- FIORILLO, E., CRISCI, A., DE FILIPPIS, T., DI GENNARO, S., DI BLASI, S., MATESE, A., PRIMICERIO, J., VACCARI, F. et GENESIO, L. (2012). Airborne high-resolution images for grape classification : Changes in correlation between technological and late maturity in a Sangiovese vineyard in Central Italy. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 18(1):80–90.
- FOURMENT, M., FERRER, M., GONZÁLEZ-NEVES, G., BARBEAU, G., BONNARDOT, V. et QUÉNOL, H. (2017). Tannat grape composition responses to spatial variability of temperature in an Uruguay’s coastal wine region. *International Journal of Biometeorology*, pages 1–12.
- FRAGA, H., AMRAOUI, M., MALHEIRO, A. C., MOUTINHO-PEREIRA, J., EIRAS-DIAS, J., SILVESTRE, J. et SANTOS, J. A. (2014). Examining the relationship between the Enhanced Vegetation Index and grapevine phenology. *European Journal of Remote Sensing*, 47:753–771.
- FRAGA, H., MALHEIRO, A. C., MOUTINHO-PEREIRA, J. et SANTOS, J. A. (2012). An overview of climate change impacts on European viticulture. *Food and Energy Security*, 1(2):94–110.
- FREEMAN, A. et DURDEN, S. L. (1998). A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3):963–973.

- FRITZ, T. (2007). TerraSAR-X ground segment level 1b product format specification. *TX-GS-DD-3307*, n°1.3.
- GALET, P. (2000). *Dictionnaire Encyclopédique Des Cépages*. Hachette.
- GERMAIN, C., DA COSTA, J.-P., LAVIALLE, O. et BAYLOU, P. (2003). Multiscale estimation of vector field anisotropy application to texture characterization. *Signal Processing*, 83(7):1487–1503.
- GIACOSA, S., MARENGO, F., GUIDONI, S., ROLLE, L. et HUNTER, J. J. (2015). Anthocyanin yield and skin softening during maceration, as affected by vineyard row orientation and grape ripeness of *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz. *Food chemistry*, 174:8–15.
- GIEC (2013). *Résumé à l'intention Des Décideurs, Changements Climatiques 2013 : Les Éléments Scientifiques. Contribution Du Groupe de Travail I Au Cinquième Rapport d'évaluation Du Groupe d'experts Intergouvernemental Sur l'évolution Du Climat*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, Etats-Unis. [sous la direction de Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, et al.].
- GIRONA, J., MARSAL, J., MATA, M., DEL CAMPO, J. et BASILE, B. (2009). Phenological sensitivity of berry growth and composition of Tempranillo grapevines (*Vitis vinifera* L.) to water stress. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 15(3):268–277.
- GLADSTONES, J. (1992). *Viticulture and Environment*. Winetitles.
- GONG, P., MAHLER, S. A., BIGING, G. S. et NEWBURN, D. A. (2003). Vineyard identification in an oak woodland landscape with airborne digital camera imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(6):1303–1315.
- GONZÁLEZ, G., NAZRALA, J., BELTRÁN, M., NAVARRO, A., DE BORBÓN, L., SENATRA, L., ALBORNOZ, L., HIDALGO, A., LÓPEZ, M., GEZ, M. I. et OTHERS (2009). Caracterización de uvas para vinificar en diferentes regiones de Mendoza (Argentina). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 41(1):165–175.
- GONZÁLEZ-DUGO, M. P., GONZÁLEZ-PIQUERAS, J., CAMPOS, I., ANDREU, A., BALBONTÍN, C. et CALERA, A. (2012). Evapotranspiration monitoring in a vineyard using satellite-based thermal remote sensing. *In Proc. of SPIE Vol*, volume 8531, pages 85310N–1–85310N–8.
- GREER, D. H. et WESTON, C. (2010). Heat stress affects flowering, berry growth, sugar accumulation and photosynthesis of *Vitis vinifera* cv. Semillon grapevines grown in a controlled environment. *Functional Plant Biology*, 37(3):206–214.
- GROSSI GALLEGOS, H. (1998). Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5:33–42.

- GROSSI GALLEGOS, H. et ATIENZA, G. (1991). Determinación de los coeficientes de ajuste de la ecuación de regresión entre las horas de insolación y la radiación global para diferentes zonas de Argentina y distintas épocas del año. *Actas de la V Reunión Nacional de Agrometeorología*, pages 57–62.
- HABOUDANE, D., MILLER, J. R., PATTEY, E., ZARCO-TEJADA, P. J. et STRACHAN, I. B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies : Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote sensing of environment*, 90(3):337–352.
- HADRIA, R., DUCHEMIN, B., BAUP, F., LE TOAN, T., BOUVET, A., DEDIEU, G. et LE PAGE, M. (2009). Combined use of optical and radar satellite data for the detection of tillage and irrigation operations : Case study in Central Morocco. *Agricultural water management*, 96(7):1120–1127.
- HALL, A. (2016). Remote sensing applications in viticulture : Recent advances and new opportunities. *In Proceedings of the 11th International Terroir Congress*, pages 358–363, McMinnville, Oregon.
- HALL, A. et JONES, G. V. (2010). Effect of potential atmospheric warming on temperature-based indices describing Australian winegrape growing conditions. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 15(2):97–119.
- HALL, A., LAMB, D., HOLZAPFEL, B. et LOUIS, J. (2002). Optical remote sensing applications in viticulture-a review. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 8(1):36–47.
- HALL, A., LOUIS, J. et LAMB, D. (2003). Characterising and mapping vineyard canopy using high-spatial resolution aerial multi-spectral images. *Computers & Geosciences*, 29:813–822.
- HALL, A. et WILSON, M. A. (2013). Object-based analysis of grapevine canopy relationships with winegrape composition and yield in two contrasting vineyards using multitemporal high spatial resolution optical remote sensing. *International journal of remote sensing*, 34(5):1772–1797.
- HARGREAVES, G. H. et SAMANI, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2):96–99.
- HEILMAN, J. L., HEILMAN, W. E. et MOORE, D. G. (1982). Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal*, 74(6):967–971.
- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E. P., GAO, X. et FERREIRA, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1):195–213.

- HUETE, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3):295–309.
- HUGGETT, J. M. (2006). Geology and wine : A review. *Proceedings of the Geologists' Association*, 117(2):239–247.
- HUGGINS, D. R. et REGANOLD, J. P. (2008). No-till : The quiet revolution. *Scientific American*, 299(1):70–77.
- HUGLIN, P. (1978). Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *C.R. Acad. Agr. France*, 64:1117–1126.
- HUGLIN, P. et SCHNEIDER, C. (1998). Biologie et écologie de la vigne. *Ed Lavoisier Tec et Doc*.
- HUNTER, J. J. (1998a). Plant spacing implications for grafted grapevine I. Soil characteristics, root growth, dry matter partitioning, dry matter composition and soil utilisation. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 19(2):25–34.
- HUNTER, J. J. (1998b). Plant spacing implications for grafted grapevine II Soil water, plant water relations, canopy physiology, vegetative and reproductive characteristics, grape composition, wine quality and labour requirements. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 19(2):35–51.
- HUNTER, J. J., VOLSCHENK, C. G. et ZORER, R. (2016). Vineyard row orientation of *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz/101-14 Mgt : Climatic profiles and vine physiological status. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228:104–119.
- INDEC (2002). Censo Nacional Agropecuario. <http://www.indec.gob.ar>.
- INSTRUMENTS, P. (2012). iMetos User Manual. <http://www.metos.at/tiki/tiki-index.php?page=iMetos%20Manual>.
- INV (2014). La vitivinicultura de la region Noroeste de Argentina. http://www.inv.gov.ar/inv_contenidos/pdf/estadisticas/vinos/regiones/Informe_RegionNoroeste.pdf.
- INV (2015a). La nueva vitivinicultura de la región patagónica argentina. http://www.inv.gov.ar/inv_contenidos/pdf/estadisticas/tespeciales/2015/Informe_Region_Sur_2015.pdf.
- INV (2015b). Registro de viñedos y superficie año 2015. http://www.inv.gov.ar/inv_contenidos/pdf/estadisticas/anuarios/2015/REGISTRO_VDOS_2015.pdf.
- INV (2015c). Registro de viñedos y superficie. Capitulo II : Superficie implantada con vid segun un sistema de conduccion. http://www.inv.gov.ar/inv_contenidos/pdf/estadisticas/anuarios/2015/CAP%3%8DTULO_II_-_SISTEMA_DE_CONDUCCION.pdf.

