



HAL
open science

Analyse multiscalaire de la variabilité spatiale et temporelle des températures à l'échelle des appellations viticoles de Saint-Émilion, Pomerol et leurs satellites

Renan Le Roux, Laure de Rességuier, Marwan Katurji, Payman Zawar-Reza, Andrew Sturman, Cornelis van Leeuwen, Hervé Quénol

► To cite this version:

Renan Le Roux, Laure de Rességuier, Marwan Katurji, Payman Zawar-Reza, Andrew Sturman, et al.. Analyse multiscalaire de la variabilité spatiale et temporelle des températures à l'échelle des appellations viticoles de Saint-Émilion, Pomerol et leurs satellites. *Climatologie*, 2017, 14, pp.1-17. 10.4267/climatologie.1243 . hal-01691424

HAL Id: hal-01691424

<https://hal.science/hal-01691424>

Submitted on 18 Jan 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

ANALYSE MULTISCALAIRE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE ET TEMPORELLE DES TEMPÉRATURES À L'ÉCHELLE DES APPELLATIONS VITICOLES DE SAINT-ÉMILION, POMEROL ET LEURS SATELLITES

Renan LE ROUX¹, Laure DE RESSÉGUIER², Marwan KATURJI³,
Peyman ZAWAR-REZA³, Andrew STURMAN³,
Cornelis VAN LEEUWEN², Hervé QUÉNOL^{1,3}

¹ LETG-Rennes, UMR 6554 CNRS - Université Rennes 2
Place du Recteur Henri Moal, Rennes – France
renan.leroux@univ-rennes2

² UMR EGFV, Bordeaux Sciences Agro, INRA, Université de Bordeaux
33140 Villenave d'Ornon – France

³ Centre for Atmospheric Research, University of Canterbury
Christchurch – Nouvelle-Zélande

Résumé

Aux échelles locales, la forte variabilité spatiale du climat engendrée par la nature et les aspérités de la surface peut avoir un impact sur les caractéristiques et la qualité des vins. D'ailleurs, les spécificités locales du climat sont un des facteurs importants qui déterminent les caractéristiques d'un terroir. Dans le Libournais, plus précisément dans les appellations de Saint-Émilion, Pomerol et leurs satellites, une étude de climatologie locale a eu pour objectif d'analyser la variabilité spatiale du climat (notamment des indices bioclimatiques thermiques) et les caractéristiques des vins. L'analyse et la modélisation spatiale des températures journalières, saisonnières et des indices bioclimatiques met en évidence l'impact des paramètres locaux (ex : topographie, distance à une rivière...) sur la répartition des températures à l'échelle du site d'étude. Une analyse des différentes distributions spatiales des températures en relation avec des situations atmosphériques synoptiques (via la méthode des 'Self-Organize Maps') a permis d'affiner les résultats sur la répartition des températures sur ces appellations.

Mots-clés : échelles locales, modélisation climatique, Self-Organized Maps, appellations viticoles.

Abstract

Spatio-temporal analysis of temperature variability at various scale in the winegrowing area of Saint-Émilion and Pomerol, France

Variability of temperature at the vineyard scale has a significant effect on physiological development of the grapevine and, ultimately, wine quality. Winegrowing areas have been classified by means of indices using accumulated heat or degree days. Or at local scale, temperature can show large variability. In the appellation of Saint-Émilion and Pomerol a fine scale network of temperature data loggers was installed in 2011 to measure temperature at local scale. These measurements allowed the creation of fine scale maps of daily temperature for 4 successive years (2012, 2013, 2014 and 2015) using non-linear regression model. Based on these maps, this study demonstrates that at this scale, temperature variability is strongly connected with local terrain (elevation, slope, aspect) but also that the temperature distribution show large variation in time depending on of the weather type of the day.

Keywords: local scale, climate modeling, Self-Organized Maps, vineyard.

Introduction

La vigne est fortement influencée par le climat tant au niveau de son fonctionnement (phénologie, physiologie) que sur les caractéristiques des raisins et la typicité des vins produits. La majeure partie des régions viticoles se situe entre 30° et 50° de latitude, c'est-à-

dire dans les secteurs où les conditions thermiques sont suffisantes pour une maturation complète des raisins dans des conditions climatiques tempérées (Blouin, 2007). À une échelle plus fine, le climat est fortement influencé par les aspérités (topographie) et la nature (occupation du sol, type de sol, proximité des masses d'eau) de la surface. Ces conditions environnementales locales ont un impact sur la phénologie, la croissance des organes herbacés et reproducteurs, la composition et la quantité des baies ainsi que le style de vin produit (van Leeuwen et Seguin, 2006). Ce sont ces spécificités environnementales locales combinées aux pratiques vitivinicoles qui définissent les caractéristiques d'un terroir viticole et par conséquent, la typicité du vin.

Au niveau climatique, la température est l'élément qui agit le plus sur la phénologie et la physiologie de la vigne (Mira de Orduña, 2010 ; Parker *et al.*, 2011 ; Jones et Alves, 2012). Des indices bioclimatiques, basés sur le calcul de sommes thermiques durant la croissance de la vigne, sont fortement corrélés avec les différents stades phénologiques de la vigne ainsi qu'avec la composition des baies (niveau de sucre, acidité, métabolites secondaires) (Amerine et Winkler, 1944 ; Huglin, 1978 ; Parker *et al.*, 2011, 2013). Les relations entre ces indices et le comportement de la vigne ont largement été étudiées à travers le monde et des classifications climatiques viticoles ont été définies (Tonietto et Carbonneau, 2004 ; Hall et Jones, 2009 ; Gladstones, 2011). Ces classifications climatiques viticoles, calculées à partir des températures issues des réseaux météorologiques nationaux sont applicables à une échelle régionale. Or, à l'échelle d'un vignoble ou d'une appellation viticole, les températures peuvent présenter des variations importantes voire supérieures à la variabilité régionale avec des écarts moyens pouvant atteindre plusieurs degrés (Quénol et Bonnardot, 2014). La prise en compte de l'échelle locale est donc indispensable pour définir précisément l'impact des températures sur la phénologie, les caractéristiques des raisins et la typicité des vins.

L'analyse et la modélisation climatique à l'échelle locale, et plus particulièrement à l'échelle d'un vignoble, nécessitent des réseaux de mesures et des modélisations prenant en compte l'influence des facteurs locaux, comme la topographie. Les réseaux climatiques nationaux (ex : réseau Météo France) ne sont pas adaptés car leur maillage est trop lâche et surtout les normes d'installation ont pour objectif de limiter l'influence des « effets locaux » afin de retranscrire au mieux le climat à l'échelle régionale. Au niveau de la modélisation, les modèles dynamiques régionaux (ex : *Weather Research and Forecasting* – WRF), basés sur les équations fondamentales de l'atmosphère, descendent à des résolutions de plus en plus fines, de l'ordre du kilomètre voire de quelques centaines de mètres, et ont été utilisés dans plusieurs études climatiques en viticulture (Xu *et al.*, 2012 ; Sturman Trought *et al.*, 2014 ; Soltanzadeh *et al.*, 2016 ; Quénol *et al.*, 2017). Ces modèles ont montré leur capacité à reproduire fidèlement les conditions climatiques aux échelles synoptiques et régionales. Mais les capacités de calcul importantes requises pour atteindre une résolution spatiale de quelques dizaines de mètres ainsi que les imprécisions des modèles à ces échelles ne permettent pas d'obtenir des résultats satisfaisants à l'échelle d'un vignoble ou d'une appellation viticole (Sturman *et al.*, 2014).

Dans le cadre de différents projets de recherche visant à étudier les impacts du changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles, plusieurs vignobles et appellations viticoles ont été équipés de réseaux denses de mesures pour pallier le manque d'informations disponibles à cette échelle (Quénol *et al.*, 2014 ; Quénol et Bonnardot, 2014). La densification des réseaux de mesures et l'emplacement des postes de mesures en fonction des conditions locales du terrain (topographie, hydrographie, proximité des bâtiments) ont permis de créer des modèles statistiques basés sur des modèles de régression linéaire entre les températures et l'environnement local (Joly *et al.*, 2003 ; Madelin, 2004 ; Bois, 2007 ; Stahl *et al.*, 2006 ;

Bonnefoy, 2013) et plus récemment, des modèles de régression non linéaire (Le Roux *et al.*, 2016) afin d'obtenir une spatialisation fine des températures.

Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux de « zonage climatique » à l'échelle de la Gironde viticole (Bois, 2007 ; Bois *et al.*, 2014). Un réseau de capteurs de température installé en 2011 dans les vignobles des sous-appellations bordelaises de Saint-Émilion, Pomerol et leurs satellites a mis en lumière une importante variabilité des températures en relation avec le comportement de la vigne (De Ressaquier *et al.*, 2016). En s'appuyant sur ces résultats ainsi que sur les cartes de modélisation à 25 m produites par des régressions non linéaires (Le Roux *et al.*, 2016), ce travail a pour objectif d'analyser la répartition des températures sur ces appellations *via* une étude spatio-temporelle à l'échelle locale en relation avec différentes situations atmosphériques synoptiques.

