

CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE LOCALE ET IMPACTS THERMIQUES DANS UN VIGNOBLE CÔTIER : OBSERVATIONS DANS LE SUD DE L'URUGUAY

Mercedes FOURMENT^{1,2}, Valérie BONNARDOT², Olivier PLANCHON²,
Milka FERRER¹ et Hervé QUÉNOL²

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de la República Oriental del Uruguay

Av. Garzón 780, CP 12900

Montevideo – Uruguay

mfourment@fagro.edu.uy ; mferrer@fagro.edu.uy

² UMR 6554 LETG-Rennes COSTEL

Université de Rennes 2

Place du recteur Henri Le Moal

35043 Rennes – France

valerie.bonnardot@uhb.fr ; olivier.planchon@uhb.fr ; herve.quenol@uhb.fr

Résumé

L'objectif est de contribuer au développement des connaissances sur le climat à échelle fine des vignobles uruguayens. La variabilité de la température est étudiée en relation avec les circulations atmosphériques locales dans la région viticole côtière de Montevideo et Canelones, la plus importante du pays, au sud de l'Uruguay. Des capteurs de température ont été installés dans des vignobles, répartis principalement en fonction de la topographie et de la distance à l'estuaire du Río de la Plata. Cette étude porte sur trois saisons végétatives (septembre à mars, pour 2012, 2013 et 2014), sur les données observées de température obtenues par neuf capteurs ainsi que des données climatiques complémentaires d'humidité relative et de vent (vitesse et direction) issues de deux stations météorologiques automatiques, situées à 0,8 et 14,8 km du Río de la Plata. L'étude des données climatiques horaires de vent a permis d'identifier la fréquence de brise de mer sur la région viticole pendant la période de maturation du raisin. La chute des températures a atteint plus de 4°C entre 10 h et 14 h (Heure Locale) sur toutes les parcelles exposées au Sud lors du jour le plus chaud de l'été 2012. De moindre ampleur et de plus courte durée, cette baisse des températures a été enregistrée jusqu'à 30 km à l'intérieur du vignoble. Dans des conditions thermiques extrêmes au cœur de la période de maturation des raisins, l'impact de la brise sur les températures de la région viticole peut réduire le stress thermique pour l'activité photosynthétique et ainsi, être bénéfique au développement des composantes primaires et secondaires dans les raisins.

Mots-clés : Variabilité de la température, brise de mer, région viticole côtière, Uruguay.

Abstract

Local atmospheric circulation and thermal impacts in a coastal wine region: observations in southern Uruguay

The aim of this work was to contribute to increase knowledge on fine scale climate in a wine region of Uruguay. Temperature variability was studied in relation to local atmospheric circulation in the coastal Montevideo and Canelones wine regions in southern Uruguay. Temperature data loggers were installed in commercial vineyards according to topography and distance from the La Plata river estuary. Observed temperature data from nine sensors and complementary climatic data of humidity and wind (velocity and direction) from two automatic stations, located at 0.8 and 14.8 km from La Plata river were analyzed over three growing seasons (September to March of 2012, 2013 and 2014). The analysis of hourly wind data allowed identifying the development of sea breeze over the wine region during the ripening period. The drop in temperature reached more than 4°C between 10:00 to 14:00 (Local hour) at the south-facing plots, during the hottest day of summer 2012. With a shorter duration and less intensity, the drop in temperature was observed 30 km inland. Under extreme thermal conditions for grapevine during the ripening period, the sea breeze impact on temperature in the wine region could be of importance in reducing the thermal stress for plant functioning, like photosynthesis activity and berry synthesis and accumulation components.

Keywords: Temperature variability, sea breeze, coastal wine region, Uruguay.

Introduction

Dans la région viticole la plus importante de l'Uruguay (Montevideo et Canelones) (figure 1), une forte variabilité spatiale de la température a été observée en raison de la configuration du relief et/ou de la proximité à la mer (Fourment *et al.*, 2013), comme cela se retrouve dans d'autres régions viticoles à travers le monde (Quénol *et al.*, 2007 ; Bonnardot *et al.*, 2012 ; Bonnefoy *et al.*, 2013), générant différentes conditions thermiques pour la phénologie de la vigne (Calame *et al.*, 1977). Les connaissances concernant les réponses de la vigne à son environnement au sens large, y compris le climat, sont nombreuses (Deloire *et al.*, 2005 ; Quénol, 2014). Ainsi, les conditions thermiques durant la période végétative de la vigne et de la maturation du raisin sont déterminantes car elles affectent les métabolismes primaires (photosynthèse et accumulation de sucres – Kliever, 1977 ; Jackson et Lombard, 1993 ; Huglin et Schneider, 1998 ; Sadras *et al.*, 2012) et secondaires (synthèse et accumulation de polyphénols, arômes du raisin – Mori *et al.*, 2007 ; Tarara *et al.*, 2008 ; Sadras *et al.*, 2012 ; Nicholas *et al.*, 2012) qui sont responsables de la composition finale du raisin et donc du vin. Des variations de chaleur extrêmes peuvent réduire le développement des arômes et altérer la couleur du vin (Mori *et al.*, 2007 ; Tarara *et al.*, 2008).

Outre la température, le vent figure aussi parmi les facteurs atmosphériques contrôlant la croissance et la physiologie de la vigne. Plusieurs auteurs rapportent qu'une vitesse du vent supérieure à $4\text{-}5\text{ m.s}^{-1}$ peut ralentir et endommager la croissance de la plante (Campbell-Clouse, 1998), causer directement la fermeture des stomates et donc, réduire l'activité photosynthétique (Freeman *et al.*, 1982 ; Kliever et Gates, 1987 ; Gladstones, 1992), avec indirectement des altérations sur les activités métaboliques de la maturation, notamment une baisse de la concentration des sucres réducteurs, une augmentation de l'acidité et un possible retard de la maturation de la baie (Jackson et Lombard, 1993 ; Bettiga *et al.*, 1996 ; Carey *et al.*, 2002).

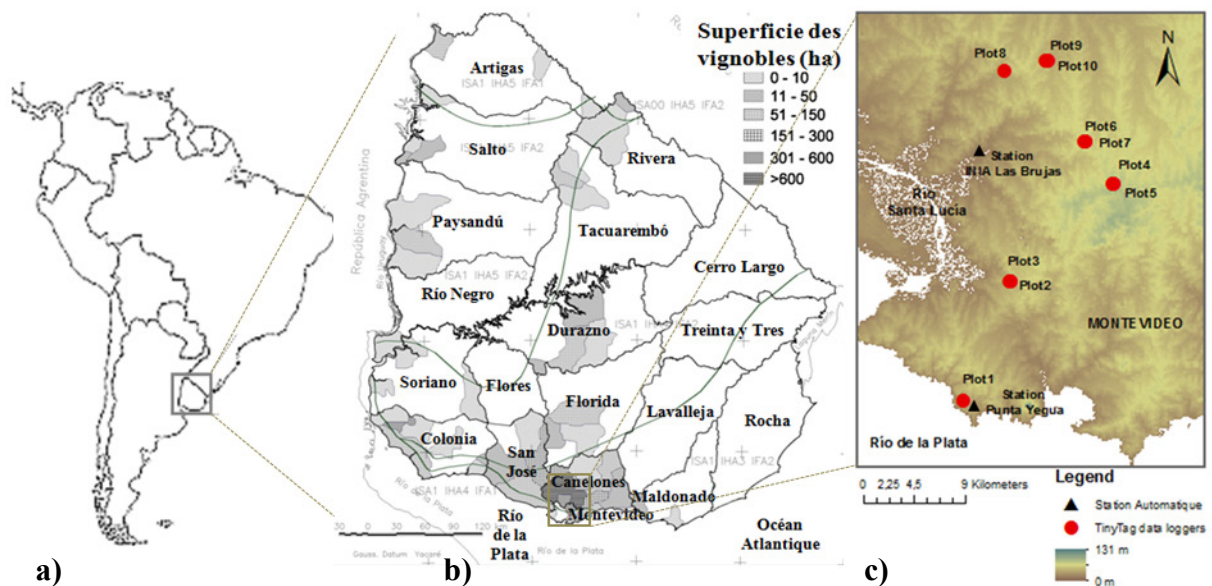


Figure 1 : Cadre géographique de la région étudiée : situation à l'échelle a) de l'Amérique du Sud ; b) de l'Uruguay et de ses régions viticoles (d'après Ferrer, 2007) et c) de la région viticole de Montevideo et Canelones (avec localisation du réseau de capteurs thermiques et des stations automatiques météorologiques INIA Las Brujas et Punta Yegua ; source : ArcGIS). *Studied area: location a) at the South American scale; b) at the Uruguayan scale and wine producing regions and c) at the scale of the wine region of Montevideo and Canelones with location of the TinyTag data loggers and the automatic meteorological stations of INIA Las Brujas and Punta Yegua (Map source: ArcGIS).*

Par ailleurs, par rapport aux conditions de température et de vent, une circulation atmosphérique locale de brise de mer dans les régions viticoles côtières peut être un facteur majeur de variation de ces deux facteurs atmosphériques, comme cela a été montré par exemple dans le district viticole de Stellenbosch en Afrique du Sud (Bonnardot *et al.*, 2002). En effet, l'analyse de l'évolution journalière des données de vent de surface, de température et d'humidité atmosphériques dans ce vignoble de l'hémisphère sud a permis de montrer que l'occurrence de telles circulations locales pouvait y modifier les conditions climatiques, surtout en février, mois le plus chaud et surtout période de maturation du raisin. En situation synoptique anticyclonique favorisant un différentiel thermique important entre la surface continentale et la mer (au moins 4°C aux latitudes intertropicales : Okoola, 1978 ; Cautenet et Rosset, 1989 ; et 6°C aux hautes et moyennes latitudes : Cautenet, 1988), avec le développement d'une cellule de brise de mer, une diminution de température de 3 à 6°C aux heures les plus chaudes de la journée a pu être enregistrée dans les vignes les plus exposées, coïncidant à l'avancée de la brise sur les terres (Bonnardot *et al.*, 2005). La vitesse du vent pendant ces événements de brise de mer a été mesurée, en moyenne, entre 4 et 6 m.s⁻¹. L'impact de ces facteurs climatiques sur les arômes de différents cépages a été mis en évidence (Carey *et al.*, 2003).

