



HAL
open science

Observation et modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique

Cyril Bonnefoy

► **To cite this version:**

Cyril Bonnefoy. Observation et modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique. Géographie. Université Rennes 2, 2013. Français. NNT : 2013REN20015 . tel-00815596

HAL Id: tel-00815596

<https://theses.hal.science/tel-00815596v1>

Submitted on 19 Apr 2013

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.



THESE / Université Rennes 2

sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE EUROPEENNE DE BRETAGNE

Mention : Géographie

Ecole doctorale Sciences Humaines et Sociales

présentée par

Cyril Bonnefoy

Préparée à l'Unité Mixte de Recherche 6554

UMR LETG-RENNES-COSTEL

Thèse soutenue le 12 Avril 2013

devant le jury composé de :

Wilfried Endlicher

Professeur, Humboldt Universität / *rapporteur*

Gregory Jones

Professeur, University of Southern Oregon / *rapporteur*

Sylvain Bigot

Professeur, Université Joseph Fourier (Grenoble 1) / *examineur*

Vincent Dubreuil

Professeur, Université Rennes 2 / *examineur*

Gérard Barbeau

Directeur Unité Vigne et Vin, INRA-SAD UE 1117- Angers / *examineur*

Malika Madelin

Maître de conférence, Université Paris Diderot / Co-directrice de thèse

Hervé Quénot

Chargé de recherche CNRS, Université Rennes 2, Directeur de thèse

Observation et modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon directeur de thèse Hervé Quénol, sans qui ce projet de thèse n'aurait pu voir le jour. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir permis de m'épanouir dans ma passion : la climatologie ! Merci également à Malika Madelin, ma co-directrice de thèse, qui m'accompagne depuis bien longtemps dans mon travail, et qui m'a permis de progresser dans de nombreux domaines durant ces années d'études. Votre complicité et complémentarité a également contribué au succès de ce travail. Merci encore d'avoir cru en mes capacités à mener à bien ce projet de thèse.

Je souhaiterais également remercier tout particulièrement Wilfried Endlicher, Gregory Jones, Gérard Barbeau, Vincent Dubreuil et Sylvain Bigot d'avoir accepté d'évaluer mon travail et d'être membre du jury.

Merci également à l'école doctorale SHS et à la région Bretagne pour les nombreuses bourses de mobilité qui m'ont été attribuées et m'ont notamment permis de m'épanouir durant deux stages doctoraux à l'Université de Californie de Davis. Je tiens alors plus particulièrement à remercier Jean-Jacques Lambert pour sa générosité et son accueil au sein du Département de Viticulture et d'Œnologie. Merci encore une fois à Hervé qui a cru en mon projet et m'a laissé libre de le mener à bien.

Cette thèse au carrefour de plusieurs disciplines m'a amené à rencontrer et à travailler avec de nombreux chercheurs de différents horizons. Je tiens ainsi à remercier tout spécialement Sylvie et Guy Cautenet pour leur dévouement au projet, leur disponibilité et leur pédagogie. Je tiens également à remercier l'équipe de l'Unité Vigne et Vin de l'INRA d'Angers pour leur accueil et plus particulièrement Gérard Barbeau pour sa confiance et ses conseils, Etienne Neethling pour ses aides précieuses sur le terrain, son soutien, nos discussions endiablés de climatologie et agronomie. Enfin, je remercie également Séverine Roger pour son aide précieuse dans l'installation des stations et la transmission des données.

Je tiens à souligner les très bonnes conditions de travail qui ont régné au laboratoire COSTEL durant mes années de thèse, notamment grâce à la bonne humeur de chacun et au professionnalisme du personnel administratif. Je tenais à remercier l'ensemble des doctorants et membres du labo : notamment Clémence, Emilie (30°C à Soumoulou!), Pauline, Xavier, Antoine, Damien, Janique, Maxime, Chloé, Julie... ainsi que Jean, Seb, Alban et Renan avec une mention spéciale pour leurs aides techniques précieuses !!! Je veux remercier également Nathan pour avoir été un excellent voisin de bureau qui malheureusement a dû repartir au Brésil trop rapidement. Je remercie également Olivier pour nos discussions passionnés de climato. Enfin, je souhaite remercier Valérie pour sa

disponibilité, ses conseils, son soutien dans les moments de doute et surtout son temps consacré à la fameuse machine si capricieuse JADE !

Je terminerai en remerciant tous les amis qui m'ont soutenu dans mon projet : Jonathan, Arnaud, Nicolas C, Nicolas G, Orlane, Elodie (de Buenos Aires), Tommy, Régis, Yann, Romain et ma famille sans qui je n'en serais pas là ! Enfin, un immense merci à Alexis qui a toujours cru en moi et m'a soutenu dans mes moments de doute comme de joie !

Liste des sigles et acronymes

| | |
|----------------|--|
| AIC | Akaike Information Criterion |
| ALT | Altitude |
| ANR | Agence National de la Recherche |
| AOC | Appellation d'Origine Contrôlée |
| AOP | Appellation d'Origine Protégée |
| AOVDQS | Appellation d'Origine Vin délimité de Qualité Supérieure |
| ATAV | Association Technique pour l'Amélioration de la Viticulture |
| AVA | American Viticultural Area |
| BD | Base de Données |
| BIC | Bayesian Information Criterion |
| CAH | Classification Ascendante Hiérarchique |
| CERFACS | Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique |
| CFC | Chlorofluorocarbure |
| CINES | Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur |
| CNRS | Centre National de Recherche Scientifique |
| CTV | Cellule Terroir Viticole |
| DDE | Direction Départementale de l'Équipement |
| DJ | Degré-jour |
| DRIAS | Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés Français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements |
| EAA | European Environment Agency |
| ESCRIME | Etude des scénarios climatiques réalisés par l'IPSL et le CNRM |
| ETP | Evapotranspiration Potentielle |
| FAO | Food and Agriculture Organization of the United Nations |
| GENCI | Grand Equipement National de Calcul Intensif |
| GES | Gaz à Effet de Serre |
| GIEC | Groupe International d'Experts sur le Climat |
| GSM | Global System for Mobile communications |
| HP | Hectopascal |
| IF | Indice de Fraîcheur des Nuits |
| IGN | Institut Géographique National |
| IH | Indice de Huglin |
| INAO | Institut National des Appellations d'Origine |
| INRA | Institut National de Recherche Agronomique |
| IPSL | Institut Pierre Simon Laplace |
| IW | Indice de Winkler |
| MCGA | Modèle de Circulation Générale de l'Atmosphère |
| MCRA | Modèle de Circulation Régionale de l'Atmosphère |
| MNT | Modèle Numérique de Terrain |
| MODIS | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer |
| NCAR | National Center for Atmospheric Research |
| NDVI | Normalized Difference Vegetation Index |
| OIV | Organisation Internationale de la vigne et du Vin |

| | |
|-----------------|---|
| OMM | Organisation Météorologique Mondiale |
| PRCP | Précipitations |
| PRUDENCE | Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects |
| RAMS | Regional Atmospheric Modeling System |
| RMSE | Root Mean Square Error |
| SAFRAN | Analyse des variables météorologiques de surface |
| SIG | Système d'Information Géographique |
| SRES | Special Report on Emission Scenarios |
| SRTM | Shuttle Radar Topography Mission |
| SST | Sea Surface Temperature |
| UNESCO | United Nations Educational Scientific and Cultural Organization |
| USDA | United States Department of Agriculture |
| UTB | Unité Terroir de Base |
| UTC | Coodinated Universal Time |
| WRF | Weather Research and Forecasting model |

Sommaire

| | |
|---|-----|
| Introduction générale..... | 9 |
| Première partie Cadre de l'étude..... | 17 |
| Chapitre I : climat et viticulture..... | 19 |
| Chapitre II Le changement climatique et les impacts sur la viticulture | 53 |
| Chapitre III : Les vignobles de la moyenne vallée de la Loire dans un contexte de changement climatique..... | 81 |
| Deuxième partie Collecte des données et approches méthodologiques | 101 |
| Chapitre IV : Observation et modélisation des températures a échelle fine : Une démarche multiscalaire | 103 |
| Chapitre V Acquisition des données d'observation et approche méthodologique du traitement des données | 121 |
| Chapitre VI : Approche méthodologique de la modélisation spatiale de la température dans les Coteaux du Layon | 141 |
| Chapitre VII : Outil de modélisation numérique du climat : Le modèle régional RAMS données et approche méthodologique..... | 153 |
| Troisième partie Analyse multiscalaire des températures dans le Val de Loire | 163 |
| Chapitre VIII : Analyse spatio-temporelle des températures dans le Centre-Ouest français depuis le milieu du XX ^{ème} siècle | 165 |
| Chapitre IX : Variabilité spatiale des températures dans le vignoble d'Anjou et du Saumurois..... | 177 |
| Chapitre X : Modélisation spatiale des températures dans le vignoble des Coteaux du Layon | 197 |
| Quatrième partie Apport de la modélisation numérique avec le modèle RAMS | 219 |
| Chapitre XI : Simulations de contrôle des modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 1991-2000 | 221 |
| Chapitre XII : Simulations du modèle RAMS pour quatre épisodes extrêmes observés..... | 233 |
| Chapitre XIII : Simulations futures des modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 2041-2050 et pour un épisode extrême | 253 |
| Conclusion générale | 265 |
| Bibliographie | 273 |
| Annexes | 291 |
| Liste des Figures | 295 |
| Liste des Tableaux | 305 |
| Table des matières | 309 |

Introduction générale

Depuis la fin du XIX^{ème} siècle les rejets de Gaz à Effet de Serre (GES) n'ont cessé d'augmenter à l'échelle planétaire, en lien avec la croissance des activités humaines et aux rythmes des phases d'industrialisation des différents pays. Le lien de cause à effet entre les activités anthropiques et le changement climatique contemporain est désormais unanimement établi par les experts (GIEC, 2007). Cette évolution majeure et sans précédent modifie profondément l'équilibre climatique de la planète. Les dernières évolutions des concentrations de GES dans l'atmosphère ont provoqué une hausse d'environ 0,6°C de la température moyenne de surface du globe, depuis 1980. De plus, les différents modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA) prévoient, selon les scénarios, une hausse de la température moyenne du globe, de 2 à 6°C d'ici la fin du XXI^{ème} siècle (Pachauri et Reisinger, 2007). De nombreuses questions se posent alors en termes d'impacts futurs sur les espèces végétales et écosystèmes alors que certains effets sont déjà notables. En effet, depuis la fin du XX^{ème} siècle, la hausse de la température engendre des modifications importantes sur le fonctionnement des écosystèmes et leur adaptation est en cours, en particulier avec la remontée des espèces en latitude (Mérot *et al.*, 2012) et en altitude. Cette augmentation de la température provoque également des changements dans les rythmes de végétation des végétaux. Les pratiques agricoles sont ainsi parmi les premières activités économiques touchées par ces évolutions du climat récentes (Rosenweig et Hillel, 1998 ; Reddy et Hodge, 2000 ; Soussana, 2001).

La vigne étant une plante fortement influencée par le climat et la température (Pouget, 1968 ; Buttrose et Hale, 1973), celle-ci connaît des changements dans le déroulement de son cycle végétatif, notamment depuis la fin des années 1980, avec l'observation d'une précocité des stades phénologiques (Délécolle *et al.*, 1999 ; Ganichot, 2002 ; Lebon, 2002 ; Seguin et Stengel, 2002 ; Seguin, 2007 ; Storchmann, 2007 ; Seguin, 2010). Même si les conséquences sur la fréquence des extrêmes thermiques ne sont pas encore très bien cernées par les modèles climatiques, certaines études montrent que les températures caniculaires, comme celles observées en 2003 en Europe de l'ouest, devraient être plus fréquentes (Beniston, 2004 ; Meehl et Tebaldi, 2004 ; GIEC, 2007). La vigne étant très sensible aux fortes chaleurs, en particulier lors de la maturation des raisins, des problèmes d'échaudage et de grillage des baies pourraient se poser. Ces modifications des conditions thermiques entraînent alors une transformation de la composition des raisins. En raison des températures plus élevées, les baies contiennent beaucoup plus de sucre et ont un taux d'acidité plus faible (Seguin, 2010). L'équilibre chimique nécessaire à la conservation des vins peut alors être compromis pour certains cépages et régions viticoles.

De nombreuses interrogations se posent alors quant à l'avenir de la filière viticole dans certaines régions. Pour cela des réponses adaptées à chaque vignoble devront être apportées, grâce à une meilleure connaissance du fonctionnement des terroirs viticoles aux échelles locales. Pour l'instant, les simulations des MCGA apportent des résultats trop approximatifs avec des résolutions de l'ordre de 50 à 300 km. Les changements climatiques ne seront pas homogènes spatialement et dans le temps (Pielke *et al.* 2002) et ces

différences engendreront des conséquences diverses selon les pays viticoles. C'est pourquoi, les analyses climatiques doivent être menées à des échelles adaptées aux terroirs viticoles. Plusieurs typologies des échelles climatiques (Orlanski, 1975 ; Yoshino, 1977) sont communément utilisées par les géographes-climatologues. Ces échelles varient du macroclimat qui permet de décrire les circulations de masse d'air à l'échelle synoptique au microclimat qui correspond à la variabilité spatio-temporelle du climat sur quelques centaines de mètres. Dans le cadre d'une étude d'impact sur la vigne, deux niveaux d'échelles méso-climatiques, décrit notamment par Orlanski (1975), nous intéressent plus particulièrement : la méso-échelle « β » qui correspond au climat régional (quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres), et la méso-échelle « γ » qui correspond à l'échelle locale. L'échelle locale se décompose alors en deux sous-niveaux : l'échelle topoclimatique (vallée, coteau...) et l'échelle microclimatique (échelles fines de la parcelle, du rang de vigne...). Des méthodologies d'observation, d'analyse et de modélisation adaptées à ces différents niveaux d'échelles doivent alors être mise en place.

Depuis plusieurs années d'importants progrès ont été faits en modélisation à méso-échelle grâce notamment à l'apport de diverses techniques (dynamiques ou statistiques) permettant de désagréger les sorties des MCGA à des échelles fines (quelques kilomètres à quelques centaines de mètres). Ces modèles sont particulièrement adaptés pour des analyses climatiques aux échelles des terroirs viticoles. Ils permettent notamment d'obtenir des simulations permettant d'évaluer les conséquences aux échelles des appellations ou des propriétés viticoles, échelles où sont prises les décisions en termes d'adaptations. Ces simulations possèdent cependant des biais inhérents aux modèles, dus notamment à la difficulté d'appréhender la multiplication des phénomènes complexes aux échelles les plus fines (Beltrando, 2004). C'est pourquoi de nombreuses études s'intéressent à la validation de ces sorties afin d'évaluer les simulations et quantifier ces biais (Briche, 2011 ; Bonnefoy *et al.* 2009 ; Bonnardot et Cautenet, 2009 ; Madelin, 2004). Ces validations se font très souvent grâce aux données issues des réseaux de stations météorologiques denses et localisés dans ou à proximité des vignobles. Les données d'observation de ces réseaux permettent alors de comprendre la forte variabilité spatiale des températures liée aux effets locaux et montrent que les modèles, bien qu'adapter à ces échelles, ont du mal à la retranscrire. Cette difficulté est due notamment à la complexité des phénomènes impliqués à échelles fines et est amplifiée par les fortes incertitudes liées au changement climatique.

Cette thèse entre dans le cadre de l'ANR-JC07-194103 TERVICLIM intitulée « Observation et modélisation spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique ». Ce programme, commencé en 2008 et terminé en 2012, visait à réunir des géographes-climatologues, des agronomes et des modélisateurs du climat afin de constituer une équipe pluridisciplinaire travaillant sur l'évolution du climat et les impacts actuels et futurs dans plusieurs pays viticoles. Ce programme avait pour objectif de mettre en place une méthodologie de mesures agro-climatiques et de spatialisation des températures à l'échelle des terroirs viticoles. Les études ont été menées dans 22 vignobles répartis dans 14 pays. Plusieurs sites expérimentaux ont été choisis dont les vignobles de

Stellenbosch (Afrique du Sud), de Mendoza (Argentine), de Bourgogne (France) et du Val de Loire (France), terrain d'étude de la thèse.

Le Val de Loire est la 3^{ème} plus grande région viticole de France (Interloire, 2011) et s'étend de Nantes à l'ouest à Sancerre à l'est, en limite de la Bourgogne. Un certain nombre d'études, dans les régions viticoles françaises, se sont intéressées aux changements climatiques à partir de réseaux de stations assez denses comme en Champagne (Beltrando et Briche, 2010 ; Briche, 2011) ou en Bourgogne (Bonnefoy *et al.*, 2009 ; Chabin *et al.*, 2007 ; Madelin *et al.*, 2008, 2010 ; Xu *et al.*, 2012). En revanche, peu d'études ont détaillé l'évolution climatique au sein des terroirs viticoles du Val de Loire. Des évolutions ont été constatées en moyenne vallée de la Loire mais essentiellement sur le comportement de la vigne et le déroulement de son cycle végétatif (Barbeau, 2007). Ce travail de thèse doit permettre de combler, en partie, ce manque d'information à travers une étude de la variabilité spatio-temporelle de la température, paramètre climatique très influent dans la croissance de la vigne (Branas *et al.*, 1946 ; Pouget, 1968 ; Galet, 2000).

La première phase de cette étude vise à évaluer l'évolution de la température dans le centre-ouest français et celle des indices bioclimatiques de la vigne en Val de Loire depuis le milieu du XX^{ème} siècle. Ce diagnostic climatique est effectué à une échelle régionale afin d'établir le contexte climatique de notre étude. Dans un deuxième temps, un important travail de terrain a été engagé afin de mettre en place un réseau de stations météorologiques adaptées pour l'étude de la variabilité spatiale de la température dans les terroirs viticoles de moyenne vallée de la Loire (Anjou et Saumurois). Une troisième phase a conduit à l'installation d'un réseau de capteurs de températures dans un site viticole expérimental de 600 ha situé dans les Coteaux du Layon. L'objectif principal est l'évaluation de la variabilité spatiale de la température au sein du site et sa spatialisation. Une méthodologie, visant à la construction de modèles multicritères, pour la spatialisation de la température, est ainsi été mise en œuvre. Cette phase de modélisation doit nous aider à comprendre les facteurs topographiques qui influent sur cette variabilité. Enfin, une dernière phase a mobilisé les compétences de modélisateurs de l'atmosphère, Sylvie et Guy Cautenet, du laboratoire LaMP à Clermont-Ferrand, pour l'utilisation d'un modèle climatique méso-échelle RAMS. Cette partie de la thèse a pour objectif d'évaluer l'apport d'un tel modèle pour l'évaluation des conséquences du changement climatique dans le Val de Loire. Le choix de la désagrégation dynamique a été fait dans l'optique que cette technique a une forte capacité d'être améliorée, notamment avec les progrès récents sur la connaissance de la physique de l'atmosphère et de l'augmentation de la capacité de calcul des ordinateurs. L'objectif final est d'apporter une meilleure évaluation des conséquences futures du changement climatique dans la moyenne vallée de la Loire, notamment grâce aux études locales menées en Anjou et en Saumurois qui fournissent des informations précieuses sur la variabilité spatiale de la température. En effet, cette connaissance approfondie de la diversité climatique au sein d'une région viticole permettra de mieux anticiper les futurs changements climatiques et de proposer des adaptations aux viticulteurs.