1. Matériels et méthodes

1.1. Site et années d'étude

Le site d'étude correspond à la partie nord-est de la Gironde viticole, sur la rive droite de la Dordogne, à proximité de la ville de Libourne. La région est soumise à un climat océanique prononcé (majorité de flux d'ouest). Les précipitations, régulières durant l'année (944 mm annuel pour 1981-2010), sont plus importantes en hiver et diminuent durant la période estivale. Le Libournais se caractérise par un relief plus marqué que le reste de la Gironde viticole, l'altitude variant de 5 m dans la plaine de la Dordogne au sud à un peu plus de 100 m sur les plateaux. Le réseau hydrographique se compose d'un bassin versant principal au sud, la Dordogne, et de plusieurs cours d'eau secondaire orientés est/ouest (figure 1).

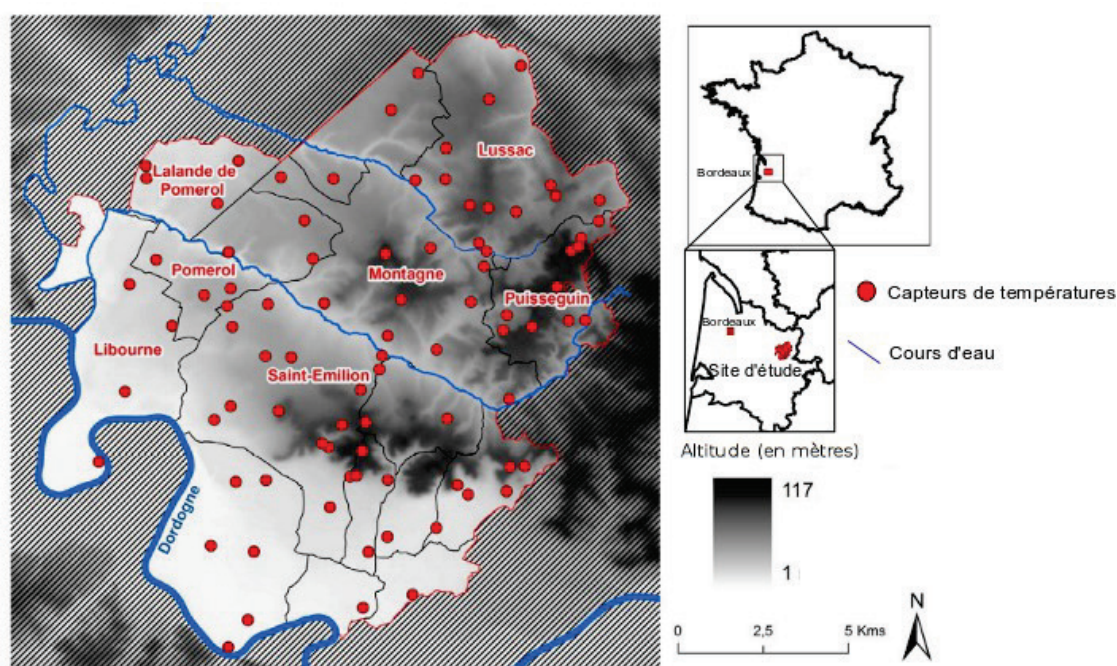


Figure 1 : Site d'étude et réseau de 90 capteurs de température installé en 2011 par les équipes de l'INRA – Bordeaux dans les vignobles des appellations de Saint-Émilion, Pomerol et leurs satellites. *90 sensors network of the study area (Saint-Émilion and Pomerol area), set up in 2011 by the INRA-Bordeaux team.*

L'étude porte sur quatre années consécutives (2012 à 2015). Ces quatre millésimes étudiés présentent des profils très différents (figure 2) : en 2012, les températures de la saison végétative (du 1^{er} avril au 30 septembre) ont été relativement élevées (+0,5 par rapport à la

normale) avec un mois d'avril très arrosé (178 mm) alors que le reste de la saison a été en dessous des normales de précipitations. Le mois d'août a été particulièrement sec. L'année 2013 est caractérisée par des précipitations continues durant la saison végétative supérieures aux normales, excepté en août. Les températures ont été en dessous des normales durant le printemps avant d'être plus proches des normales au cours de la période estivale. En 2014, les conditions climatiques ont été proches de la normale hormis septembre qui a été très sec (21 mm) avec des températures plus élevées que la normale (+1,7°C). L'année 2015 est caractérisée par de faibles précipitations tout au long de la saison végétative, à l'exception du mois d'août, avec des températures supérieures aux normales. Ces quatre années d'analyse, aux profils climatiques très variés, couvrent une grande diversité de situations climatiques de la région.

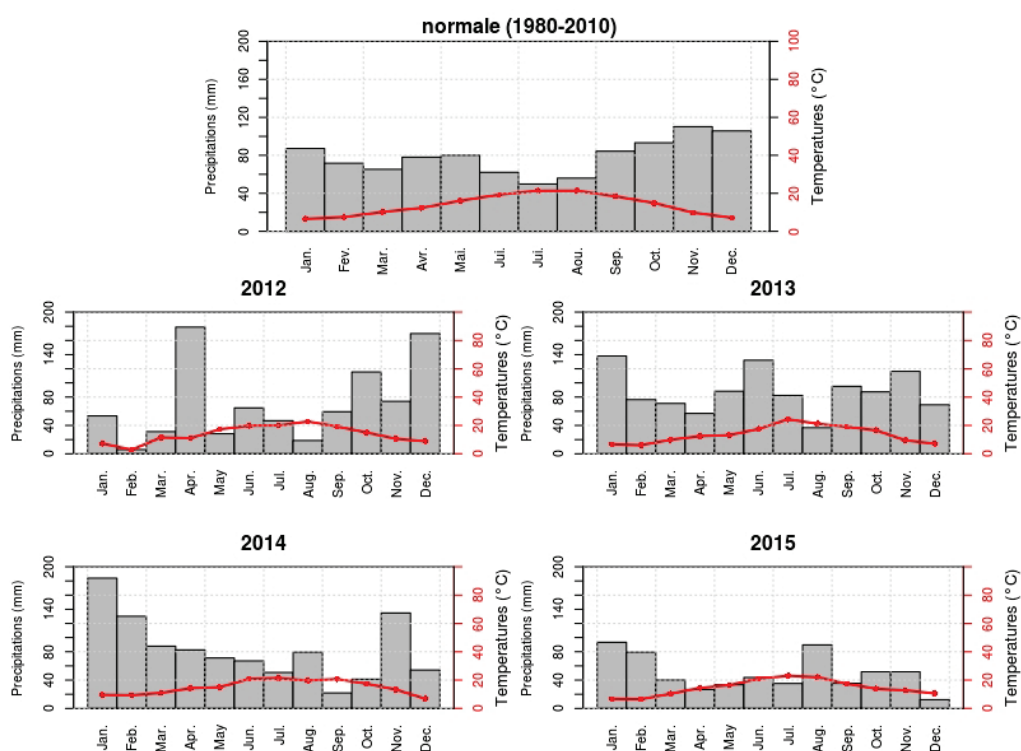


Figure 2 : Diagrammes ombrothermiques de la normale 1980-2010 et des années 2012 à 2015 à la station de Bordeaux-Merignac (source des données : Météo France). *Monthly precipitation and average temperature during the studied years (2012 to 2015) and for 1980-2010 at Bordeaux-Merignac weather station (Météo-France data).*

1.2. Données utilisées

Afin d'étudier la variabilité spatiale des températures liées aux effets locaux (topographie) en liaison avec le comportement de la vigne (phénologie) et les caractéristiques des vins (typicité), un réseau de 90 capteurs de température (type TinyTag, Gemini) a été installé fin 2011 dans la région de Saint-Émilion, Pomerol et Lalande-de-Pomerol (les capteurs possèdent une résolution théorique de $0,4^{\circ}\text{C}^1$, mais des tests d'étalonnages en laboratoire ont montré une résolution plus précise). Les températures (minimales, maximales et moyennes) enregistrées toutes les heures ont été analysées pour les quatre millésimes étudiés entre 2012 et 2015. La différence entre le capteur présentant les valeurs les plus élevées et celui présentant les plus faibles est calculée chacune des journées de mesure afin de connaître l'amplitude thermique journalière sur le site. Plus spécifiquement, en liaison avec les

¹ <http://gemini2.assets.d3r.com/pdfs/original/1554-tk-4023.pdf>

caractéristiques de la vigne, les températures moyennes minimales et maximales ont été analysées durant la saison végétative (d'avril à septembre) et des indices bioclimatiques ont été calculés afin de caractériser chacun des millésimes et de pouvoir les comparer. Les indices bioclimatiques de Winkler et de Huglin, fondés sur des accumulations de températures journalières, sont utilisés pour déterminer les types de climats favorables pour la viticulture (Winkler, 1962 ; Tonietto et Carbonneau, 2004), et se calculent par exemple ainsi :

$$IW = \sum_{01/04}^{31/10} (M_{dj} - 10) \quad IH = \sum_{01/04}^{30/09} \frac{(M_{dj} - 10) + (M_{xj} - 10)}{2} \cdot k$$

avec IW = Indice de Winkler ; IH = indice de Huglin ; M_{dj} = Températures moyennes journalières ; M_{xj} = Températures maximales journalières ; k = coefficient de longueur du jour.