A l'échelle de la région du Río de la Plata, des études de brise de mer ont été réalisées en Argentine (Sraibman, 2009 ; Berri *et al.*, 2010 ; Humántico-Cisneros et Piccolo, 2011) mais aucune étude de la sorte n'a encore été menée en Uruguay et plus précisément, sur la région viticole de Montevideo et Canelones. La situation géographique semble pourtant théoriquement propice à l'établissement et à la pénétration de telles circulations atmosphériques sur le vignoble côtier. En effet, ce vignoble est situé au sud de l'Uruguay, en zone tempérée, à environ 34° de latitude Sud et surtout, en bordure de l'estuaire du Río de la Plata qui, large d'une centaine de kilomètres vers Montevideo, est une imposante superficie aquatique à proximité du vignoble (figure 1). Des centres de hautes pressions souvent situés sur l'Atlantique, ou plus au nord du pays en été, génèrent des vents d'est ou nord-est dans la région, produisant des anomalies négatives journalières de la température de surface océanique (Simionato *et al.*, 2009). Ce différentiel thermique terre-mer et la configuration topographique plus ou moins plate de la région semblent ainsi être favorables à l'établissement et à la pénétration de brise de mer sur le vignoble côtier. C'est l'hypothèse retenue et il est donc intéressant d'étudier ce phénomène d'échelle régionale, qui caractérise l'ambiance climatique du vignoble pour aider à mieux comprendre le comportement bioclimatique de la vigne dans cette région sud-américaine.

L'objectif est de contribuer au développement des connaissances sur le climat à échelle fine des terroirs viticoles uruguayens, et plus précisément, d'analyser les phénomènes de brise dans la région sud du pays et d'évaluer les possibles impacts des contraintes climatiques dans les vignobles.

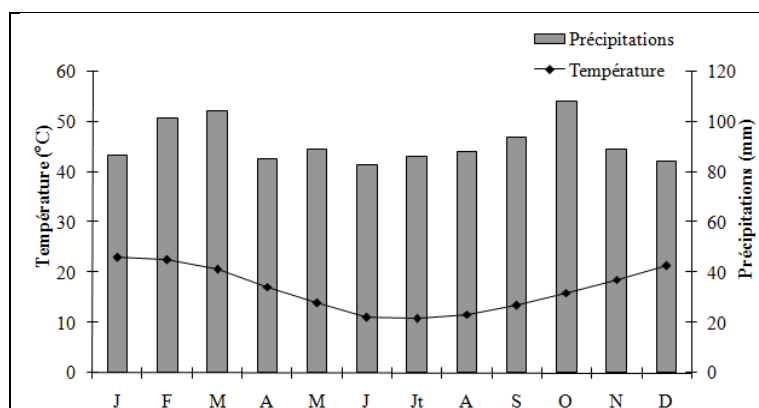
1. Site expérimental, données et méthodes

La région étudiée est le territoire viticole de Montevideo et Canelones, situé au sud de l'Uruguay en bordure de l'estuaire du Río de la Plata (figure 1). C'est la région viticole la plus importante du pays puisqu'elle totalise 76,4 % de la superficie des vignobles (INAVI, 2013). Le cépage le plus cultivé est le *Tannat*, cépage rouge prédominant et traditionnel en Uruguay.

Selon la classification climatique de Köppen, la région présente un climat subtropical doux humide (Cfa). Selon la normale 1961-1990, les hivers sont doux (température moyenne supérieure à 10°C de juin à août), les étés sont chauds (température moyenne de janvier et février supérieure à 22°C) et la pluie est régulière tout au long de l'année (au moins 80 mm

par mois), pour atteindre un total annuel supérieur à 1000 mm (figure 2). Selon la classification climatique multicritères (MCC) dédiée à la description des climats viticoles mondiaux (Tonietto et Carbonneau, 2004), la région appartient à la classe climatique *IH4, IF1 ISI*, c'est-à-dire « tempéré chaud avec des nuits tempérées et une sécheresse modérée » (Ferrer, 2007). Les conditions météorologiques les plus fréquemment observées en été sur l'Uruguay et les régions voisines du Rio Grande do Sul au Brésil et de la province de Buenos Aires en Argentine, sont caractérisées par une alternance entre masses d'air instable pluvieuse d'origine tropicale et influence stabilisante (anticyclonique) de l'océan Atlantique (Prohaska, 1976).

Figure 2 : Température et précipitations moyennes mensuelles à Montevideo (normale 1961-1990 ; source : OMM). *Monthly mean temperature and rainfall in Montevideo; average for the 1961-1990 period (data source: WMO).*



Pour obtenir des données climatiques dans cette région viticole, dix capteurs de température de type TinyTag Talk 2 (Gemini Data Loggers Ltd., UK) ont été installés depuis septembre 2011 dans des vignobles commerciaux et répartis principalement en fonction des différences topographiques et de la distance à l'estuaire du Río de la Plata. Cette phase s'est réalisée dans le cadre des projets ANR-JC-TERVICLIM et GICC-TERADCLIM (Quénol et Bonnardot, 2014) (figure 1 et tableau 1).

Parcelle	Distance du Río de la Plata (km)	Altitude (m)	Pente (%)	Exposition
Plot1	0,9	34	3,3	Sud
Plot2	11,7	31	1,3	Ouest
Plot3	11,7	29	0,9	Ouest
Plot4*	18,3	95	2,3	Est
Plot5	18,3	83	2,9	Est
Plot6	21,9	65	2,6	Sud-est
Plot7	21,9	62	2,6	Sud
Plot8	28,0	53	4,4	Sud-est
Plot9	28,6	49	1,6	Nord
Plot10	28,6	46	3,6	Sud-est
Station Punta Yegua	0,9	34	3,3	Sud
Station INIA Las Brujas	18,6	32	0,9	Sud-Ouest

Tableau 1 : Caractéristiques géographiques du réseau de capteurs TinyTag et des stations automatiques déployés dans la région viticole de Montevideo et Canelones. * Le capteur du Plot 4 n'est pas utilisé en raison de 40 % de données manquantes pour la saison 2013-2014. *Geographical characteristics of the TinyTag data loggers network and the automatic meteorological stations in the wine region of Montevideo and Canelones. * The data logger located in Plot 4 was not used because of 40% missing data during the 2013-2014 season.*

Seules les données de neuf d'entre eux ont été exploitées en raison de 40 % de données manquantes pour la saison 2013-2014 pour l'un des capteurs. L'étude porte sur les données des périodes végétatives (c'est-à-dire du 1^{er} septembre au 15 mars) des saisons 2011-12,

2012-13 et 2013-14. Nous avons aussi analysé des données climatiques complémentaires issues de deux stations météorologiques automatiques situées près des vignobles étudiés : une située à 15 km du Río de la Plata (Station de l'INIA Las Brujas) et l'autre située à moins d'un kilomètre du fleuve (Station Punta Yegua). La station Punta Yegua (de type Davis Vantage Pro2, USA) a été installée à côté du Río de la Plata, dans la parcelle la plus proche du fleuve (Plot 1) en décembre 2012, pour analyser plus spécifiquement les effets éventuels de la brise sur la région viticole côtière.

Les données des stations météorologiques INIA Las Brujas (I.N.I.A., 2013) et Punta Yegua ont été utilisées afin d'analyser d'autres variables climatiques, notamment le vent (vitesse et direction) et l'humidité relative. La période étudiée s'étend du 1^{er} novembre au 28 février de la saison 2013-14 en raison des données disponibles. La fréquence de la direction du vent et la moyenne de la vitesse du vent ont été calculées sur cette période du cycle végétatif, pendant le jour (7 h à 18 h), pendant la nuit (19 h à 6 h) et pendant les heures les plus chaudes de la journée (13 h à 15 h) pour étudier les circulations atmosphériques locales aux deux stations. Nous avons aussi calculé le nombre de jours avec une vitesse de vent supérieure à 4 m.s^{-1} pour évaluer l'impact potentiel sur la physiologie de la vigne en période de maturation du raisin (Gladstone, 1992 ; Carey *et al.*, 2002 ; Bonnardot *et al.*, 2005).

Un intérêt particulier a été porté sur l'étude de la brise de mer pendant la période de maturation du raisin. L'analyse se concentre sur le mois de février, mois précédant la vendange, pour analyser les effets possibles sur la composition finale du raisin. Une étude de fréquences de baisse de température au moment du maximum thermique journalier a été faite pendant la maturation du raisin (janvier et février) pour observer les possibles épisodes de brise de mer par parcelle. L'intensité et la durée de la baisse de température ont aussi été calculées, afin d'analyser l'influence thermique régionale de la brise.