La thèse s'articule alors autour de quatre parties :

- La première partie se veut être une synthèse bibliographique introduisant ainsi le cadre scientifique de l'étude. Nous insistons tout d'abord sur le lien fort, existant entre le climat et la vigne. L'importance du paramètre « température » est mis en avant notamment grâce à une réflexion sur l'apport des principaux indices bioclimatiques dans une étude sur la variabilité spatio-temporelle de la température. Les conséquences des risques climatiques, liés aux extrêmes thermiques froids (gel tardif) et chauds (canicule), sont également exposées. Le chapitre II est une synthèse des recherches menées dernièrement sur le thème du changement climatique et des conséquences en agriculture et plus particulièrement en viticulture. Dans un premier temps, nous dressons un constat des changements climatiques observés dans le monde puis en zones viticoles. Nous détaillons ensuite les simulations futures du climat à partir des différents scénarios du GIEC. Enfin, nous abordons les impacts observés et attendus en agriculture et plus particulièrement dans le domaine viticole. Le dernier chapitre de cette partie (chapitre III), présente la zone d'étude de la thèse : la moyenne vallée de la Loire, en la replaçant dans un contexte géographique et viticole régional. Pour cela un portrait climatique et géomorphologique de la région est dressé puis les notions de terroir et d'Unité Terroir de Base (UTB) sont développées. Le chapitre termine en s'interrogeant sur le devenir de ces vignobles face aux changements climatique à venir.
- Dans la seconde partie de la thèse, les jeux de données mobilisées à différents niveaux d'échelles spatiales et temporelles sont introduits. Les méthodes déployées pour le traitement de ces données sont également détaillées. Le chapitre IV développe la méthodologie au cœur de la thèse. L'intérêt d'une étude avec des échelles spatio-temporelles imbriquées est alors discuté. Puis, la mise en place de réseaux de mesures climatiques, adaptés à l'échelle des terroirs viticoles, est décrite. Ce chapitre démontre également l'utilité de certaines méthodes statistiques de spatialisation de la température ainsi que les apports des Modèles de Circulation Régionale de l'Atmosphère. Le chapitre V décrit les différentes bases de données climatiques utilisées. Les méthodes adoptées pour le traitement statistique de ces données sont également détaillées. Le chapitre VI se consacre à la méthodologie ayant servi à la modélisation des températures dans le site expérimental des Coteaux du Layon. La sélection des données climatiques et topographiques utilisées pour la modélisation est expliquée. Le choix de la méthode de modélisation est alors justifiée et la méthode d'automatisation de la procédure détaillée. Le dernier chapitre de cette partie présente un autre outil de spatialisation de la température : le modèle numérique *Regional Atmospheric Modelling System* (RAMS). Les données d'entrée et les étapes de paramétrisation sont présentées puis les choix des périodes simulées sont expliqués. Enfin, les méthodes de traitement des sorties sont détaillées.

- La troisième partie présente les résultats de l'analyse de la variabilité spatio-temporelle de la température aux trois niveaux d'échelles de l'étude. Dans le chapitre VIII, nous présentons les résultats du diagnostic à l'échelle régionale afin de mesurer l'évolution des températures dans le centre-ouest de la France et des indices bioclimatiques en Val de Loire. Dans le chapitre IX, nous développons les résultats de l'analyse de la variabilité spatiale de la température à l'échelle topoclimatique du Val de Loire et à l'échelle microclimatique du site expérimental dans les Coteaux du Layon. Le chapitre X, détaille les résultats des différents modèles multicritères construits, afin d'expliquer la variabilité de la température dans le site expérimental. Des cartes de la spatialisation de la température pour certains mois et certaines dates sont proposées et commentées.

- La dernière partie de la thèse montre l'apport, pour notre étude, de la modélisation numérique avec le modèle RAMS. Le chapitre XI compare les observations de 3 stations météorologiques de moyenne vallée de la Loire avec les simulations pour la période de référence 1991-2000 du modèle RAMS à 5 km de résolution horizontale et d'ARPEGE-Climat à 50 km. L'apport de la désagrégation numérique avec le modèle RAMS est alors discuté. Dans le chapitre XII, les résultats des simulations, à 200 m de résolution, pour quatre évènements extrêmes sont développés grâce à des comparaisons entre les données observées issues des stations mises en place dans le cadre de la thèse et du projet TERVICLIM. Des cartes des champs thermiques modélisées sont également proposées. Enfin, le dernier chapitre s'intéresse aux simulations de RAMS et ARPEGE-Climat à 5 km de résolution sur la période future 2041-2050. Les simulations sont notamment discutées en fonction des résultats obtenus par les deux modèles sur la période de référence.

Première partie

Cadre de l'étude

Cette première partie présente le contexte géographique et climatologique dans lequel s'inscrit ce travail de thèse à travers une synthèse bibliographique.

Nous aborderons, dans un premier chapitre, le lien étroit entre le climat et la viticulture. Le fonctionnement de la vigne et le déroulement de son cycle phénologique est, en effet, fortement lié à la variabilité spatio-temporelle du climat.

Le deuxième chapitre présente le changement climatique observé, en particulier dans les différentes régions viticoles, ainsi que les impacts visibles sur les vignobles. Les simulations climatiques futures et les évolutions attendues pour la vigne sont également abordées.

Enfin, le troisième chapitre propose une présentation de la région de la moyenne vallée de Loire et de ses vignobles. Ce chapitre termine sur les dernières évolutions du climat observées dans la région et une discussion sur les conséquences à venir du changement climatique et les possibles adaptations de pratiques est proposée.

Chapitre I : CLIMAT ET VITICULTURE

Le climat est l'une des composantes essentielles du terroir viticole et explique en grande partie la qualité de la vendange comme le rappelle Galet (2000) lorsqu'il explique qu'« il est de tradition dans les ouvrages de viticulture d'enseigner que les facteurs de la qualité des vins sont : le climat, le sol et le cépage. Il précise également qu'« il est bien connu que les variations annuelles de la qualité des vins, dans un vignoble donné, sont sous l'étroite dépendance des fluctuations annuelles du climat qui agissent directement sur la maturation des raisins et indirectement sur le développement et l'extension des parasites de la vigne ». Nous allons ainsi présenter dans ce chapitre les liens forts existant entre le climat, la variabilité spatio-temporelle climatique et la croissance de la vigne. Nous montrerons notamment que la température est l'un des paramètres climatiques qui influe le plus sur le déroulement du cycle végétatif de la plante. Des indices bioclimatiques directement calculés à partir de paramètres thermiques sont d'ailleurs très répandus dans les études de climatologie viticole. Le choix, ayant été fait de se focaliser sur le facteur « température » dans ce travail de thèse, nous insisterons plus particulièrement sur les liens existants entre variabilité spatio-temporelle de ce paramètre climatique et la croissance de la vigne. Dans un premier temps nous rappellerons quelques éléments indispensables à la compréhension du fonctionnement de la vigne, de sa croissance et du développement des différents stades phénologiques en lien avec les variables climatiques et donc la température. Dans un deuxième temps, la question des échelles spatiales et temporelles dans l'étude des climats viticoles sera développée, à travers en outre l'utilisation d'indices bioclimatiques aidant à la délimitation des climats viticoles. Enfin nous étudierons les effets des extrêmes climatiques, liés notamment à la température (gel, canicule), sur la vigne.

I.1. Le déroulement du cycle végétatif de la vigne en lien avec le climat

La vigne, du vieux français *vinne* ou du latin *vinea* qui signifient plant de vigne, est un arbrisseau rampant (Figure I.1), de la famille botanique des Vitacées, de l'espèce *Vitis* (Blouin, 2007). Galet (2000) parle également d'« arbrisseaux souvent sarmenteux, grimpant comme des lianes, s'attachant à des supports variés grâce à des vrilles oppositifoliées, simples ou le plus souvent ramifiées ». Nous allons développer ici les différents rythmes et stades phénologiques de la plante, ainsi que ses besoins climatiques qui lui assurent une bonne croissance.

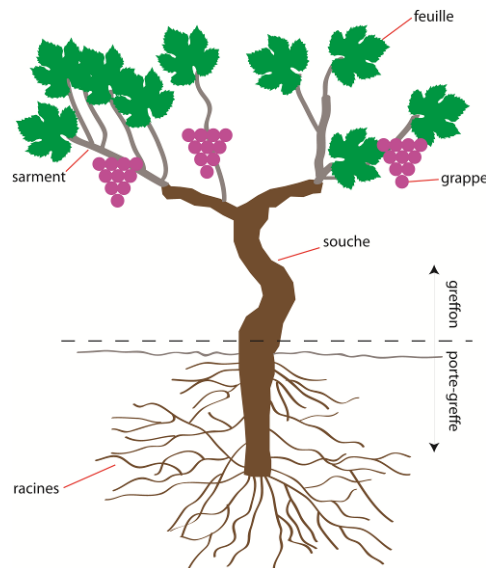


Figure I.1. Un cep de vigne et ses différents éléments

I.1.1. Les rythmes de végétation

La vigne est avant tout une plante vivace et doit donc assurer une triple fonction. Chaque année la vigne doit former une végétation herbacée, composée de rameaux et de feuilles qui vont assurer le développement de la souche, du système racinaire, ainsi que l'accroissement de la tige : c'est le cycle végétatif (Figure I.2).

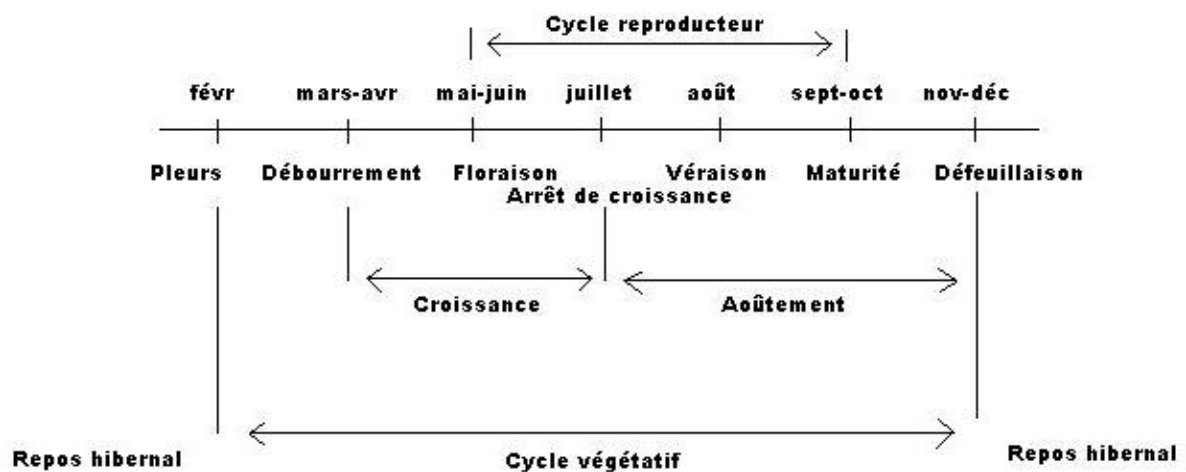


Figure I.2. Cycle végétatif de la vigne (d'après Galet, 2000)

Sous les climats tempérés, la vigne possède un rythme de végétation discontinu, c'est-à-dire qu'on observe l'alternance des périodes de végétation (vie active) et des périodes de repos (vie ralentie) (Galet, 2000). Ce cycle débute avec les pleurs à la fin de l'hiver qui correspondent à la montée de sève dans les rameaux de vigne, due aux températures plus clémentes. La phase de pleurs peut alors commencer. La reprise de la vie externe (développement de la végétation visible) se fera à partir du stade de débourrement. La phase de croissance de la vigne débutera alors en s'étendant du milieu du printemps jusqu'au milieu de l'été. Durant cette période d'environ 4 mois, les rameaux de la plante vont s'allonger et des feuilles vont se développer à partir des bourgeons initiaux. Les feuilles

permettront à la plante d'assurer les échanges gazeux nécessaires à sa respiration et à son développement à travers l'activité chlorophyllienne. Cette activité de la vigne sert également à la transformation de la sève brute en sève élaborée qui sera ensuite nécessaire à la croissance des organes végétatifs et reproducteurs. À la fin de cette phase (fin juillet-début août selon les climats et cépages), la vigne rentre alors en aoûtement, c'est-à-dire que la croissance des rameaux et des feuilles cesse. À l'automne, avant de perdre ses feuilles dès les premières gelées, la vigne entre alors en repos dit « hibernant ».

Le cycle reproducteur débute quelques jours après le débourrement. Quelques semaines plus tard, de petites inflorescences vont apparaître et une forme de grappe va commencer à être visible puis la floraison va se produire (mi-mai à fin Juin dans le midi de la France et jusqu'en juillet dans les vignobles les plus septentrionaux). Par la suite, les grappes vont commencer à se développer avec l'apparition de grains de raisin verts. Ces grains vont progressivement changer de couleur durant l'été jusqu'au stade de la véraison (mi-juillet à début août dans le sud de la France et jusqu'à septembre dans le nord). Les raisins atteignent alors leur maturité de la mi-septembre à la mi-octobre selon les cépages et régions. Les vendanges ont alors lieu et la fin du cycle végétatif de la vigne interviendra quelques semaines après la récolte, lors des premières gelées.

1.1.2. Les différents stades phénologiques

Nous avons expliqué les différents rythmes de végétation et introduit quelques notions concernant les stades phénologiques mais il est nécessaire de détailler ces différents stades majeurs de la plante afin de comprendre par la suite le lien entre le climat et leur développement. La phénologie est l'étude de l'apparition d'évènements annuels périodiques dans le monde vivant, déterminée par les variations saisonnières du climat. Plusieurs auteurs (Eichhorn et Lorenz, 1977 ; Lancashire *et al.*, 1991 ; Huglin et Schneider, 1998) ont cherché à définir ces stades clés de la croissance de la vigne comme Baggiolini (1952) qui propose un schéma (Figure I.3) résumant les stades phénologiques de la vigne en 16 stades de A à P. Les stades repères couramment étudiés, pour leur lien fort avec les variables climatiques et surtout la température, sont ainsi définis, ci-après.

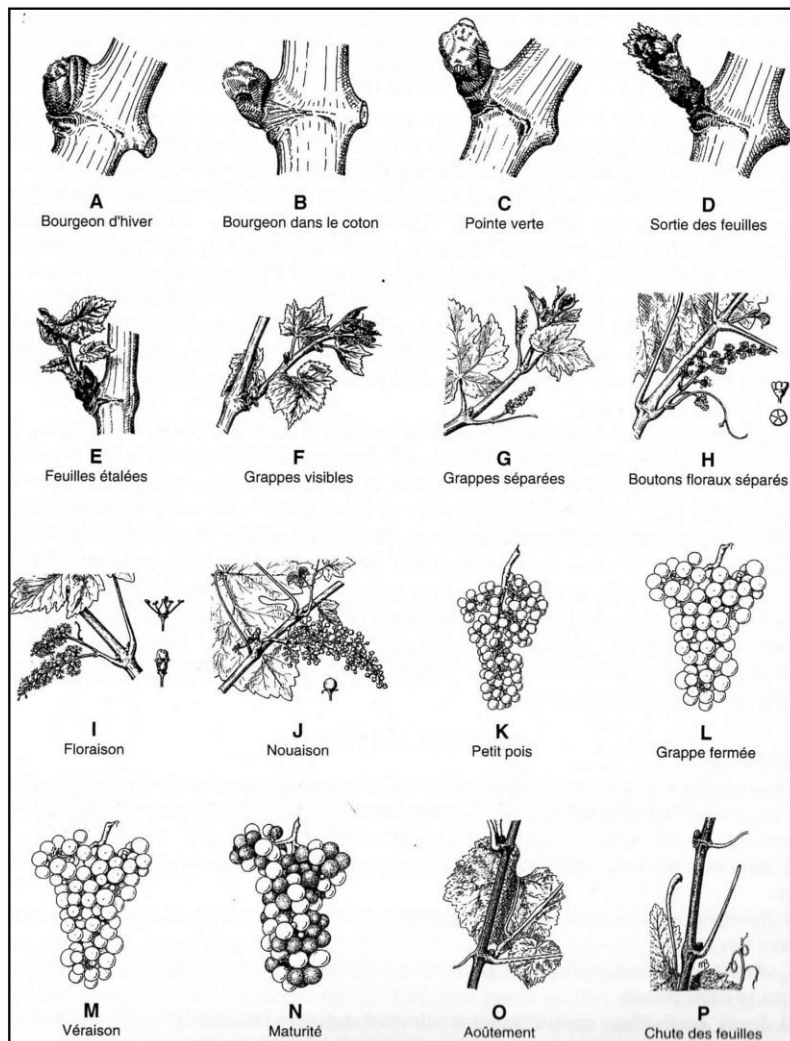


Figure 1.3. Les stades repères de la vigne

Source : [Baggiolini, 1952]

I.1.2.1. Le débourrement

Le débourrement est le premier stade repère de la vigne marquant le début du cycle phénologique. Il intervient après la période de dormance hivernale puis les pleurs. On dit que la vigne « débourre », c'est-à-dire que les futurs rameaux de la nouvelle année apparaissent au milieu de la « bourre », ce filament les protégeant du froid de l'hiver, à l'intérieur du bourgeon. (Blouin, 2007). Ce stade repère de la vigne, le stade C, intervient de manière plus ou moins précoce selon les années, les cépages, les régions et les portes greffes. La durée du débourrement s'étalera de quelques jours à plusieurs semaines selon les conditions climatiques précédant l'occurrence du stade. Par exemple, la date moyenne de débourrement des vignes de la collection des mêmes 23 cépages usuels français varie de 18 au 30 avril à Colmar et du 3 au 14 avril à Montpellier (Blouin, 2007). Dans tous les cas, cette date de débourrement est très importante dans le cas de gel de printemps, d'autant plus si cette date est précoce, mais nous y reviendrons dans la dernière partie de ce chapitre.

La date de débourrement varie d'une année à l'autre principalement en fonction du climat de l'année en question. La date de débourrement est étroitement liée à la température de

l'air. Le débourrement est le résultat de l'action de la somme de températures de l'hiver et du début de printemps (Pouget, 1968). Ce même auteur a prouvé, par ses expériences, qu'un cépage précoce aura toujours une vitesse de débourrement supérieure à un cépage tardif, quelles que soient l'époque de prélèvement des bourgeons et la somme de température nécessaire au débourrement. Il a aussi montré que la température moyenne de débourrement, c'est-à-dire la température nécessaire au déclenchement du stade, va diminuer avec la latitude, là où le repos hivernal devient plus long et plus marqué. Le cépage Aramon nécessite, par exemple, une température moyenne de débourrement de 13,5°C à Alger mais de 10,2°C à Montpellier (Branas *et al.*, 1946). La date de débourrement, quant à elle, deviendra de plus en plus tardive en se dirigeant vers des latitudes plus élevées. Pour l'Aramon cette date sera autour du 10 mars à Alger mais du 25 mars à Montpellier et du 2 avril à Colmar. Cependant pour un même cépage et un même lieu, Branass *et al.* (1946) expliquent que la date de débourrement va varier d'une année sur l'autre. Ceci est dû principalement à la plus ou moins grande intensité du froid hivernal qui précède le débourrement. Enfin, tous les cépages ne vont pas débourrer en même temps. Ceci est dû à des températures de débourrement très différentes selon les cépages (Ravaz, 1907). Par exemple à Montpellier les écarts entre les extrêmes pouvaient atteindre près de 50 jours pour les diverses espèces de *Vitis* en 1966 (Galet, 2000).