Ces indices, qui sont fortement corrélés au développement de la vigne et aux caractéristiques des raisins, s'avèrent utiles pour décrire les différences thermiques spécifiques du site à l'échelle d'un millésime. L'analyse des données de températures du réseau de capteurs a permis d'étudier ponctuellement la variabilité spatiale des températures et des indices bioclimatiques. Les données manquantes ou aberrantes ont été retirées du jeu de données ; lorsque des dérives ont été observées, les capteurs ont été doublés pour contrôler la qualité de la mesure. Seuls les capteurs possédant 80 % de l'information à l'échelle de la saison végétative ont été conservés. Afin de pouvoir estimer la variabilité spatiale des températures en tout point du site d'étude, il est nécessaire de spatialiser les données en utilisant une modélisation appropriée à l'échelle d'étude.

1.3. Modélisation spatiale multiscalaire des données topo-climatiques

Après avoir acquis les données ponctuellement *via* le réseau de capteurs, il est nécessaire de les cartographier sur l'ensemble du site d'étude. Les méthodes d'interpolation spatiale estiment en tout point de l'espace une variable à partir de points d'échantillonnage aux valeurs connues. L'utilisation de ces différentes méthodes repose sur des prérequis liés aux types de données à interpoler ainsi qu'à l'échelle spatiale d'application (Bivand *et al.*, 2008 ; Wackernagel, 2013).

À l'échelle locale, la distribution des températures est fortement tributaire des éléments locaux et particulièrement de la topographie (Joly *et al.*, 2003). Les relations entre la topographie et les températures peuvent être évaluées et quantifiées *via* des modèles de régression. À partir de ces modèles, les températures sont spatialisées à une maille fine. Un modèle de régression non linéaire (*Support Vector Regression*) a été mis en place pour produire des cartes précises des températures minimales et maximales journalières (Le Roux *et al.*, 2016 ; Le Roux *et al.*, 2017).

Les *Support Vector Machine* (SVM) sont issus de la théorie '*machine learning*' (Cortes et Vapnik, 1995). Ils sont particulièrement efficaces pour les estimations de relations non linéaires complexes grâce à l'emploi de ce noyau. La fonction de régression associée est la suivante :

$$Y(X) = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i K(X, S_i) + \varepsilon$$

avec S les Support Vector, β_0 les coefficients associés et K le noyau.

La qualité du modèle est évaluée par validation croisée (80 % et 20 % ; Arlot et Celisse, 2010). Dans le cas présent, ce type de modèle produit des résultats avec des incertitudes faibles (tableau 1). Pour plus de détails sur la création et la qualité du modèle, le lecteur

pourra se référer à Le Roux *et al.* (2017). À partir des cartes journalières, les indices bioclimatiques de la vigne cités précédemment ont été cartographiés afin de caractériser les disparités spatiales de chaque millésime. Cependant, ces indices ne sont pas suffisants pour connaître la variabilité journalière des températures. En effet, la variabilité spatiale moyenne annuelle des températures et des indices bioclimatiques d'une appellation viticole va être la résultante de nombreuses situations très différentes. La répartition des températures varie suivant les différentes situations atmosphériques. Les climats, et donc les températures, des échelles inférieures sont tributaires des échelles climatiques supérieures. Pour expliquer la répartition des températures à un pas de temps journalier, il est alors nécessaire d'étudier les situations synoptiques et leurs conséquences sur les distributions de températures à l'échelle locale.

	Température minimales moyennes			
	2012	2013	2014	2015
RMSE (°C)	0,24	0,26	0,23	0,22
Coef. de corrélation	0,94	0,89	0,92	0,90
	Température maximales moyennes			
	2012	2013	2014	2015
RMSE (°C)	0,21	0,21	0,22	0,24
Coef. de corrélation	0,85	0,81	0,83	0,84

Tableau 1 : Évaluation de la qualité du modèle SVR sur les températures minimales et maximales journalières (01/04 au 30/04) par des indicateurs statistiques pour les quatre années étudiées (d'après Le Roux *et al.*, 2017). *Model performance based on standard statistical indicators for the studied years.*

Pour cela, des sorties du modèle atmosphérique régional WRF (*Weather Research and Forecasting*; Skamarock *et al.*, 2008) ont été utilisées. WRF est un modèle climatique dynamique composé de grilles imbriquées à différentes échelles spatiales (27, 9, 3 et 1 km) fournissant une diversité de variables climatiques (pressions, températures, vents...). Le fonctionnement du modèle nécessite une importante puissance de calcul. Dans cette étude, la modélisation dynamique par WRF n'a été réalisée que sur le millésime 2014 pour ces raisons de capacité de calcul.

Le calcul de la pression moyenne au niveau de la mer, ainsi que de la direction et la force du vent moyen journalier à partir des sorties du modèle à 27 km de résolution a permis de déterminer les conditions atmosphériques journalières au niveau du site d'étude. Une analyse de la variabilité spatiale des températures à échelle locale en fonction des types de situations atmosphériques a ensuite été réalisée pour cette année 2014.

1.4. Modes spatio-temporels et analyses météorologiques synoptiques

Pour faciliter la lecture et l'analyse des différentes distributions de température à l'échelle du site d'étude, celles-ci ont été regroupées par classe *via* la méthode des 'Self-Organize Maps' (SOM). Il s'agit d'une méthode de classification non supervisée, basée sur les réseaux de neurones, détectant les relations topologiques entre différentes variables (Kohonen, 1988, 2012) qui sont regroupées en un nombre de clusters définis par l'utilisateur. En météorologie et climatologie, la méthode SOM est utilisée pour identifier les principaux patterns spatiaux de température, précipitation ou de circulation atmosphérique (Alexander *et al.*, 2010 ; Nigro *et al.*, 2011 ; Katurji *et al.*, 2015). L'algorithme SOM, employé dans cette étude, provient du package *R Kohonnen* (Wehrens et Buydens, 2007). La méthode a été appliquée aux températures minimales et maximales journalières. Après une série de tests, une sélection de neuf modes spatio-temporels principaux (ou modes) a été retenue, résumant suffisamment

l'information afin qu'elle soit lisible tout en conservant une diversité satisfaisante des situations possibles. Les occurrences mensuelles de ces différents patterns ont ensuite été analysées lors des quatre millésimes disponibles entre 2012 et 2015.

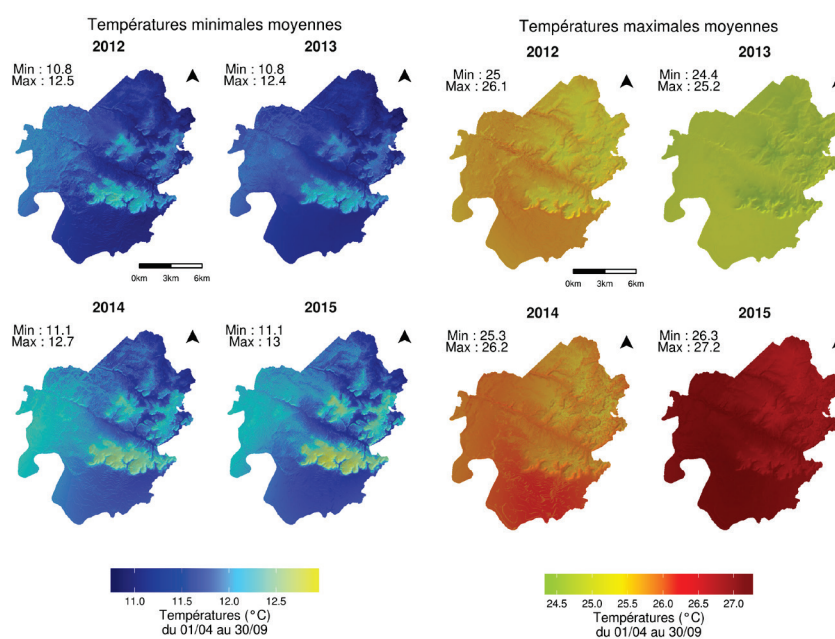
Les sorties du modèle WRF ne couvrant que l'année 2014, seul ce millésime a été étudié pour l'analyse des températures à échelle locale en fonction des différentes situations atmosphériques. Dans un premier temps, les dates des modes spatio-temporels issus de la méthode SOM de ce millésime ont été extraites. Ensuite, chaque journée a été associée aux champs de pression obtenus *via* la grille WRF à 27 km couvrant l'ouest de l'Europe. Enfin, les anomalies de pressions moyennes ont été calculées (variable centrée) ainsi que la force et la direction du vent moyenne par mode, créant 18 situations différentes (9 pour les températures minimales et 9 pour les maximales).