Une procédure univariée (ANOVA) est utilisée pour déterminer les différences significatives (selon le Test de Tukey ; $\alpha=0,05$) entre parcelles et années, à partir des températures maximales et minimales durant la période de maturation des raisins, selon l'amplitude thermique, la fréquence du vent et le nombre de jours avec une vitesse de vent supérieure à 4 m.s^{-1} pendant le mois de février pour les trois saisons étudiées.

Avec les données enregistrées par les capteurs lors de ces trois saisons sont calculées différentes variables correspondant à des indices bioclimatiques adaptés à la vigne :

- Les degrés Jours ($\text{GDD}=\sum(\text{Tmj}-10^{\circ}\text{C})$), avec Tmj : Température moyenne journalière $> 10^{\circ}\text{C}$;
- L'indice d'Huglin ($\text{IH}=\sum(\text{Tmj}-10^{\circ}\text{C})+(\text{Txj}-10^{\circ}\text{C})/2*k$) ; Huglin et Schneider, 1998 ;
- L'indice de Fraîcheur de Nuits ($\text{IF}=\text{Température minimale moyenne du mois de février}$) ;
- Les températures moyennes maximale (TX) et minimale (TN) du cycle, c'est-à-dire du 1^{er} septembre au 15 mars ;
- Les températures moyennes maximale et minimale des mois de janvier (TXjan et TNjan) et février (TXfév, TNfév) ;
- L'amplitude thermique du 1^{er} janvier au 15 mars ;
- Le nombre de jours avec une température maximale au-dessus de 35°C (NJt35) ;
- Le nombre d'heures avec une température au-dessus de 35°C (NHt35).

Une analyse en composantes principales (basée sur les données centrées-réduites) est calculée en utilisant ces indices pour préciser l'impact thermique des circulations atmosphériques dans le vignoble (niveau de confiance de 95 %), les ressemblances entre les

parcelles en fonction des variables thermiques et dégager ainsi des profils thermiques de parcelles. Ensuite, une classification hiérarchique ascendante (selon la méthode de Ward et une distance euclidienne) est appliquée avec ces mêmes variables thermiques pour distinguer d'éventuelles typologies de parcelles. Un dendrogramme de classification issu de cette analyse aide ainsi à classer les comportements thermiques similaires entre parcelles.

2. Résultats et discussion

2.1. Caractérisation du vent pendant la période végétative de la vigne

Pendant la période végétative de la vigne, les directions du vent les plus fréquentes sont celles de Nord-Est et d'Est (21 %) à la station INIA Las Brujas, et celles de Sud-Est (37,5 %) à Punta Yegua, station de référence la plus proche de la côte (figure 3). La fréquence remarquablement élevée des vents de Sud-Est à Punta Yegua souligne l'effet de canalisation du vent synoptique par le Río de la Plata, le vent de Nord-Est devenant secondaire. La vitesse du vent est plus élevée à proximité du Río de la Plata et diminue vers l'intérieur (du fait de la forte rugosité).

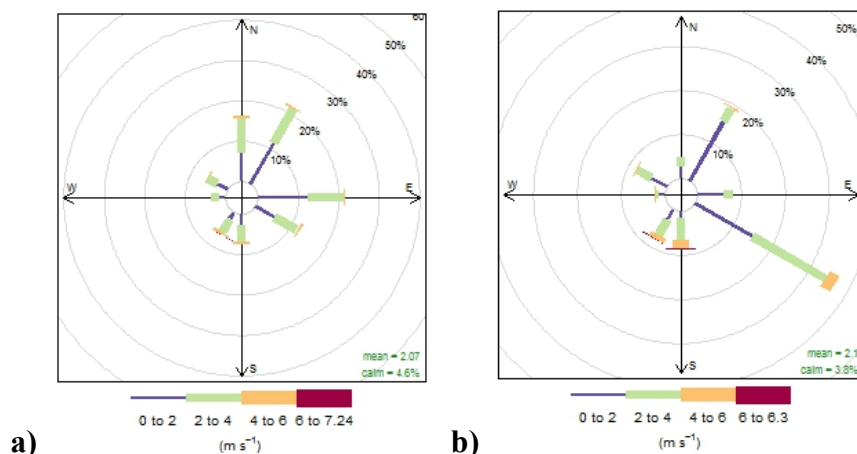


Figure 3 : Fréquence et intensité des vents par secteur à la station INIA Las Brujas (a) et Punta Yegua (b) – moyenne pour la période de novembre à février 2014. *Wind frequency and velocity per sector at the INIA Las Brujas station (a) and Punta Yegua station (b) - average for the November-February 2014 period.*

Entre le jour (figure 4) et la nuit (figure 5), les changements de fréquence de direction du vent traduisent l'influence des brises de mer et/ou de terre, de manière différente à Las Brujas et à Punta Yegua. À Las Brujas, la fréquence plus élevée des vents de Nord-Est et surtout d'Est, de vitesses modestes (inférieures à 4 m.s⁻¹) mais regroupant 52,5 % de toutes les directions, pourrait traduire le développement d'une brise de terre et/ou de pente descendante malgré le faible dénivelé topographique (131 m entre le sommet le plus élevé du vignoble étudié et le Río de la Plata). En effet, les vents des autres directions (surtout Ouest et Sud-Ouest) sont faibles ou quasi inexistantes. Pendant la journée, les directions les plus fréquemment observées sont celles de Nord-Est et Nord, correspondant donc au flux dominant à l'échelle synoptique, mais on voit nettement se renforcer (en fréquence et en force) les vents de Sud, indiquant l'arrivée de la brise de mer de façon répétée à cette station. À Punta Yegua, les vents de Sud-Est restent les plus fréquents de jour comme de nuit, mais on note aussi un renforcement (fréquence et force) des vents de Sud. Ainsi, sur la côte du Río de la Plata, la circulation de brise de mer existe bien, mais elle est en grande partie masquée par le vent dominant de Sud-Est (canalisé par l'estuaire) auquel elle se combine.

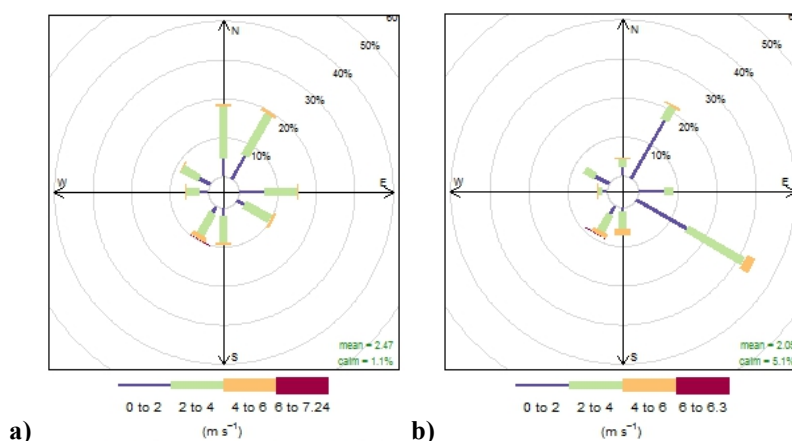


Figure 4 : Fréquence et intensité des vents par secteur à la station INIA Las Brujas (a) et Punta Yegua (b) – moyenne pour la période de novembre à février 2014, pendant le jour (7 h à 18 h). *Wind frequency and velocity per sector at the INIA Las Brujas station (a) and Punta Yegua station (b) - average for the November-February 2014 period, during the day (7:00 to 18:00).*

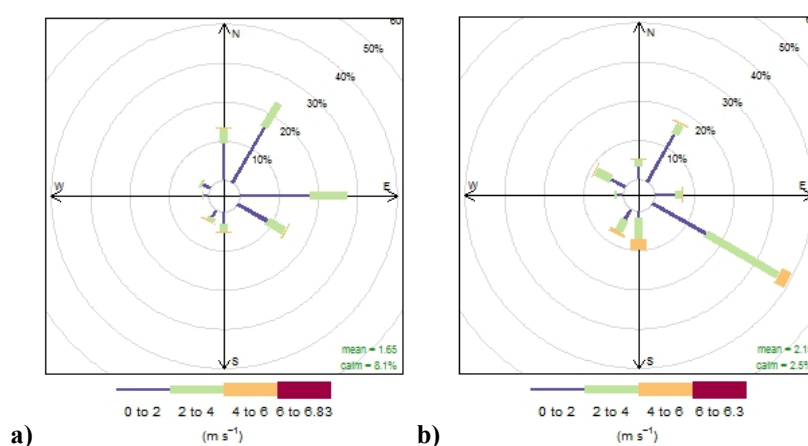


Figure 5 : Fréquence et intensité des vents par secteur à la station INIA Las Brujas (a) et Punta Yegua (b) – moyenne pour la période de novembre à février 2014, pendant la nuit (19 h à 6 h). *Wind frequency and velocity per sector at the INIA Las Brujas station (a) and Punta Yegua station (b) - average for the November - February 2014 period, during the night (19:00 to 6:00).*

Durant les heures les plus chaudes de la journée (de 13 à 15 h), les variations de direction des vents montrent encore mieux l'influence de la brise de mer aux deux stations de référence (figure 6). On note ainsi une accentuation des caractéristiques déjà relevées à Las Brujas (vents plus forts de Sud-Ouest, avec une fréquence de 14,5 %) et à Punta Yegua (vent le plus fort et fréquent de Sud-Est – 27,5 %), sans négliger ceux de Sud-Ouest et Sud.