I.1.2.2. La floraison

La floraison correspond au stade durant lequel les inflorescences sortent des bourgeons au début de la croissance, quelques jours après le débourrement. Ce stade intervient généralement entre fin mai et début juin, selon les régions, les cépages et les conditions climatiques de l'année. La première étape de ce stade est la libération du pollen par les étamines qui assureront ensuite la fécondation des ovaires Blouin (2007) explique que le plus souvent la fécondation est dite « autogame » - le pollen d'une fleur féconde les ovules de la même fleur - mais le vent entraîne certaine fécondation « allogame », entre ceps. Cette situation est obligatoire pour les (rares) cépages-femelles dont on assure la fécondation par du pollen de cépages mâles ou hermaphrodites. La fécondation normale se manifeste par la « nouaison », l'apparition de la baie. De 30 à 40% seulement des fleurs donnent des baies normales, avec un à quatre pépins. Dans les autres cas, il y a transformation de l'inflorescence en vrille stérile (filage), ou une nouaison imparfaite sans pépins, avec des baies restant très petites, d'un à trois-quatre millimètre de diamètre (millerandage). Lorsque ces fécondations imparfaites sont très abondantes, il y a coulure, avec perte de récolte anormale. Galet (2000) explique que « lorsque les feuilles sont étalées, les inflorescences deviennent bien visibles (stade F) et apparaissent au sommet de la pousse avec 4 à 6 feuilles étalées. On observe ensuite le stade G grappes séparées, puis le stade H boutons floraux séparés avec l'apparition de la forme typique de l'inflorescence, dans laquelle les boutons floraux sont nettement isolés avant d'arriver à la floraison au stade I, c'est-à-dire l'épanouissement de la fleur ».

Tout comme pour le débourrement, la floraison a besoin de certaines conditions climatiques pour se produire. La lumière joue un rôle très important dans l'initiation florale. L'éclairement des bourgeons va jouer alors un rôle essentiel durant la période de pré-floraison. L'ombrage des souches au printemps diminue notamment la lumière reçue directement par les inflorescences et donc leur développement (May et Antcliff, 1964). Buttrose (1969) et Wagner (1966) ont également étudié les effets positifs de la lumière sur la floraison de la Sultanine alors que Champagnol (1984) a lui montré que cette dernière n'avait que peu d'effet, car des rangs de vigne en bord de parcelle et bordés par des platanes, donc très souvent à l'ombre, n'étaient pas plus en retard dans la floraison que le reste des autres rangs. Il conclut sur le fait que la concurrence imposée par les arbres augmentait la vigueur de la vigne.

La température de l'air est également un facteur primordial pour la date de floraison. La floraison se déroule dans de bonnes conditions lorsque la température moyenne de l'air est supérieure à 20°C durant le développement des inflorescences (Winkler *et al.*, 1974 ; Carbonneau, 1992). Des températures inférieures à 15°C sont néfastes pour la pollinisation et la germination du pollen alors que des excès thermiques (supérieurs à 38°C) inhibent la pollinisation (Winkler *et al.*, 1974). Par conséquent, la fertilité des cépages va en augmentant lorsque l'on descend en latitude puisque la température est plus favorable et l'ensoleillement plus important. Un temps ensoleillé et sec durant la phase de floraison de la vigne sera bénéfique à une bonne initiation florale. Cependant, une sécheresse trop marquée sera néfaste au développement des inflorescences, puisque celle-ci réduira la vigueur de la vigne. Les vignes vigoureuses ont en effet une meilleure fertilité que des vignes peu vigoureuses (Galet, 2000).

I.1.2.3. La véraison

Le stade de la véraison est défini comme un changement d'aspect et de couleur des raisins intervenant environ 60 jours après la floraison. Les raisins rouges passent alors du vert au rouge par formation d'anthocyanes, les raisins blancs du vert opaque au vert plus transparent et tous deviennent mous à la pression. La véraison dure quelques heures pour une baie mais jusqu'à 15-20 jours pour une parcelle (Blouin, 2007). Ce stade, noté M par Baggiolini (Figure I.3), intervient donc au milieu de l'été et marque aussi l'arrêt de croissance de la vigne et son entrée dans l'aoûtement.

Les conditions climatiques de la période pré-véraison vont jouer sur la date d'occurrence de ce stade. Par exemple, le nombre de jours avec des températures supérieures à 25°C est corrélé négativement et significativement avec la date de véraison (Jones et Davis, 2000). Ainsi plus le nombre de journées avec des températures supérieures à 25°C est important, plus la date de véraison est précoce. Ils montrent également que plus la quantité de précipitations tombées dans l'intervalle débourrement-floraison est conséquente, plus la date de véraison est tardive. Cependant ceci est un effet indirect du retard de la floraison dû à ces conditions climatiques trop humides. Cependant, les niveaux de corrélations des variables climatiques avec la date de véraison sont moins élevés que pour les stades du

débourrement ou de la floraison car contrairement à ces deux derniers stades, l'influence du climat sur la véraison se fait de manière plutôt indirecte. Nous avons vu que lors de la floraison, les conditions climatiques vont être déterminantes pour la pollinisation. Pour la véraison, plus que les conditions climatiques pendant l'apparition du stade, c'est la capacité hydrique du sol qui sera primordiale car celle-ci va influencer la température du substrat autour du système racinaire de la plante et ainsi jouer sur sa vigueur. Carbonneau (1992) explique que l'occurrence de la véraison sera favorisée par un bon ensoleillement et une sécheresse relative. En effet, en période de pré-véraison, le stade de la véraison peut être accéléré sur des sols plus fins qui subiront un stress hydrique plus marqué que des sols plus profonds avec des réservoirs en eau plus importants. Le climat agit donc indirectement et de manière couplée avec le sol.

I.1.2.4. La phase de maturation du raisin

La phase de maturation du raisin dure environ 35-45 jours, selon les cépages, mais avec une durée à peu près indépendante du climat : un temps chaud facilite la maturation mais sans en modifier sensiblement le terme. Selon Blouin (2007), la maturation correspond à la transformation du raisin entre la véraison et la maturité avec accumulation des sucres, baisse de l'acidité et développement des arômes du raisin. La maturation va ainsi conduire à des modifications majeures en teneur de certains composés chimiques dans les baies. Moreau et Vinet (1932) ont notamment étudié, en Anjou, l'accroissement du grain de Gamay noir et les variations de sa composition (Figure I.4). Ils montrent ainsi très clairement la baisse du taux d'acidité alors qu'en parallèle la concentration des sucres et le poids des baies augmentent.

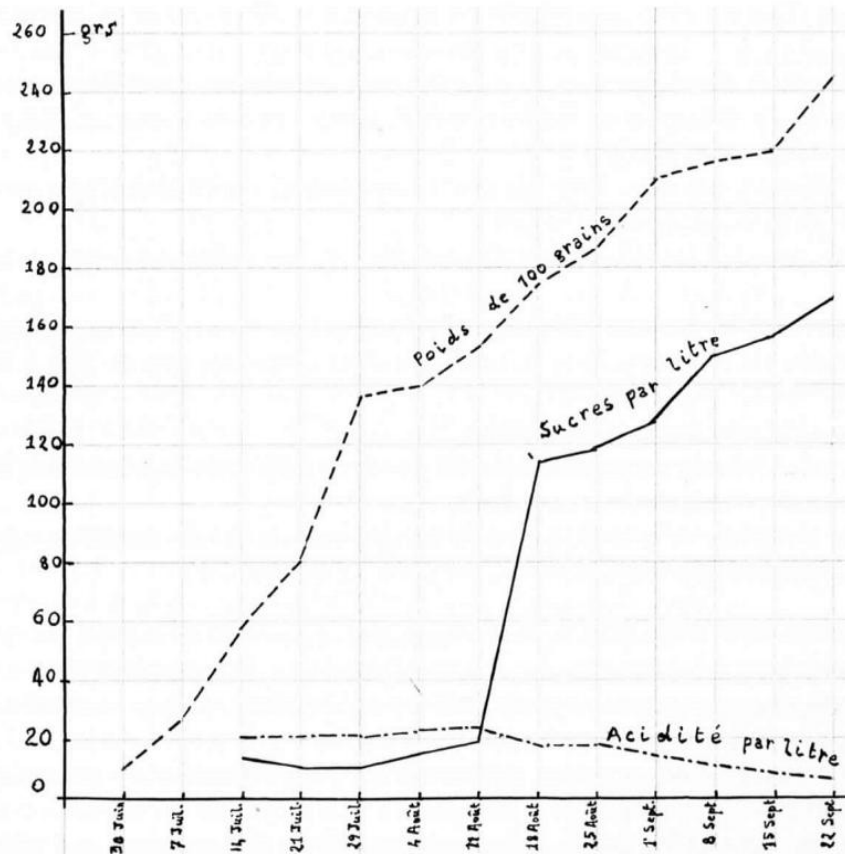


Figure 1.4. Evolution du poids des baies, des sucres et de l'acidité au cours de la maturation en Anjou (d'après Moreau et Vinet, 1932).

Au terme de la maturation, nous parlons de stade de maturité du raisin. Il existe néanmoins un certain nombre de maturités. Nous allons en définir les deux principales (Blouin, 2007) :

- Maturité phénologique : « Les durées des périodes floraison/véraison, véraison/maturité, floraison/maturité peuvent être considérées comme des constantes variétales, très peu dépendantes du climat, du terroir...Par exemple il s'écoule 112 jours/±2 à 5 jours entre floraison et maturité du Merlot noir à Bordeaux. Cette période varie un peu avec les cépages, les grandes zones viticoles mais les écarts sont limités et localement très faibles. » Par conséquent, la maturité phénologique est un repère essentiel pour le choix de la date optimale de récolte et le climat changera assez fortement les caractéristiques du raisin récolté mais que très peu la durée de la phase de maturation.
- Maturité industrielle : « Ce qualitatif inesthétique caractérise, selon les cas, la concentration en sucres maximales, la teneur en acidité totale minimale, la quantité de sucres à l'hectare maximale. Selon les cas, on privilégie le rôle de l'acidité (ex : vins de base pour effervescents) ou des sucres (ex : vins doux). Il faut atteindre une teneur en sucres minimale pour récolter et/ou enrichir aussi selon les zones viticoles européennes, les AOC. Teneurs en sucre et/ou acides ne doivent pas être un critère

unique de fixation de la date de récolte pour vins de qualité. Elles constituent cependant des marques importantes et simples, à ne jamais négliger. »

1.1.3. La vigne, excellent marqueur du climat

Nous avons pu voir que le développement des stades phénologiques pouvait être lié aux conditions climatiques de manière plus ou moins marquée. En effet, comme pour les autres plantes, la température et la photopériode sont considérées comme fondamentale dans le développement phénologique de la vigne et dans la maturation des raisins (Winkler *et al.*, 1974 ; Huglin et Schneider, 1998 ; Jones et Davis, 2000 ; Jones *et al.*, 2005 ; Van Leeuwen *et al.*, 2008 ; Duchêne *et al.*, 2010). Ainsi, la phénologie de cette plante a été utilisée par plusieurs auteurs afin de reconstruire les variables climatiques du passé, notamment la température.

La très forte corrélation entre les températures et les différents stades phénologiques a permis de reconstruire certaines séries climatiques très anciennes (Le Roy Ladurie, 1971 ; Brázdil *et al.*, 2005; Jones *et al.*, 2009). En particulier, les dates de vendanges sont très utiles pour remonter jusqu'au Moyen Age (Pfister, 1999 ; Chuine *et al.*, 2004) et ces dates de vendanges sont étroitement liées aux conditions thermiques (Coombe et Dry, 1988; Jones, 2003). Des études assez récentes (Chuine *et al.*, 2004; Menzel, 2005) ont pu montrer que les séries de températures reconstruites à partir des dates de vendanges permettaient de détecter les différentes anomalies climatiques des temps passés. Cependant, l'utilisation des dates de vendanges afin de reconstruire des séries de températures n'est pas si simple. Meier *et al.*, (2007) mettent en évidence les différentes sources d'incertitudes liées aux données phénologiques. En effet, les relevés phénologiques sont réalisés par différents observateurs qui n'ont pas forcément les mêmes critères d'observation. De plus, les pratiques viticoles ont pu évoluer durant les siècles, tout comme les cépages cultivés. Ces sources d'incertitudes sont donc à prendre en considération lorsque l'on étudie des séries de températures reconstruites grâce à des dates de vendanges.

1.2. Vers une délimitation des climats viticoles

Le climat peut avoir des conséquences positives ou négatives sur le fonctionnement de la vigne. Le climat jouera alors un rôle favorable ou limitant à cette culture. Nous verrons dans un premier temps ces facteurs qui jouent sur la géographie actuelle de la viticulture mondiale puis nous étudierons dans un second temps les principaux indices bioclimatiques qui servent à la délimitation des climats viticoles.

1.2.1. Limites mondiales de la culture de la vigne

1.2.1.1. Les facteurs climatiques limitant la culture de la vigne

Différents éléments du climat vont jouer sur le fonctionnement de la vigne. La lumière est l'un des facteurs essentiels à son développement. En effet la vigne exige des climats lumineux. On parle de plante héliophile (Galet, 2000) puisque ces fleurs nouent mal à

l'ombre ou par temps brumeux. Ainsi, lors des années avec une longue durée d'ensoleillement, les raisins tendront à être plus sucrés mais moins acides. Un excès d'ensoleillement pourra également être nuisible, comme dans les régions méditerranéennes où une année trop chaude et trop ensoleillée donnera des raisins insuffisamment acides. Les parfums seront aussi plus accentués, ce qui sera favorable à des cépages tel que le muscat mais plutôt défavorable sur des hybrides américains à saveur foxée, descendants de *V. Labrusca*. Galet (2000) explique que Levy a comparé, entre 1877 et 1880, la teneur en sucre et en acidité de raisins de Pinot selon qu'ils étaient abrités ou non du soleil. Les résultats montrent que les raisins exposés au soleil avaient une teneur en sucre beaucoup plus élevée que ceux non exposés et inversement la teneur en acidité était beaucoup plus faible pour les raisins exposés. Ces observations nous amène à parler de photopériodisme qui est défini comme la durée pendant laquelle la plante sera exposée à la lumière du soleil. La vigne fait partie des plantes à jours longs ou héméropériodiques (De Parcevaux et Huber, 2007). Elle réclame donc beaucoup de lumière et ne fleurit que pour une durée d'ensoleillement qui est propre à chaque cépage. Caldwell (1925) a montré en Californie que la composition des raisins était étroitement liée à la durée d'ensoleillement de la période végétative.

Les précipitations sont aussi importantes dans le cycle végétatif de la vigne. Leur rythme, leur fréquence, leur intensité a un impact indirect sur la récolte. Galet (2000) précise qu'on admet qu'un minimum de 250 à 350 mm de pluie est nécessaire durant la période végétative et la phase de maturation des raisins (sur 200 jours environ). Cependant, la vigne peut subsister dans des conditions encore plus sèches. En France, les cumuls moyens annuels sont de l'ordre de 600 à 900 mm, ce qui fait que nos régions viticoles sont suffisamment arrosées, pour éviter l'irrigation. En revanche, la variabilité peut être très marquée dans le sud du pays, comme en région méditerranéennes où, à titre d'exemple, au cours des années 1950-70 à Montpellier, le cumul annuel de précipitations a varié de 455 mm en 1950 à 1332 mm en 1969 (Galet, 2000). Le total annuel des précipitations n'est pas le seul paramètre hydrique à retenir. Il est nécessaire de prendre en compte le nombre de jours de précipitations, ainsi que leur intensité. La période d'occurrence de ces précipitations sera également très importante. Les précipitations d'hiver n'ont pas un effet direct sur la vigne mais une bonne reconstitution des réserves durant cette période sera bénéfique à la vigne dès le printemps. Des précipitations en période de floraison seront toujours néfastes à une bonne inflorescence. Les pluies d'été seront favorables à la vigne dans le cas où celles-ci permettront de ne pas souffrir de la sécheresse (80 et 150 mm). Cependant, en excès, elles deviendront très rapidement néfastes et engendreront des problèmes de maladies type mildiou. Enfin, pendant la période de vendanges, les pluies seront plutôt un facteur défavorable, d'une part car elles détremperont le sol et rendront les travaux des vendangeurs difficiles et d'autre part pourront détériorer la récolte en faisant parfois pourrir les raisins.

Température, précipitations et ensoleillement sont donc des facteurs prépondérants pour la vigne, d'où l'intérêt de définir l'évapotranspiration. « L'évapotranspiration potentielle ou ETP concerne la totalité de l'évaporation du sol et de la transpiration végétale, en un temps donné, au sein d'une végétation homogène en phase active de croissance et se développant sur un sol abondamment pourvu en eau » (Galet, 2000). Cette variable a été mise au point

par Thorntwaite en 1948 et dépend du rayonnement, c'est-à-dire du bilan entre la radiation solaire globale, le rayonnement de l'atmosphère et celui de la terre, de la température, de l'humidité de l'air, des précipitations ainsi que des mouvements de l'air verticaux et horizontaux. On parle également d'ETR ou d'évapotranspiration réelle. C'est en fait l'évapotranspiration qui a réellement lieu. Huglin et Schneider (1998) ont comparé les régimes hydriques des stations de Montpellier et Colmar avec un cumul de précipitations sur la période d'avril à septembre similaire pour les deux stations (± 320 mm). Par contre le bilan hydrique est très différent du fait d'une évapotranspiration potentielle bien plus importante à Montpellier (960 mm) qu'à Colmar (592 mm), ce qui entraîne un climat beaucoup plus sec pour la vigne à Montpellier qu'à Colmar.

Enfin, le paramètre « température » n'a pas été abordé ici mais le sera plus longuement lorsque nous introduirons les indices bioclimatiques et les risques climatiques (gel et canicule) pour la plante.

1.2.1.2. La géographie mondiale des vignobles

En rapport avec ses besoins climatiques, la vigne ne va pas pouvoir être cultivée sous toutes les latitudes du globe (Figure I.5). Certaines régions seront hostiles à la culture de la vigne du fait des températures moyennes annuelles trop basses ou du fait des extrêmes climatiques (gel, sécheresse, humidité tropicale ...). La température de l'air diminue depuis l'équateur, à mesure qu'on s'élève en latitude, en direction du pôle Nord ; l'abaissement moyen est de $0,6^{\circ}\text{C}$ par degré de latitude entre Alger et Saint-Pétersbourg par exemple.