2. Résultats

2.1. Variabilité spatiale interannuelle des températures saisonnières

L'analyse des températures minimales (Tn) et maximales (Tx) enregistrées par le réseau de capteurs a mis en évidence une forte variabilité spatiale et temporelle à l'échelle de l'aire d'étude. Sur les quatre millésimes étudiés, la variabilité spatiale des températures minimales a été plus importante que celle des maximales : entre 1,6 et 1,9°C pour les Tn, et entre 0,9 et 1,1°C pour les Tx (figure 3). Pour les Tn, les secteurs avec les altitudes les plus élevées (plateaux calcaires de Saint-Émilion, Montagne, Puisseguin et Lussac), ainsi que ceux en pentes exposées sud correspondent aux températures minimales les plus élevées. Inversement, les secteurs les plus bas (fonds de vallons et la vallée de la Dordogne) sont associés aux températures les plus basses. Ce sont certainement les situations d'inversions thermiques liées à la topographie qui ont un poids important sur la répartition des températures nocturnes (Beltrando et Chémery, 1995). Il existe également une différence entre l'ouest et l'est de la région d'étude. Les Tn enregistrées dans la partie ouest (Libourne, Pomerol, Lalande-de-Pomerol) sont légèrement supérieures à la moyenne alors que les altitudes sont relativement basses et les pentes quasi nulles. La variabilité spatiale interannuelle des Tn est plus importante que la variabilité interannuelle.

Figure 3 : Températures minimales (à gauche) et maximales (à droite) moyennes du 01/04 au 30/09 pour les millésimes 2012, 2013, 2014 et 2015 dans les appellations viticoles de Saint-Émilion, Pomerol et leurs satellites. *Maps of average daily minimum and maximum temperature during the growing season over the study area for 2012, 2013, 2014 and 2015 (04/01 to 09/30) in Saint-Émilion and Pomerol area.*



La répartition spatiale des T_x est très différente, mais ce sont également les facteurs topographiques (altitude et exposition) qui expliquent la variabilité spatiale (Carrega, 2003). Les secteurs avec les valeurs les plus élevées sont majoritairement situés en basse altitude (plaine de la Dordogne, Libourne, Pomerol et les fonds de vallées), exception faite du nord-est du site (Lussac et les Artigues de Lussac) tandis que les plateaux sont plus frais. Les fortes pentes exposées sud sont ici aussi des secteurs où les T_x sont les plus élevées. L'amplitude thermique spatiale des températures maximales moyennes est moins importante que celle des températures minimales. Pour les T_n et les T_x , la distribution spatiale des températures est quasiment similaire quel que soit le millésime étudié.

2.2. Les indices bioclimatiques

La distribution spatiale de l'indice de Winkler est similaire à celle des températures minimales moyennes : les plateaux et coteaux ont les valeurs les plus élevées et les secteurs avec les plus basses altitudes présentent les valeurs les plus faibles (figure 4). Or, L'indice de Winkler est fortement corrélé aux températures moyennes lors de la saison végétative (Jones, 2006). La distribution des températures moyennes est donc fortement tributaire des températures minimales. Ces résultats sont explicables par le fait qu'à l'échelle locale, la variabilité spatiale des températures maximales est moins importante que pour les températures minimales (Carrega, 2003). L'indice de Huglin, par sa construction, donne un poids plus important aux températures maximales.

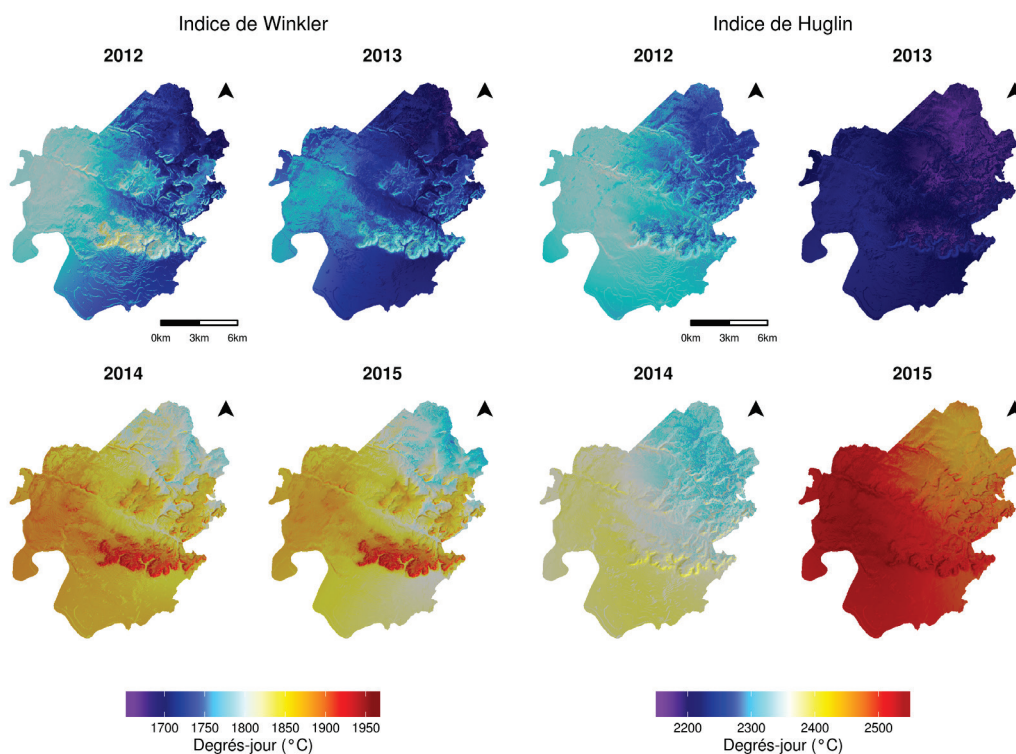


Figure 4 : Cartographie de l'indice de Winkler (à gauche) et de Huglin (à droite) pour les saisons 2012, 2013, 2014 et 2015 dans les appellations viticoles de Saint-Émilion, Pomerol et leurs satellites. *Maps of Winkler (left) and Huglin (right) indexes for 2012, 2013, 2014 and 2015 in Saint-Émilion and Pomerol area.*

Cependant, la température et les valeurs moyennes des indices d'une saison vont être plus dépendantes des températures maximales. Et l'effet millésime est donc plus tributaire des valeurs maximales. Les résultats ont mis en avant d'importantes disparités dans la distribution spatiale des températures. Cependant, ces résultats calculés sur une année ou sur la période

végétative de la vigne (d'avril à septembre pour l'indice d'Huglin et d'avril à octobre pour l'indice de Winkler) ne fournissent qu'une valeur moyenne et donc, une information partielle de la variabilité spatio-temporelle des températures. Pour comprendre les mécanismes climatiques (brises de pentes, position d'abris par rapport aux vents dominants) sous-jacents, les températures ont été analysées à une échelle journalière.

2.3. Analyses statistiques de la variabilité des températures des quatre années étudiées

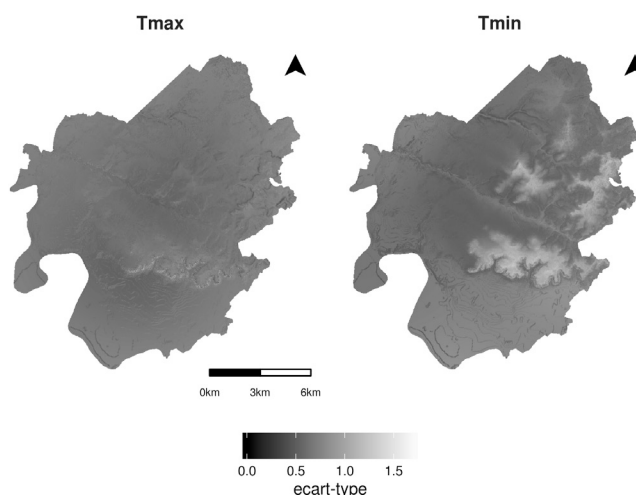
À l'échelle journalière, la distribution spatiale des températures varie fortement et de manière différente pour les températures minimales et maximales. La différence maximale de température, entre le capteur le plus chaud et celui le plus froid sur l'aire d'étude, est supérieure à 9°C pour les Tn et à 8°C pour les Tx (tableau 2). La variance est plus importante pour les Tn (3,1°C contre 1°C pour les Tx). D'une manière générale, 50 % des journées/nuits sont caractérisées par un écart thermique compris entre 2,5 et 5°C pour les Tn, et entre 2,5 et 3,8°C pour les Tx.