- INV (2015d). Superficie de viñedos segun variedad. http://www.inv.gov.ar/inv_contenidos/pdf/estadisticas/anuarios/2015/CAP%C3%8DTULO_VIII_-_SEGUN_VARIEDAD_DE_UVA_IMPLANTADA.pdf.
- IPCC (2014). *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- JACKSON, D. I. et LOMBARD, P. B. (1993). Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality-a review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 44(4):409–430.
- JACKSON, R. D., IDSO, S. B., REGINATO, R. J. et PINTER, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water resources research*, 17(4):1133–1138.
- JACKSON, R. S. (2008). *Wine Science : Principles and Applications*. Academic press.
- JERMINI, M., BLAISE, P., GESSLER, C. et OTHERS (2010). Quantification of the influence of the downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on the compensatory capacities of *Vitis vinifera* ‘Merlot’ to limit the qualitative yield damage. *Vitis*, 49(4):153–160.
- JI, K. et WU, Y. (2015). Scattering Mechanism Extraction by a Modified Cloude-Pottier Decomposition for Dual Polarization SAR. *Remote Sensing*, 7(6):7447–7470.
- JOHNSON, L., BOSCH, D. F., WILLIAMS, D. C. et LOBITZ, B. M. (2001). Remote sensing of vineyard management zones : Implications for wine quality. *Applied Engineering in Agriculture*, 17(4):557–560.
- JOHNSON, L., LOBITZ, B., ARMSTRONG, R., BALDY, R., WEBER, E., DE BENEDICTIS, J., BOSCH, D. et OTHERS (1996). Airborne imaging aids vineyard canopy evaluation. *California Agriculture*, 50(4):14–18.
- JOHNSON, L., ROCZEN, D., YOUKHANA, S., NEMANI, R. et BOSCH, D. (2003). Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 38(1):33–44.
- JOHNSON, L. F. (2003). Temporal stability of an NDVI-LAI relationship in a Napa Valley vineyard. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 9(2):96–101.
- JOHNSON, R. (2000). *Wine Science : Principles, Practice, Perception*. Academic Press.
- JONES, G., MORIONDO, M., BOIS, B., HALL, A., DUFF, A. et OTHERS (2009). Analysis of the spatial climate structure in viticulture regions worldwide. *Bulletin de l’OIV*, 82(944):507–517.
- JONES, G. V. (2004). Making wine in a changing climate. *Geotimes*, 49(8):24–29.

- JONES, G. V. (2006). Climate and terroir : Impacts of climate variability and change on wine. *Fine wine and terroir-the geoscience perspective*, 9:1–14.
- JONES, G. V. (2007). Climate change : Observations, projections, and general implications for viticulture and wine production. *Economics Department-working paper*, 7:14 p.
- JONES, G. V. (2015). Climate, Grapes, and Wine : Terroir and the Importance of Climate to Winegrape Production. https://www.guildsomm.com/public_content/features/features/b/gregory_jones/posts/climate-grapes-and-wine.
- JONES, G. V. et DAVIS, R. E. (2000). Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France. *American Journal of Enology and Viticulture*, 51(3):249–261.
- JONES, G. V., REID, R. et VILKS, A. (2012). Climate, grapes, and wine : Structure and suitability in a variable and changing climate. In *The Geography of Wine*, pages 109–133. Springer.
- JONES, G. V., WHITE, M. A., COOPER, O. R. et STORCHMANN, K. (2005a). Climate change and global wine quality. *Climatic change*, 73(3):319–343.
- JONES, G. V., WHITE, M. A., COOPER, O. R. et STORCHMANN, K. (2005b). Climate change and global wine quality. *Climatic change*, 73(3):319–343.
- JORDAN, C. F. (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50(4):663–666.
- JOSSO, B., BURTON, D. R. et LALOR, M. J. (2005). Texture orientation and anisotropy calculation by Fourier transform and principal component analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(5):1152–1161.
- KARAKIZI, C., OIKONOMOU, M. et KARANTZALOS, K. (2016). Vineyard detection and vine variety discrimination from very high resolution satellite data. *Remote Sensing*, 8(3):235.
- KELLER, M. (2010). Managing grapevines to optimise fruit development in a challenging environment : A climate change primer for viticulturists. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16:56–69.
- KELLER, M. (2015). *The Science of Grapevines : Anatomy and Physiology*. Academic Press.
- KENNY, G. J. et SHAO, J. (1992). An assessment of a latitude-temperature index for predicting climate suitability for grapes in Europe. *Journal of Horticultural Science*, 67(2):239–246.

- KERGOMARD, C. (2000). Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : Utilisation du logiciel 5S-PC. *Cybergeographie : European Journal of Geography*.
- KLIEWER, W. M. (1971). Effect of day temperature and light intensity on concentration of malic and tartaric acids in *Vitis vinifera* L. grapes. *Amer Soc Hort Sci J*, 96:372–377.
- KLIEWER, W. M. et DOKOOZLIAN, N. K. (2005). Leaf area/crop weight ratios of grapevines : Influence on fruit composition and wine quality. *American Journal of Enology and Viticulture*, 56(2):170–181.
- KLIEWER, W. M. et TORRES, R. E. (1972). Effect of controlled day and night temperatures on grape coloration. *American Journal of Enology and Viticulture*, 23(2):71–77.
- KOTTEK, M., GRIESER, J., BECK, C., RUDOLF, B. et RUBEL, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3):259–263.
- KOUNDOURAS, S., TSIALTAS, I. T., ZIOZIOU, E. et NIKOLAOU, N. (2008). Rootstock effects on the adaptive strategies of grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Cabernet–Sauvignon) under contrasting water status : Leaf physiological and structural responses. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 128(1):86–96.
- KRIEDEMANN, P. E. et SMART, R. E. (1971). Effects of irradiance, temperature, and leaf water potential on photosynthesis of vine leaves. *Photosynthetica*, 5:6–15.
- LACAR, F. M., LEWIS, M. M. et GRIERSON, I. T. (2001). Use of hyperspectral imagery for mapping grape varieties in the Barossa Valley, South Australia. In *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, volume 6, pages 2875–2877.
- LAMB, D., WEEDON, M. et BRAMLEY, R. (2004). Using remote sensing to predict grape phenolics and colour at harvest in a Cabernet Sauvignon vineyard : Timing observations against vine phenology and optimising image resolution. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 10(1):46–54.
- LANJERI, S., SEGARRA, D. et MELIÁ, J. (2004). Interannual vineyard crop variability in the Castilla–La Mancha region during the period 1991–1996 with Landsat Thematic Mapper images. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12):2441–2457.
- LAVIE, E. (2009). *Activités Anthropiques et Qualité de l’eau Dans l’oasis de Mendoza (Argentine) : Diagnostic, Enjeux et Durabilité*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 3, Bordeaux.
- LE CLEC’H, S. (2016). *Spatialisation Des Services Écosystémiques En Contexte de Front Pionnier Amazonien*. Thèse de doctorat, Université Rennes 2, Rennes.

- LE ROUX, R., KATURJI, M., PEYMANZAWAR-REZA, L. d. R., STURMAN, A., VAN LEEUWEN, C., PARKER, A., TROUGHT, M. et QUÉNOL, H. (2016). A fine scale approach to map bioclimatic indices using and comparing dynamical and geostatistical methods. *In Terroir Congress, Oregon*, page 6 p.
- LE TOAN, T. (2005). SAR image information content : Scattering physics. http://earth.esa.int/dragon/LeToan1_SAR_scattering_physics.pdf.
- LEE, J.-S. (1981). Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images. *Computer graphics and image processing*, 17(1):24–32.
- LEE, J.-S. et POTTIER, E. (2009a). *Polarimetric Radar Imaging : From Basics to Applications*. CRC press.
- LEE, J.-S. et POTTIER, E. (2009b). *Polarimetric Radar Imaging : From Basics to Applications*. CRC press.
- LEFEBVRE, A., CORPETTI, T. et MOY, L. H. (2010). Segmentation of very high spatial resolution panchromatic images based on wavelets and evidence theory. *In Proc. of SPIE Vol*, volume 7830, pages 78300E–1–78300E–13.
- LEFEBVRE, A., CORPETTI, T. et MOY, L. H. (2011). Estimation of the orientation of textured patterns via wavelet analysis. *Pattern Recognition Letters*, 32(2):190–196.
- LEYVRAZ, H. (1950). Hail damage to vineyards. *Revue romande d’Agriculture, de Viticulture et d’Arboriculture*, 6:57–9.
- LIU, J., PATTEY, E., MILLER, J. R., MCNAIRN, H., SMITH, A. et HU, B. (2010). Estimating crop stresses, aboveground dry biomass and yield of corn using multi-temporal optical data combined with a radiation use efficiency model. *Remote Sensing of Environment*, 114(6):1167–1177.
- LÓPEZ-LOZANO, R., BARET, F., DE CORTÁZAR-ATAURI, I. G., BERTRAND, N. et CASTERAD, M. A. (2009). Optimal geometric configuration and algorithms for LAI indirect estimates under row canopies : The case of vineyards. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(8):1307–1316.
- LÓPEZ-URREA, R., MONTORO, A., MAÑAS, F., LÓPEZ-FUSTER, P. et FERERES, E. (2012). Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature ‘Tempranillo’ wine grapes. *Agricultural water management*, 112:13–20.
- LOYARTE, M. M. G. (1995). La diagonale aride argentine : Une réalité écologique oscillante. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 6(1):35–44.
- MALDONADO, A. O. (2001). *Distribución Geográfica de Los Elementos Meteorológicos Principales y Adversidades de Mendoza*. Triunfar.