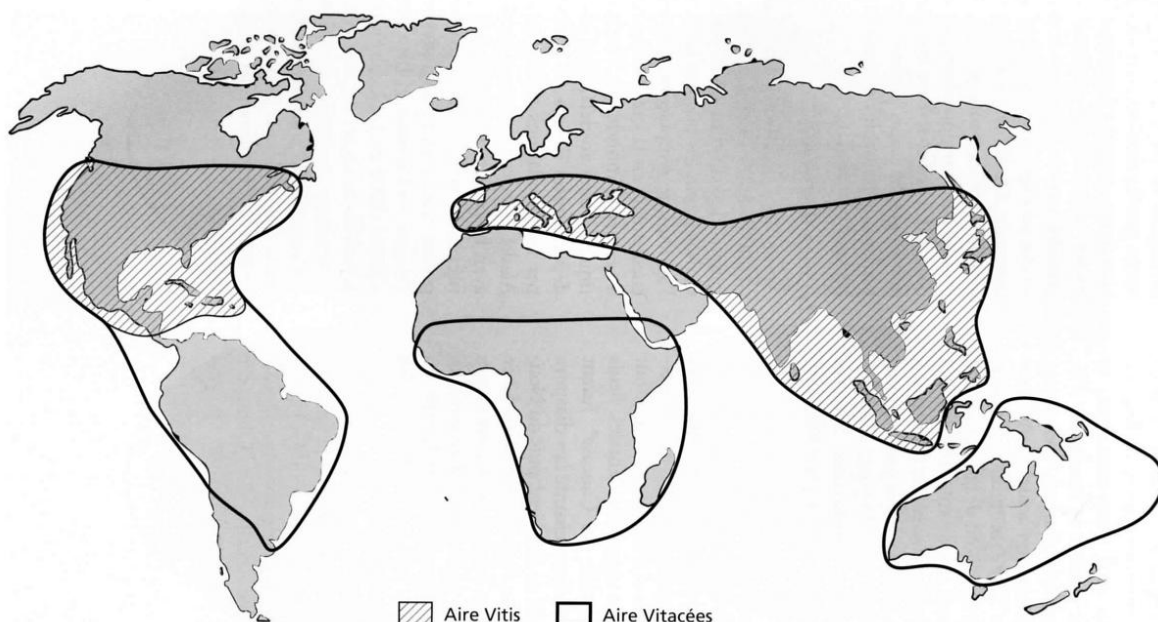


Figure I.5. Répartition de *Vitis vinifera*, *Vitis sp.* et Vitacées

Source : [Blouin, 2007]

Il existe deux limites nord pour la culture de la vigne. La première correspond à la possibilité pour le raisin de mûrir : si le niveau des températures est trop faible, les fruits ne pourront

pas arriver à maturité. La seconde limite est celle qui permet à la vigne de végéter sans que les raisins puissent réellement mûrir. Cette limite de la culture de la vigne a évolué au fil du temps, tantôt plus au nord, tantôt plus au sud. C'est ainsi que l'on a observé, durant l'optimum médiéval, des vignes dans le pays de Galles (51°30'N), en Belgique, en Allemagne, en Prusse Orientale (55°30'N), régions où les raisins ne mûrissaient que 2 à 4 fois tous les 10 ans, au Danemark et même en Norvège aux environs de 63° de latitude nord. La Figure I.6 présente la limite septentrionale de la culture de la vigne en Europe. Actuellement la limite nord de la culture de la vigne en Europe se situe dans le sud de l'Angleterre, remontant jusqu'à environ 52°30' de latitude nord. En France, cette limite nord commence au sud du Morbihan en Bretagne puis se prolonge jusqu'à la Champagne en passant par le Val de Loire, pour finir vers la frontière du Luxembourg. Cette limite nord continue ensuite jusqu'au sud de Bonn (50°40' N) en Allemagne puis passe au nord de Prague à Melnick pour redescendre en Slovaquie et atteindre le nord de la Hongrie à Miskolcz. Elle gagne ensuite la Roumanie à Lassy puis la Moldavie et le sud de la Russie.

Pour ce qui est de la limite sud de la culture de la vigne, celle-ci se situe en Afrique du nord (Maroc, Algérie, Tunisie, Lybie et Egypte). La sécheresse trop importante et les températures extrêmes du désert deviennent un véritable obstacle à toute culture de la vigne.



Figure I.6. Limites de la culture de la vigne en Europe

Source : [Galet, 2000]

Dans le reste du monde, les limites sont parfois plus diffuses comme en Asie où la vigne existe au sud du Turkménistan, en Ouzbékistan dans la vallée de l'Amou-Daria et au Kirghistan. En Amérique du Nord, la vigne remonte jusqu'au sud du Canada comme en Colombie Britannique (50°N) et dans la péninsule du Niagara à l'est (43°N). Dans l'hémisphère austral, la culture de la vigne est une pratique beaucoup plus récente. On parle des « nouveaux pays viticoles » qui sont entre autres le Chili, l'Argentine, l'Uruguay, le Brésil, l'Afrique du sud, l'Australie, les Etats-Unis et la Nouvelle-Zélande.

Tout comme la latitude, l'altitude va constituer un facteur limitant à la culture de la vigne. La température décroît en moyenne de 0,6°C tous les 100 mètres, ce qui entraîne de manière évidente un retard sur la végétation, retard qui atteint 2 à 3 jours pour 100 mètres d'élévation (Galet, 2000). Dans les régions de culture de la vigne, les plus septentrionales, l'altitude va donc constituer un obstacle à l'exploitation de vignobles. Cependant, cet obstacle pourra être corrigé par de bonnes expositions et des pentes adéquates. En revanche, dans les pays des basses latitudes, l'altitude sera un atout pour la culture de la vigne, ce qui explique que l'on trouve des vignobles à plus de 3500 mètres d'altitude dans certains pays d'Amérique du Sud par exemple. En France la majorité des vignobles sont à une altitude inférieure à 500 mètres.

1.2.2. Les indices bioclimatiques

Les surfaces agricoles cultivées en vigne étant très étendues à travers la planète, la vigne pousse sous des conditions climatiques certes adéquates à cette culture mais très diversifiées selon les pays, les latitudes et l'altitude. Certains auteurs ont créé des indices bioclimatiques propres à la vigne qui permettent de diviser ces climats viticoles en différentes régions climatiques. Ces indices servent également à prédire le déroulement du cycle phénologique de la vigne ou encore la composition des raisins. Nous allons présenter ici que trois de ces indices qui sont parmi les plus couramment analysés en viticulture et qui seront fréquemment utilisés dans ce travail de thèse.

1.2.2.1. Les degrés-jours (DJ) ou l'indice de Winkler (IW)

La vigne se développe plus ou moins rapidement et sa vitesse de croissance est linéairement liée à un intervalle de température spécifique (Figure 1.7). Cet intervalle est généralement compris entre 10 et 30°C selon les espèces (zone pseudo-linéaire sur le graphique).

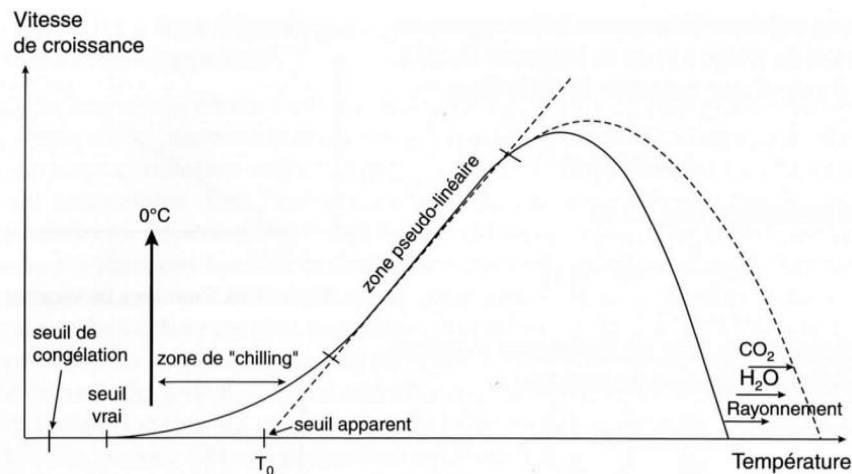


Figure I.7. Variation de la vitesse de croissance d'un végétal avec la température
Source : [De Parcevaux et Huber, 2007]

La durée nécessaire pour déclencher un stade phénologique est proportionnelle au temps biologique ou thermique qui se définit comme l'intégrale du produit du temps et de la température au-dessus d'un certain seuil. Ce principe est en réalité le concept des degrés-jours qui se calcule à partir de la différence d'une température seuil pour la plante (le 0°C de végétation) et la température moyenne journalière.

Ce concept des degrés-jours est particulièrement utile en viticulture afin de modéliser le déroulement du cycle phénologique de la vigne. Le zéro de végétation pour la vigne est de 10°C par convention (Van Leeuwen *et al.*, 2008). Dans la réalité, ce seuil est beaucoup plus variable. Galet (2000) précise que le zéro de végétation est « la température nécessaire pour permettre le débournement, variable avec les cépages, la latitude et les années ». Angot en 1885 avait fixé le zéro de végétation à 9°C pour les différents départements français. De Parcevaux et Huber (2007) ajoutent qu'« il est évident que pour des températures basses ou élevées, la courbe d'action de la température (Figure I.7) sur la vitesse de développement n'est plus linéaire : on ne doit plus utiliser la notion de somme de températures ».

Le concept de degrés-jours est largement utilisé pour modéliser la phénologie de la vigne et comme outil de zonage agroclimatique. Cet indice a été introduit dès 1935 par Amerine et Winkler de l'Université de Californie de Davis. Couramment dénommé « indice de Winkler » (IW), il a servi à établir 5 types de régions en Californie qui ont ensuite été étendus à d'autres pays viticoles. Ces « degree-days » correspondent à la somme des températures moyennes journalières au-dessus de 50°F ou 10°C sur la période du 1^{er} avril au 31 Octobre, dans l'hémisphère nord, soit sur 7 mois :

$$IW = \sum_{1^{\text{er}} \text{ avril}}^{31 \text{ Octobre}} (Tm_j - 10)$$

avec Tm_j (température moyenne journalière) > 10°C

Dans l'hémisphère sud, cet indice est calculé sur la période du 1^{er} octobre au 30 Avril. Ainsi, 5 régions climatiques viticoles ressortent de cette classification, de la plus froide à la plus chaude. Le Tableau I.1 liste les différentes régions et les critères thermiques.

Cet indice simple ne tient pas compte de la durée du jour du fait qu'il a d'abord été conçu pour la Californie (33 à 39°N), où ce facteur n'est pas discriminant. Galet (2000) montre qu'avec cette classification, « la région I est trop vaste puisque Geisenheim en Allemagne avoisine Beaune ou Bordeaux en France et devrait être divisée en 2 : moins de 2000°F et de 2001 à 2500°F ». Vaudour (2003) indique que cet indice n'est peut-être pas le plus satisfaisant pour décrire un climat viticole mais il peut être néanmoins intéressant de la calculer afin d'établir des comparaisons avec d'autres vignobles, car il est couramment utilisé.

Tableau I.1. Classes de l'indice thermique des « degrés-jours » de Winkler (d'après Winkler, 1962 ; Winkler et al., 1974)

| Region | °C | °F | Exemples |
|--------|-------------|-------------|---|
| V | > 2205 | ≥ 4000 | Palerme (I), Fresno (USA) Alger (DZ), Hunter (AUS) |
| IV | 1927 à 2205 | 3501 à 4000 | Venise (I), Mendoza (RA), Le Cap (ZA) |
| III | 1650 à 1926 | 3001 à 3500 | Montpellier (F), Milan (I) |
| II | 1371 à 1649 | 2501 à 3000 | Napa (USA), Budapest (H), Bucarest (R) Santiago (RCH), Odessa (SU) |
| I | <1371 | < 2500 | Geisenheim (D), Genève (CH), Dijon (F) Vienne (A), Coonawara (AUS), Bordeaux (F) |

I.2.2.2. L'indice héliothermique de Huglin (IH)

L'indice de Huglin, contrairement à l'indice de Winkler, prend en compte la durée du jour à partir d'un coefficient de « longueur du jour » (Tableau I.2). Ce coefficient inclut ainsi dans la formule la notion d'éclairement potentielle de la plante, la croissance de la vigne (du débourrement à la maturité) étant très influencée par l'ensoleillement. Ceci corrige les possibles lacunes de formule simple des degrés-jours.

Tableau I.2. Valeur du coefficient *k* de longueur du jour en fonction de la latitude (d'après Vaudour, 2003)

| Valeur du coefficient <i>k</i> | Latitude en degrés (hémisphère nord ou sud) |
|--------------------------------|---|
| <i>k</i> = 1,02 | de 40°1' à 42°0' |
| <i>k</i> = 1,03 | de 42°1' à 44°0' |
| <i>k</i> = 1,04 | de 44°1' à 46°0' |
| <i>k</i> = 1,05 | de 46°1' à 48°0' |
| <i>k</i> = 1,06 | de 48°1' à 50°0' |

Dans l'hémisphère nord, l'indice de Huglin correspond à :

$$IH = \sum_{1^{\text{er}} \text{ avril}}^{30 \text{ Septembre}} \frac{[(Tm_j - 10) + (Tx_j - 10)] \cdot k}{2}$$

avec Tm_j : température moyenne journalière en °C
 Tx_j : température maximale journalière en °C
 k : le coefficient de longueur du jour

Dans l'hémisphère sud, cet indice sera calculé sur la période du 1^{er} octobre au 31 mars. Cet indice a été conçu par Huglin en 1978 après différents tests sur les indices de Winkler et de Branas¹ à partir de la collection ampélographique de la station agronomique de l'INRA (Institut National de Recherche Agronomique) de Colmar. Au final, l'indice de Huglin, calculé sur 6 mois de l'année, s'est avéré beaucoup plus corrélé aux teneurs en sucre mesurées pour la centaine de cépages de la collection, ainsi que de celles de diverses autres parcelles complantées de Sylvaner B, d'Auxerrois B et de Pinot B (Vaudour, 2003). La température maximale, intégrée dans la formule de Huglin, permet de différencier des vignobles qui auraient des températures moyennes similaires, mais des potentialités viticoles différentes en raison de la différence d'amplitude thermique de leurs températures journalières. La limite inférieure de culture de la vigne correspondrait à un indice de Huglin de 1400 environ. Tonietto a proposé une classification des climats viticoles à partir du calcul de l'indice d'Huglin appliqué à une trentaine de pays viticoles. Il obtient 6 classes caractérisant les régions viticoles des plus froides ou fraîches aux plus chaudes (Tableau I.3). Les exemples des régions viticoles dans le Tableau correspondent aux climats observés sur la période 1961-1990, période sur laquelle Huglin a effectué ses calculs.

Tableau I.3. Classes de l'indice héliothermique de Huglin (d'après Tonietto, 1999)

| Caractéristiques | Rangs | Valeurs | Exemples |
|------------------|--------|------------------|---------------------------------------|
| Très chaud | IH + 3 | IH > 3000 | Vallée de São Francisco (Brésil) |
| Chaud | IH + 2 | 2400 ≤ IH ≤ 3000 | Malaga (Espagne), Marsala (Italie) |
| Tempéré chaud | IH + 1 | 2100 ≤ IH ≤ 2400 | Napa (USA), Montpellier (France) |
| Tempéré | IH - 1 | 1800 ≤ IH ≤ 2100 | Pau, Bordeaux (France) |
| Frais | IH - 2 | 1500 ≤ IH ≤ 1800 | Colmar, Angers (France) |
| Très frais | IH - 3 | IH ≤ 1500 | Québec (Canada), Londres (Angleterre) |

I.2.2.3. L'indice de fraîcheur des nuits (IF)

Nous avons évoqué précédemment l'importance de la fraîcheur nocturne durant la phase de maturation des raisins. En réalité, c'est avant tout une bonne amplitude thermique qui permettra la biosynthèse des anthocyanes et des acides abscissiques (Yamane *et al.*, 2006 ; Koshita *et al.*, 2007), donnant ainsi aux grappes la couleur de leur peau et au vin sa qualité.

¹ Le produit héliothermique de Branas a été introduit en 1946 et prenait en compte la température moyenne journalière au-dessus de 10°C et la longueur du jour.

L'indice de fraîcheur des nuits (Tonietto, 1999 ; Tonietto et Carbonneau, 2004) a ainsi été créé pour étudier les conditions nocturnes de maturation des baies suivant les régions. Par convention, cet indice est également appelé indice nycthermique et correspond dans l'hémisphère nord à la température minimale moyenne du mois de septembre, mois de la récolte. Dans l'hémisphère sud, c'est la température minimale moyenne du mois de mars qui sera prise en compte. Vaudour (2003) explique que « cet indice est fondé sur les relations existant entre des températures fraîches et la biosynthèse des composés aromatiques durant la phase de maturation, dans les 30 jours précédant la récolte ». De la même façon que pour l'indice d'Huglin, Tonietto a défini 4 classes de conditions nocturnes des nuits les plus fraîches aux plus chaudes (Tableau I.4).

Tableau I.4. Classes de l'indice de fraîcheur des nuits (d'après Tonietto, 1999)

| Caractéristiques | Rangs | Valeurs | Exemples |
|---------------------|-------|------------------|--|
| Nuits chaudes | IF1 | IF > 18°C | Marsala (Italie), Nabeul (Tunisie) |
| Nuits tempérées | IF2 | 14°C < IF ≤ 18°C | Madrid (Espagne), Montpellier (France) |
| Nuits fraîches | IF3 | 12°C < IF ≤ 14°C | Porto (Portugal), Carcassonne (France) |
| Nuits très fraîches | IF4 | IF ≤ 12°C | Freiburg (Allemagne), Napa (USA) |

Une meilleure qualité du vin est en général obtenue dans des régions viticoles avec forte amplitudes thermiques entre le jour et la nuit et des températures nocturnes inférieures à 10°C, pendant la période précédant la récolte. Une différence thermique importante permet une bonne synthèse des sucres, des composés aromatiques et des composés phénoliques (anthocyanes en particulier) ainsi que le transfert dans la baie. Une importante variation thermique jour-nuit, permet ainsi de maximiser la quantité de sucres dans la baie. Fregoni et Pezzutto (2000) précisent que les 10 derniers jours avant la récolte sont les plus importants pour la qualité et soulignent que « la vigne éprouve des difficultés, pour assurer le transfert des composants issus de la photosynthèse, quand les températures nocturnes sont élevées (comme dans les climats sans variations thermiques significatives) ». Winkler *et al.* (1974) montrent de la même manière qu'une faible différence de température entre le jour et la nuit donne des couleurs de baies moins marquées que pour des différences plus importantes. Pour toutes ces raisons, « les meilleurs caractères organoleptiques des raisins sont obtenus sous des climats présentant des différences thermiques élevées pendant la période qui précède la vendange » (Fregoni et Pezzuto, 2000). Ainsi les vignobles situés sur les collines et les flancs des montagnes permettent d'obtenir des vins de qualité supérieure à ceux provenant des vignobles de plaine : en général, les arômes sont plus fins, la couleur (anthocyanes) est plus brillante et plus stable, les polyphénols moins oxydables et les vins plus équilibrés.

I.2.2.4. Les limites de l'application des indices bioclimatiques

La validité d'application des indices bioclimatiques peut être quelquefois contestée dans des régions viticoles autres que la région d'origine où ils ont initialement été créés. C'est ainsi que Vaudour (2003) explique que l'indice héliothermique de Huglin et le produit héliothermique de Branas n'ont pas vraiment de pertinence dans les régions viticoles les

plus chaudes du globe car la période végétative couvre toute l'année et n'a plus de signification biologique. Il ajoute que la caractérisation des climats viticoles doit s'appuyer sur les indices de Huglin, l'indice de fraîcheur des nuits et l'indice de sécheresse, indices pour lesquels nous disposons de comparaisons au niveau mondial.

La carte de répartition mondiale de la vigne (Figure I.5) montre qu'une grande partie des régions viticoles se situent dans des zones tempérées mais où la diversité climatique est très présente, du climat océanique au climat continental en passant par les climats méditerranéens, qui se différencient d'un hémisphère à l'autre. Ainsi, Vaudour (2003) met en garde contre l'utilisation parfois « inhérente » de ces indices qui sont la plupart du temps basés sur des calculs à partir d'une seule et même station dite « représentative d'une région donnée ». Leur validité spatiale peut être remise en question, notamment dans des régions à forts contrastes topographiques et avec une forte variabilité spatiale du climat. Le manque de réseaux de stations météorologiques au sein même des vignobles fait que les cartes d'indices détaillées à échelle plus fine sont relativement rares à l'heure d'aujourd'hui. L'exemple du zonage climatique des régions viticoles californiennes (Figure I.8) par Winkler (1974) montre des contours très nets des différentes zones, qui sont fortement liés aux facteurs altitude et pente. Ces zones climatiques correspondent aux grands ensembles topographiques qui composent la Californie : la vallée centrale, la vallée de Napa, les vallées côtières, les *foothills* (au pied de la Sierra) et la côte sud de l'Etat. La résolution de cette carte a depuis été améliorée par Jones *et al.* (2010) qui, en utilisant les grilles climatiques de PRISM sur la période 1971-2000 et à 400 mètres de résolution, ont spatialisé des indices bioclimatiques au sein des différentes *American Viticultural Areas* (AVA) dans l'ouest des Etats-Unis de la Californie à l'état de Washington (Figure I.8).