Les courbes représentant la vitesse horaire du vent moyenne pour les mois de janvier et février 2014 aux deux stations (figure 7) montrent une accélération du vent en fin de matinée et pendant l'après-midi (entre 10 et 18 h). Malgré sa situation côtière, la station de Punta Yegua enregistre des vents légèrement plus faibles en moyenne l'après-midi que ceux de Las Brujas, même si la différence n'est pas statistiquement significative entre les deux stations. Le nombre d'heures enregistrant une vitesse supérieure à 4 m.s^{-1} pendant la période de maturation (février) à la station de Las Brujas pour les trois saisons étudiées est plus important en 2013 (26 heures de plus qu'en 2012, et 20 heures de plus qu'en 2014), avec des différences significatives l'après-midi (13 h et 14 h) (tableau 2). Cette variabilité saisonnière pourrait contribuer à la différence entre les millésimes en jouant sur la composition finale de la baie, et ainsi, sur le vin.

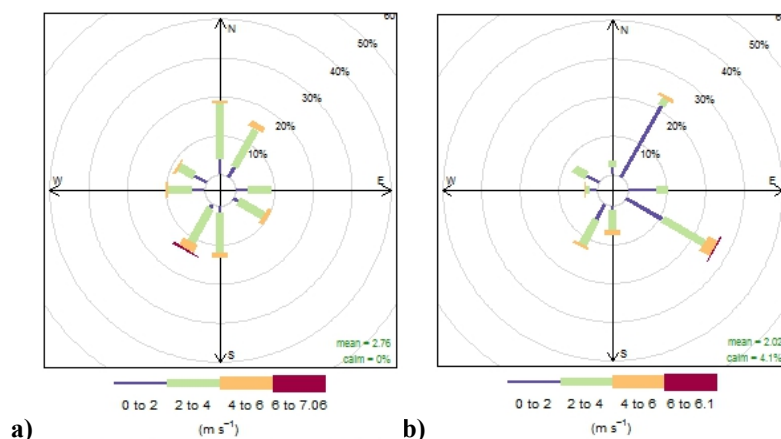


Figure 6 : Fréquence et intensité des vents par secteur à la station INIA Las Brujas (a) et Punta Yegua (b) - moyenne pour la période de novembre à février 2014, pendant les heures plus chaudes du jour (13 h à 15 h). *Wind frequency and velocity per sector at the INIA Las Brujas station (a) and Punta Yegua station (b) - average for the November - February 2014 period, during the hottest hours of the day (13:00 to 15:00).*

Figure 7 : Vitesse horaire du vent ($m.s^{-1}$), moyenne pour janvier et février 2014 aux stations INIA Las Brujas (LB) et Punta Yegua (PY). *Hourly wind velocity ($m.s^{-1}$), average for January and February 2014 at INIA Las Brujas (LB) and Punta Yegua stations (PY).*

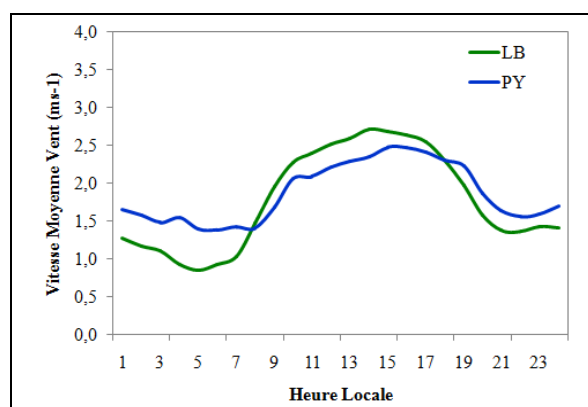


Tableau 2 : Nombre d'heures avec une vitesse du vent supérieure à 4 $m.s^{-1}$ en février pour les saisons 2012, 2013 et 2014, à la station Las Brujas. *Number of hours with a wind velocity above 4 $m.s^{-1}$ in February for the 2012, 2013 and 2014 seasons at Las Brujas station.*

Heures	Nombre d'heures en février avec un vent supérieur à 4 $m.s^{-1}$		
	2012	2013	2014
0	1	1	1
1	0	1	0
2	0	1	0
3	0	2	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	1
7	0	0	0
8	0	1	1
9	0	2	0
10	1	3	2
11	2	3	2

Heures	Nombre d'heures en février avec un vent supérieur à 4 $m.s^{-1}$		
	2012	2013	2014
12	3	2	1
13*	2	5	2
14*	3	6	2
15	1	4	1
16	2	3	2
17	1	2	2
18	1	2	3
19	0	1	1
20	0	1	1
21	0	1	1
22	0	1	0
23	0	1	0

* Différences statistiquement significatives. *Significant differences ($r^2=0,65$; $p<0,0001$).*

Pour la période de maturation 2014, pour laquelle on possède des données à la station de Punta Yegua, le nombre d'heures avec une vitesse du vent supérieure à 4 $m.s^{-1}$ est élevé de jour comme de nuit, surtout durant la saison chaude. On dénombre pour cette station côtière et cette saison 2014 (janvier et février), 77 heures avec des vents forts pour les vignobles, tandis

qu'on en dénombre seulement 34 à celle de Las Brujas. Ces contraintes peuvent engendrer des situations de stress sur les vignobles exposés. Ainsi, les vents les plus forts mesurés dans la parcelle 1 ont pu provoquer des altérations sur la maturation des raisins et un possible retard des stades phénologiques, notamment pour la finalisation de la maturité des baies, comme cela a été constaté dans d'autres régions viticoles (Jackson et Lombard, 1993 ; Carey *et al.*, 2002).

2.2. Circulation atmosphérique locale : étude de cas quotidiens

Afin d'illustrer un événement typique d'occurrence de brise de mer et ses impacts climatiques sur la région viticole, les données du 14 février 2012 sont utilisées. Les conditions synoptiques ce jour-là sont anticycloniques sur l'Uruguay avec un centre de hautes pressions (1026 hPa) situé à 35°S sur l'océan Atlantique Sud, au large des côtes uruguayennes, bloquant l'avancée d'un système frontal localisé à la même latitude sur l'Argentine (CEPETEC, 2013 ; figure 8) et apportant sur l'Uruguay une masse d'air chaud et humide d'origine tropicale. La situation météorologique du 14 février 2012, l'une des journées les plus chaudes de l'été de cette année (maximum de 36,8°C enregistré dans le vignoble au site Plot 8), est donc une situation typiquement estivale en Uruguay et génératrice de fortes chaleurs. Ces conditions synoptiques ont favorisé des températures élevées sur le continent, amplifiant le contraste thermique de l'air au dessus de la terre et de la mer. Sur la côte sud du pays, cette situation synoptique peut freiner la pénétration d'une brise de mer vers l'intérieur des terres, puisque le flux dominant de nord est théoriquement de direction opposée à la brise de mer dans cette région, comme cela a été montré sur d'autres régions (Estoque, 1962 ; Savijärvi et Alestalo, 1988 ; Bonnardot *et al.*, 2005).

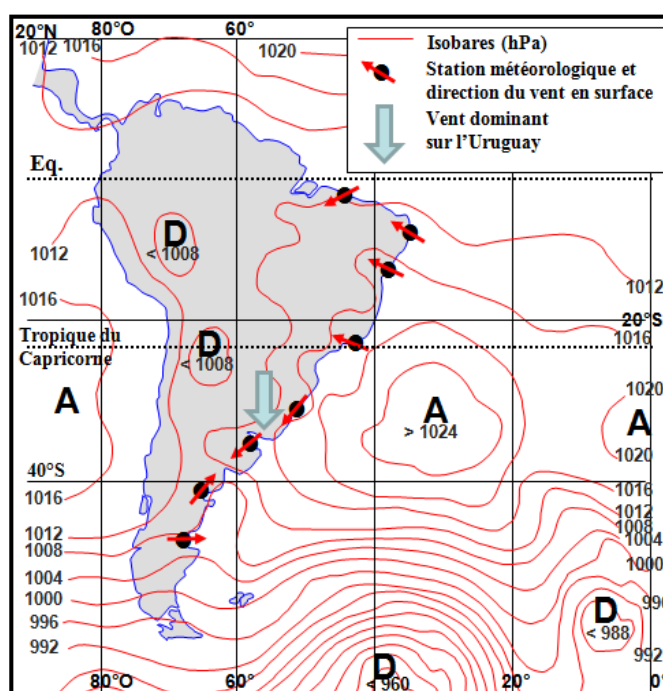


Figure 8 : Carte synoptique de l'Amérique du Sud et de l'Atlantique Sud le 14 février 2012 (12h UTC). Source : Marinha do Brasil. *Synoptic weather map over South America and the South Atlantic Ocean on the 14th of February 2012 (12:00 UTC). Source: Marinha do Brasil.*

L'analyse des données de vent enregistrées à la station automatique située à 15 km du Río de la Plata (Las Brujas), montre qu'une cellule de circulation de brise de mer s'est bien mise en place : on note une augmentation de la vitesse du vent à partir de 13 h (Heure Locale - HL)

pour atteindre un maximum de 3 m.s^{-1} vers 17 h, accompagnée d'un changement de direction (d'une composante nord jusqu'à 14 h à une composante sud et sud-est de 15 h à 20 h HL), marquant ainsi l'arrivée de la brise de mer (figure 9a). La faiblesse du vent dominant a permis le développement de la circulation de brise de mer, pourtant de direction opposée, et sa pénétration à l'intérieur des terres. En effet, la brise de mer ne peut se développer sous des flux dominants dépassant 6 ou 8 m.s^{-1} (Borne *et al.*, 1998) et, plus précisément, ne peut se développer en présence de flux dominants de direction opposée dépassant 6 m.s^{-1} (Rey, 1967).