- MARAIS SICRE, C., BAUP, F. et FIEUZAL, R. (2014). Determination of the crop row orientations from Formosat-2 multi-temporal and panchromatic images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 94:127–142.
- MATTHEWS, M. A. et ANDERSON, M. M. (1988). Fruit ripening in *Vitis vinifera* L. : Responses to seasonal water deficits. *American Journal of Enology and viticulture*, 39(4):313–320.
- MAY, P. (1987). The grapevine as a perennial, plastic and productive plant. *In Proceedings of the Sixth Australian Wine Industry Technical Conference. TH Lee (Ed.)*, pages 40–49.
- MCNAIRN, H., BOISVERT, J. B., MAJOR, D. J., GWYN, Q. H. J., BROWN, R. J. et SMITH, A. M. (1996). Identification of agricultural tillage practices from C-band radar backscatter. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 22(2):154–162.
- MCNAIRN, H. et BRISCO, B. (2004). The application of C-band polarimetric SAR for agriculture : A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3):525–542.
- MENENTI, M., BASTIAANSEN, W. G. M. et VAN EICK, D. (1989). Determination of surface hemispherical reflectance with Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, 28:327–337.
- MEZHER, R. N., DOYLE, M. et BARROS, V. (2012). Climatology of hail in Argentina. *Atmospheric research*, 114:70–82.
- MIRA DE ORDUÑA, R. (2010). Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, 43(7):1844–1855.
- MONTERO, F. J., MELIA, J., BRASA, A., SEGARRA, D., CUESTA, A. et LANJERI, S. (1999). Assessment of vine development according to available water resources by using remote sensing in La Mancha, Spain. *Agricultural Water Management*, 40(2):363–375.
- MORÁBITO, J. A., MIRABILE, C. et SALATINO, S. (2007). Eficiencia del riego superficial, actual y potencial, en el área de regadío del río Mendoza (Argentina). *Ingeniería del agua*, 14(3):199–214.
- MORÁBITO, J. A., TÍVOLI, J. M., SALATINO, S. et MIRÁBILE, C. (2002). Necesidades de riego en el área de Influencia del río Mendoza. *In XIX Congreso Nacional Del Agua*, pages 71–80, Carlos Paz, Córdoba.
- MORATIEL, R. et MARTÍNEZ-COB, A. (2012). Evapotranspiration of grapevine trained to a gable trellis system under netting and black plastic mulching. *Irrigation science*, 30(3):167–178.

- MORI, K., GOTO-YAMAMOTO, N., KITAYAMA, M. et HASHIZUME, K. (2007). Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *Journal of experimental botany*, 58(8):1935–1945.
- MORIONDO, M., JONES, G. V., BOIS, B., DIBARI, C., FERRISE, R., TROMBI, G. et BINDI, M. (2013). Projected shifts of wine regions in response to climate change. *Climatic Change*, 119(3-4):825–839.
- MORLAT, R. (2010). *Traité de Viticulture de Terroir : Comprendre et Cultiver La Vigne Pour Produire Un Vin de Terroir*. Tec & Doc.
- MORLAT, R. et BODIN, F. (2006). Characterization of viticultural terroirs using a simple field model based on soil depth–II. Validation of the grape yield and berry quality in the Anjou vineyard (France). *Plant and Soil*, 281(1-2):55–69.
- MORLAT, R., PENAVAYRE, M., JACQUET, A., ASSELIN, C. et LEMAITRE, C. (1992). Influence des terroirs sur le fonctionnement hydrique et la photosynthèse de la vigne en millésime exceptionnellement sec (1990). Conséquence sur la maturation du raisin. *OENO One*, 26(4):197–220.
- MUSSETTA, P. et BARRIENTOS, M. J. (2015). Vulnerabilidad de productores rurales de Mendoza ante el Cambio Ambiental Global : Clima, agua, economía y sociedad. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 47(2):145–170.
- NEETHLING, E. (2016). *Adaptation de La Viticulture Au Changement Climatique : Vers Des Stratégies à Haute Résolution*. Thèse de doctorat, Université Rennes 2.
- OJEDA, H. (1999). *Influence de La Contrainte Hydrique Sur La Croissance Du Péricarpe et Sur l'évolution Des Phénols Des Baies de Raisin(Vitis Vinifera L.) Cv. Syrah*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.
- OJEDA, H., ANDARY, C., KRAEVA, E., CARBONNEAU, A. et DELOIRE, A. (2002). Influence of pre-and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *American Journal of Enology and Viticulture*, 53(4):261–267.
- ORLANDO, F., MOVEDI, E., CODUTO, D., PARISI, S., BRANCADORO, L., PAGANI, V., GUARNERI, T. et CONFALONIERI, R. (2016). Estimating Leaf Area Index (LAI) in Vineyards Using the PocketLAI Smart-App. *Sensors*, 16(12):2004.
- PALLADINO, M., STAIANO, A., D'URSO, G., MINACAPILLI, M. et RALLO, G. (2013). Mass and Surface Energy Balance Approaches for Monitoring Water Stress in Vineyards. *Procedia Environmental Sciences*, 19(Supplement C):231–238.

- PALOSCIA, S., PAMPALONI, P. et SIGISMONDI, S. (1995). The microwave backscattering of vineyards. *In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995. IGARSS '95. 'Quantitative Remote Sensing for Science and Applications', International*, volume 1, pages 222–223 vol.1.
- PARKER, A., DE CORTÁZAR-ATAURI, I. G., CHUINE, I., BARBEAU, G., BOIS, B., BOURSQUOT, J.-M., CAHUREL, J.-Y., CLAVERIE, M., DUFOURCQ, T., GÉNY, L. et OTHERS (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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180:249–264.
- PARMESAN, C. et YOHE, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918):37–42.
- PETTITT, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied statistics*, 28(2):126–135.
- PICUNO, P., TORTORA, A. et CAPOBIANCO, R. L. (2011). Analysis of plasticulture landscapes in Southern Italy through remote sensing and solid modelling techniques. *Landscape and urban planning*, 100(1):45–56.
- PLANCHON, O. et ROSIER, K. (2005). Variabilité des régimes pluviométriques dans le nord-ouest de l'Argentine : Problèmes posés et analyse durant la deuxième moitié du vingtième siècle. *Climatologie*, 2:55–76.
- POBLETE-ECHEVERRÍA, C. A. et ORTEGA-FARIAS, S. O. (2013). Evaluation of single and dual crop coefficients over a drip-irrigated Merlot vineyard (*Vitis vinifera* L.) using combined measurements of sap flow sensors and an eddy covariance system. *Australian journal of grape and wine research*, 19(2):249–260.
- POLING, E. B. (2008). Spring cold injury to winegrapes and protection strategies and methods. *HortScience*, 43(6):1652–1662.
- POTTIER, E. et FERRO-FAMIL, L. (2012). PolSARPro V5. 0 : An ESA educational toolbox used for self-education in the field of POLSAR and POL-INSAR data analysis. *In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*, pages 7377–7380. IEEE.
- POUGET, R. (1968). Nouvelle conception du seuil de croissance chez la vigne. *Vitis*, 7(201-205):201–205.
- PULETTI, N., PERRIA, R. et STORCHI, P. (2014). Unsupervised classification of very high remotely sensed images for grapevine rows detection. *European Journal of Remote Sensing*, 47:45–54.

- QUÉNOL, H. (2011). *Observation et Modélisation Spatiale Du Climat Aux Échelles Fines Dans Un Contexte de Changement Climatique*. Habilitation à diriger des recherches, Université Rennes 2.
- QUÉNOL, H. (2014). *Changement Climatique et Terroirs Viticoles*. Lavoisier Tec&doc.
- QUÉNOL, H., MADELIN, M., LOUSSERT, P., CORGNE, S. et GRASSIN, M. (2015). Influence du climat local sur la viticulture dans la Province de Mendoza (Argentine). *In 28 Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*.
- RABATEL, G., DEBAIN, C., DELENNE, C. et DESHAYES, M. (2006). "Bacchus" Methodological approach for vineyard inventory and management. Chap.4 : Textural and structural analysis. *European Commission, DG Research, RTD action : energy, environment and sustainable development*, pages 67–87.
- RANA, G., KATERJI, N., INTRONA, M. et HAMMAMI, A. (2004). Microclimate and plant water relationship of the “overhead” table grape vineyard managed with three different covering techniques. *Scientia Horticulturae*, 102(1):105–120.
- REYNIER, A. (2011). *Manuel de Viticulture : Guide Technique Du Viticulteur*. Lavoisier.
- REYNOLDS, A. G. et HEUVEL, J. E. V. (2009). Influence of grapevine training systems on vine growth and fruit composition : A review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 60(3):251–268.
- REYNOLDS, A. G., WARDLE, D. A. et NAYLOR, A. P. (1996). Impact of training system, vine spacing, and basal leaf removal on Riesling. Vine performance, berry composition, canopy microclimate, and vineyard labor requirements. *American Journal of Enology and Viticulture*, 47(1):63–76.
- RIBÉREAU-GAYON, P., DUBOURDIEU, D., DONÈCHE, B. et LONVAUD, A. (2006). *Handbook of Enology, the Microbiology of Wine and Vinifications*, volume 1. John Wiley & Sons.
- RICHARDSON, A. D., KEENAN, T. F., MIGLIAVACCA, M., RYU, Y., SONNENTAG, O. et TOOMEY, M. (2013). Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169:156–173.
- RIOU, C., CARBONNEAU, A., BECKER, N., CALÓ, A., COSTACURTA, A. et OTHERS (1994). Le déterminisme climatique de la maturation du raisin : Application au zonage de la teneur en sucre dans la Communauté Européenne. *Office des Publications Officielles des Communautés Européennes*, 319.
- RIOU, C., VALANCOGNE, C. et PIERI, P. (1989). Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne - vérification expérimentale. *Agronomie*, 9(5):441–450.