	Moyenne	Max	Min	Variance	Médiane	1 ^{er} quartile	3 ^{ème} quartile
Tn	3,9	9,5	0,9	3,1	3,8	2,4	5,0
Tx	3,2	9,4	0,8	1,0	3,1	2,5	3,8

Tableau 2 : Indicateurs statistiques de l'amplitude thermique spatiale (différence entre le capteur le plus chaud et le capteur le plus froid au pas de temps journalier) pour les quatre années étudiées (01/01/2012 au 31/12/2015). *Statistical indexes of differences between warmest and coolest sensor (daily step time) for the four studied year (01-01-2012 to 12-31-2015).*

L'amplitude de température entre le point le plus chaud et le plus froid est plus élevée la nuit que le jour. La nuit notamment, les conditions atmosphériques favorables à la formation d'une inversion thermique (phénomène d'accumulation d'air plus froid dans les cuvettes ou dans les secteurs sub-horizontaux) vont engendrer de forts écarts de températures, en particulier par rapport aux secteurs en pente. Le jour, la variabilité spatiale des températures est principalement liée aux effets d'abris ou d'obstacles qui vont modifier le bilan énergétique de surface. Ces effets sont très localisés (ombre portée des nuages). La Figure 5 met en évidence cette variabilité spatiale et temporelle élevée par l'intermédiaire de l'écart-type moyen calculé sur chaque pixel des cartographies journalières issues de l'interpolation spatiale des Tn et Tx de 2012 à 2015. Les espaces aux reliefs plus marqués (coteaux et plateaux) sont ceux avec les écart-types les plus élevés pour les températures minimales. Les résultats sont beaucoup plus homogènes pour les températures maximales, et les valeurs ne présentent pas d'extrêmes comparables à ceux observés pour les valeurs minimales.

Figure 5 : Ecart-type moyen de chaque pixel des Tn (à gauche) et des Tx (à droite) sur les quatre années d'étude (1^{er} janvier au 31 décembre 2012-2015). *Average standard deviation of each pixel for 2012, 2013, 2014 and 2015.*



2.4. Classification spatio-temporelle de la distribution des températures

La classification par la méthode SOM prend en compte à la fois les distributions spatiales dominantes des températures mais également l'occurrence de ces distributions au cours de la saison. Les neuf modes identifiés révèlent que le nord-est du site est en général plus froid que la moyenne (figure 6). Trois grandes distributions des températures se dégagent de cette analyse pour les Tn :

- Les inversions thermiques, où les secteurs en position dominante (plateaux) sont associés aux températures les plus élevées, concernent les modes 1, 2, 4, 5 et 7 dont la fréquence est particulièrement élevée en été et à l'automne.
- Les modes où les plateaux sont plus frais que les vallées (modes 6 et 9) sont plus observés en hiver et au printemps.
- Avec les modes 3 et 8, la distribution des températures est marquée par un gradient longitudinal, l'ouest du secteur étant plus chaud que l'est. Ces situations ne dominent aucune saison.

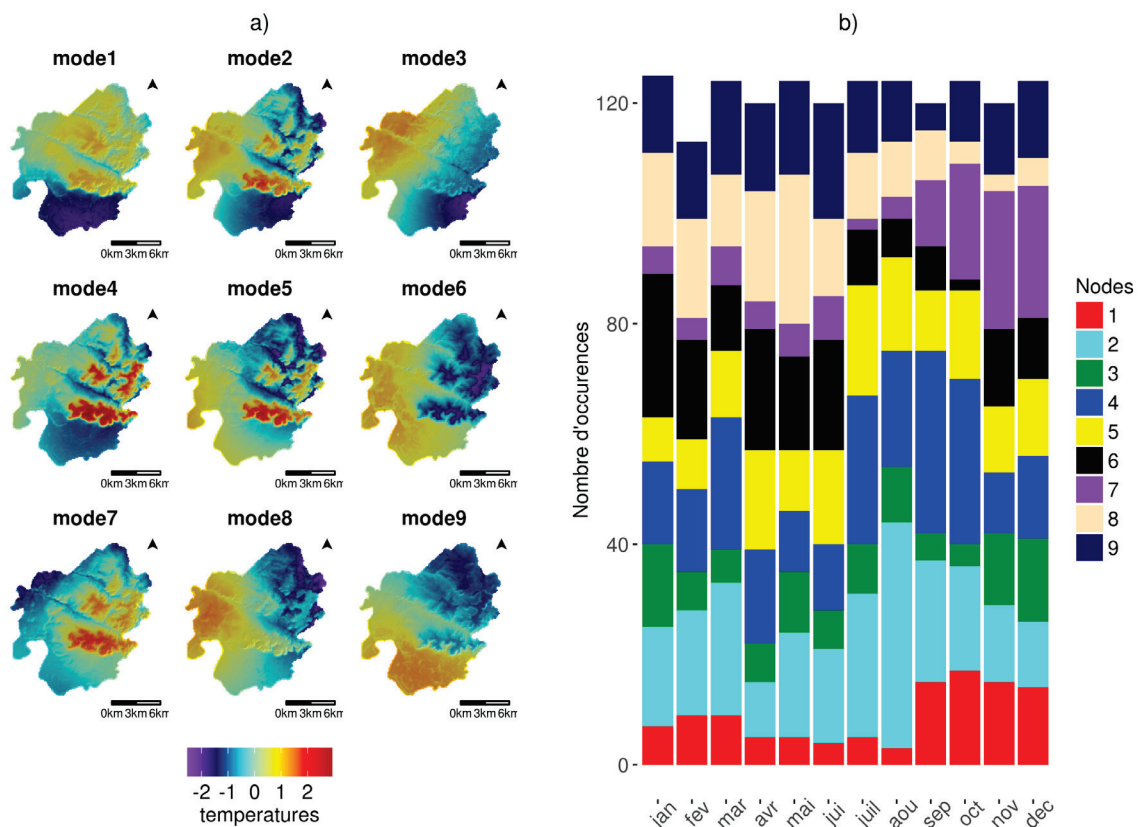


Figure 6 : a) Patterns spatiaux des températures minimales journalières identifiés par la méthode SOM pour les années 2012 à 2015 ; b) Occurrences mensuelles des différents patterns spatiaux. a) *Temperature patterns identified by the SOM method for the minimal temperatures (2012-2015)*; b) *Frequency of SOM modes observed per month over the study period.*

Pour les températures maximales, les plateaux possèdent des valeurs plus faibles de températures pour l'ensemble des modes (figure 7). À l'exception des plateaux, les différences entre les modes sont principalement liées à des gradients de température longitudinaux et latitudinaux. Il est difficile de distinguer des patterns dominants suivant les saisons, excepté durant la saison estivale où l'ouest du site est associé aux températures les plus élevées (modes 1, 2 et 3). La distribution des indices de Winkler et d'Huglin est

concordante avec les modes obtenus. En effet, les modes les plus fréquents en été, période au cours de laquelle l'accumulation de degrés-jours est maximale, possèdent des distributions de températures similaires aux indices bioclimatiques cartographiés précédemment.