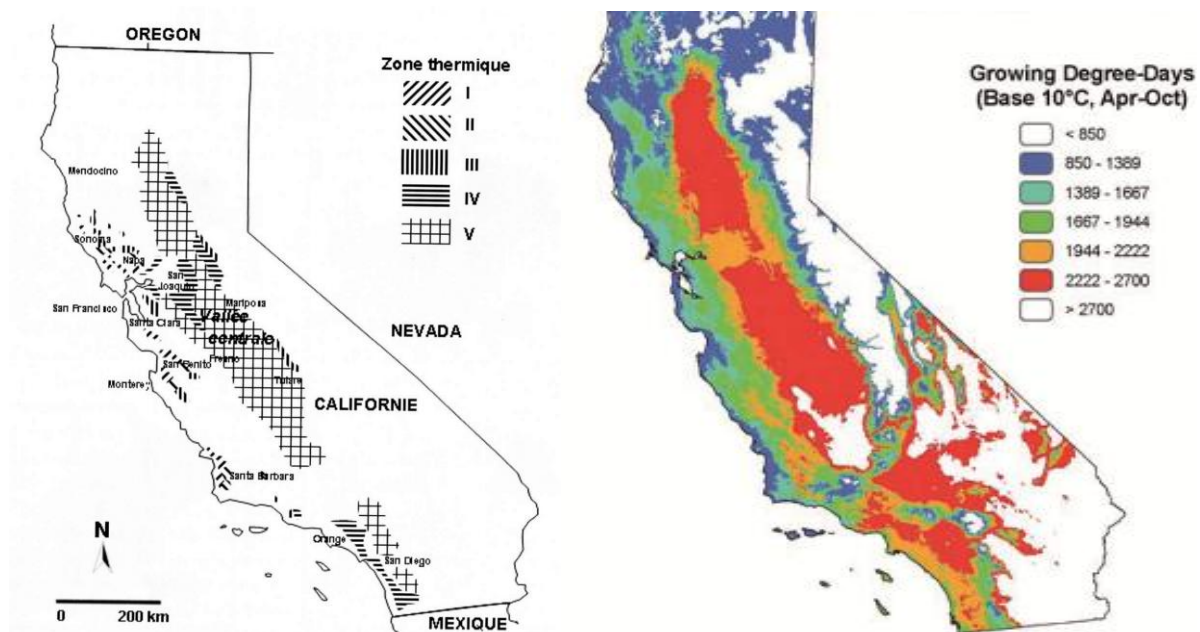


Figure I.8. Zones thermiques des vignobles de Californie d'après Winkler (1974) à gauche (cf. Tableau I.1. pour la définition des classes) et Jones (2010) à droite.

En France, l'aire AOC des Côtes du Rhône a également été cartographiée d'un point de vue climatique à partir des degrés-jours de Winkler et sur différentes périodes (Figure I.9) à partir des données de 10 stations. Il apparaît que le zonage est différent selon les années considérées du fait de la variabilité temporelle du climat et que les délimitations des polygones de Thiessen ne prennent pas en compte la topographie variée du secteur. Cependant, l'étude des indices bioclimatiques « s'avère précieuse dans le cadre global de la géoviticulture, pour la caractérisation des macroclimats viticoles et des comparaisons internationales » (Vaudour, 2003). Leur usage devient plus contesté lorsqu'il s'agit de définir les mésoclimats viticoles. Le manque de données climatiques sur des réseaux fins est notamment un des obstacles à cette spatialisation des climats viticoles à échelles plus locales.

I.3. Du macroclimat régional au microclimat de la vigne

Les différents découpages et caractérisations des climats viticoles régionaux ont été décrits. Cependant, des études plus fines peuvent être nécessaires afin de comprendre la variabilité climatique au sein d'une même région viticole. Dans cette troisième partie, le passage du macroclimat régional au microclimat de la vigne est décrit et les différents éléments topographiques et environnementaux influant sur la variabilité du climat et notamment de la température, aux échelles les plus fines, sont présentés.

1.3.1. Les différents niveaux d'échelles spatio-temporelles en climatologie viticole

Les différents climats viticoles dans le Monde sont très largement influencés par les conditions locales liées au relief, à l'exposition, à la pente ou à la proximité d'un cours d'eau ou d'une forêt. Si les grands ensembles climatiques viticoles (macroclimat régionaux) sont connus, des études plus fines au sein de chaque région permettent de caractériser les méso-, topo- et microclimats (Figure I.9).

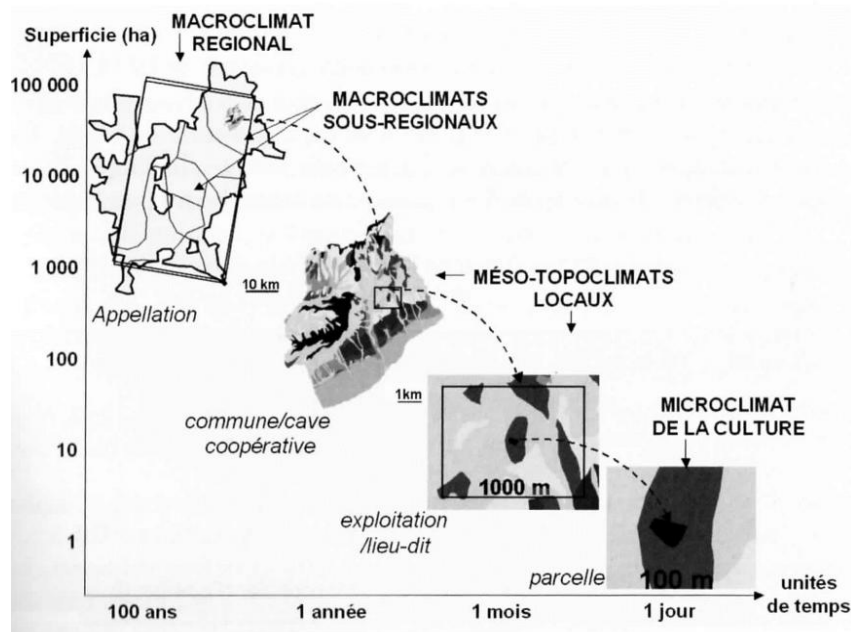


Figure 1.9. Différentes échelles spatio-temporelles pour l'étude des climats viticoles

Source : [Vaudour, 2003]

Le macroclimat

D'un point de vue purement climatologique, le macroclimat va correspondre à une zone géographique très étendue comme un continent, un océan voire l'ensemble du globe (Geiger, 1965). De Parcevaux et Huber (2007) explique que ce climat est « *conditionné principalement par la distribution de l'énergie solaire, la circulation atmosphérique, les transferts de vapeur d'eau et les contrastes océans-continentes* ». Ce type de climat correspondraient par exemple au climat du bassin méditerranéen, le climat de la France ou encore le climat polaire. Vaudour (2003) définit alors un macroclimat viticole au niveau régional et global d'organisation du climat. La résolution du climat régional est de l'ordre de 1-100 km ; celle du climat global est de l'ordre de 100-10 000 km. Classiquement, en viticulture l'aire d'étendue du macroclimat va correspondre à l'aire d'étendue de la délimitation de l'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC). Au niveau temporel la définition de ce type de climat se fait sur plusieurs décennies, très souvent 30 ans, comme le préconise l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

Le méso- ou topoclimat

Le méso-climat correspond au niveau d'échelle d'une entité géographique à aire limitée comme une vallée, un bassin, un versant... (Orlanski, 1975) Les paramètres climatiques vont être dirigés par l'orographie et la géomorphologie locale du terrain. Ainsi, ce type de climat est très souvent appelé topoclimat, surtout en viticulture où les facteurs d'expositions et de pente sont prépondérants dans la variabilité climatique au sein des vignobles. La résolution du topoclimat viticole est de 10 km au plus et sa superficie d'influence varie du lieu-dit à la commune et sa périodicité d'étude est décadaire ou mensuelle. La caractérisation d'un topoclimat peut se faire à l'aide d'une station météorologique munie d'appareils de mesure

placés en condition normalisée à 2 mètres du sol sous abri pour la température de l'air (Vaudour, 2003).

Le microclimat

« *Le microclimat représente, la structure climatique fine de la couche atmosphérique adjacente à une surface déterminée et suffisamment homogène : microclimat d'un lac, d'un champ de maïs* » (De Parcevaux et Huber, 2007). Vaudour (2003) définit le microclimat comme le climat de la parcelle avec une résolution de quelques dizaines de mètres. On distingue différents niveaux de microclimat comme le microclimat de la culture ou encore climat de la parcelle viticole et le microclimat de la plante, qui correspond au climat mesuré sur la plante, elle-même (niveau d'échelle centimétrique à métrique). On parle alors de phytoclimat.

L'étude des climats viticoles implique une approche avec des échelles spatiales et temporelles imbriquées en partant des macroclimats régionaux, que l'on étudie sur une période de 30 ans minimum, jusqu'aux topo-climats et micro-climats étudiés du pas de temps saisonnier (6-7 mois) au pas de temps journalier. Ces études à différentes échelles spatio-temporelles imbriquées aident à affiner nos connaissances sur la variabilité climatique au sein des régions viticoles et pourront ensuite nous aider dans le cadre d'évaluation des futurs impacts climatique sur la vigne.

1.3.2. Le rôle des facteurs topographiques et environnementaux sur les climats viticoles

Les facteurs orographiques et environnementaux des vignobles ont une importance considérable dans la variabilité spatiale des topo- et micro-climats. Nous allons définir plus en détails ces principaux facteurs et leurs impacts sur les différents climats viticoles pour l'hémisphère nord. Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'échelle topo-climatique dans un premier temps.

Le relief

Les formes de relief

Galet (2000) rappelle le vieil adage romain « *Bacchus amat colles* » qui est toujours d'actualité car les vignobles de coteaux permettent d'obtenir certains des vins les plus réputés au monde. Le meilleur exemple en France viticole est la côte bourguignonne, entérinée d'abord par les usages puis par les délimitations des AOC, qui ont établi une hiérarchisation des crus que l'on détecte aisément à la dégustation, des appellations villages de la plaine au Grand cru du mi- coteau. Cette côte est orientée à 90° et offre l'une des situations les plus favorables à la culture de la vigne et à la production de grands crus.

Il existe différentes configurations de relief favorables ou défavorables à la culture de la vigne. Dans les vallées étroites la vigne ne peut occuper que les pentes bien exposées au

sud. Par conséquent seules les vallées orientées est-ouest sont viticoles. C'est par exemple le cas en Allemagne de la vallée de l'Ahr, affluent du Rhin, sur sa rive gauche.

Les dispositions en amphithéâtre sont également favorables à la culture de la vigne, puisqu'elles créent des microclimats bien abrités des vents dominants et ensoleillés une grande partie de la journée, seulement si l'orientation est bonne. Les cuvettes ou dépressions sont soumises à de fortes amplitudes thermiques qui vont exposer la vigne aux gelées de printemps et d'hiver car l'air froid s'y retrouve bloqué. Les formes convexes de relief seront plus favorisées pour la culture de la vigne du fait de la présence de larges sommets où les variations diurnes de températures sont plus faibles et l'exposition aux gelées de ce fait moins importantes. En revanche sur les plateaux, certaines configurations peuvent être propices aux températures basses. L'altitude et les vents auront alors une importance décisive. Les vignobles de plaine côtoient très souvent d'autres types de cultures tel le maïs, le blé, le colza... Ils sont établis sur des sols riches, alluvionnaires qui vont permettre d'atteindre de haut rendement. Galet (2000) précise que « les gelées y sont fréquentes et les maladies causent parfois des ravages importants, nécessitant des soins nombreux et coûteux ». Cependant il ajoute qu'il existe des plaines viticoles peu fertiles, caillouteuses comme en Médoc, à Châteauneuf-du-Pape et dans certains vignobles des Côtes du Rhône où des vins de qualité sont produits.

L'exposition

L'exposition se définit par deux paramètres qui sont l'orientation et l'inclinaison du sol que l'on appelle aussi la pente.

➤ *L'orientation*

L'orientation peut être définie comme l'angle formé à partir du nord géographique, par la perpendiculaire à la trace du terrain considéré. Le vent refroidissant l'atmosphère en séchant l'air échauffé au contact du sol (ex : la bise), la meilleure orientation sera donc celle opposée aux vents dominants. Pour déterminer cette meilleure exposition, Branas (1974) indique qu'il est commode de comparer les fréquences de vent cumulées de trois directions voisines (ex : nord-ouest + ouest + sud-ouest) aux trois directions opposées (nord-est + est + sud-est). L'exposition sud-est (100° à 160°) donne les meilleurs résultats, puisqu'elle reçoit les rayons du soleil dès son lever. Par conséquent, la température de l'air s'y élève de bonne heure et cette orientation est protégée des vents froids (Alsace, côte bourguignonne). Galet (2000) montre que la fréquence cumulée à Meursault (Bourgogne) des trois directions nord-ouest, ouest, sud-ouest atteint 49%, alors que la même fréquence cumulée mais pour les trois directions nord-est, est, sud-est ne dépasse pas 21%. Les vignobles réputés sont donc vers 135° ou de Sud-Est. L'exposition sud va offrir en règle générale les mêmes avantages que celle de sud-est. En revanche l'exposition nord sera très défavorable car la vigne ne verra que peu le soleil durant la journée et sera soumise aux vents froids. Certaines exceptions comme les grands crus de la Montagne de Reims en Champagne (Mailly, Verzenay, Rilly ...) possèdent une grande partie de leur vignoble exposée au nord (Briche,

2011), pour soustraire la vigne aux vents dominants d'ouest, grâce à la montagne et à la forêt. L'exposition au sud-ouest n'est pas aussi bonne que celle de sud-est car celle-ci ne reçoit pas de lumière du soleil dès le matin, donc les vignes et le sol demeurent relativement froids pendant la matinée, moment où la plus grande transparence de l'air fait que la lumière solaire est plus riche en radiations calorifiques et lumineuses (Galet, 2000). Enfin, les terrains exposés à l'est retrouvent la lumière dès le matin mais sont exposés au gel du fait que le soleil quitte ce site tôt dans l'après-midi jusqu'au lendemain matin.

➤ L'inclinaison du sol ou pente

L'inclinaison du sol ou pente est le second facteur important de l'exposition. Le degré d'inclinaison va jouer sur la quantité de chaleur absorbée par le sol et la plante durant la journée (Figure I.10). A nos latitudes, un faisceau lumineux se diffusera sur une surface beaucoup plus étendue sur un coteau incliné de 20° que sur un coteau incliné de 45°. Ainsi, la quantité de chaleur reçue au niveau du sol et absorbée par la végétation est plus importante sur le coteau le plus pentu. En effet, le soleil échauffe un plan en raison du nombre de rayons R qui frappent ce plan et proportionnellement au sinus de l'angle d'incidence h, qu'ils font avec lui : $i = R \sin h$. Pour un sol incliné d'un angle α sur l'horizontale, l'intensité devient : $i = R \sin (h+\alpha)$.

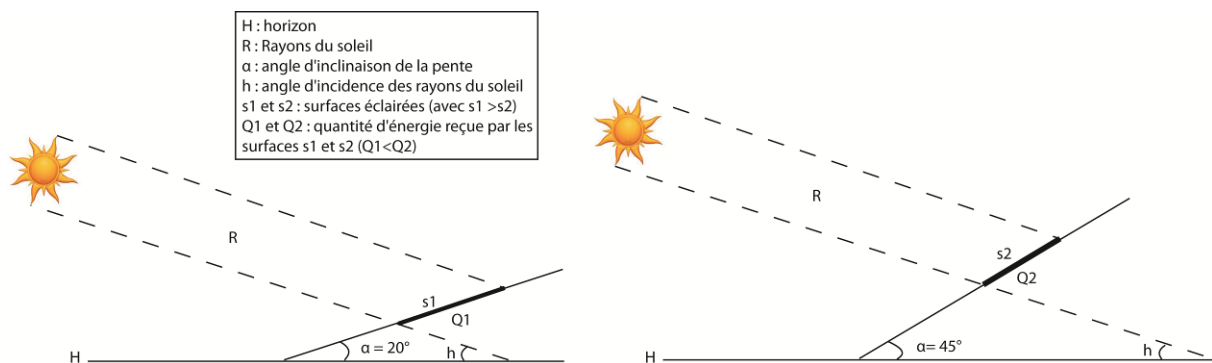


Figure I.10. Effet de l'inclinaison du relief sur la quantité de chaleur reçue par le sol et la végétation

Galet (2000) donne les inclinaisons les plus favorables afin d'avoir les rayons du soleil perpendiculaires au sol. Ainsi, à Mostaganem en Algérie (36°N) la pente la plus favorable est de 17°. À Colmar et Orléans en France (48°N), la pente la plus bénéfique est de 30°. Enfin, en Rhingau en Allemagne, l'inclinaison la plus favorable est de 36°. Ainsi, les vignobles à la limite nord de la culture de la vigne ne peuvent être établis que sur des pentes rapides, souvent transformées en terrasse. Des mesures de température ont notamment été effectuées en fonction de l'orientation et de la pente comme le montre le Tableau I.5.

Tableau I.5. Somme de chaleur, exprimée en joules/cm²/an (d'après Galet, 2000)

| Pente | 100% | 58% | 27% | 0% |
|--------------|---------|---------|---------|---------|
| Versant sud | 463 500 | 451 600 | 410 200 | ... |
| Versant nord | 89 200 | 159 900 | 246 900 | ... |
| Plaine | ... | ... | ... | 343 200 |

Les terrains orientés au nord se réchauffent beaucoup moins que les terrains plats, qui sont eux-mêmes défavorisés par rapport aux versants sud. L'augmentation de la pente est donc favorable mais uniquement dans le cas de bonnes expositions. Par exemple, certains vignobles suisses ont des pentes qui atteignent 85%. Enfin, Jones (2003) explique que les pentes orientés au sud avec un angle de 8° et un angle d'incidence des rayons du soleil de 77° à 44° de latitude nord, bénéficient d'une bonne luminosité et donc les vignes d'une meilleure photosynthèse. Jackson et Schuster (1987) précisent qu'une bonne orientation de la pente garantit une bonne croissance de la plante, une bonne maturation des raisins et limite les problèmes liés aux maladies.

La proximité des mers ou des océans

De la même manière que la topographie, la proximité d'une mer ou d'un océan va influencer la variabilité spatiale des climats viticoles. Selon les latitudes, les influences vont être soit favorables, soit défavorables. L'inertie thermique de l'eau fait que celle-ci se refroidit et se réchauffe moins vite que le sol, grâce à sa chaleur spécifique élevée. Celle-ci influe directement sur la température de la couche d'air qui la surplombe et la température de l'eau est à prendre en considération.

La Méditerranée grâce à la faible profondeur du détroit de Gibraltar, qui empêche l'arrivée des eaux froides de l'Atlantique, conserve une température moyenne supérieure à 13°C toute l'année jusque dans ses grands fonds de plus de 4000 m. Elle constitue ainsi un vaste réservoir calorifique pour les masses d'air au-dessus et garantit un climat plutôt clément tout du long de l'année aux régions la bordant. Le bassin méditerranéen constitue, par ailleurs, le berceau de la civilisation de la vigne.

D'autres mers fermées comme la Mer Rouge atteignent une température de surface tellement élevée qu'elles rendent la température de l'air environnant encore plus difficile à supporter.

Dans tous les cas, la présence d'une mer ou d'un océan à proximité d'un vignoble diminue l'amplitude thermique diurne et annuelle. Les grosses chaleurs estivales sont ainsi atténuées et la vigne souffre moins des excès thermiques. Des régions, comme la Californie et le Chili, qui sont bordées par des courants froids, respectivement le courant de Californie et le courant de Humboldt, bénéficient des brises marines très fraîches et des brouillards côtiers. Cependant cette diminution de la température estivale peut être néfaste à la culture de la vigne lorsqu'on se situe à des latitudes relativement élevées comme en Bretagne ou en Normandie en France. La proximité de la mer va également diminuer les rigueurs de l'hiver en atténuant notamment le risque de gelées Galet (2000).