- RODRÍGUEZ PÉREZ, J. R., ÁLVAREZ LÓPEZ, C. J., MIRANDA, D. et ÁLVAREZ TABOADA, M. F. (2008a). Vineyard area estimation using medium spatial resolution satellite imagery. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6(3):441–452.
- RODRÍGUEZ PÉREZ, J. R., ÁLVAREZ LÓPEZ, C. J., MIRANDA, D. et ÁLVAREZ TABOADA, M. F. (2008b). Vineyard area estimation using medium spatial resolution satellite imagery. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6(3):441–452.
- ROOT, T. L., PRICE, J. T., HALL, K. R., SCHNEIDER, S. H. et OTHERS (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421(6918):57–60.
- ROUSE JR, J., HAAS, R. H., SCHELL, J. A. et DEERING, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *In Proceedings of Third ERTS Symposium*, pages 309–317, Washington.
- RUBIO, E., ARTIGAO, M. M., CASELLES, V., COLL, C. et VALOR, E. (2001). Cartografiado de la Vid con datos Landsat-TM. Aplicación a una Zona de Tomelloso (Ciudad Real) | Asociación Española de Teledetección. *Revista de Teledetección*, 15:47–56.
- SALOMON, J.-N. (2004). *Le Piémont Andin Argentin : Environnement, Risques et Enjeux*. LGPA.
- SAMUI, P., GOWDA, P. H., OOMMEN, T., HOWELL, T. A., MAREK, T. H. et PORTER, D. O. (2012). Statistical learning algorithms for identifying contrasting tillage practices with Landsat Thematic Mapper data. *International journal of remote sensing*, 33(18): 5732–5745.
- SANTOS, J. A., MALHEIRO, A. C., KARREMANN, M. K. et PINTO, J. G. (2011). Statistical modelling of grapevine yield in the Port Wine region under present and future climate conditions. *International Journal of Biometeorology*, 55(2):119–131.
- SCHIAVON, G., SOLIMINI, D. et BURINI, A. (2007). Sensitivity of multi-temporal high resolution polarimetric C and L-band SAR to grapes in vineyards. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 3651–3654, Barcelona. IEEE.
- SCHULTZ, H. (2000). Climate change and viticulture : A European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal of grape and wine research*, 6(1):2–12.
- SHANI, U. et BEN-GAL, A. (2005). Long-term response of grapevines to salinity : Osmotic effects and ion toxicity. *American Journal of Enology and Viticulture*, 56(2):148–154.
- SMART, D. R., SCHWASS, E., LAKSO, A. et MORANO, L. (2006). Grapevine rooting patterns : A comprehensive analysis and a review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57(1):89–104.

- SMART, R. E. (1985). Principles of grapevine canopy microclimate manipulation with implications for yield and quality. A review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 36(3):230–239.
- SMART, R. E., SMITH, S. M. et WINCHESTER, R. V. (1988). Light quality and quantity effects on fruit ripening for Cabernet Sauvignon. *American Journal of Enology and Viticulture*, 39(3):250–258.
- SNYDER, R. L., GENG, S., ORANG, M. et SARRESHTEH, S. (2012). Calculation and simulation of evapotranspiration of applied water. *Journal of Integrative Agriculture*, 11(3):489–501.
- SPAYD, S. E., TARARA, J. M., MEE, D. L. et FERGUSON, J. C. (2002). Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot berries. *American Journal of Enology and Viticulture*, 53(3):171–182.
- STEELE-DUNNE, S. C., MCNAIRN, H., MONSIVAIS-HUERTERO, A., JUDGE, J., LIU, P.-W. et PAPATHANASSIOU, K. (2017). Radar remote sensing of agricultural canopies : A review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(5):2249–2273.
- TARANTINO, E. et FIGORITO, B. (2012). Mapping rural areas with widespread plastic covered vineyards using true color aerial data. *Remote Sensing*, 4(7):1913–1928.
- TARARA, J. M., LEE, J., SPAYD, S. E. et SCAGEL, C. F. (2008). Berry temperature and solar radiation alter acylation, proportion, and concentration of anthocyanin in Merlot grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, 59(3):235–247.
- TEIXEIRA, A. d. C., BASTIAANSEN, W. G. M. et BASSOI, L. H. (2007). Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the Sao Francisco river basin, Brazil. *Agricultural water management*, 94(1):31–42.
- TESIC, D., KELLER, M. et HUTTON, R. J. (2007). Influence of vineyard floor management practices on grapevine vegetative growth, yield, and fruit composition. *American Journal of Enology and Viticulture*, 58(1):1–11.
- TESIC, D., WOOLLEY, D. J., HEWETT, E. W. et MARTIN, D. J. (2002). Environmental effects on cv Cabernet Sauvignon (*Vitis vinifera* L.) grown in Hawke’s Bay, New Zealand. : 1. Phenology and characterisation of viticultural environments. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 8(1):15–26.
- THIS, P., LACOMBE, T. et THOMAS, M. R. (2006). Historical origins and genetic diversity of wine grapes. *TRENDS in Genetics*, 22(9):511–519.

- TISSOT, C., NEETHLING, E., ROUAN, M., BARBEAU, G., QUÉNOL, H. et LE COQ, C. (2017). Modeling Environmental Impacts on Viticultural Ecosystems : A First Case Study in a Regulated Wine Producing Area. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems (IJAEIS)*, 8(3):1–20.
- TOMASI, D., JONES, G. V., GIUSTI, M., LOVAT, L. et GAIOTTI, F. (2011). Grapevine phenology and climate change : Relationships and trends in the Veneto region of Italy for 1964–2009. *American Journal of Enology and Viticulture*, 62(3):329–339.
- TONIETTO, J. (1999). *Les Macroclimats Viticoles Mondiaux et l'influence Du Mésoclimat Sur La Typicité de La Syrah et Du Muscat de Hambourg Dans Le Sud de La France : Méthodologie de Caractérisation*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Montpellier.
- TONIETTO, J. et CARBONNEAU, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(1):81–97.
- TREGOAT, O., OLLAT, N., GRENIER, G. et VAN LEEUWEN, C. (2001). Etude comparative de la précision et de la rapidité de mise en oeuvre de différentes méthodes d'estimation de la surface foliaire de la vigne. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 35(1):31–39.
- TROLIER, L. J., PHILIPSON, W. R. et PHILPOT, W. D. (1989). Landsat TM analysis of vineyards in New York. *International Journal of Remote Sensing*, 10(7):1277–1281.
- TROUGHT, M. C. T., DIXON, R., MILLS, T., GREVEN, M., AGNEW, R., MAUK, J. L. et PRAAT, J. (2008). The impact of differences in soil texture within a vineyard on vine vigour, vine earliness and juice composition. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 42(2):67.
- ULABY, F. T., BATLIVALA, P. P. et DOBSON, M. C. (1978). Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture : Part I-bare soil. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 16(4):286–295.
- ULABY, F. T., BRADLEY, G. A. et DOBSON, M. C. (1979). Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture : Part II-vegetation-covered soil. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 17(2):33–40.
- ULABY, F. T., MOORE, R. K. et FUNG, A. K. (1982). *Microwave Remote Sensing Active and Passive-Volume II : Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*. Addison- Wesley Publishing Company, advanced book program/world science division édition.
- VAN LEEUWEN, C., FRIANT, P., CHONE, X., TREGOAT, O., KOUNDOURAS, S. et DUBOURDIEU, D. (2004a). Influence of climate, soil, and cultivar on terroir. *American Journal of Enology and Viticulture*, 55(3):207–217.

- VAN LEEUWEN, C., FRIANT, P., CHONE, X., TREGOAT, O., KOUNDOURAS, S. et DURBOURDIEU, D. (2004b). Influence of climate, soil, and cultivar on terroir. *American Journal of Enology and Viticulture*, 55(3):207–217.
- VAN LEEUWEN, C., SCHULTZ, H. R., DE CORTAZAR-ATAURI, I. G., DUCHÊNE, E., OLLAT, N., PIERI, P., BOIS, B., GOUTOULY, J.-P., QUÉNOL, H., TOUZARD, J.-M. et OTHERS (2013). Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(33):E3051–E3052.
- VAN LEEUWEN, C., TRÉGOAT, O., CHONÉ, X., BOIS, B., PERNET, D. et GAUDILLÈRE, J.-P. (2009). Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *OENO One*, 43(3):121–134.
- VANINO, S., PULIGHE, G., NINO, P., DE MICHELE, C., BOLOGNESI, S. F. et D'URSO, G. (2015). Estimation of evapotranspiration and crop coefficients of tendone vineyards using multi-sensor remote sensing data in a mediterranean environment. *Remote Sensing*, 7(11):14708–14730.
- VASCONCELOS, M. C., GREVEN, M., WINEFIELD, C. S., TROUGHT, M. C. et RAW, V. (2009). The flowering process of *Vitis vinifera* : A review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 60(4):411–434.
- VAUDOUR, E. (2001). *Les Terroirs Viticoles. Analyse Spatiale et Relation Avec La Qualité Du Raisin. Application Au Vignoble AOC Des Côtes-Du-Rhône Méridionales*. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon.
- VAUDOUR, E. (2003). Les terroirs viticoles. *Dunod, Paris*.
- VAUDOUR, E., BAGHDADI, N. et GILLIOT, J.-M. (2014a). Mapping tillage operations over a peri-urban region using combined SPOT4 and ASAR/ENVISAT images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28:43–59.
- VAUDOUR, E., CAREY, V. A. et GILLIOT, J.-M. (2010). Digital zoning of South African viticultural terroirs using bootstrapped decision trees on morphometric data and multitemporal SPOT images. *Remote sensing of Environment*, 114(12):2940–2950.
- VAUDOUR, E., COSTANTINI, E., JONES, G. V. et MOCALI, S. (2014b). An overview of the recent approaches for terroir functional modelling, footprinting and zoning. *SOIL Discussions*, 1:827–906.
- VAUDOUR, E., NOIROT-COSSON, P. E. et MEMBRIVE, O. (2015). Early-season mapping of crops and cultural operations using very high spatial resolution Pléiades images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42:128–141.