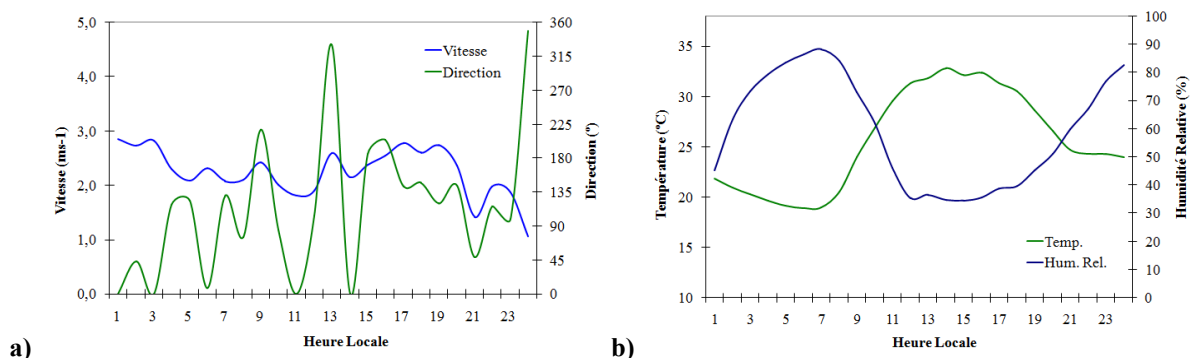
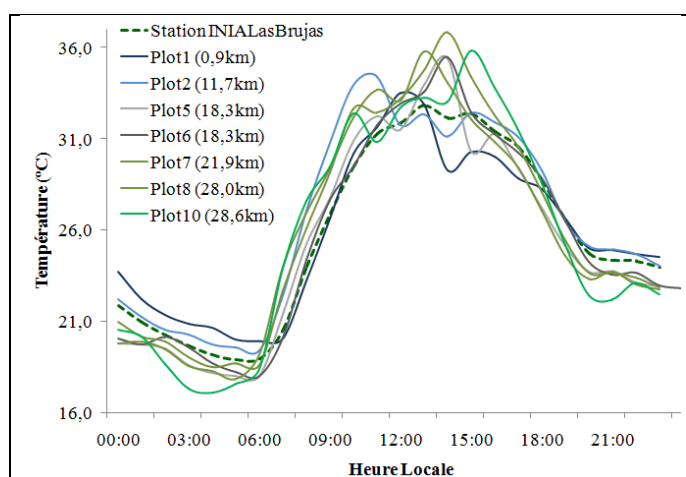


Figure 9 : Paramètres climatiques du 14 février 2012 à la station météorologique INIA Las Brujas : a) Vitesse (m.s^{-1}) et direction ($^{\circ}$) du vent ; b) Température ($^{\circ}\text{C}$) et humidité relative (%). *Climatic parameters of the 14th of February 2012 in INIA Las Brujas station: a) Wind velocity (m.s^{-1}) and direction ($^{\circ}$). b) Temperature ($^{\circ}\text{C}$) and relative humidity (%).*

Même si la moyenne de la vitesse du vent est modeste à 15 km de la côte, les vents marins originaires du Río de la Plata ont permis à la température, au moment du maximum diurne, de se stabiliser aux environs de $31,5^{\circ}\text{C}$ de 11 h à 15 h, malgré une baisse rapide de l'humidité au contact de la surface continentale. La courbe de température du capteur de la parcelle 6, le plus proche de la station automatique, est similaire à celle de la station automatique, prouvant l'impact thermique de l'arrivée de la brise, mais le maximum thermique ($35,5^{\circ}\text{C}$) a été légèrement plus élevé (figure 10). Cette différence thermique peut s'expliquer par la situation géographique plus éloignée et/ou par une différence d'instrumentation (capteur/station automatique).

Figure 10 : Température horaire ($^{\circ}\text{C}$) observée le 14 février 2012 dans sept des parcelles viticoles instrumentées (avec la distance au Río de la Plata en km) et la station INIA Las Brujas. *Observed hourly temperature ($^{\circ}\text{C}$) on the 14th of February 2012 in seven plots (with the distance from de Río de la Plata in km) and in the INIA Las Brujas station.*



L'arrivée de la brise est bien visible sur les courbes de température enregistrée dans les vignobles au cours de la journée du 14 février 2012, l'une des plus chaudes de l'été 2012, avec une chute de température entre 10 h et 14 h HL sur toutes les parcelles (figure 10). Cette baisse de température a été la plus marquée sur la parcelle la plus proche de la mer, avec une

diminution de 4,7°C entre 12 h et 17 h. De moindre ampleur (-2,1°C) et de plus courte durée (entre 15 h et 16 h), cette baisse de température a été enregistrée jusqu'à 30 km à l'intérieur du vignoble (plot 10, le site le plus éloigné de la mer). Des conditions intermédiaires ont été observées, notamment sur les parcelles situées entre 18 et 22 km de la mer. La température sur ces parcelles a baissé de 4,2°C, un peu plus tard que sur la parcelle 1, entre 14 h et 16 h HL. Sur les parcelles les plus éloignées de la mer (Plot 8, 9 et 10), même si la brise a été plus faible, on remarque les sautes de température caractéristiques de l'arrivée de la brise sur chaque site.

Sachant d'une part qu'une température supérieure à 35°C provoque un stress thermique pour la photosynthèse et ainsi, la fermeture des stomates, défavorisant donc le processus de transpiration (Jackson, 2008) ; et d'autre part, qu'une température comprise entre 25 et 30°C, représente les conditions optimales pour la photosynthèse et donc, pour la maturation du raisin, on peut conclure que l'arrivée de la brise de mer sur le vignoble durant cette journée du 14 février 2012 lui a permis de limiter le stress et de bénéficier de conditions thermiques favorables pour la photosynthèse. Dans le cas de la région viticole de Montevideo et Canelones, la fréquence de brises de mer peut ainsi modifier considérablement les températures maximales pour la vigne.

Ces événements, habituels dans les conditions de températures maximales élevées, sont courants pendant toute la saison de maturation du raisin dans la région viticole côtière du sud de l'Uruguay. Ces conditions météorologiques particulières ont également été mises en évidence (figures 11 et 12) grâce aux données des deux stations automatiques disponibles sur l'espace étudié pour la journée du 16 janvier du 2014.

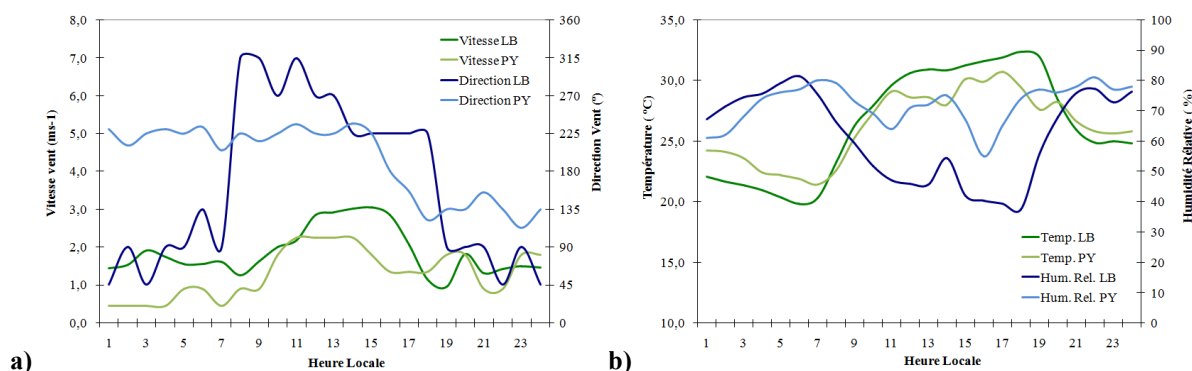
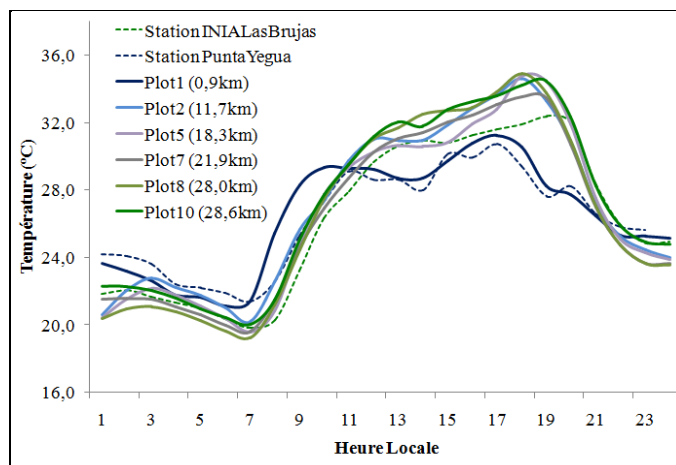


Figure 11 : Paramètres climatiques du 16 janvier 2014 : a) Vitesse (m.s⁻¹) et direction (°) du vent, b) Température (°C) et humidité relative (%), aux stations de Las Brujas (LB) et Punta Yegua (PY). *Climatic parameters on the 16th of January 2014: a) Wind velocity (m.s⁻¹) and wind direction (°), b) Temperature (°C) and relative humidity (%) in Las Brujas station (LB) and Punta Yegua station (PY).*

Les conditions synoptiques de cette journée sont similaires à celles du 14 février 2012, avec un flux dominant de direction opposée à la brise de mer sur la région étudiée. À partir de 11 h HL à Punta Yegua et un peu plus tard à Las Brujas (figure 11b), la pénétration de la brise à l'intérieur des terres provoque une chute de température associée à une augmentation de l'humidité relative. L'évolution de la température dans les vignobles (figure 12) montre une stabilisation de la température à partir de 10 h (Plot1) et 12 h (les parcelles restantes), soulignant l'impact régional de la brise sur les conditions thermiques. Durant la journée du 16 janvier 2014, le vent est faible à Punta Yegua (vitesse maximale : 2,25 m.s⁻¹ à 11 h), mais l'humidité atteint 75 % à 14 h (20,7 % plus élevée qu'à Las Brujas : figure 11a). Ainsi, durant cette journée, l'oscillation diurne de l'humidité relative est plus démonstrative de l'arrivée et de l'impact de la brise de mer que la vitesse du vent, faible en permanence.