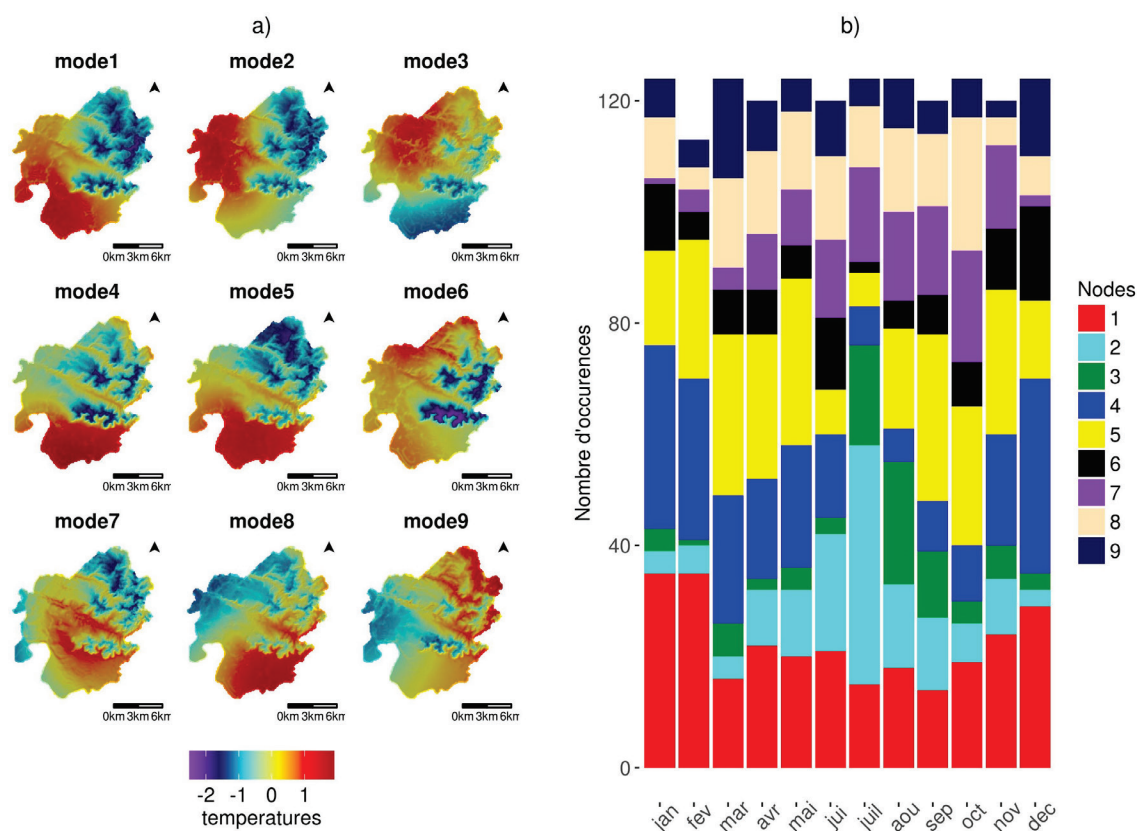


Figure 7 : a) Patterns spatiaux des températures maximales journalières identifiés par la méthode SOM pour les années 2012 à 2015 ; b) Occurrences mensuelles des différents patterns spatiaux. a) *Temperature patterns identified by the SOM method for the maximal temperatures (2012-2015)*; b) *Frequency of SOM modes observed per month over the study period.*

Les secteurs généralement les plus chauds de l'aire d'étude (partie ouest, coteaux et plateaux) sont également ceux où sont produits les vins les plus réputés (Pomerol, coteau sud de Saint-Émilion). La configuration spatio-temporelle du topoclimat au cours des saisons végétatives favorise donc ces secteurs.

Les variables topographiques étant constantes au cours du temps, les différents modes sont tributaires des conditions atmosphériques du jour considéré. Pour chacun des modes, l'analyse des sorties du modèle WRF de l'année 2014 souligne le rôle de la pression atmosphérique ainsi que la direction et vitesse du vent sur la distribution des températures minimales (figure 8).

- Excepté pour le mode 1, les modes caractérisés par une inversion thermique sont soumis à des pressions plus hautes que sur le reste de l'Europe et des vents relativement faibles (<3 m/s), conditions requises pour la mise en place de ces inversions (modes 2, 4, 5 et 7).
- Des vents avec des vitesses plus élevées dus à de plus basses pressions sur le nord de l'Europe (-6 mbar par rapport à la moyenne) sont présents pour les situations des modes 3 (5 m/s), 6 (7,31 m/s), 8 (5,88 m/s) et 9 (3,8 m/s) et empêchent la mise en place de ces inversions, l'air étant brassé par les flux. Les vallées sont plus abritées du vent que les plateaux, ce qui explique les températures plus élevées sur ces espaces.

- Le node 1 fait figure d'exception, car des vents supérieurs à 3 m/s soufflent, mais la distribution générale des températures est similaire aux modes présentant des inversions thermiques.

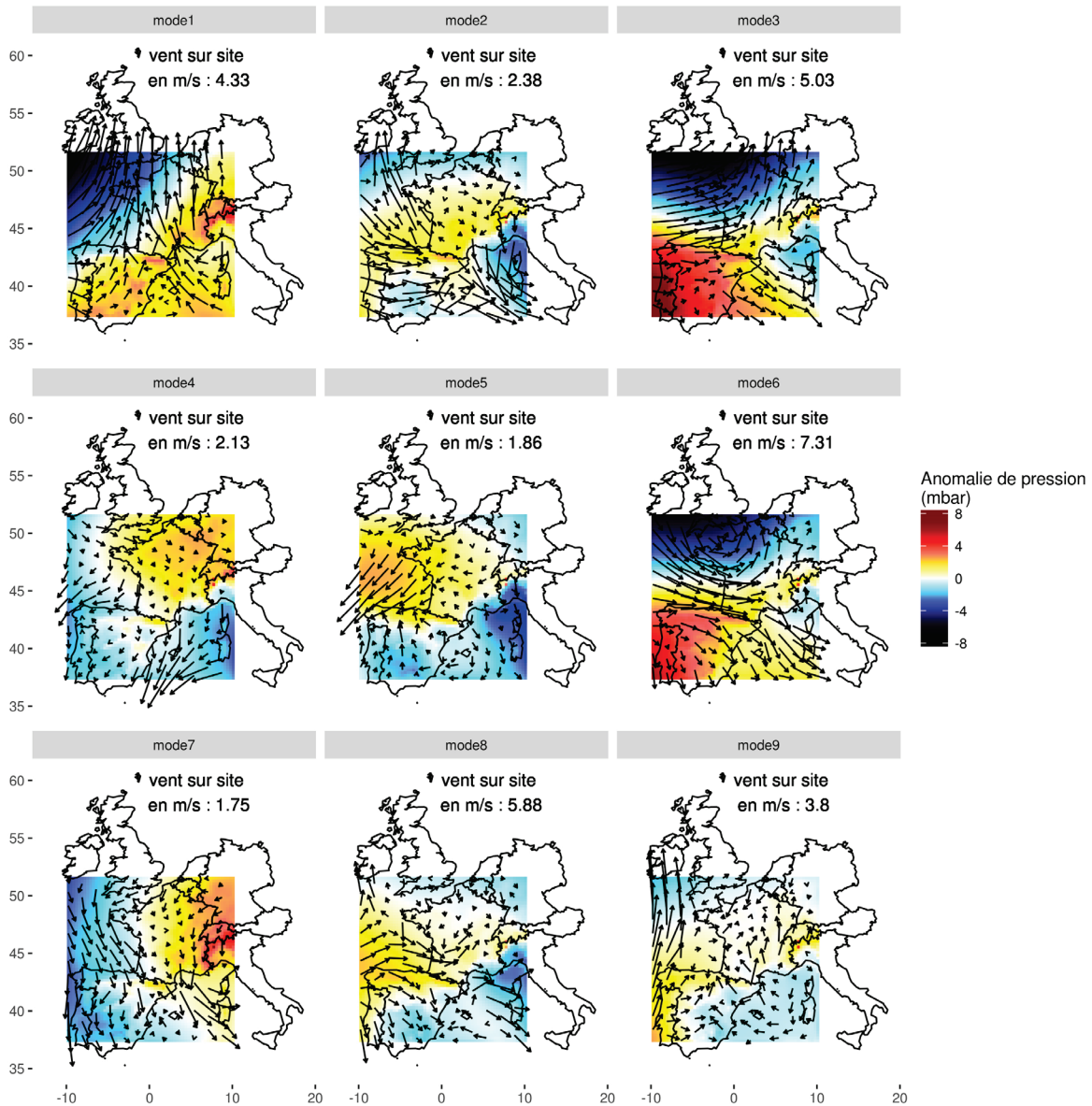


Figure 8 : Moyennes des anomalies relatives de pression en surface (par rapport à la pression moyenne sur l'Europe) et vitesse du vent (à 10 m) pour les modes spatiaux des températures minimales (année 2014 à partir du modèle WRF 27 km, données journalières). La vitesse du vent sur site indique les valeurs de vent moyen soufflant sur l'aire d'étude. *Mean sea level pressure anomaly and wind patterns over Europe for minimal temperature modes based on output data from WRF at 27km. The number indicated the average wind speed over the study area.*

Les conditions atmosphériques des modes associées aux Tx sont caractérisées par des vitesses de vent plus homogènes (maximum pour le node 9 avec 4,67 m/s et minimum pour le node 4 avec 1,69 m/s) que pour les Tn. Seule la situation 4, dominée par des anomalies de pression positive, est associée à des vents faibles (1,69 m/s) sur le Bordelais (figure 9). Cependant, le lien entre la direction et la puissance des vents avec les gradients de températures observées pour chacun des modes n'est pas explicite. Par exemple, le site est soumis à des vents d'ouest sous des pressions similaires pour les modes 1 et 9, mais la répartition des températures est symétriquement différente pour ces deux modes.