Les lacs et les cours d'eau

De la même manière que les océans, les lacs et cours d'eau influent sur les climats viticoles. Ils ont d'ailleurs à peu près les mêmes effets mais, du fait d'une masse d'eau moins importante, les effets sur le climat local sont plus faibles. Cependant, certains grands lacs comme les lacs suisses (Léman, Neuchâtel...) ou les lacs italiens de la bordure méridionale des Alpes (Garde, Côme...), du fait de leur grande surface en eau ont un réel impact sur le climat. Les travaux de Guyot et Godet (1933) ont montré que le lac de Neuchâtel créait un véritable microclimat autour de lui avec une élévation de la température de l'air de 1°C à son voisinage. L'effet des cours d'eau est le même que les lacs, si ce n'est que cet effet est amoindri du fait d'une superficie en eau plus faible. De nombreux vignobles sont d'ailleurs implantés sur des coteaux surplombant une vallée ou une plaine où se trouve un fleuve (Val de Saône, Val de Loire, Vallée du Rhin ...). Le cours d'eau apporte l'humidité nécessaire pour éviter un dessèchement trop intense de l'air, tout en évitant une baisse trop sensible de la température la nuit. Enfin, les fleuves ont favorisé pendant longtemps le transport des raisins et des bouteilles de vin pour le commerce.

1.4. La vigne et les extrêmes climatiques

La vigne est sujette à un grand nombre d'aléa climatique que les facteurs topographiques ou environnementaux peuvent parfois amplifier. Nous avons choisi ici de ne développer que les deux principaux risques, qui posent de nombreuses questions quant au changement climatique : le gel et la canicule. Nous aborderons ces risques en expliquant les types de situation météorologique qui en sont à l'origine, puis nous expliquerons les conséquences que cela implique pour la plante et les fruits.

1.4.1. Le gel

Le gel peut être un aléa très dommageable pour la vigne, en particulier lors de la période de débourrement qui intervient généralement entre le début et le milieu du printemps en région tempérée. Le printemps est une saison de transition en météorologie où alternent constamment des périodes plus chaudes entrecoupées de période plus froides. Les masses d'air froides de l'hiver sont encore présentes au voisinage de latitudes relativement moyennes alors que les masses d'air d'origine tropicale remontent déjà au niveau des latitudes tempérées. Cette saison va donc être clé pour une grande partie d'espèces cultivées à ces latitudes. Le démarrage de la saison végétative de la vigne en sera donc tributaire, avec un développement plus ou moins précoce. Certaines années, des descentes ou remontées, selon l'hémisphère, de masses d'air d'origine polaire peuvent se produire et faire chuter les températures de manière brutale après un début de printemps plutôt doux. Le risque pour la vigne sera donc le gel des bourgeons et une perte parfois conséquente de la récolte de fin de saison. Le gel hivernal est également un problème dans certaines régions continentales où est cultivée la vigne (Canada, Europe de l'est ...). Une descente trop importante du mercure pourra alors entraîner la mort de la plante.

I.4.1.1. Gelées de printemps

Une gelée, par définition, intervient lorsque le mercure descend au-dessous de 0°C (Clément, 1981). Diverses situations météorologiques peuvent aboutir à la gelée. Nous parlerons de gelées d'advection ou de gelées noires ou encore gelées de plein vent lorsqu'une masse d'air très souvent d'origine polaire migrera sur une région donnée en amenant des températures négatives. Le deuxième type de gelées observé est appelé gelées blanches (Figure I.11) ou gelées radiatives. Dans un grand nombre de cas les deux types de gelées pourront se combiner et souvent renforcer le phénomène. Le deuxième type de gelées abordé ici, les gelées radiatives, sera la plupart du temps renforcé par la topographie locale du terrain. « Ce type de gelées a une grande importance agricole » (De Parcevaux et Huber, 2007). Nous allons ici développer ce type de phénomène.

La gelée radiative se produit lors de nuit claire, avec une absence de nuage et un vent presque nul. Madelin (2004) explique qu'« elle est déterminée par un déficit radiatif du sol et des végétaux : les pertes radiatives importantes dans l'infrarouge au niveau de surface (du sol et des végétaux) ne sont pas compensées par un flux de conduction dans le sol ni par un rayonnement atmosphérique ». Le bilan radiatif devient alors très rapidement négatif, la déperdition d'énergie au sol devenant prédominante. En termes de météorologie, ce genre de phénomène intervient lors de situations anticycloniques qui apportent une certaine stabilité de l'air du fait des hautes pressions et donc un ciel le plus souvent clair, lorsqu'il n'y a pas formation de brouillard, surtout l'hiver ou le printemps. Cette perte d'énergie au niveau du sol et ce refroidissement de basses couches de l'atmosphère entraîne la mise en place d'une inversion thermique (Figure I.12).



Figure I.11. Gelée blanche observée au petit matin du 18 février dans des vignobles suisse proche du Léman (©Planchon Olivier)

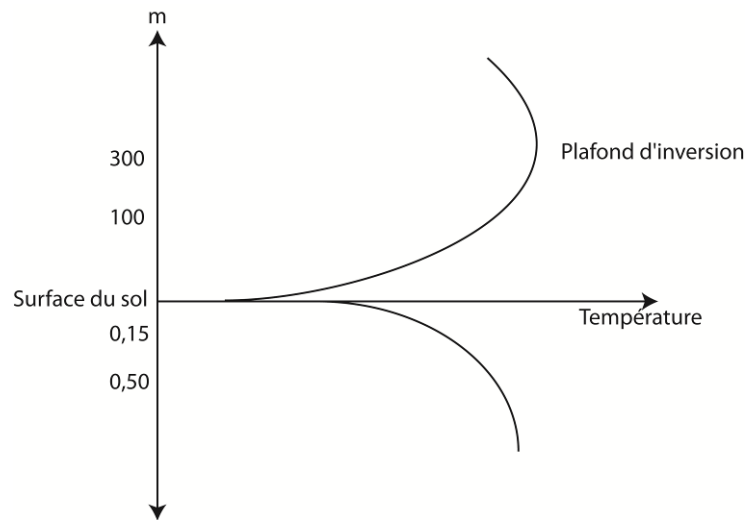


Figure I.12. Profils thermiques dans l'air et le sol au cours d'une nuit de rayonnement (d'après De Parcevaux et Huber, 2007)

En absence de vent, les couches d'air plus chaud en altitude ne peuvent pas réchauffer la base de la masse d'air au niveau du sol. L'air froid plus lourd dévale les pentes à une vitesse très réduite (0,5 à 1m/s) et donc à peine perceptible. Ces brises de pente que l'on appelle « vent catabatique », surtout en montagne, peuvent être mises en évidence par de la fumée ou bien grâce à des installations très sensibles du type girouette manuelle en balsa (Quénol et Beltrando, 2006). L'air froid s'accumule donc en basse couche et forme un lac d'air froid. Cette couche d'air froid stagne alors entre le sol et le plafond d'inversion. Au-dessus de ce plafond d'inversion se trouve la ceinture chaude (De Parcevaux et Huber, 2007). Les arboriculteurs ou viticulteurs rechercheront alors cet endroit comme lieu de plantation privilégié plutôt que les bas-fonds proches des plaines et vallées ou leurs cultures seraient beaucoup plus exposées à ce type de gel (Figure I.13).

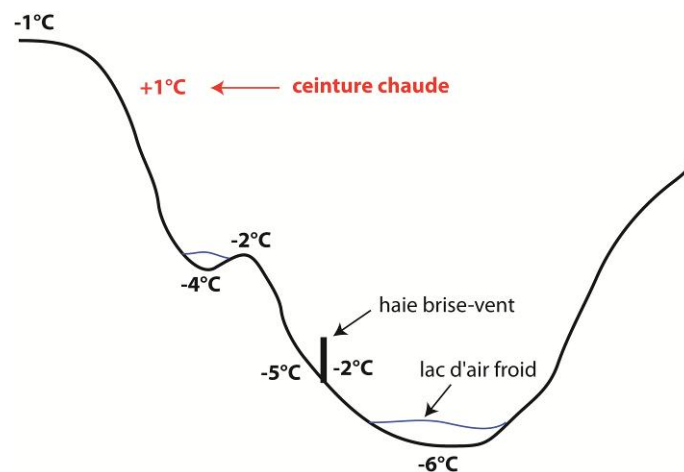


Figure I.13. Ecoulement de l'air le long d'une pente et formation d'un lac d'air froid (d'après De Parcevaux et Huber, 2007)

La topographie du terrain joue beaucoup en cas de mise en place d'une inversion. De mini dépressions situées sur la pente vont également créer de petits lacs d'air froid, tout comme des obstacles de type haie brise-vent.

La nature du sol est l'un des autres facteurs très influents dans ce type de configuration. Un sol humide limitera la descente de la température alors qu'un sol sec l'amplifiera. En effet, en s'évaporant un sol humide va libérer de la chaleur et ainsi réchauffer l'air environnant par conduction. De même, plus l'air est humide, plus celui-ci absorbe le rayonnement émis par le sol et plus il réémet vers le sol, diminuant ainsi le rayonnement net. De Parcevaux et Huber (2007) explique qu'« une gelée blanche qui dépose sur le sol l'équivalent d'une lame d'eau de 0,1 mm d'épaisseur apporte donc sur un hectare un mètre cube d'eau, soit à peu près 2850 MJ ». La gélivité d'une parcelle dépendra alors de la texture et de la nature du sol. Des sols labourés ou enherbés auront 2 à 5 fois plus de chance d'observer du gel qu'un sol nu et tassé.

Tableau I.6. Gélivité (D'après De Parcevaux et Huber, 2007)

| Etat du sol | Fréquence des années dangereuses | Nombre de gelées en 100 ans |
|--------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Sol nu tassé | 1/7 | 17 |
| Sol labouré | 1/4 | 35 |
| Sol enherbé | 1/2 | 102 |

Si la topographie et la texture et nature du sol peut influencer fortement la variabilité spatiale de la température et ainsi dans certains cas augmenter le risque d'exposition de la vigne au gel, la formation de brouillard peut limiter la baisse du mercure. La condensation de l'eau qui forme alors un brouillard va libérer de la chaleur et ainsi limiter le refroidissement de l'air environnant. La proximité d'un lac ou d'un fleuve de la même manière en apportant de l'humidité par phénomènes de brises locales va diminuer le risque d'exposition au gel.

I.4.1.2. Gelées d'hiver

En hiver, la vigne entre en dormance et théoriquement est moins exposée aux fluctuations de température, sauf lorsque ces dernières plongent de manière conséquente sous 0°C. Aux latitudes tempérées, il est fréquent d'observer des descentes ou remontées d'air polaire durant l'hiver. Cet air est certes moins froids qu'aux hautes latitudes mais des températures sous -10°C peuvent être fréquemment relevées, comme dans l'Est de la France dans les vignobles Bourguignons, Alsaciens ou de Champagne ou encore dans les vignobles canadiens ou du nord-est des Etats-Unis pour ne citer que quelques exemples.

Tous les végétaux n'ont pas la même résistance au froid. Les dommages sur la vigne commencent très souvent à apparaître au-delà de -20°C. Blouin (2007) explique que « la vigne peut être détruite par le gel, au-dessous de -17/-18°C durant la période hivernale. Une période courte peut se limiter à faire éclater le cep qui est alors facilement atteint par des bactéries endémiques provoquant alors l'apparition de « broussins » aggravant les dégâts direct du gel ». En France si les -10°C sont observés régulièrement en hiver chaque année, les -20°C sont beaucoup plus rares et interviennent lors de vagues de froid conséquentes. En revanche de telles valeurs de températures sont beaucoup plus fréquentes en Ukraine, dans le nord de la Chine ou au Canada. Ce risque est donc un autre facteur limitant de culture de la vigne. « Tous les vigneron de France – ainsi que les oléiculteurs – se rappellent des gelées de février 1956 qui détruisirent des centaines de milliers d'hectares et nécessitèrent des

replantations massives dans les années qui suivirent» (Blouin, 2007). Plus récemment, une vague de froid a touché une grande partie de l'Europe en Février 2012. La France a également été touchée durant près de 3 semaines dans certaines régions avec des températures nocturnes fréquemment comprises entre -10 et -20°C. Des vignobles très septentrionaux comme la Champagne ont été touchés mais les vignobles de Provence ont également été sévèrement attaqués par le gel (Figure I.14).



Figure I.14. Gourmands repoussant à la base des pieds de vigne gelés par la vague de froid de Février 2012 dans l'AOC Côte de Provence Sainte-Victoire (©Balikian)

Source : [viti-net.com]

Les dégâts ont été très souvent visibles plus tardivement lors de la reprise de végétation. La descente de sève se fait durant le repos hivernal puis elle est censée remonter au printemps lorsque les températures sont plus clémentes. Le début de l'hiver étant resté plutôt doux, la sève n'était pas complètement descendue dans les ceps de vigne, et elle a alors été figée au milieu du cep. Les vieilles vignes sont souvent plus touchées car la sève met plus longtemps à descendre étant donné que les ceps sont plus gros (Figure I.15).



Figure I.15. Cas d'un vieux cep moins résistant, tué par le gel hivernal en février 2012 dans un vignoble de Castelnau-Valence Source : [castelnauvalence.blogs.midilibre.com]

I.4.1.3. Méthodes de lutte anti-gel

Face à l'aléa « gel » le viticulteur a développé différentes méthodes de lutte, afin de protéger son vignoble. Le gel hivernal est fréquemment observé dans les vignobles les plus septentrionaux. Les viticulteurs enfouissent donc les ceps dans la terre durant cette période avant de les relever au printemps. En France cette pratique n'est pas nécessaire, le niveau de gel n'étant pas celui de pays plus nordiques comme le Canada par exemple.

Pour le gel de printemps, différentes méthodes de lutte sont envisagées. Madelin (2004) explique qu'il existe la lutte passive et la lutte active que de De Parcevaux et Huber appelle aussi respectivement lutte préventive et curative.

La lutte passive consiste dans un premier temps au choix du site viticole et du cépage approprié. En effet, tous les cépages ne sont pas égaux face à la résistance au gel et ils sont plus ou moins précoces. Il sera conseillé de choisir un cépage plus tardif dans une région fréquemment soumise au gel de printemps. Le viticulteur va également tailler sa vigne plus ou moins tôt selon sa situation sur le coteau. Il taillera de préférence plus tôt en haut de coteau que dans le bas de coteau. Une taille tardive peut retarder de 10 jours le développement des bourgeons (Avc, 1991). Le viticulteur pourra également choisir de travailler son sol puisque comme nous l'avons vu, un sol enherbé ou labouré entrainera une diminution de température plus prononcée durant la nuit. Enfin, une création ou un renforcement des haies brise-vent en amont est vivement conseillé pour éviter que l'air froid dévale toute la pente jusqu'aux parcelles cultivées. « Ces techniques préventives et peu onéreuses permettent de réduire de un à trois degrés l'abaissement de la température nocturne, ce qui suffit pour diminuer le risque de gel de près de 50%, et donc pour abaisser la durée et le coût de la lutte active ». (De Parcevaux et Huber, 2007)

La lutte active consiste à prendre des mesures protectrices contre le gel alors que l'évènement est sur le point de se produire. Elle consistera à modifier le micro-climat et notamment le bilan énergétique de surface (Madelin, 2004). Nous ne développerons pas ici les différentes techniques mais nous allons citer les principales. Une des techniques les plus couramment utilisées, mais très coûteuses en énergie et en argent, c'est le chauffage de l'air par des bougies, brûleurs, résistance électrique entourant les bois de taille. Cette méthode est bien adaptée pour réchauffer l'air de manière très locale dans les endroits des parcelles les plus exposés au risque gélif. Un autre moyen de lutte consiste à brasser l'air environnant les vignobles à l'aide d'un hélicoptère ou d'hélices. Cette dernière méthode permet à l'air froid qui stagne à la surface de sol de se mélanger avec la couche d'air plus doux qui le surplombe et ainsi d'homogénéiser la température dans la parcelle. Enfin, et plus paradoxalement, le vigneron pourra décider d'employer l'aspersion. L'aspersion va réchauffer les bourgeons par la chaleur de solidification de l'eau qui se transforme en glace. C'est un système coûteux à la fois en argent et en ressource naturelle, ce qui pose certains problèmes environnementaux pour certaines régions où la ressource en eau vient à manquer. En France ce système est fréquemment utilisé en Champagne et à Chablis, régions fréquemment soumises au gel printanier et où des vins à prix élevés sont vendus.

1.4.2. Les fortes chaleurs

Si le gel est l'un des principaux aléas climatiques auquel est soumise la vigne, les épisodes de fortes chaleurs durant l'été sont également un risque important. Ils sont parfois aussi associés à un risque de stress hydrique.

1.4.2.1. Conséquences des épisodes de fortes chaleurs sur la vigne

Nous avons vu que l'optimum thermique pour la vigne se situe entre 25 et 35°C environ, au-delà de ce seuil le risque d'échaudage physiologique (Crespy, 1992) devient important et au-delà de 40°C la vigne est soumise au grillage. Suite à une série de journées avec des températures supérieures à 35°C, les baies se dessèchent, ce qui nuit à une bonne maturation des baies. Ainsi, les différents auteurs qualifient les températures dangereuses pour la vigne à partir de 35°C jusqu'à 42°C (Champagnol, 1984 ; Huglin, 1986 ; Galet, 2000). En région tempérée durant l'été météorologique (Juin-Août), les remontées d'air d'origine tropicale sont assez courantes et provoquent parfois une hausse brutale des températures. En 2003, la France et une grande partie de l'Europe de l'Ouest ont été exposées à des températures caniculaires à deux reprises, en Juin et au mois d'Août, pendant plusieurs jours consécutifs. Une série de journées caniculaires ($T_x > 35^\circ\text{C}$) peut être néfaste au développement des grappes, particulièrement lorsque celle-ci intervient en période de maturation. La synthèse des anthocyanes, sucre et polyphénols se retrouvent alors bloquée (Briche, 2011) et il existe un risque de brûlure sur les baies exposées directement au soleil. La synthèse des flavanoïdes, qui contribuent à la bonne synthèse des tanins est également affectée (Matus *et al.*, 2006). De plus des températures supérieures à 40°C vont bloquer la photosynthèse de la vigne (Motorina, 1958). Pendant la phase de maturation la « baie ayant atteint sensiblement son volume définitif subit des transformations chimiques importantes : accumulation de sucres, diminution de l'acidité » (Guillon, 1905) et est donc très sensible à ces températures extrêmes. C'est pourquoi Langellier (2003) explique que les vignes souffrent davantage d'un stress thermique que d'un stress hydrique.