Figure 12 : Température horaire observée (°C) le 16 janvier 2014 dans 6 des parcelles viticoles étudiées (avec la distance au Río de la Plata en km) et les stations météorologiques. *Hourly observed temperature (°C) on the 16th of January 2014 in six of the studied plots (with their distance from Río de la Plata in km) and in the meteorological stations.*



2.3. Impacts thermiques dans le vignoble

L'analyse des températures dans les parcelles des vignobles étudiés révèle une forte variabilité spatiale des conditions thermiques. La figure 13 résume les températures horaires moyennes pendant la saison végétative (1^{er} septembre au 15 mars) et les différences entre parcelles. D'une manière générale, ces différences sont expliquées par l'effet modérateur du Río de la Plata sur la température, avec un écart de 1,8°C pendant la nuit et de 1,4°C lorsque les températures sont les plus élevées. Quand les conditions thermiques sont plus extrêmes (pendant l'été), les écarts de température sont plus marqués entre parcelles, de 2°C durant la nuit et 1,5°C dans la journée (figure 13c). Au cours de la période de maturation des baies, les situations de températures extrêmes jouent un rôle négatif sur la composition finale du moût, par un effet de dégradation des acides organiques et anthocyanes (Mori *et al.*, 2007 ; Sadras *et al.*, 2012) et d'inhibition de la synthèse des sucres réducteurs et phénols du raisin (Nicholas *et al.*, 2012).

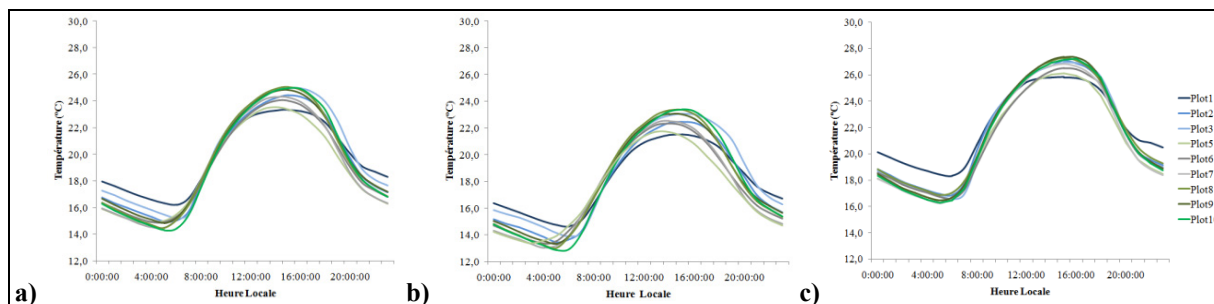
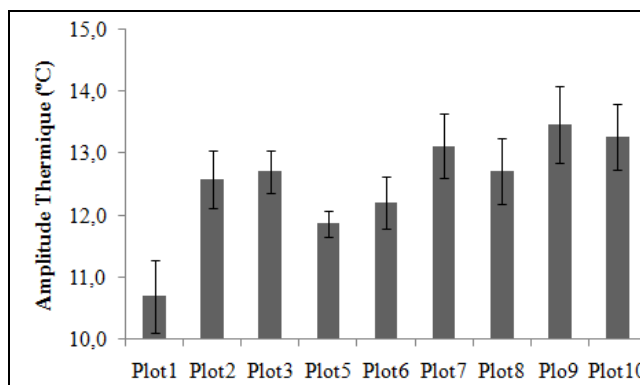


Figure 13 : Température horaire dans chaque parcelle pendant (a) la saison végétative de la vigne, de septembre à février, (b) la saison pré-véraison, de septembre à décembre et (c) la saison post-véraison, de janvier à mars ; moyenne des trois saisons étudiées (2011-12, 2012-13 et 2013-14). *Hourly temperature in each plot during (a) the vine growing season, from September to March; (b) the pre-veraison season, from September to December; and (c) the post-veraison season, from January to March; average for the three studied seasons (2011-12, 2012-13 and 2013-14).*

La figure 14 analyse le gradient de température en fonction de la distance à la côte, avec quelques nuances locales liées à la position topographique des parcelles et des stations. Le calcul de l'amplitude thermique moyenne par parcelle met en évidence la parcelle la plus proche de la mer (Plot 1) par rapport aux autres parcelles (moyennes statistiquement différentes entre parcelles, avec $r^2=0,72$; $p=0,058$). Ainsi, les stations des parcelles 2 et 3 ont une amplitude thermique diurne plus forte que ne le laisserait supposer empiriquement leur seule distance à la côte. C'est leur position topographique abritée qui explique cette anomalie

apparente, imposant ainsi des oscillations thermiques diurnes comparables à celles des parcelles et stations les plus éloignées de la côte.

Figure 14 : Moyenne et écart type des amplitudes thermiques (°C) pendant la période de maturation du raisin (1^{er} janvier au 15 mars) pour les saisons 2012, 2013 et 2014 dans chaque parcelle. *Average and standard deviation of thermal amplitude (°C) during the grape ripening period (1st January to 15th March) for the 2012, 2013 and 2014 seasons in each plot.*



L'amplitude thermique diurne joue un rôle déterminant pour la qualité finale du vin. Un écart diurne de température supérieur à 15°C peut provoquer une dégradation des anthocyanes dans les raisins ainsi qu'un déséquilibre des composantes primaires, les sucres et l'acidité (Huglin et Schneider, 1998). Les stations des parcelles étudiées enregistrent, en moyenne, des valeurs toutes au-dessous de ce seuil, mais dans des cas particuliers d'étés chauds, comme celui de 2012, les parcelles avec des conditions thermiques extrêmes ont bien atteint le seuil critique pour la maturation correcte du raisin.

L'analyse de la fréquence des événements de brise de mer sur la région souligne, pour les années étudiées, le poids des jours chauds sur l'occurrence de ce phénomène. L'analyse du nombre de jours avec une chute de température entre 10h et 15h en janvier et février pour les trois saisons étudiées révèle des différences entre parcelles (figure 15). Le site Plot 1 est la parcelle la plus impactée par la brise, c'est-à-dire avec le plus grand nombre de jours enregistrant une chute de température, toutes intensités confondues (par exemple : 50 jours avec une baisse de température de -0,5°C en une heure). Au contraire, le site Plot 10 enregistre le moins d'influence de la brise sur la température, avec le nombre minimum de jours ayant enregistré ces événements (44 jours avec une baisse de température de -0,5°C en une heure).

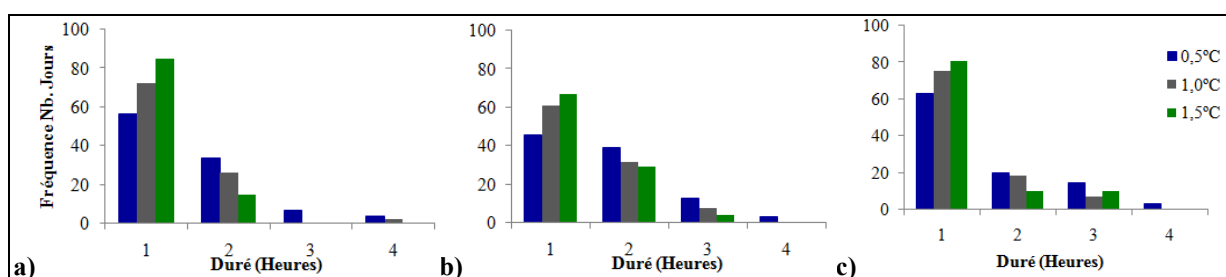


Figure 15 : Fréquences des nombres de jours avec des chutes de températures d'intensité différentes (0,5, 1 et 1,5°C) au moment du maximum journalier et durée de l'évènement (en heures) pour trois capteurs de la région : Plot 1 (a), Plot 5 (b) et Plot 10 (c) ; moyenne des trois saisons étudiées. *Frequency of days with temperature decreases of different intensity (0.5, 1 and 1.5°C) at the time of diurnal maximum and duration of the event (in hours) for three plots of the wine region: Plot1 (a), Plot5 (b) and Plot10 (c); average for the three studied seasons.*

Ces parcelles, représentatives des différents environnements de la région viticole étudiée (Ferrer, 2007), permettent d'illustrer, sur une même région d'étude, une grande variété de conditions possibles (et contrastées) de stress thermique pour la vigne. Ces résultats suggèrent

aussi de quelle manière l'influence maritime pourrait expliquer des différences dans la composition des baies du cépage Tannat issues de ces vignobles.