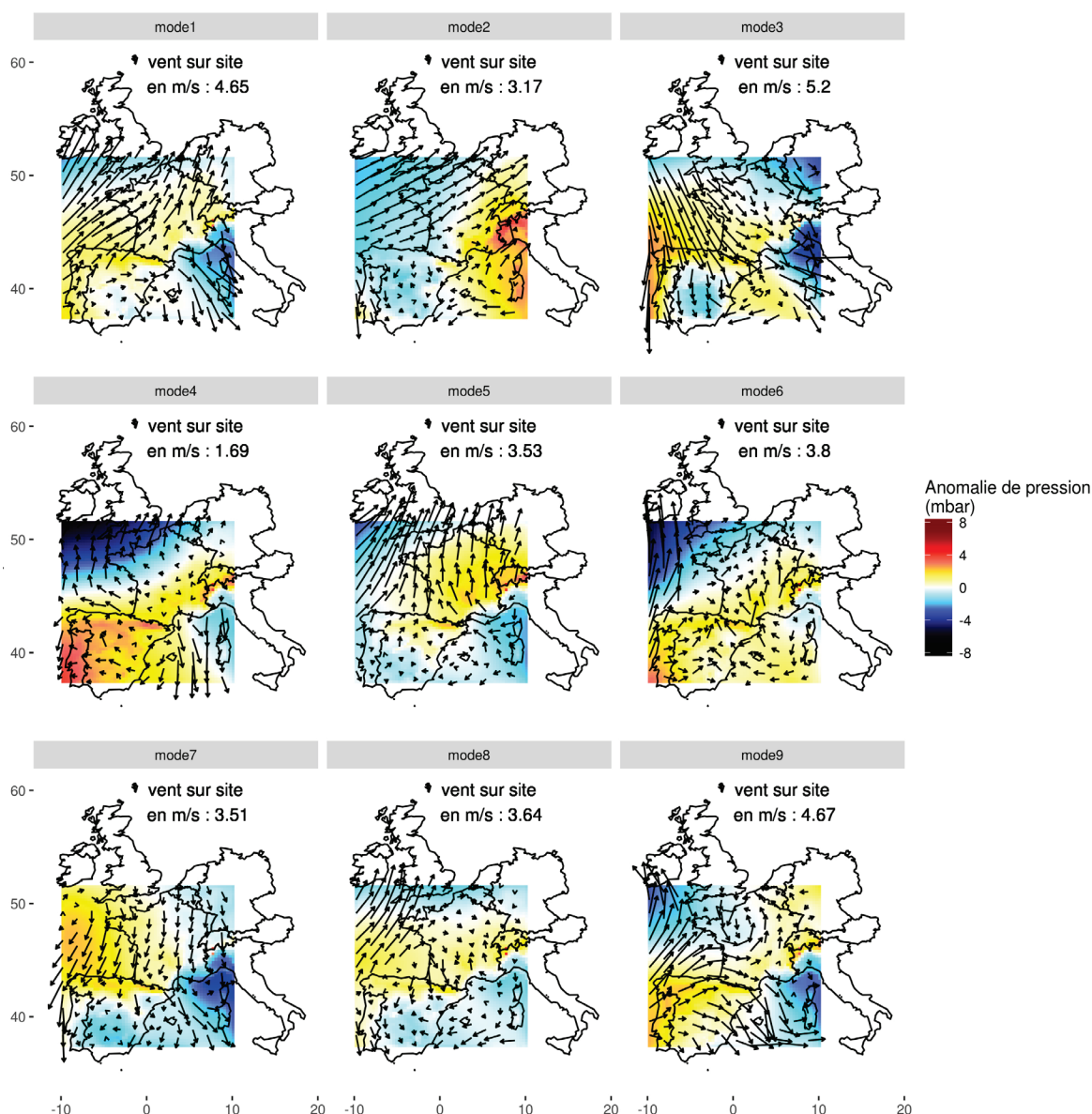


Figure 9 : Moyennes des anomalies relatives de pression en surface (par rapport à la pression moyenne sur l'Europe) et vitesse du moyenne (à 10 m) pour les modes spatiaux des températures maximales (année 2014 à partir du modèle WRF 27 km, données journalières). La vitesse du vent sur site indique les valeurs de vent moyen soufflant sur l'aire d'étude. *Mean sea level pressure anomaly and wind patterns over Europe for maximal temperature modes based on output data from WRF at 27km. The number indicated the average wind speed over the study area.*

Discussion et conclusion

La topographie joue un rôle majeur dans sur le comportement des températures moyennes et des indices bioclimatiques, confirmant les résultats d'études réalisées à cette échelle (Carrega, 2003 ; Joly *et al.*, 2003 ; Madelin, 2004 ; Bois, 2007 ; Bonnefoy *et al.*, 2010 ; Bonnardot *et al.*, 2012 ; Bonnefoy, 2013). L'utilisation des températures moyennes à l'échelle d'une saison et d'indices bioclimatiques masque toutefois la variabilité thermique aux échelles temporelles plus fines. Cette étude a montré que dans les secteurs où la topographie est la plus accidentée, les écarts de températures peuvent atteindre plusieurs degrés sur quelques centaines de mètres lors de conditions atmosphériques spécifiques (inversion thermique, positions d'abris). La prise en compte des conditions atmosphériques d'échelle synoptique a permis de mettre en évidence le lien entre certains paramètres climatiques (ici, le

vent et la pression atmosphérique) et la répartition locale des températures. Toutefois, l'intégration des situations synoptiques a été réalisée pour une année, ce qui n'est pas suffisant pour confirmer statistiquement les relations observées. La reproduction d'une telle démarche sur les autres millésimes étudiés (2012, 2013 et 2015) consoliderait ces relations. L'intégration d'échelles intermédiaires (supra-régionale et régionale) est également un moyen d'appréhender plus en détail les interactions entre les échelles climatiques, notamment pour conforter l'explication de la variabilité spatiale des températures maximales.

Les études multiscalaires mettant en relation des situations synoptiques avec leurs conséquences locales permettent de mieux étudier l'imbrication des échelles climatiques. En reproduisant ce type d'analyse, il est envisageable de simuler les températures d'un vignoble, ou d'une appellation, à partir de conditions atmosphériques spécifiques. La classification effectuée dans cette étude repose sur une approche uniquement statistique. Les mécanismes expliquant les situations atmosphériques synoptiques sont largement documentés (Czaja et Frankignoul, 1999 ; Hurrell *et al.*, 2003 ; Cassou, 2004) et classifiés (Köppen, 1936). La combinaison de ces classifications avec une approche statistique pourrait aboutir à l'automatisation de la détection des situations de références, dans le but de suivre leurs évolutions.

Pour conclure, le réseau de capteurs installés dans les appellations de Saint-Émilion, Pomerol et leurs satellites, associé à des modélisations statistiques à résolution fine et à un modèle climatique dynamique régional, a mis en lumière la grande variabilité spatiale et temporelle des températures de ce secteur, grâce à l'utilisation de modèle à différentes échelles spatiales.

Dans le contexte de changement climatique, les modèles dynamiques simulant l'évolution du climat pour le siècle à venir n'ont pas aujourd'hui une résolution suffisante pour intégrer la variabilité locale du climat, et sont donc inadaptés pour que les viticulteurs puissent mettre en place des stratégies d'adaptation à l'échelle de leur vignoble (Dunn *et al.*, 2015). L'utilisation couplée de modèles climatiques dynamiques et de méthodes statistiques est une approche intéressante pour affiner la résolution des projections du changement climatique (Martin *et al.*, 2013).

Références bibliographiques

- ALEXANDER L. V., UOTILA P., NICHOLLS N., LYNCH A., 2010 : A new daily pressure dataset for Australia and its application to the assessment of changes in synoptic patterns during the last century. *Journal of Climate*, 23, 5, 1111-1126.
- AMERINE M. A., WINKLER A. J., 1944 : *Composition and quality of musts and wines of California grapes*. University of California, 1944, 184 p.
- ARLOT S., CELISSE A., 2010 : A survey of cross-validation procedures for model selection. *Statistics Surveys*, 4, 0, 40-79.
- BELTRANDO G., CHÉMERY L., 1995 : *Dictionnaire du climat*. Larousse, 331 p.
- BIVAND R. S., PEBESMA E. J., GÓMEZ-RUBIO V., PEBESMA E. J., 2008 : *Applied spatial data analysis with R*. Springer, 2008, 405 p.
- BLOUIN J., 2007 : *Le dictionnaire de la vigne et du vin*. Paris, Dunod, 2007, 351 p.
- BOIS B., 2007 : *Cartographie agroclimatique à méso-échelle : méthodologie et application à la variabilité spatiale du climat en Gironde viticole. Conséquences pour le développement de la vigne et la maturation du raisin*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 210 p.