- VERMOTE, E. F., TANRÉ, D., DEUZE, J. L., HERMAN, M. et MORCETTE, J.-J. (1997). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S : An overview. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 35(3):675–686.
- VIDAL, M. (2001). *Histoire de La Vigne et Des Vins Dans Le Monde : XIXe-XXe Siècle*. Ed. Féret.
- VIGIL, A., RUIZ DE PEÑA Y LILLO, A. et VILLA, H. (2003). Nuevas estructuras de la vitivinicultura argentina. In DÍAS-ÁLAVREZ, J. et LAUREANO, O., éditeurs : *XIX. C Red Ibero-Americana de Vitivinicultura. A Vitivinicultura Nos Países Iberoamericanos : Impacto Económico, Social e Técnico-Científico*. Instituto Superior de Agronomia de Portugal.
- VILLALBA, R. et BONINSEGNA, J. (2009). Cambios climáticos regionales en el contexto del calentamiento global en Gobierno de Mendoza. *Informe Ambiental 2009. Informe Ambiental, Ambiente. Gobierno de Mendoza*, pages 103–113.
- VIVIER, M. A., PRETORIUS, I. S. et OTHERS (2000). Genetic improvement of grapevine : Tailoring grape varieties for the third millennium-a review. *South African Journal for Enology and Viticulture*, 21:5–26.
- VUOLO, F., D'URSO, G., DE MICHELE, C., BIANCHI, B. et CUTTING, M. (2015). Satellite-based irrigation advisory services : A common tool for different experiences from Europe to Australia. *Agricultural Water Management*, 147(Supplement C):82–95.
- WALKER, R. R. (1994). Grapevine responses to salinity. *Bulletin de l'OIV*, 67(761-62):634–661.
- WALKER, R. R., BLACKMORE, D. H. et CLINGELEFFER, P. R. (2010). Impact of rootstock on yield and ion concentrations in petioles, juice and wine of Shiraz and Chardonnay in different viticultural environments with different irrigation water salinity. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16(1):243–257.
- WALKER, R. R., BLACKMORE, D. H., CLINGELEFFER, P. R. et CORRELL, R. L. (2002). Rootstock effects on salt tolerance of irrigated field-grown grapevines (*Vitis vinifera* L. cv. Sultana). : 1. Yield and vigour inter-relationships. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 8(1):3–14.
- WALKER, R. R., BLACKMORE, D. H., CLINGELEFFER, P. R. et CORRELL, R. L. (2004). Rootstock effects on salt tolerance of irrigated field-grown grapevines (*Vitis vinifera* L. cv. Sultana) 2. Ion concentrations in leaves and juice. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 10(2):90–99.
- WASSENAAR, T., ROBBEZ-MASSON, J.-M., ANDRIEUX, P. et BARET, F. (2002). Vineyard identification and description of spatial crop structure by per-field frequency analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 23(17):3311–3325.

- WATTS, J. D., LAWRENCE, R. L., MILLER, P. R. et MONTAGNE, C. (2009). Monitoring of cropland practices for carbon sequestration purposes in north central Montana by Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 113(9):1843–1852.
- WATTS, J. D., POWELL, S. L., LAWRENCE, R. L. et HILKER, T. (2011). Improved classification of conservation tillage adoption using high temporal and synthetic satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115(1):66–75.
- WEBB, L., WHITING, J., WATT, A., HILL, T., WIGG, F., DUNN, G., NEEDS, S. et BARLOW, E. W. R. (2010). Managing grapevines through severe heat : A survey of growers after the 2009 summer heatwave in south-eastern Australia. *Journal of Wine Research*, 21(2-3):147–165.
- WEBB, L. B., WHETTON, P. H. et BARLOW, E. W. R. (2007). Modelled impact of future climate change on the phenology of winegrapes in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 13(3):165–175.
- WEISS, S. B., LUTH, D. C. et GUERRA, B. (2003). Potential Solar Radiation in a Vertical Shoot Positioned (VSP) Trellis at 38 N Latitude. *Practical Winery And Vineyard Journal*, May/June:16–23.
- WILLIAMS, L. E. et SMITH, R. J. (1991). The effect of rootstock on the partitioning of dry weight, nitrogen and potassium, and root distribution of Cabernet Sauvignon grapevines. *American journal of enology and viticulture*, 42(2):118–122.
- WILLIAMS, M. G., MAGAREY, P. A. et SIVASITHAMPARAM, K. (2007). Effect of temperature and light intensity on early infection behaviour of a Western Australian isolate of *Plasmopara viticola*, the downy mildew pathogen of grapevine. *Australasian Plant Pathology*, 36(4):325–331.
- WILSON, J. E. (1998). *Terroir : The Role of Geology, Climate and Culture in the Making of French Wines*. Univ of California Press.
- WINKLER, A. J. (1974). *General Viticulture*. Univ of California Press.
- ZHENG, B., CAMPBELL, J. B., SERBIN, G. et GALBRAITH, J. M. (2014). Remote sensing of crop residue and tillage practices : Present capabilities and future prospects. *Soil and Tillage Research*, 138:26–34.

Table des matières

Introduction générale	1
I Télédétection et viticulture : concepts et cadre de l'étude	7
1 La physiologie de la vigne et son contrôle	9
1.1 Introduction	10
1.2 Présentation générale de la vigne	10
1.3 Cycle phénologique de la vigne	11
1.3.1 La dormance, le débourrement et la croissance végétative	11
1.3.2 La floraison et la nouaison	12
1.3.3 La véraison	12
1.3.4 La phase de maturation	13
1.4 Facteurs climatiques de contrôle du cycle de développement	14
1.4.1 La température	14
1.4.2 Le rayonnement solaire	15
1.4.3 Les précipitations	15
1.4.4 Le vent	16
1.4.5 Les indices bioclimatiques	16
1.5 Influence des caractéristiques du sol et de la géologie sur la phénologie et le potentiel qualitatif	18
1.5.1 Rôle de la géologie et de la géomorphologie	18
1.5.2 Rôle des caractéristiques du sol	18
1.6 Le rôle des pratiques culturales	19
1.6.1 Les pratiques pérennes	19
1.6.2 L'orientation des rangs	21
1.6.3 Les pratiques pluri-annuelles	22
1.6.4 Les pratiques annuelles	23
1.7 La notion de terroir et d'échelle spatiale de la viticulture	23
1.8 Conclusion	25
2 La télédétection et ses applications en viticulture	27
2.1 Introduction	28

2.2	Caractéristiques des données de télédétection	28
2.2.1	La télédétection passive dans le domaine de l'optique	28
2.2.2	La télédétection active dans le domaine des hyperfréquences	29
2.3	Les vignobles et leurs signatures dans les différentes fréquences	32
2.3.1	Signatures optiques des vignobles et principaux indices de végétation	33
2.3.2	Caractéristiques des vignobles sur les images RSO à différentes fréquences	34
2.4	Les principales applications de la télédétection en viticulture	35
2.4.1	Détection et cartographie des vignobles	36
2.4.2	Suivi de la phénologie de la vigne par télédétection	36
2.4.3	Utilisation de la télédétection pour l'étude des pratiques culturales .	37
2.5	Conclusion	39
3	Site d'étude et données	41
3.1	Introduction	42
3.2	La viticulture en Argentine	42
3.2.1	Les principales régions viticoles argentines	42
3.2.2	Les caractéristiques de la région viticole de Mendoza	45
3.2.3	Lujan de Cuyo : un département viticole de la zone centrale de production	48
3.3	Les données des stations météorologiques	49
3.3.1	Réseaux de mesures	49
3.3.2	Pré-traitement des données météorologiques	51
3.3.3	Calcul des indices bioclimatiques	52
3.3.4	Calcul de l'évapotranspiration de référence	52
3.4	Les données de télédétection	53
3.4.1	Les images satellitaires optiques	53
3.4.2	Les images satellitaires radar	55
3.5	Les observations et mesures de terrain	57
3.5.1	Les parcelles viticoles	58
3.5.2	Les pratiques culturales	58
3.5.3	Suivi de la croissance végétative	61
3.6	Conclusion	63
II	Analyse multi-échelle du climat des régions viticoles d'Argentine	65
	Introduction	67