2.4. Essai de classification des parcelles en fonction de l'impact thermique de la brise dans le vignoble

La figure 16 présente les deux principaux axes d'une analyse factorielle en composantes principales qui résument 96,6 % de la variance totale. La première composante principale (PC1) explique 66,7 % de la variance et la seconde (PC2) 29,9 %. Le premier axe est expliqué par les variables en lien avec les températures maximales, ainsi que par l'amplitude thermique ($r > 0,85$). En revanche, le deuxième axe synthétise, dans une moindre mesure, les variables relatives aux températures minimales ($0,59 < r < 0,63$) ainsi que les indices bioclimatiques ($r=0,99$ pour GDD et $r=0,66$ pour IH). Les parcelles les plus éloignées du Río de la Plata (Plot 8, 9 et 10) et les parcelles avec les situations topographiques particulières exposées au nord (Plot 2 et 3), se regroupent sur PC1, en révélant des conditions plus extrêmes ou continentales. Ce sont des parcelles avec les conditions thermiques les plus stressantes de la région pour la vigne. Au contraire, le site Plot 1, situé près de la mer, s'oppose à ce groupe de stations par rapport à PC1, en montrant des situations thermiques moins extrêmes (près des indices de températures minimales), fraîches, grâce à l'effet du Río sur la région.

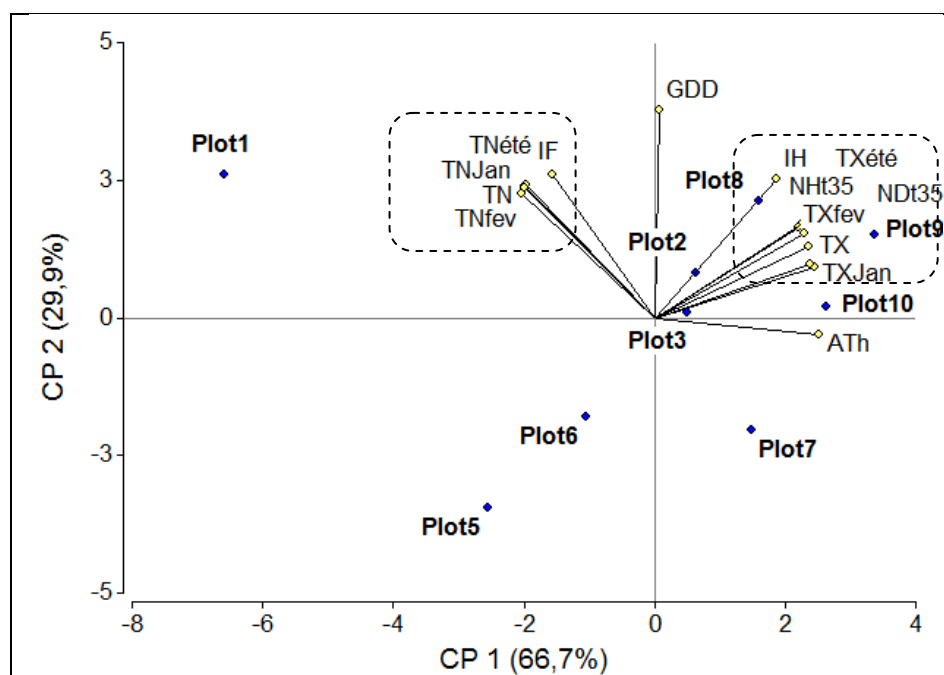


Figure 16 : Projection des individus (Plot ; en bleu) et des variables thermiques (en jaune) sur le plan principal de l'ACP (CP1 et CP 2) pour 2012, 2013 et 2014 avec TN = Température minimale ; TX = Température maximale ; IF = Indice de Fraîcheur de Nuits ; IH = Indice de Huglin ; GDD = Indice de Degrés Jours ; Ath = Amplitude thermique du 1^{er} janvier au 15 mars ; NDT35 et NHT35 = Nombre de Jours et nombre d'Heures avec une Température au dessus 35°C. Les carrés pointillés indiquent les variables très fortement corrélées ($r^2 > 0,83$).
Projections of plots (in blue) and temperature variables (in yellow) in the principal plan (PC1 and PC2) for 2012, 2013 and 2014, with TN = Minimal Temperature; TX = Maximum Temperature; IF = Cool Night Index; IH = Huglin Index; GDD = Growing Degree Days; Ath = Thermal Amplitude between the 1st of January and the 15th of March; NDT35 et NHT35 = Number of Days and number of Hours with temperature over 35°C. Dotted squares indicate variables with high correlation ($r^2 > 0,83$).

Sur les mêmes variables de température, une analyse multivariée de classification hiérarchique ascendante est ensuite effectuée afin de regrouper les parcelles soumises à des conditions thermiques similaires (figure 17). Les résultats indiquent que 55,3 % de la variance

totale est expliquée par la partition en trois classes. La classe constituée par Plot 1 est caractérisée par des conditions thermiques moins extrêmes, avec une influence du Río de la Plata sur la température. C'est la classe avec les températures maximales les moins élevées (Température maximale du cycle = 24,7°C), les minimales les plus élevées (TN du cycle = 15,2°C) et l'amplitude thermique la plus faible (Moyenne pendant janvier et février de 10,7°C).

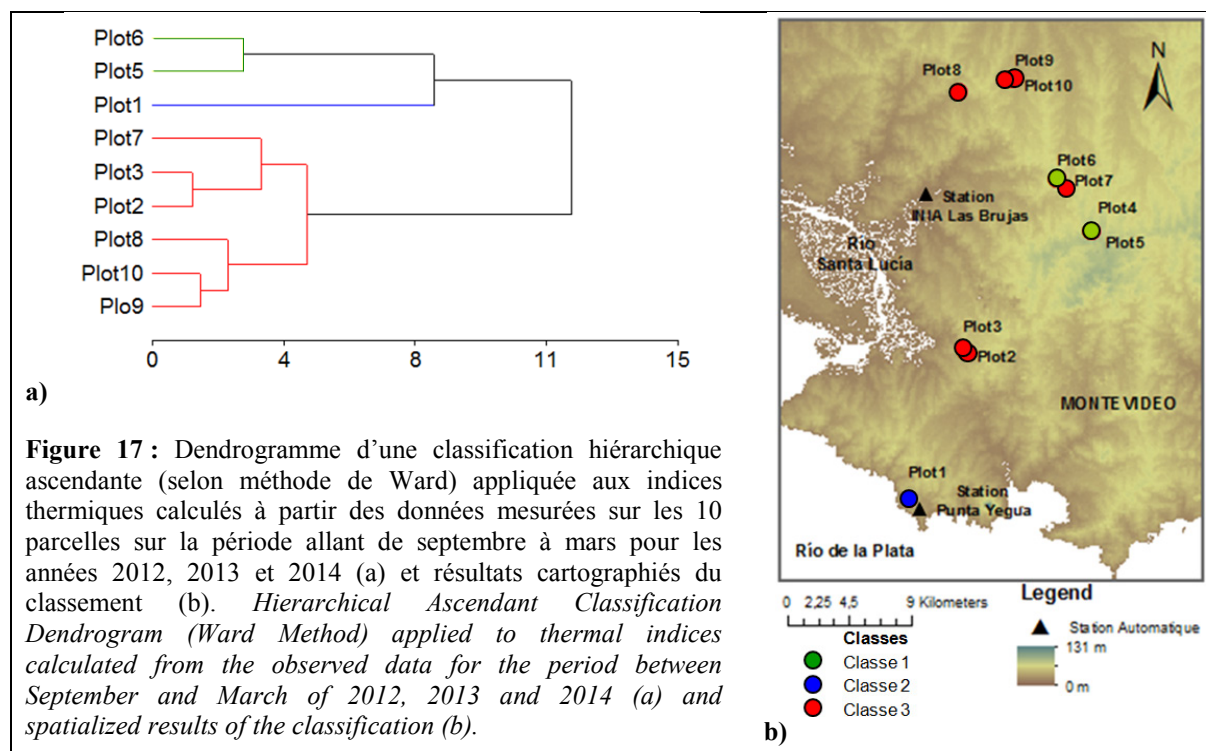


Figure 17 : Dendrogramme d'une classification hiérarchique ascendante (selon méthode de Ward) appliquée aux indices thermiques calculés à partir des données mesurées sur les 10 parcelles sur la période allant de septembre à mars pour les années 2012, 2013 et 2014 (a) et résultats cartographiés du classement (b). *Hierarchical Ascendant Classification Dendrogram (Ward Method) applied to thermal indices calculated from the observed data for the period between September and March of 2012, 2013 and 2014 (a) and spatialized results of the classification (b).*

Une autre classe est composée par les parcelles les plus éloignées de la mer (Plot 7, 8, 9 et 10) et celles avec une exposition au nord (Plot 2 et 3). L'influence du Río y est moins marquée, donc les conditions thermiques sont plus contrastées : températures maximales élevées (TX du cycle = 25,9°C), minimales plus basses (TN du cycle = 13,5°C) et amplitude thermique plus forte (Moyenne de 13°C en janvier). Avec des conditions thermiques intermédiaires, la dernière classe comprend les parcelles dont les altitudes sont les plus élevées de la région (Plot 5 et 6), à une distance du fleuve intermédiaire et donc, avec une modeste influence du Río de la Plata sur les températures.