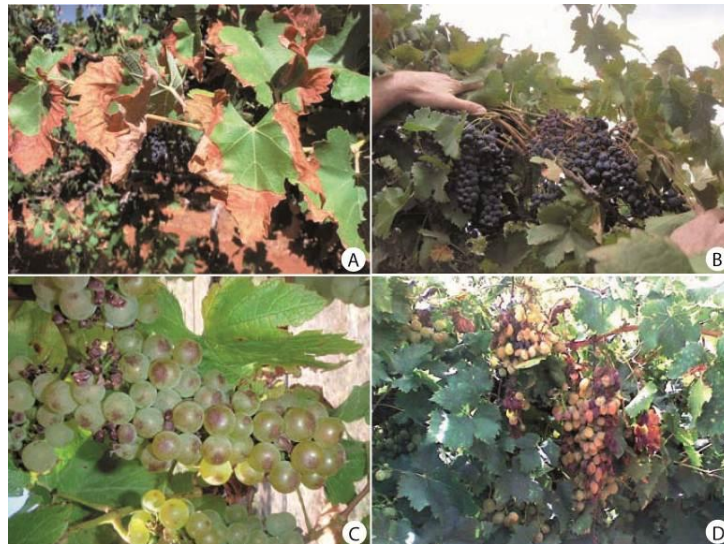


Figure I.16. Feuilles de vigne desséchées (A) et grappes de raisins brûlées (B-C-D) suite à la vague de chaleur de l'été 2009 dans le sud-est de l'Australie

Source : [Webb *et al.*, 2009]

Les excès thermiques des températures minimales sont tout aussi dommageables que les excès en termes de températures maximales. En effet, les grappes ont besoin d'une certaine fraîcheur nocturne pour le développement des arômes notamment. Si la température ne descend pas suffisamment cette synthèse se fait beaucoup moins bien. C'est pour cela que l'indice de fraîcheur des nuits est calculé. Dans certaines régions méridionales (Provence, Italie, Espagne ...) ou de latitudes subtropicales (Maroc, vallée centrale de Californie ...) les températures restent très nettement supérieures à 18°C, seuil de nuits chaudes selon Tonietto. Dans des vignobles plus septentrionaux comme la Champagne, la Bourgogne ou le Val de Loire ces températures nocturnes sont relativement fraîches. Cependant lors de période de vagues de chaleur intenses, les températures peuvent rester supérieures à 18°C pendant plusieurs nuits.

I.4.2.2. Les pratiques culturales pour lutter contre les effets des fortes chaleurs

Face à ce risque climatique non-négligeable et finalement assez fréquent dans la plupart des régions viticoles dans le monde, les viticulteurs peuvent adapter leur pratiques pour une meilleure gestion du vignoble et pour limiter les pertes en cas de fortes chaleurs. Il est assez difficile de savoir à l'avance le temps qu'il fera durant la saison végétative et donc également durant le cœur de l'été mais certaines régions du globe sont beaucoup plus vulnérables à ce type d'aléa. Les acteurs sur le terrain vont alors anticiper ce type d'évènements.

L'orientation des rangs de vigne est un paramètre important dans la gestion d'un vignoble, particulièrement dans le cadre des vagues de chaleur. Une orientation est-ouest sera souvent à privilégier par rapport à une orientation nord-sud. Webb *et al.* (2009), ont constaté que durant la vague de chaleur de l'été 2009 en Australie, les rangs orientés Est-Ouest ont subi moins de dégâts sur les grappes et les feuilles que les autres rangs. Hunter *et al.* (2010) ont également montré que la pulpe des baies des rangs orientés nord-sud se réchauffait beaucoup plus que sur les autres rangs. En effet, une grappe de raisin d'un rang orienté nord-sud va recevoir durant les heures les plus chaudes de la journée les rayons directs du soleil alors que sur un rang orienté est-ouest ce ne sera pas le cas. Cependant, ce

type de mesure se prend en amont, c'est-à-dire plusieurs années avant les premières récoltes. Ainsi, sous des climats chauds et secs comme en Australie par exemple, les viticulteurs connaissent le climat et adaptent donc leur façon de planter les vignes.

Les grappes en période de pré-véraison qui seront exposées à une vague de chaleur intense ne subiront en général que peu de dommages (McIntyre *et al.*, 1982). En revanche, les raisins en phase de post-véraison seront beaucoup plus vulnérables à la chaleur. L'effeuillage est donc réalisé en fin de période de maturité pour que les raisins reçoivent la quantité de chaleur et de lumière nécessaire pour mûrir. Ceci est vrai surtout dans les régions viticoles les plus septentrionales. Cependant, un effeuillage trop précoce peut exposer les baies à une chaleur excessive lors d'un épisode caniculaire par exemple. Suivant le climat, bien connu des viticulteurs, cet effeuillage se fera donc plus ou moins tardivement. En région Anjou par exemple, l'effeuillage se fait de plus en plus, uniquement, du côté exposé à l'est mais pas à l'ouest car en cas d'épisode de chaleur extrême des dégâts pourraient apparaître sur la vigne et les raisins.

Enfin, l'irrigation n'est pas autorisée dans tous les pays viticoles, comme en France par exemple. En revanche dans les pays viticoles du nouveau monde (Australie, USA, Chili, Argentine ...) cette pratique est non seulement autorisée mais également indispensable à la pérennité de la vigne, du fait de climat bien trop secs. Des périodes de vague de chaleur à répétition durant l'été exposeront la vigne, en plus de l'échaudage des baies, à un stress hydrique trop important et les vignes peuvent dans certains cas, si elles manquent d'eau en parallèle, fanées et dépérir (Kriedemann *et al.*, 1969 ; Flexas *et al.*, 2004). Les prévisions météorologiques à moyen et court terme peuvent être très utiles dans ce type de configuration. Une irrigation contrôlée et adaptée peut être alors mise en œuvre en amont de l'évènement. Le porte-greffe peut également avoir son importance. Dans les régions fréquemment soumises aux hautes températures et à un stress hydrique important, il sera conseillé de greffer les cépages sur des portes greffes résistants à la sécheresse ou de planter des ceps de vigne sans porte greffe.

CONCLUSION DU CHAPITRE I

Ce chapitre a montré l'importance du climat et notamment de la température, sur le fonctionnement de la vigne et du déroulement de son cycle phénologique. Certains indices bioclimatiques sont significativement corrélés avec les dates des différents stades et permettent d'expliquer en partie la composition des baies lors de la récolte. Ces mêmes indices permettent de classifier les différents macroclimats régionaux à l'échelle mondiale mais des études à échelle plus locale peuvent aider à affiner notre connaissance des terroirs viticoles au sein d'une même région. En effet, la variabilité du climat et notamment de la température est souvent très marquée, du fait des caractéristiques topographiques des sites d'implantation des vignobles et de leur environnement. Dans le cadre du changement climatique global, des questions nombreuses se posent sur l'évolution des futures conditions climatiques au sein des différentes régions viticoles. La vigne étant un excellent marqueur du climat, cette dernière pourrait être l'une des premières cultures impactées par cette nouvelle donne climatique. Nous avons vu qu'il existait cependant des marges de manœuvres importantes pour les viticulteurs. Cependant, toutes les régions viticoles n'auront pas la possibilité de s'adapter de la même manière, en raison des différentes conditions climatiques initiales, des ressources en eau disponible (irrigation) ou encore des ressources financières.

Chapitre II

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LES IMPACTS SUR LA VITICULTURE

Le climat a toujours fluctué dans l'histoire de la planète mais plus récemment, depuis le siècle dernier, un changement climatique global sans précédent a été détecté par la communauté scientifique. Les rapports des chercheurs du groupe d'experts intergouvernemental sur le climat (GIEC) sont aujourd'hui unanimes pour dire que l'Homme est en grande partie responsable de ces changements (GIEC, 2007). Ainsi, la température moyenne du globe a augmenté d'environ 0,6°C depuis les années 1980, ce qui équivaut à un forçage radiatif autour de 1,6 Watt/m². La plupart des régions observent un réchauffement alors que d'autres se refroidissent. Ces changements climatiques rapides ont bien évidemment un impact notable sur la végétation et en particulier les cultures. La vigne est un excellent marqueur du climat et réagit donc à ces changements climatiques et plus spécifiquement à l'augmentation des températures dans beaucoup de zones viticoles. Ce chapitre se focalise plus particulièrement sur les évolutions en termes de températures. Nous développerons ainsi les différents changements climatiques observés dans le monde et dans les différents pays viticoles puis les évolutions simulées par des modèles de circulation générale (MCGA). Enfin nous développerons les impacts issus de ces changements climatiques sur l'agriculture et plus particulièrement la viticulture.

II.1. Changements climatiques observés dans le monde et en zones viticoles

Les observations du climat depuis 1900 montrent une augmentation de la température moyenne à la surface du globe. Cette augmentation s'est nettement accélérée depuis la fin des années 1980. Il est important pour comprendre ce phénomène de changement climatique d'en rappeler les mécanismes à l'origine. Nous préciserons ensuite les différentes évolutions climatiques dans le monde et en région viticole au cours du dernier siècle.

II.1.1. Les mécanismes à l'origine des changements climatiques

II.1.1.1. Les mécanismes à l'origine de l'effet de serre

Un amalgame est souvent fait entre réchauffement climatique et effet de serre. Les deux ne sont pas équivalents mais c'est bien l'amplification de l'effet de serre qui provoque cette augmentation de la température. Nous allons ici rappeler les principaux mécanismes naturels qui sont à l'origine de l'effet de serre sur la planète Terre. Sans ce phénomène naturel qu'est l'effet de serre et qui maintient la température moyenne de l'air autour de

15°C, la vie serait improbable sur Terre. Afin de comprendre ce phénomène, il est nécessaire de s'attarder sur le bilan radiatif à l'interface atmosphère-Terre (Figure II.1).

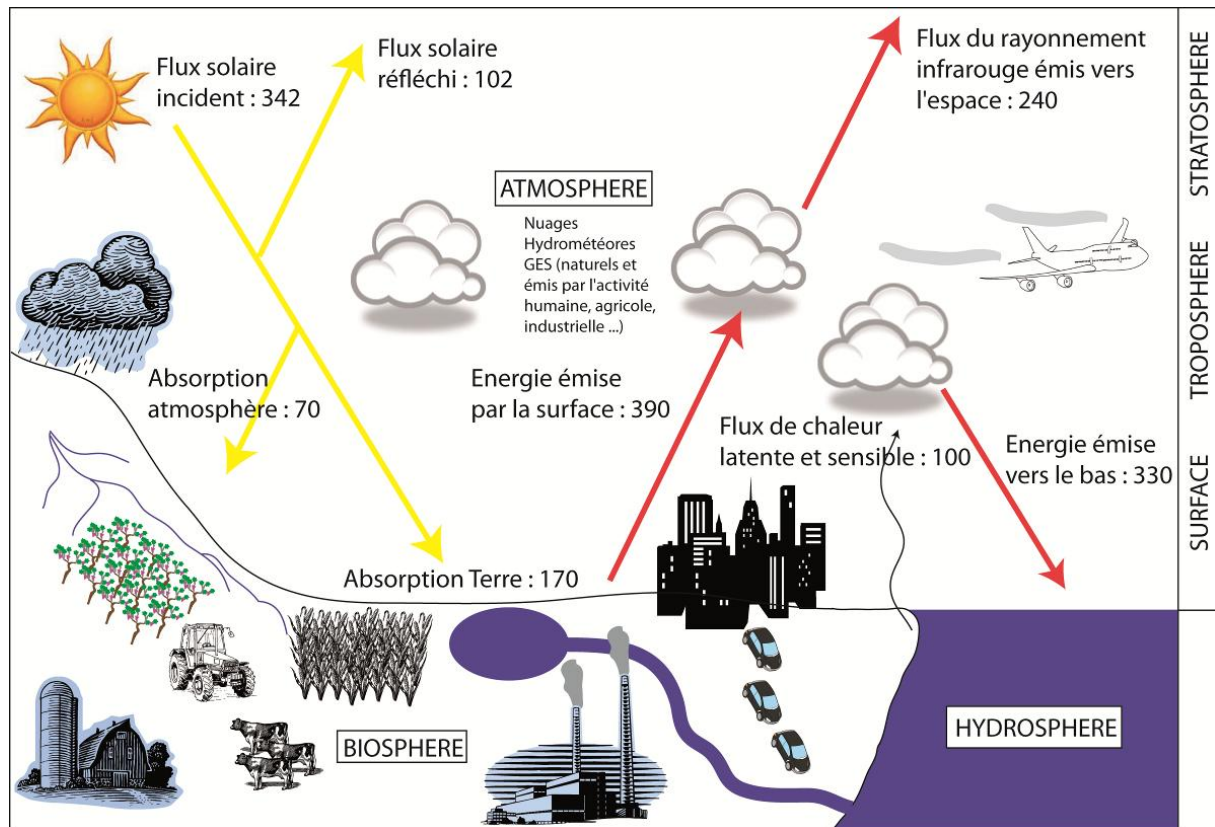


Figure II.1. Schéma récapitulatif du bilan radiatif (en Watt/m²) à la surface terrestre.
 Réalisation : Cyril Bonnefoy

L'énergie incidente du soleil arrivant au sommet de l'atmosphère est de 342 Watt/m² environ, alors que l'énergie atteignant directement la surface du globe n'est que de 170 Watt/m². En effet une partie de ce flux solaire est absorbé par l'atmosphère (70 Watt/m²) ou bien réfléchi (102 Watt/m²), tous ces flux étant situés dans les courtes longueurs d'ondes. L'atmosphère joue un rôle de « filtre », constituant une enveloppe gazeuse, qui s'interpose ainsi entre le soleil et la surface terrestre. Le principal gaz absorbant, qui est pourtant en quantité relativement faible dans l'atmosphère (0 à 2%), est la vapeur d'eau. La Terre émet également de la chaleur (390 Watt/m²) par rayonnement dans les longues longueurs d'ondes. Cependant, seulement une partie de ce rayonnement est émis vers l'espace (240 Watt/m²). Un certain flux de chaleur latente et sensible est aussi émis par la Terre (100 Watt/m²). Enfin, l'atmosphère et notamment les nuages et les différents Gaz à Effet de Serre (GES) contribuent à réchauffer le système grâce à une énergie de 330 Watt/m² réémise vers la surface terrestre. Sans cette conservation de la chaleur par l'atmosphère, la température au voisinage du sol serait nettement inférieure, de l'ordre de -30°C (Beltrando, 2004).

II.1.1.2. L'augmentation des rejets de Gaz à Effets de Serre (GES)

Labeyrie (1985) montre dès 1950 qu'une augmentation de la quantité de carbone dans l'air a pu être détectée notamment à travers la dendrochronologie. Cette croissance des rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère est liée au début de l'ère industrielle qui a commencé à

peu près à cette époque. En effet, depuis le milieu du XIX^{ème} siècle, la combustion de carbone fossile, c'est-à-dire de carbone contenu dans le charbon, le pétrole et le gaz naturel, a considérablement augmenté. C'est donc la première fois, où l'action de l'homme sur des modifications de la composition de l'atmosphère, a été mise en évidence. En 2001, le GIEC a confirmé que les concentrations de GES dans l'atmosphère sont restées à peu près constantes durant le millénaire qui a précédé l'ère industrielle mais que depuis celles-ci étaient en constante augmentation, sous l'effet direct ou indirect des activités anthropiques. Le rapport du GIEC (2007) a mis en évidence l'influence de l'homme sur cette augmentation qui excède de loin celle des procédés naturels tels que l'activité solaire ou les éruptions volcaniques. La Figure II.2 permet de visualiser la forte augmentation des concentrations de trois des GES à vie longue, de l'ère industrielle à nos jours.

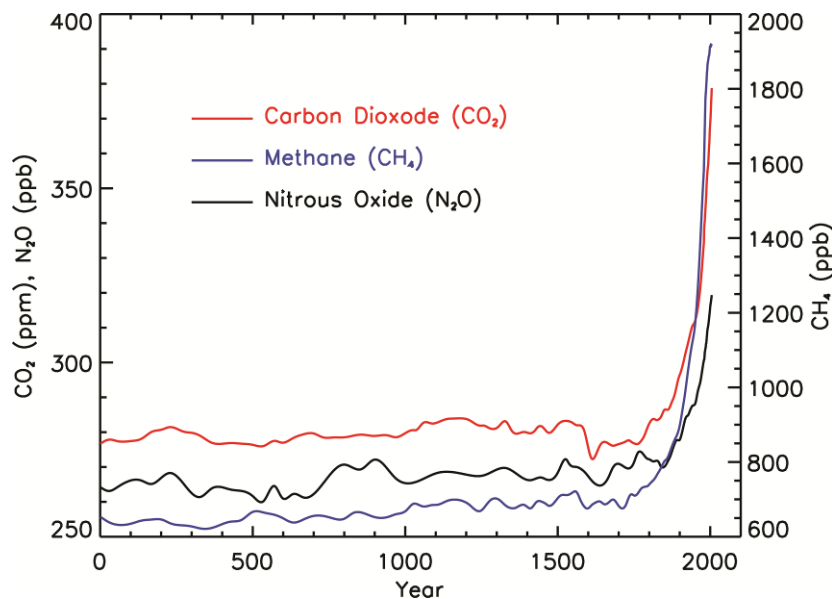


Figure II.2. Concentrations atmosphériques de trois GES à vie longue depuis les 2000 dernières années. Les unités de concentration sont en particules par million (ppm) ou milliard (ppb).

Source : [GIEC, 2007]

Les activités humaines résultent en effet de l'émission de quatre principaux GES : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O) et les halocarbones (un groupe de gaz contenant du fluor, du chlore et du brome) :

Dioxyde de carbone (CO₂)

Son augmentation est due en grande partie aux carburants fossiles utilisés par les transports et les systèmes de chauffages et de climatisation. La déforestation est également responsable de l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère puisque les puits de carbone diminuent. Sa concentration est passée d'environ 280 ppm avant l'ère industrielle à 380 ppm dans les années 2000.

Méthane (CH₄)

La concentration de méthane a augmenté en lien avec l'intensification des activités agricoles et du développement des activités humaines liées à la distribution du gaz naturel et à

l'enfouissement des déchets. Le méthane provient également de mécanismes plus naturels intervenant par exemple dans les zones humides. Les experts du GIEC ont noté une baisse du taux de croissance des concentrations en méthane depuis deux décennies. Cependant, les effets seront encore répercutés dans les prochaines décennies, le méthane étant un gaz à vie longue dans l'atmosphère.

L'oxyde nitreux (NO₂)

Ce gaz est également émis par les activités humaines comme l'utilisation de fertilisants et la combustion de carburants fossiles. Les procédés naturels dans les sols et les océans contribuent également à la diffusion d'oxyde nitreux dans l'atmosphère.

Halocarbones

La concentration des halocarbones a également augmenté dans l'atmosphère en lien avec les activités anthropiques. Les procédés naturels sont aussi une source relativement modeste. Les principaux gaz sont les chlorofluorocarbures (par exemple CFC-11 et CFC-12) et étaient utilisés majoritairement comme des agents réfrigérants et dans d'autres procédés industriels avant que l'on découvre que leur présence dans l'atmosphère était responsable du trou dans la couche d'ozone. Leur abondance dans l'atmosphère est en train de décroître du fait de la prise de conscience des autorités et des régulations internationales qui en ont découlé pour la protection de la couche d'ozone.

L'augmentation de l'ensemble de ces GES dans l'atmosphère dérègle l'équilibre climatique global. Des conséquences directes sur les différents paramètres climatiques sont observées par les stations météorologiques et les satellites. L'une des évolutions majeures observées depuis la fin du XIX^{ème} siècle est l'augmentation de la température moyenne planétaire et une accélération de cette hausse depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle.

II.1.2. Les observations des changements climatiques en cours

II.1.2.1. Evolution de la température à l'échelle global et en France

Les derniers rapports du GIEC (2001,2007) montrent que la température a augmenté d'environ 0,6°C ± 0,2°C au cours du XX^{ème} siècle. Cependant, cette évolution s'est faite à différents rythmes au cours des décennies (Figure II.3). Sur la période 1850-2004, la température a augmenté en moyenne de 0,045°C/an alors que sur la dernière période 1980-2004 celle-ci a augmenté de 0,177°C/an. Une accélération de ce réchauffement est donc clairement visible à partir des années 1980.