4	Caractérisation et évolution du climat des régions vitivinicoles d'Argentine	69
4.1	Introduction	70
4.2	Matériel et méthodes	70
4.2.1	Région d'étude	70
4.2.2	Données utilisées	71
4.2.3	Analyse de la variabilité spatiale et temporelle régionale des températures et des précipitations de la saison végétative	72
4.3	Résultats et discussion	73
4.3.1	Variabilité inter-régionale et temporelle des températures moyennes, minimales et maximales des saisons végétatives et des précipitations	73
4.3.2	Evolution des indices bioclimatiques	77
4.3.3	Choix variétaux	79
4.4	Limites de l'utilisation des indices bioclimatiques	81
4.5	Conclusion	82
5	Variabilité spatiale des conditions agroclimatiques dans la province de Mendoza	83
5.1	Introduction	84
5.2	Matériels et méthodes	84
5.2.1	Localisation des stations	84
5.2.2	Caractéristiques vitivinicoles des aires de production	85
5.2.3	Variabilité intra-régionale des indices bioclimatiques	85
5.3	Résultats et discussion	87
5.3.1	Caractéristiques de la campagne d'étude par rapport à la moyenne de la période	87
5.3.2	Variabilité des indices bioclimatiques entre les différentes aires viticoles de la province de Mendoza	88
5.3.3	Facteurs de variabilité intra-régionale des indices bioclimatiques	93
5.4	Conclusion	96
III	Caractérisation des vignobles de Mendoza par télédétection optique et radar	99
	Introduction	101
6	Evaluation des images Pléiades en mode multispectral et panchromatique pour la détermination de l'orientation des rangs des vignobles	103
6.1	Introduction	104
6.2	Matériels et méthodes	105
6.2.1	Site d'étude	105

6.2.2	Image satellitaire utilisée	105
6.2.3	Méthodologie	106
6.3	Résultats et discussion	109
6.4	Conclusion	111
7	Potentiel des séries temporelles d'images optiques et radar pour le suivi de la croissance végétative	113
7.1	Introduction	114
7.2	Matériels et méthodes	115
7.2.1	Site d'étude	115
7.2.2	Images satellitaires	115
7.2.3	Mesures de terrain	115
7.2.4	Méthodologie	116
7.3	Résultats	118
7.3.1	Analyse des signatures temporelles des vignobles	118
7.3.2	Estimation de la surface foliaire et de la hauteur de la canopée des vignes par télédétection	122
7.4	Discussion	130
7.5	Conclusion	134
8	Potentiel des images optiques et radar pour la classification des pratiques culturelles des vignobles	135
8.1	Introduction	136
8.2	Matériels et méthodes	137
8.2.1	Site d'étude et inventaire des pratiques culturelles	137
8.2.2	Images satellitaires	138
8.2.3	Méthodologie	138
8.3	Résultats	142
8.3.1	Cartographie des modes de gestion des inter-rangs et de l'équipement en filets anti-grêle	142
8.3.2	Cartographie des modes d'irrigation	147
8.4	Discussion	150
8.5	Conclusion	154
9	Estimation de l'évapotranspiration des vignobles à partir des séries d'images satellitaires optiques	157
9.1	Introduction	158
9.2	Matériel et méthodes	159
9.2.1	Données utilisées	159
9.2.2	Méthodologie	159

9.2.3	Performances des deux méthodes pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle des vignobles	164
9.2.4	Estimation des besoins en eau	164
9.3	Résultats et discussion	165
9.3.1	Effet du capteur sur les estimations de l'albédo	165
9.3.2	Variabilité spatio-temporelle des paramètres estimés pour la méthode analytique	166
9.3.3	Comparaison des deux méthodes de calcul de l'évapotranspiration à partir des images satellitaires	167
9.3.4	Evolution temporelle de l' ET_c	172
9.3.5	Cartographie de l'évapotranspiration potentielle et des besoins en eau de la vigne	174
9.4	Conclusion	176
	Conclusion générale et perspectives	177
	Bibliographie	183
	Annexes	223
	A Indices Bioclimatiques	225
	B Calibration de l'équation de Hargreaves	227

Table des figures

1	Organisation générale de la thèse	5
1.1	Les stades principaux du développement de la vigne	11
1.2	Evolution des composants des baies durant la phase de maturation (Deloire, 2007)	13
1.3	Localisation géographique des principales régions viticoles mondiales en noir et isothermes optimales de la saison végétative entre 12°C et 22°C (Jones <i>et al.</i> , 2012)	16
1.4	Classifications de cépages selon leurs besoins thermiques (en °C) pour atteindre la floraison, la véraison et la maturité (fixée à une concentration en sucre de 200g/L) (Parker <i>et al.</i> , 2013)	20
1.5	Température moyenne de la saison végétative nécessaire pour l'obtention de raisins à haut potentiel qualitatif pour les principaux cépages cultivés dans le monde (Jones, 2006)	20
1.6	Les échelles spatiales du climat (Quénol, 2011)	24
1.7	Facteurs de variabilité du climat local (Quénol, 2011)	25
2.1	Principaux domaines de fréquences du spectre électromagnétique (adapté de http://www.alloprof.qc.ca/BV/pages/s1137.aspx)	28
2.2	Plages de fréquences (GHz) et de longueurs d'onde (cm) des bandes dans le domaine des hyperfréquences, adapté de Lee et Pottier (2009a)	29
2.3	Principaux diffuseurs de la végétation en fonction de la longueur d'onde émise par le capteur (Le Toan, 2005)	30
2.4	Géométrie d'acquisition des capteurs RSO à visée latérale d'après Lee et Pottier (2009a)	31
2.5	Illustration des trois principaux types de mécanismes de rétrodiffusion d'une surface : a) Simple rebond, b) diffusion multiple, c) double rebond	31
2.6	Exemples de signatures spectrales de la vigne, du sol et d'un couvert végétal (Hall <i>et al.</i> , 2002)	33
2.7	Représentation schématique des mécanismes de diffusion présents sur une parcelle de vigne	34
3.1	Localisation des principales provinces viticoles d'Argentine	43

3.2	Surfaces viticoles totales et proportion de couleur d'encépagement par rapport à la surface totale dédiée à la production de vins par province (INV, 2015b)	43
3.3	Localisation schématique des surfaces viticoles de la région viticole du Nord-Est (INV, 2014)	44
3.4	Localisation schématique des surfaces viticoles de la région viticole du Sud (INV, 2015a)	45
3.5	Localisation des quatre oasis de la Province de Mendoza	46
3.6	Surfaces viticoles totales et proportion de couleur d'encépagement par rapport à la surface totale dédiée à la production de vins par aire de production à Mendoza (INV, 2015b)	47
3.7	Cépages majoritaires par couleur et par aire de production à Mendoza (INV, 2015d)	47
3.8	Localisation du département de Lujan de Cuyo et sa topographie	48
3.9	Localisation des stations du réseau de la DACC au sein des 5 aires de production viticoles de la province de Mendoza	50
3.10	Schéma des pré-traitements effectués sur les images radar	57
3.11	Localisation des parcelles des quatre domaines viticoles échantillonnés	59
3.12	Parcelles de vignes présentes sur la zone d'étude en fonction du mode de conduite de la canopée	59
3.13	Carte des principaux cépages plantés sur les quatre domaines échantillonnés	60
3.14	Illustration de l'irrigation par méthode gravitaire (photo prise à Agrelo le 3 décembre 2014)	61
3.15	Localisation (en vert) des parcelles échantillonnées pour le suivi de la croissance végétative sur le site d'étude	62
3.16	Exemples de photographies hémisphériques acquises à différentes positions par rapport au gradient rang/inter-rang	62
4.1	Localisation des stations du réseau météorologique national (SMN) associée aux surfaces plantées en vignes de chaque province viticole	71
4.2	Températures minimales, maximales et moyennes des saisons végétatives de 1965 à 2015 pour les 10 stations étudiées du réseau SMN	74
4.3	Fréquences des types de saisons végétatives par période pré et post-rupture par station	76
4.4	Variabilité inter-annuelle et inter-régionale de trois indices bioclimatiques : indice de Huglin, indice de fraîcheur des nuits et indice de sécheresse des 10 stations du réseau SMN	78
5.1	Localisation des stations retenues au sein des 5 aires viticoles de la province de Mendoza	86

5.2	Températures moyennes mensuelles et cumuls mensuels des précipitations des 3 stations SMN de Mendoza par rapport à la normale par station de la période 1965-2016	88
5.3	Cumuls des degrés jours, de l'indice de Huglin et de l'indice des degrés jours biologiquement actifs des stations de la province de Mendoza	90
5.4	Variabilité spatiale de l'indice de Winkler a), de l'indice de Huglin b) et de l'indice des degrés jours biologiquement actifs c)	91
5.5	Fréquences des intervalles des températures nocturnes du mois de mars 2015 pour les 18 stations de la province de Mendoza	92
5.6	Comparaison des valeurs de l'indice de sécheresse obtenues en fonction de la méthode de calcul de l'évapotranspiration de référence ; en pointillés ET_0 à partir de l'équation de Penman Monteith FAO56, en trait plein ET_0 à partir de l'équation de Hargreaves calibrée sur la zone d'étude	93
5.7	Evolution et variabilité spatiale de l'indice de sécheresse	94
5.8	Analyse de co-inertie effectuée entre les données bioclimatiques et les données géographiques des 18 stations ; A gauche, cercles des corrélations des variables sur les axes de la co-inertie, au centre nuage des individus projetés sur les axes 1 et 2 de la co-inertie, le départ de la flèche correspond aux coordonnées avec les variables géographiques, et la pointe aux coordonnées avec les variables bioclimatiques et éboulis des valeurs propres de la co-inertie	95
6.1	Localisation du site d'étude et des vignobles étudiés	105
6.2	Fréquence des angles d'orientation des rangs sur l'espace d'étude	106
6.3	Schéma méthodologique de l'extraction de l'orientation des rangs à partir des images multispectrale et panchromatique adapté de Marais Sicre <i>et al.</i> (2014)	107
6.4	Exemples de segments extraits par les deux filtres sur la bande rouge de l'image multispectrale (a, b) et la bande panchromatique (c, d)	108
6.5	Fréquence spatiale moyenne des segments extraits par les deux filtres en fonction de l'orientation des rangs pour les deux images testées	109
6.6	Comparaison entre les valeurs estimées et mesurées de l'orientation des rangs à partir de la bande rouge de l'image multispectrale a) et de l'image panchromatique b)	109
6.7	Comparaison de la direction des segments extraits avec l'image panchromatique et l'image multispectrale pour le filtre directionnel à 45°	110
6.8	Effet d'aliasing à 2m de résolution spatiale	110
6.9	Carte des orientations des rangs produite à partir de l'image panchromatique Pléiades	112
7.1	Photos des trois types d'inter-rang : a) présence d'une bande enherbée, b) désherbage chimique, c) labour	116