Conclusion

La brise de mer peut être considérée comme un élément climatique très pertinent pour aider à l'identification des terroirs viticoles côtiers, car les techniques de gestion du vignoble peuvent être influencées par ses impacts dont la variabilité spatio-temporelle est forte.

Le réseau de capteurs thermiques installé dans le vignoble de Montevideo et Canelones s'est avéré être un bon outil de mesure pour enregistrer les impacts thermiques de la brise de mer à l'échelle fine de ce vignoble. Cette étude des variations spatio-temporelles de la température observée a permis, en parallèle des données de stations météorologiques automatiques, de caractériser la pénétration de la brise de mer jusqu'à au moins 30 km sur la plus importante région viticole en Uruguay. L'étude a bien montré la chute de température au moment du maximum diurne (environ -4°C) associée à l'arrivée de la brise. Dans des conditions thermiques extrêmes au cœur de la période de maturation des raisins, l'impact de

la brise sur la température pourrait donc réduire le stress thermique pour l'activité photosynthétique et ainsi, être bénéfique au développement des composantes primaires et secondaires des raisins.

Cette étude a mis l'accent sur les impacts thermiques mais il faudra dans le futur également développer l'analyse des impacts du vent et de l'humidité relative. En effet, comme cela a été montré, la variabilité saisonnière des vents supérieurs à 4 m.s^{-1} pourrait également contribuer à la différence entre les millésimes. Une modélisation atmosphérique méso-échelle incluant différentes conditions synoptiques est donc envisagée sur la région pour améliorer les connaissances des processus atmosphériques régionaux et locaux auxquels est soumis ce vignoble.

Références bibliographiques

BERRI G., SRAIBMAN L., TANCO R.A. & BERTOSSA G., 2010 : Low-level wind field climatology over the La Plata River region obtained with a mesoscale atmospheric boundary layer model forced with local weather observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 1293-1305.

BETTIGA L. J., DOKOOZLIAN N. & WILLIAMS L. E., 1996 : *Windbreaks improve the growth and yield of Chardonnay grapevines grown in a cool climate*. In: *Proceedings of the Fourth International Symposium on Cool Climate Viticulture and Enology*, Rochester, New York, 43-46.

BONNARDOT V., PLANCHON O., CAREY V.A. & CAUTENET S., 2002 : Diurnal wind, relative humidity and temperature variation in the Stellenbosch-Groot Drakenstein winegrowing area. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 23 (2), 62-71.

BONNARDOT V., CAREY V., MADELIN M., CAUTENET S., COETZEE Z. & QUENOL 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, 1-13.

BONNARDOT V., PLANCHON O. & CAUTENET S., 2005 : The 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, 203-218.

BONNEFOY C., QUÉNOL H., BONNARDOT V., BARBEAU G., MADELIN M., PLANCHON O. & 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.

BORNE K., CHEN D., NUNEZ M., 1998 : A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast. *Int. J. Climatol.*, 18, 901-914.

CALAME F., ROCHAIX M. & SIMON J. L., 1977 : Observations phénologiques et mesures bioclimatiques dans plusieurs sites valaisans à différentes altitudes en vue de la délimitation de l'aire viticole. *Bulletin OIV*, 601-616.

CAMPBELL-CLAUDE J. M., 1998 : Stomatal response of grapevines to wind. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38, 77-82.

CAREY V.A., ARCHER E. & SAAYMAN D., 2002 : Natural terroir units: What are they? How can they help the wine farmer? *South African Wineland magazine*, 151, 86-88.

CAREY V. A., BONNARDOT V., SCHMIDT A. & THERON J. C. D., 2003 : The interaction between vintage, vineyard site (mesoclimate) and wine aroma of *Vitis vinifera* L.

cvs. Sauvignon blanc, Chardonnay and Cabernet Sauvignon in the Stellenbosch-Klein Drakenstein wine producing area. *Bulletin OIV*, 76, 4-29.

CAUTENET S., 1988 : *Interaction d'une circulation méso-échelle de brise de mer avec un cisaillement de vent synoptique. Application au golfe de Guinée*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 204 p.

CAUTENET S. & ROSSET R., 1989 : Numerical simulation of sea breezes with vertical wind shear during dry season at Cape of Three Points, West Africa. *Monthly Weather Review*, 117, 329-339.

C.P.T.E.C., 2013 : Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. In: <http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/20981> (visité le 23 janvier 2014).

DELOIRE A., VAUDOUR E., CAREY V. A., BONNARDOT V. & VAN LEEUWEN C., 2005 : Grapevine responses to terroir: a global approach. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 39 (4), 149-162.

ESTOQUE M. A., 1962 : The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 19, 244-250.

FERRER M., 2007 : *Étude du climat des régions viticoles de l'Uruguay, des variations climatiques et de l'interaction apportée par le microclimat et l'écophysiologie des systèmes de conduite Espalier et Lyre sur Merlot*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 360 pages.

FOURMENT M., FERRER M., GONZÁLEZ-NEVES G., BARBEAU G., BONNARDOT V. & QUÉNOL H., 2013 : *Spatial variability of temperature and grape berry composition at terroir scale in Uruguay*. In: *Proceedings of 18th International Symposium GiESCO*. 7th to 11th July, Porto (Portugal).

FREEMAN B. M., KLIEWER W. M. & STERN P., 1982 : Influence of windbreaks and climatic region on diurnal fluctuation of leaf water potential, stomatal conductance, and leaf temperature of grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 33 (4), 233-236.

GLADSTONES J., 1992 : *Viticulture and environment*. Winetitles, Adelaïde, 310 pages.

HUGLIN P. & SCHNEIDER C., 1998 : *Biologie et écologie de la vigne*. Editions Tec & Doc / Lavoisier, 2^{ème} édition augmentée, 370 p.

HUMÁNTICO-CISNEROS M. A. & PICCOLO M. C., 2011 : Caractertización de la brisa marina en el balneario de Monte Hermoso, Argentina. *Estudios Geográficos*, 271, 461-475.

I.N.I.A., 2013 : Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. In: www.inia.org.uy (visité le 11 janvier 2014).

I.Na.Vi., 2013 : Instituto Nacional de Vitivinicultura. In: www.inavi.com.uy (visité le 18 janvier 2014).

JACKSON D. I. & LOMBARD P. B., 1993 : Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality: a review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 44, 409-430.

JACKSON R. S., 2008 : *Wine Science principles and applications*. Third edition, Elsevier, Oxford, England, 789 pages.

KLIEWER W. M., 1977 : Influence of temperature, solar radiation, and nitrogen on coloration and composition of Emperor grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, 23, 71-77.

- KLIEWER W. M. & GATES D., 1987 : Wind effects on grapevine growth, yield and fruit composition. *Australian and New Zealand Wine industry Journal*, 2, 30-37.
- MORI K., GOTO-YAMAMOTO N., KITAYAMAM M. & HASHIZUME H., 2007 : Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *Journal of Experimental Botany*, 58, 1935-1945.
- NICHOLAS K. A., MATHEWS M. A., LOBELL D. B., WILLITS N. H. & FIELD C. B., 2012 : Effect of vineyard-scale climate variability on Pinot noir phenolic composition. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1556-1567.
- OKOOLA R. E. A., 1978 : *Spatial distribution of precipitation in the Mombasa area of Kenya*. Kenya Meteorological Department, IMTR Research Report, 1/78.
- PROHASKA F., 1976 : *The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay*. Climates of Central and South America, World Survey of Climatology, Elsevier Scientific Publishing Company, 12, 13-112.
- QUÉNOL H., MACIEL A., MONTEIRO A. & BELTRANDO G., 2007 : Variabilidade espacial do gelo primaveril nos vinhedos do Vinho Verde (Portugal). *Geografia*, 32, 5-27.
- QUÉNOL H. & BONNARDOT V., 2014 : A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change: the "TERADCLIM" project. *International Journal of Vine and Wine Sciences*, LACCAGE; Vigne et Vin Publications Internationales, Special issue, 23-32.
- QUÉNOL H., 2014 : *Changement climatique et terroirs viticoles*. Ed. Lavoisier, coll. Tech. & Doc, 444 pages.
- REY P., 1967 : *Étude biogéographique du vent sur le littoral Languedoc-Roussillon*. Service de la carte de la végétation, CNRS, Fasc II, 143 + 86 pages.
- SADRAS V. O., PETRIE P. R. & MORAN M. A., 2012 : Effects of elevated temperature in grapevine. II juice pH, titrable acidity and wine sensory attributes. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 19, 107-115.
- SAVIJÄRVI H. & ALESTALO M., 1988 : The sea breeze over a lake of gulf as the function of the prevailing flow. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, 61, 98-104.
- SIMIONATO C. G., LUZ CLARA TEJEDOR M., MOREIRA D. & CAMPETELLA C., 2009 : Sea surface temperature variability at the Argentinean and Uruguayan Coast off the Rio De La Plata estuary: evidence of upwelling. *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 56, 1424-1428.
- SRAIBMAN L., 2009 : *Modelado numérico atmosférico de capas bajas sobre el Río de la Plata y zonas de influencia y su empleo en estudios de variabilidad climática*. Thèse de doctorat, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 144 pages.
- TARARA J. M., LEE J., SPAYD S. E. & 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, 235-247.
- TONIETTO J. & CARBONNEAU A., 2004 : A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124 (1-2), 81-97.