- BOIS B., JOLY D., PIERI P., GAUDILLIÈRE J.-P., GUYON D., VAN LEEUWEN C., 2014 : Zonage climatique de l'aire de production des vins de bordeaux basé sur la température. Incidences sur la phénologie de la vigne. In '*Changement climatique et terroirs viticoles*', Lavoisier Tec&doc, 189-214.
- BONNARDOT V., CAREY V. A., MADELIN M., CAUTENET S., COETZEE Z., QUÉNOL H., 2012 : Spatial variability of night temperatures at a fine scale over the Stellenbosch wine district, South Africa. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 46, 1, 1-13.
- 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, 321 p.
- BONNEFOY C., QUÉNOL H., PLANCHON O., BARBEAU G., 2010 : Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo*, 14. Consultable sur <http://echogeo.revues.org/12146> [Accédé le 25 août 2014].
- CARREGA P., 2003 : Le climat aux échelles fines. *Publications de l'Association internationale de Climatologie*, 15, 19-30.
- CASSOU C., 2004 : Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation nord-atlantique. *La Météorologie*, 45, 21-32.
- CORTES C., VAPNIK V., 1995 : Support-vector networks. *Machine learning*, 20, 3, 273-297.
- CZAJA A., FRANKIGNOUL C., 1999 : Influence of the North Atlantic SST on the atmospheric circulation. *Geophysical Research Letters*, 26, 19, 2969-2972.
- DUNN M., LINDESAY J., HOWDEN M., 2015 : Spatial and temporal scales of future climate information for climate change adaptation in viticulture: a case study of user needs in the Australian winegrape sector. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 21, 2, 226-239.
- GLADSTONES J., 2011 : *Wine, terroir and climate change*. Wakefield Press, 2011, 279 p.
- HALL A., JONES G. V., 2009 : 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.
- HUGLIN P., 1978 : Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 64, 1117-1126.
- HURRELL J. W., KUSHNIR Y., OTTERSEN G., VISBECK M., 2003 : An overview of the North Atlantic Oscillation. In J. W. Hurrell et al. Dir., *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, American Geophysical Union, 1-35. Consultable sur <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/134GM01/summary> [Accédé le 26 septembre 2017].
- JOLY D., NILSEN L., FURY R., ELVEBAKK A., BROSSARD T., 2003 : Temperature interpolation at a large scale: test on a small area in Svalbard. *International Journal of Climatology*, 23, 13, 1637-1654.
- JONES G., 2006 : Climate change and wine: observations, impacts and future implications. *Wine Industry Journal*, 21, 4, 21-26.
- JONES G., ALVES F., 2012 : Impact of climate change on wine production: a global overview and regional assessment in the Douro Valley of Portugal. *International Journal of Global Warming*, 4, 3/4, 383.

- KATURJI M., NOONAN B., ZAWAR-REZA P., SCHULMANN T., STURMAN A., 2015 : Characteristics of the springtime alpine valley atmospheric boundary layer using Self-Organizing Maps. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54, 10, 2077-2085.
- KOHONEN T., 1988 : An introduction to neural computing. *Neural networks*, 1, 1, 3-16.
- KOHONEN T., 2012 : *Self-organization and associative memory*. Springer Science & Business Media, vol. 8, 312 p.
- KÖPPEN W., 1936 : *Das geographischen system der climate*. Handbuch der klimatologie, 1-44.
- LE ROUX R., KATURJI M., ZAWAR-REZA P., DE RESSÉGUIER L., STURMAN A., VAN LEEUWEN C., PARKER A., TROUGHT M., QUÉNOL H., 2016 : A fine scale approach to map bioclimatic indices using and comparing dynamical and geostatistical methods. *In Proceeding of the XIth International Terroir Congress*, 10-14 July, Oregon, USA.
- LE ROUX R., DE RESSÉGUIER L., CORPETTI T., JÉGOU N., MADELIN M., VAN LEEUWEN C., QUÉNOL H., 2017 : Comparison of two fine scale spatial models for mapping temperatures inside winegrowing areas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 159-169.
- LE ROUX R., NEETHLING E., DE RESSEGUIER L., BARBEAU G., VAN LEEUWEN C., QUÉNOL H., 2016 : Nested scale approach to characterize climate aspect of vineyard terroirs in a context of climate change. *In 'Climwine Sustainable grape and wine production in the context of climate change'*, 10-13 avril, Bordeaux, France.
- VAN LEEUWEN C., SEGUIN G., 2006 : The concept of terroir in viticulture. *Journal of Wine Research*, 17, 1, 1-10.
- MADÉLIN M., 2004 : *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne. Modélisation spatiale à une échelle fine des écoulements de l'air et des températures minimales*. Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot - Paris VII, 412 p.
- MARTIN N., CARREGA P., ADNÈS C., 2013 : Downscaling à fine résolution spatiale des températures actuelles et futures par modélisation statistique des sorties ALADIN-climat sur les Alpes-Maritimes (France). *Climatologie*, 10, 51-73.
- MIRA DE ORDUÑA R., 2010 : Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, 43, 7, 1844-1855.
- NIGRO M. A., CASSANO J. J., SEEFELDT M. W., 2011 : A weather-pattern-based approach to evaluate the Antarctic Mesoscale Prediction System (AMPS) forecasts: Comparison to automatic weather station observations. *Weather and Forecasting*, 26, 2, 184-198.
- PARKER A., GARCIA DE CORTÁZAR-ATAURI I., CHUINE I., BARBEAU G., BOIS B., BOURSICQUOT J.-M., CAHUREL J.-Y., CLAVERIE M., DUFOURCQ T., GÉNY L., GUIMBERTEAU G., HOFMANN R.W., JACQUET O., LACOMBE T., MONAMY C., OJEDA H., PANIGAI L., PAYAN J.-C., LOVELLE B. R., ROUCHAUD E., SCHNEIDER C., SPRING J.-L., STORCHI P., TOMASI D., TRAMBOUZE W., TROUGHT M., VAN LEEUWEN C., 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.
- PARKER A., GARCIA DE CORTÁZAR-ATAURI I., VAN LEEUWEN C., CHUINE I., 2011 : General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17, 2, 206-216.

QUÉNOL H., BONNEFOY C., BONNARDOT V., BARBEAU G., NEETHLING E., MADELIN M., ROGER S., CAUTENET S., LE ROUX R., 2014 : Méthodes d'analyse et de modélisation agro climatique et de changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles. *Changement climatique et terroirs viticoles*, 39-89.

QUÉNOL H., DE CORTAZAR ATAURI I.G., BOIS B., STURMAN A., BONNARDOT V., LE ROUX R., 2017 : Which climatic modeling to assess climate change impacts on vineyards? *OENO One*, 51, 2, 91-97.

QUÉNOL H., BONNARDOT V., 2014 : A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change: the "TERADCLIM" project. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, Special issue on the Laccave project, 23-32.

DE RESSÉGUIER L., LE ROUX R., QUÉNOL H., VAN LEEUWEN C., 2016 : Spatial temperature variability and distribution at local scale in Saint-Emilion and Pomerol. In 'Climwine Sustainable grape and wine production in the context of climate change', 10-13 avril, Bordeaux, France

SKAMAROCK W., KLEMP J., DUDHIA J., GILL D., BARKER D., WANG W., HUANG X.-Y., DUDA M., 2008 : A Description of the Advanced Research WRF Version 3, Consultable sur <http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH> [Accédé le 4 mai 2016].

SOLTANZADEH I., BONNARDOT V., STURMAN A., QUÉNOL H., ZAWAR-REZA P., 2016 : Assessment of the ARW-WRF model over complex terrain: the case of the Stellenbosch Wine of Origin district of South Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 129 (3-4), 1407-1427.

STAHL K., MOORE R. D., FLOYER J. A., ASPLIN M. G., MCKENDRY I. G., 2006 : Comparison of approaches for spatial interpolation of daily air temperature in a large region with complex topography and highly variable station density. *Agricultural and Forest Meteorology*, 139, 3-4, 224-236.

STURMAN A., SCHULMANN T., SOLTANZADEH I., GENDIG E., ZAWAR-REZA P., KATURJI M., PARKER A., TROUGHT M., 2014 : Application of high-resolution climate measurement and modelling to the adaptation of New Zealand vineyard regions to climate variability. In 'Proceeding of the Xth International Terroir Congress', 7-10 July, Hungary, 18-23.

STURMAN A., TROUGHT M., QUÉNOL H., ZAWAR-REZA P., TAIT A., AGNEW R., SOLTANZADEH I., POWELL S., PARKER A., KATURJI M., GENDIG E., 2014 : Mesures et modélisation de la variabilité climatique à l'échelle des vignobles de Nouvelle-Zélande. *Changement climatique et terroirs viticoles*, 267-290.

TONIETTO J., CARBONNEAU A., 2004 : A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 1-2, 81-97.

WACKERNAGEL H., 2013 : *Multivariate geostatistics: an introduction with applications*. Springer Science & Business Media, 293 p.

WEHRENS R., BUYDENS L. M., 2007 : Self-and super-organizing maps in R: the Kohonen package. *Journal of Statistical Software*, 21, 5, 1-19.

XU Y., CASTEL T., RICHARD Y., CUCCIA C., BOIS B., 2012 : Burgundy regional climate change and its potential impact on grapevines. *Climate dynamics*, 39, 7-8, 1613-1626.