7.2	Schéma méthodologique des traitements et analyses effectués	117
7.3	Evolution temporelle des coefficients de rétrodiffusion, de l'entropie, de l'angle alpha et du NDVI : a) pour une parcelle témoin aux inter-rangs enherbés associé aux précipitations, au calendrier d'irrigation et au suivi de la croissance; b) à l'échelle du site le profil moyen des parcelles enherbées et l'écart-type	119
7.4	Evolution temporelle des coefficients de rétrodiffusion, de l'entropie, de l'angle alpha et du NDVI : a) pour une parcelle aux inter-rangs désherbés chimiquement, orientée à 167,5° associés aux précipitations, au calendrier d'irrigation et au suivi de la croissance; b) à l'échelle du site le profil moyen des parcelles désherbées et l'écart-type	121
7.5	Evolution temporelle des coefficients de rétrodiffusion, de l'entropie, de l'angle alpha et du NDVI : a) pour une parcelle labourée associés aux précipitations, au calendrier d'irrigation et au suivi de la croissance; b) à l'échelle du site le profil moyen des parcelles labourées et l'écart-type . . .	123
7.6	Résumé statistiques des régressions entre les indices de végétation, les paramètres polarimétriques et la variable biophysique GLAI pour les trois catégories de parcelles	124
7.7	Régressions obtenues pour les parcelles dont les rangs sont enherbés au cours de la saison végétative entre le GLAI et le MTVI2 a); GLAI et entropie b)	125
7.8	Régressions obtenues pour les parcelles dont les rangs sont désherbés et orientés à 167,5° au cours de la saison végétative entre le GLAI et le MTVI2 a); GLAI et angle alpha b)	125
7.9	Régressions obtenues pour les parcelles dont les rangs sont désherbés par labour au cours de la saison végétative entre le GLAI et le MTVI2 a); GLAI et entropie b)	126
7.10	Résumé statistiques des régressions entre les indices de végétation, les paramètres polarimétriques et la variable biophysique de hauteur de la canopée pour les trois catégories de parcelles	127
7.11	Régressions obtenues pour les parcelles dont les rangs sont enherbés au cours de la saison végétative entre la hauteur de la canopée et le MTVI2 a); GLAI et entropie b)	127
7.12	Régressions obtenues pour les parcelles dont les rangs sont désherbés et orientés à 167,5° au cours de la saison végétative entre la hauteur de la canopée et le MTVI2 a); GLAI et angle alpha b)	129
7.13	Régressions obtenues pour les parcelles dont les rangs sont désherbés par labour au cours de la saison végétative entre la hauteur de la canopée et le MTVI2 a); GLAI et entropie b)	129

7.14	Cartes du GLAI a) à c) et indices de confiance autour de la prédiction associés d) à f)	131
7.15	Cartes de la hauteur de la canopée a) à c) et indices de confiance autour de la prédiction associés d) à f)	132
8.1	Types de filets anti-grêle employés sur le site d'étude	138
8.2	Diagramme méthodologique de la classification des pratiques culturelles . .	139
8.3	Performances des 10 échantillons d'entraînement (et validation) testés sur les images considérées une à une; a) Ecart quadratique moyen au kappa moyen de chaque image par échantillon testé, b) Localisation des parcelles d'entraînement retenues	142
8.4	Valeurs de kappa obtenues en utilisant différentes combinaisons d'images présentées en fonction du nombre impliquées dans la classification	143
8.5	Fréquence d'utilisation des différentes images dans les quatre combinaisons à trois images dont le kappa est supérieur ou égal à 0,93	144
8.6	Importance des variables dans la classification : a) Diminution moyenne de la précision, b) Diminution moyenne de l'indice de Gini	145
8.7	Cartes des pratiques culturales à l'échelle de la zone d'étude et probabilités des classes associées. Sont entourées en rouge les parcelles du jeu d'entraînement	148
8.8	Performances des 10 échantillons d'entraînement (et validation) testés sur les images considérées une à une; a) Ecart quadratique moyen au kappa moyen de chaque image par échantillon testé, b) Localisation des parcelles d'entraînement retenues	149
8.9	Valeurs de kappa obtenues en utilisant différentes combinaisons d'images présentées en fonction du nombre d'images impliquées dans la classification	149
8.10	Importance des variables dans la classification : a) Diminution moyenne de la précision, b) Diminution moyenne de l'indice de Gini	150
8.11	Cartes des modes d'irrigation à l'échelle de la zone d'étude et probabilités des classes associées. Sont entourées en rouge les parcelles du jeu d'entraînement	151
8.12	Signatures temporelles moyennes : a) des parcelles classées comme désherbées chimiquement hors des quatre domaines d'étude et les écart-types associés; b) des parcelles labourées du site d'étude du chapitre 7	153
9.1	Méthodologie générale appliquée pour comparer des méthodes d'estimation de l'évapotranspiration potentielle des vignobles et des besoins en eau . . .	160
9.2	Comparaison des valeurs d'albédo estimées par les deux capteurs optiques utilisés : a) Images du 5 janvier (Landsat-8) et du 9 janvier (Pléiades); b) Images du 21 janvier (Landsat-8) et du 25 janvier (Pléiades)	166

9.3	Variabilité spatiale et évolution temporelle de l'albédo au cours de la saison végétative	168
9.4	Variabilité spatiale et évolution temporelle du LAI calculé à partir du MTVI2 au cours de la saison végétative	169
9.5	Comparaison de l' ET_c incluant les données in-situ pour le calcul du K_c avec le calcul de l' ET_c à partir du K_c -NDVI a) ; avec le calcul de l' ET_c par méthode analytique b)	170
9.6	Variabilité spatiale et évolution temporelle des K_c calculés à partir du NDVI (a) à d)) et à partir de la méthode analytique (e) à h)) au cours de la saison végétative	171
9.7	Cumuls mensuels moyens de l'évapotranspiration potentielle et écart-types associées	174
9.8	Estimations bimensuelles de l'évapotranspiration potentielle des vignes calculées à partir du K_c -NDVI a) à d) et des besoins en eau associés(a) à d)) et à partir de la méthode analytique e) à h) durant les mois de novembre et décembre 2014	175
B.1	Performances de l'équation de Hargreaves et de sa version calibrée pour le calcul de l'évapotranspiration de référence	228

Liste des tableaux

3.1	Coordonnées géographiques des stations du SMN et liste des variables mesurées	49
3.2	Variables mesurées par la station météorologique de la Finca Decero	51
3.3	Caractéristiques des images satellitaires optiques utilisées	53
3.4	Indices de végétation calculés à partir des images satellitaires optiques	55
3.5	Caractéristiques des images TerraSAR-X utilisées	56
3.6	Résumé par domaine viticole des pratiques culturales de plantation et de gestion des parcelles	60
4.1	Caractéristiques des quatre types de saisons végétatives en fonction du signe des anomalies de la température moyenne de la saison végétative et du cumul des précipitations de la saison végétative	72
4.2	Ruptures climatiques dans les séries des températures moyennes, minimales et maximales de la saison végétative et tendances associées. Les lignes présentant des * ne sont pas significatives au seuil de 0,05%	75
4.3	Cumuls mensuels moyens (en mm) sur la période 1964-2015 durant la saison végétative et les écarts-type associés entre parenthèse	76
4.4	Evolution des différents indices bioclimatiques au cours de la période 1965-2016	80
4.5	Principaux cépages cultivés (rouges et blancs) des six régions étudiées source INV 2015 destinés à la vinification	81
5.1	Statistiques des indices bioclimatiques et cumuls de précipitations de la saison végétative 2014-2015 par aire de production viticole de la province de Mendoza	89
7.1	Gestion des inter-rangs et protection des vignobles avec des filets anti-grêle	115
7.2	Résultats de la validation croisée avec la méthode "leave-one-out", les coefficients de détermination et les erreurs quadratiques moyennes correspondent aux résultats de l'ajustement des valeurs prédites aux valeurs de validation	130
8.1	Matrice de confusion issue de la classification réalisée à partir des 3 images : TerraSAR-X 18 janvier, Pléiades 9 janvier et Pléiades 25 janvier	144

8.2	Matrice de confusion issue de la classification réalisée à partir de l'image TerraSAR-X du 18 janvier	146
8.3	Matrice de confusion issue de la classification réalisée à partir de l'image Pléiades du 9 janvier	146
8.4	Matrice de confusion issue de la classification réalisée à partir de l'image Pléiades du 25 janvier	146
8.5	Classes des pratiques culturales des parcelles de la zone d'étude non échantillonnées dont le mode d'irrigation a été classé comme gravitaire	154
9.1	Coefficients de pondération nécessaires pour estimer l'albédo pour les deux capteurs utilisés	163
9.2	Variation statistiques des valeurs des coefficients culturaux calculés avec les différentes méthodes sur les 14 parcelles de validation	170
9.3	Coefficients culturaux des vignobles rapportés dans la littérature	173

ANNEXES

ANNEXE A

Indices Bioclimatiques

Indice	Equation pour l'hémisphère Sud	Classes climatiques	Référence
Température moyenne de la saison végétative (GST °C)	$\frac{\sum_{01/10}^{30/04} \frac{T_x + T_n}{2}}{n}$	Trop froid < 13 Frais]13 - 15] Tempéré]15 - 17] Tempéré chaud]17 - 19] Chaud]19 - 21] Très chaud]21 - 24] Trop chaud > 24	Jones <i>et al.</i> (2005b) Hall et Jones (2010)
Indice de Winkler (WI °C)	$\sum_{01/10}^{30/04} \max\left[\frac{T_x + T_n}{2} - 10, 0\right]$	Trop froid < 850 I [850 - 1389] II]1389 - 1667] III]1667 - 1944] IV]1944 - 2222] V]2222 - 2700] Trop chaud > 2700	Amerine et Winkler (1944) Winkler (1974)
Indice de Huglin (HI °C)	$\sum_{01/10}^{31/03} \max\left[\frac{(T_m - 10) + (T_x - 10)}{2} - 10, 0\right]k^b$	Très frais ≤ 1500 Frais]1500 - 1800] Tempéré]1800 - 2100] Tempéré chaud]2100 - 2400] Chaud]2400 - 2700] Très chaud]2700 - 3000] Trop chaud > 3000	Huglin (1978) Huglin et Schneider (1998)
Indice des degrés jours biologiquement actifs (BEDD °C)	$\sum_{01/10}^{31/03} \min\left[\max\left(\frac{T_x + T_n}{2} - 10, 0\right)k + DTR, 9\right]$	Trop froid ≤ 1000 Très frais [1000- 1200] Frais]1200 - 1400] Tempéré]1400 - 1600] Tempéré chaud]1600 - 1800] Chaud]1800 - 2000] Très chaud]2000 - 2200] Trop chaud > 2200	Gladstones (1992) Tonietto et Carbonneau (2004)
Indice de fraîcheur des nuits (IF °C)	$\frac{\sum_{01/03}^{31/03} T_n}{31}$	Nuits très fraîches ≤ 12 Nuits fraîches]12 - 14] Nuits tempérées]14 - 18] Nuits chaudes > 18	Tonietto (1999) Tonietto et Carbonneau (2004)
Indice de sécheresse (DI mm)	$\sum_{Oct}^{Mar} [W_0 + P - T_v - E_s]^c$	Humide > 150 Subhumide]50 - 150] Sécheresse modérée]-100 - 50] Sécheresse forte < -100	Riou <i>et al.</i> (1994) Tonietto et Carbonneau (2004)

a. T_x correspond aux températures maximales et T_n aux minimales

b. k= coefficient de longueur des jours suivant la latitude

c. W_0 est la balance hydrique du sol initiale fixée à 200mm, P est le cumul de précipitations du mois, T_v est la transpiration de la vigne, E_s est l'évaporation du sol.

ANNEXE B

Calibration de l'équation de Hargreaves

Dans le cas des stations de la DACC seules les données de température sont disponibles, donc pour le calcul de l'évapotranspiration nécessaire au calcul de l'indice de sécheresse, l'équation de Hargreaves a été utilisée (Hargreaves et Samani, 1985). La version de l'équation conseillée par la FAO est la suivante :

$$ET_0 = 0.0023(T_m + 17.8)(T_x - T_n)^{0.5} R_a \quad (\text{B.1})$$

T_m est la température moyenne de l'air en °C ;

T_x est la température maximale de l'air en °C ;

T_n est la température minimale de l'air en °C ;

R_a est le rayonnement extraterrestre en mm.

Cependant, sans calibration et en fonction des conditions d'humidité et de vitesse du vent particulières, cette équation va surestimer ou sous-estimer l' ET_0 . Une comparaison entre l'équation de Hargreaves et une version calibrée est donc réalisée en utilisant les données des stations de Mendoza Aero, San Martin et San Rafael Aero. Les ajustements de l'équation de Hargreaves à l'équation de Penmann Monteith version FAO56 et de la version calibrée aux conditions du site et de la campagne 2014-2015 à la méthode de référence sont ensuite comparés .

La version calibrée de l'équation est issue d'une régression non linéaire de l'équation de la forme :

$$ET_0 = a(T_m + b)(T_x - T_n)^c R_a + d \quad (\text{B.2})$$

Les valeurs des différents paramètres obtenues sont : a=0.0053, b=26.7, c=0.21 et d=-1.83

L'évaluation de la performance des deux équations de Hargreaves par rapport à la méthode de référence sont présentées dans la figure B.1 suivante. La calibration de l'équation aux conditions du site permet d'améliorer les performances de cette méthode empirique. Cette version sera donc retenue pour calculer l'évapotranspiration de référence avec les données de la DACC.

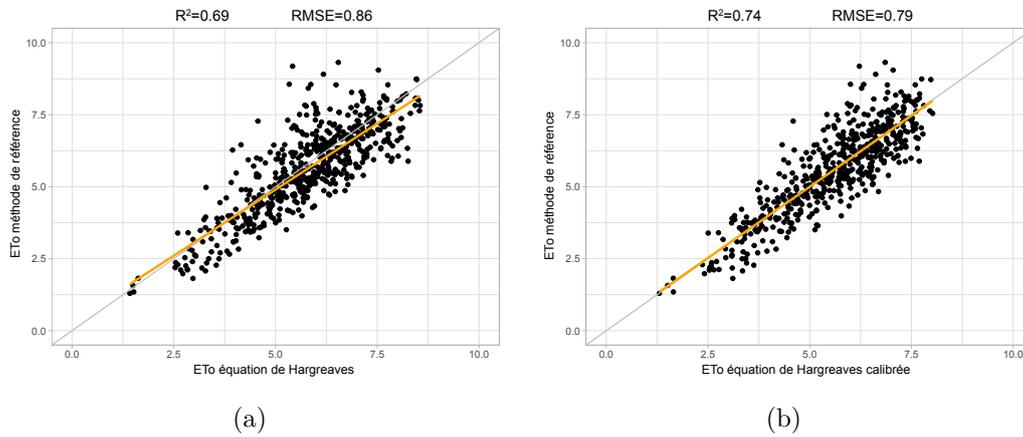


Figure B.1 – Performances de l'équation de Hargreaves et de sa version calibrée pour le calcul de l'évapotranspiration de référence

Caractérisation de la viticulture irriguée par télédétection en contexte de changement climatique : Application aux vignobles de la province de Mendoza en Argentine

Résumé : En contexte de changement global, les questions d'adaptation et de pérennisation des systèmes de production sont un enjeu agricole majeur. En Argentine, le 5^{ème} producteur mondial de vins, les conditions thermiques et hydriques sont déjà proches des limites de la culture de la vigne. En tant que culture pérenne, son adaptation à court et moyen termes doit être pensée, dès à présent. La pérennisation de cette culture passe par une adaptation des pratiques culturales. L'objectif de cette thèse visait à proposer des outils de détection et de gestion des pratiques culturales des vignobles à partir d'images satellitaires optiques et radar. Une analyse préalable des évolutions du climat et de sa variabilité intra-régionale a mis en évidence les principales menaces et opportunités au regard du changement climatique. A l'échelle locale, le travail sur un grand nombre de parcelles aux caractéristiques hétérogènes a approfondi les connaissances sur l'interaction signal cible en fonction des pratiques culturales. Des cartographies de l'orientation des rangées de vignes, des surfaces protégées par des filets anti-grêles et des modes d'irrigation ont été réalisées afin de dresser un état des lieux du système viticole actuel. Ensuite, l'évaluation du potentiel des données satellitaires pour le suivi de la croissance de la vigne et de ses besoins en eau ont apporté des résultats prometteurs pour le développement d'outils d'aide à la décision pour les viticulteurs.

Mots clés : viticulture, télédétection, images optiques, images radar, irrigation, pratiques culturales, changement climatique

Use of remote sensing for irrigated viticulture characterization in the climate change context : Application over the vineyards of Mendoza, Argentina

Abstract : In the climate change context, the adaptation and sustainability of agricultural systems is a major challenge. In Argentina, the 5th worldwide wine producing country, the thermal and hydri-cal conditions are already extreme for grapevine production. This perennial crop sustainability depends on the adaptation of cultural practices. The objective of the thesis was to develop tools for helping in cultural practices management using optical and SAR remote sensing images. First, an analysis of climate evolution and its inner regional variability highlighted the main threats and opportunities in the climate change context. At the local scale, working on a high number of heterogeneous vineyards improved the knowledge about signal and target interaction depending on cultural practices. Maps of row orientation, areas protected by anti-hail nets and irrigation systems were produced for an inventory of the actual viticultural system conditions. Then, the potential of remote sensing data for grapevine growth monitoring and irrigation requirements was evaluated and led to promising preliminary results for developing irrigation monitoring tools destined to grapevine producers.

Keywords : viticulture, remote sensing, optical images, SAR images, irrigation, cultural practices, climate change

Laboratoire LETG-Rennes UMR 6554 CNRS
Université Rennes 2
Place du recteur Henri Le Moal, CS 24037,
35043 Rennes cédex, France