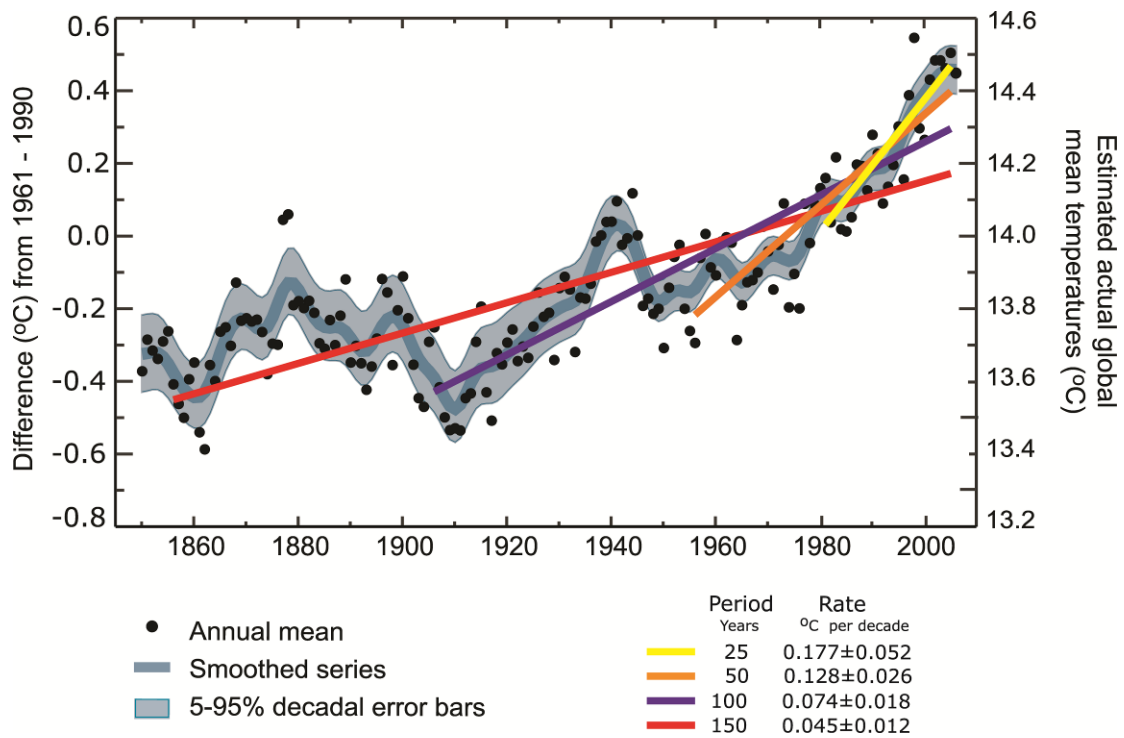


Figure II.3. Températures moyennes annuelles relevées à la surface du globe de 1850 à 2004 (anomalies par rapport à la normale 1961-1990 sur l'axe de gauche et valeurs absolues sur l'axe de droite).
 Source : [GIEC, 2007]

La température a évolué de manière non-linéaire depuis le milieu du XIX^{ème} siècle avec des périodes plus ou moins stables (fin du XIX^{ème} siècle et période 1945-1970) et deux hausses significatives au début et à la fin du XX^{ème} siècle. La première période correspond à la phase d'industrialisation de nombreux pays d'Europe et d'Amérique du Nord. La deuxième phase est liée à l'accélération des rejets de GES dans l'atmosphère lorsque de nombreux pays sont entrés dans une phase d'industrialisation. L'évolution de la température a également été sensiblement différente d'un continent à l'autre (Figure II.4). L'augmentation de température a souvent été plus marquée dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud (GIEC, 2007). En Amérique du Nord, l'augmentation de température du début du XX^{ème} siècle a été plus intense et rapide qu'en Europe par exemple, mais la hausse est similaire dans les deux continents depuis 1980.

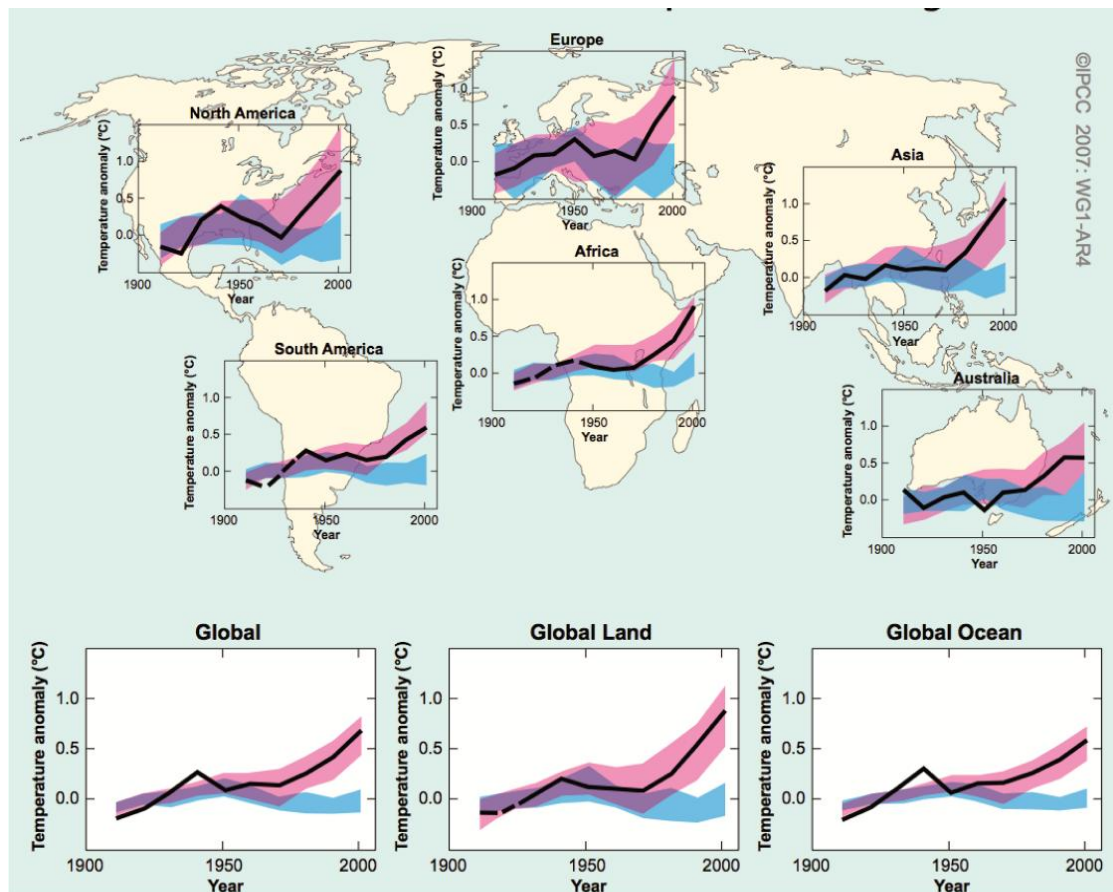


Figure II.4. Comparaison des changements observés au niveau continental et global de température de surface à partir des résultats des simulations des modèles utilisant les forçages naturels et anthropogéniques. La courbe noire montre les anomalies décennales des observations par rapport à la normale de la période 1901-1950. La courbe est en pointillés lorsque la couverture spatiale est inférieure à 50%. Les bandes bleu correspondent aux simulations issues des forçages naturels et les courbes roses correspondent aux simulations issues des forçages à la fois naturels et anthropogéniques.

Source : [GIEC, 2007]

Le comportement des températures en Afrique et Amérique du Sud est comparable à celui observé en Europe ou en Amérique du Nord, bien que les hausses soient un peu moins marquées. Mais, les données d'Afrique et d'Amérique du Sud, avant 1940, sont un peu moins fiables du fait du faible nombre de stations météorologiques dans ces régions. L'Asie a connu une première hausse en deux temps puis l'on retrouve la même accélération du réchauffement des années 1980. Enfin, la température a un peu plus fluctué en Australie au début du XX^{ème} siècle puis une hausse plus sensible dans les années 1980 a été observée avant une relative stabilité depuis les années 1990. L'évolution des températures a également été asymétrique au niveau saisonnier avec des hivers et des printemps qui se réchauffent en général plus que les étés et automnes (Karl *et al.*, 1993).

En France, les mêmes observations ont été constatées, c'est-à-dire une augmentation de la température au début du XX^{ème} siècle puis une légère baisse ou stagnation après la seconde guerre mondiale suivie d'une augmentation plus significative à partir des années 1980 (Figure II.5).

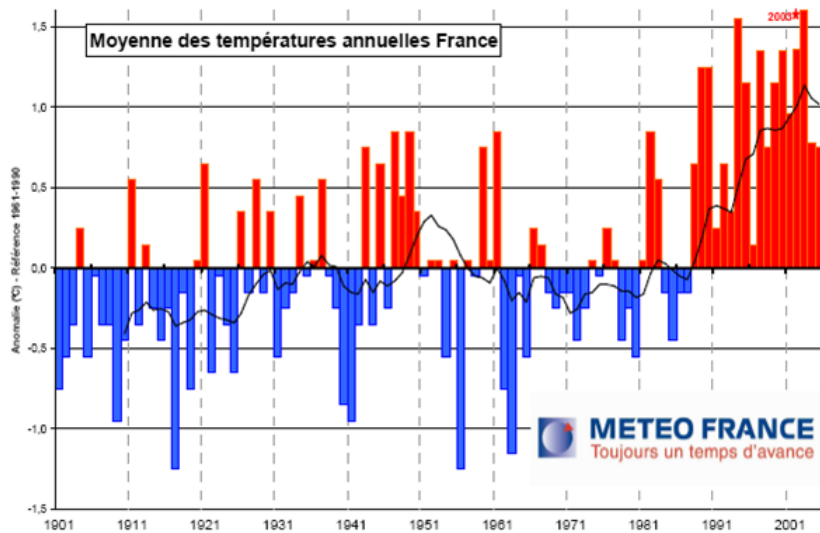


Figure II.5. Évolution de 1901 à 2005 des anomalies par rapport à la période 1961-1990 de la température moyenne annuelle (en °C) en France.

Source : [Météo-France]

Les anomalies de températures sont toutes positives après 1986 et les années les plus chaudes enregistrées depuis le début des mesures sont toutes postérieures à 1988. Sur l'ensemble du XX^{ème} siècle l'augmentation de la température moyenne en France est supérieure à celle du globe avec +1°C (Moisselin, 2002). La température minimale a subi une augmentation plus importante que la température maximale, ce qui rejoint les observations faites à l'échelle mondiale (Jones *et al.*, 1999). Cette évolution asymétrique est en partie due à l'augmentation de l'évaporation au niveau des océans qui produit donc une nébulosité plus importante. Cela engendre des nuits plus douces et des journées plus fraîches (Raval et Ramanathan, 1989; Chahine, 1992; Dai *et al.*, 1997). Chaque région française n'a pas été soumise à la même hausse de température (Figure II.6). Ainsi, la température minimale a plus augmenté dans le nord de la France que dans le sud et inversement pour les maximales (Moisselin *et al.*, 2002).

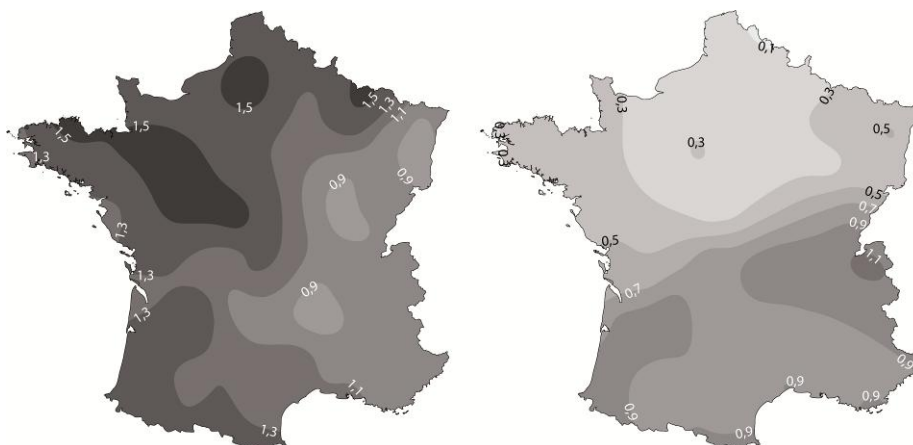


Figure II.6. Cartographie des tendances 1901-2000 (en °C/siècle) de la température minimale à gauche et maximale à droite (à partir de 70 séries homogénéisées de températures).

Source : [Moisselin *et al.*, 2002]

II.1.3. Les évolutions du climat en régions viticoles

Les changements climatiques ont été analysés dans différentes régions viticoles dans le monde. Les évolutions diffèrent selon les pays mais une augmentation moyenne de la température de l'air a été observée. Une étude sur 27 régions viticoles mondiales (Jones, 2005) révèle que toutes ces régions ont connu une augmentation de la température, l'évolution étant significative dans 17 de ces pays. Les tendances significatives sont la plupart situées en Europe et en Amérique du Nord alors que les tendances dans les pays viticoles de l'hémisphère sud sont souvent non-significatives. Cette observation met en évidence une dissymétrie de l'évolution des températures de part et d'autre de l'Equateur montrant que le changement climatique ne se traduit pas de la même façon dans tous les pays viticoles. La Figure II.7 montre les augmentations de la température dans quatre régions viticoles d'Europe, d'Amérique du Nord et d'Australie. Jones *et al.* (2005) expliquent que la plupart des régions viticoles ont atteint leur optimum climatique pour la culture de la vigne et que d'autres l'ont même dépassé comme en Alsace, Médoc ou Graves.

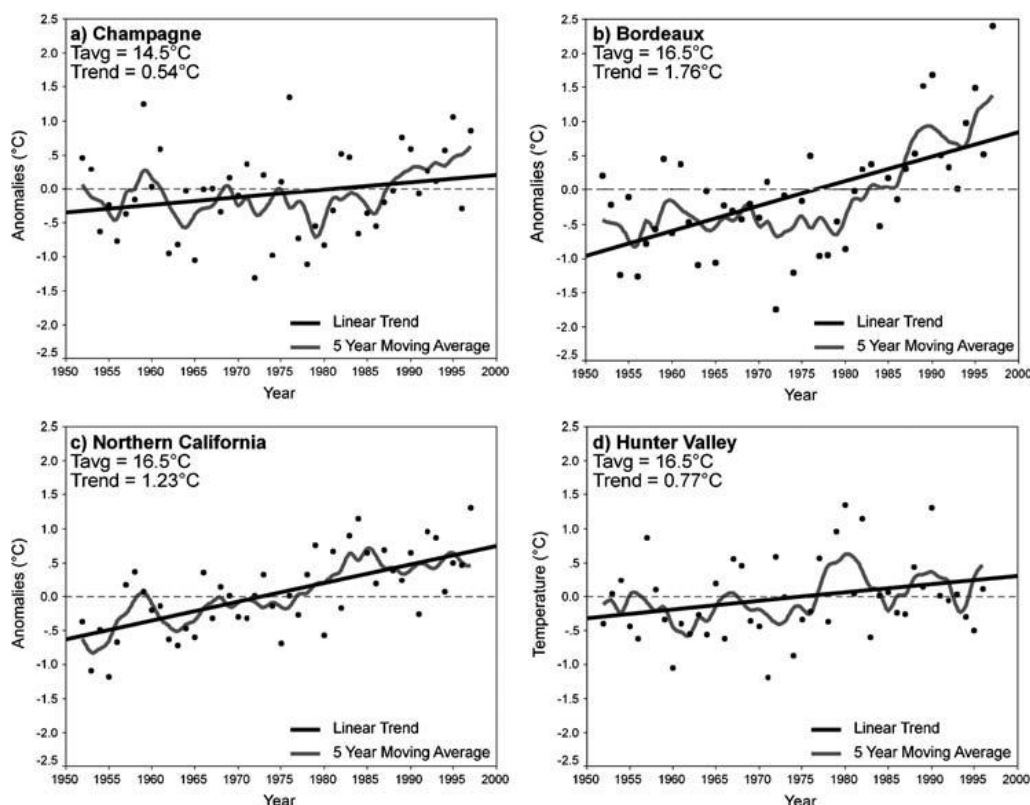


Figure II.7. Anomalies de la température moyenne saisonnière (1950-1999) pour la Champagne (a), la région bordelaise (b), le nord de la Californie (c) et la « Hunter Valley » en Australie (d). Tavg correspond à la température moyenne de la saison végétative de la vigne (Avril-Octobre dans l'Hémiphère nord et Octobre-Avril dans l'Hémiphère Sud) et Trend est la tendance sur 50 ans.

Source : [Jones *et al.*, 2005]

Une dichotomie dans l'évolution des températures entre le jour et la nuit est également observée. La Californie est l'une des régions où cette différence est la plus marquée, notamment dans les vallées de Napa et Sonoma (Figure II.8), régions où l'on a également constaté la diminution du nombre annuel de jours de gel. Cette dernière observation n'est

pas propre à la Californie puisque L'Agence Européenne de l'Environnement a par exemple noté une diminution du nombre de jour de gel en Europe en 100 ans (EEA, 2004).

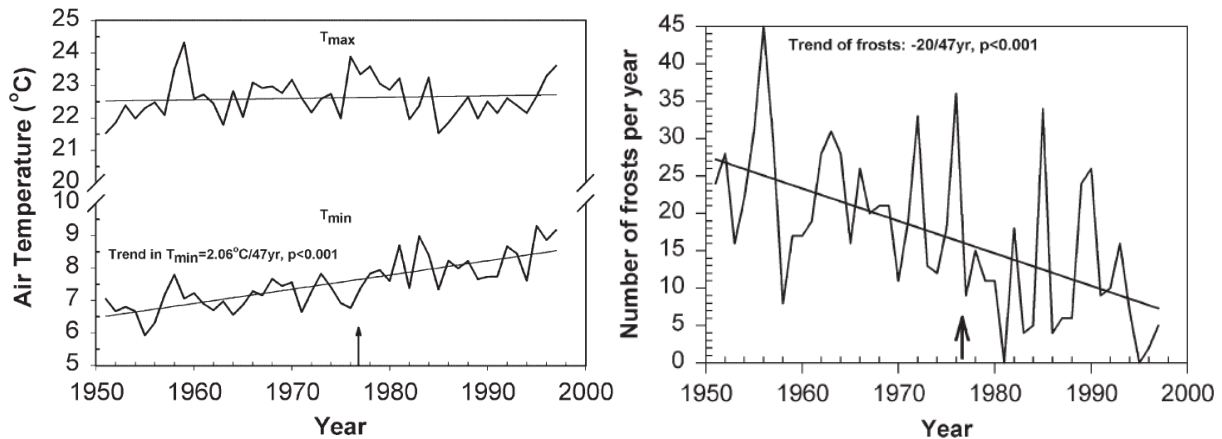


Figure II.8. Evolution des températures minimales et maximales à Napa et Sonoma Valley (à gauche) et du nombre annuel de jours de gel de 1950 à 2000 (à droite).

Source : [Nemani *et al.*, 2001]

En Europe, l'augmentation des températures est importante dans la plupart des régions viticoles. Jones (2005) a analysé l'évolution de la température moyenne de la saison végétative dans 9 vignobles européens. L'augmentation moyenne de la température a été d'environ 2°C (Tn : 1,9°C, Tx : 1,8°C). L'intensité de ce réchauffement est plus prononcée au printemps et en été. Concernant les indices bioclimatiques, les degrés-jours ont augmenté dans 8 des 9 régions, la hausse étant comprise entre 165 unités (à Aloxe-Corton en Bourgogne) et 416 unités (Bordeaux). Une telle évolution implique des changements de classification de ces climats viticoles, chaque catégorie de l'indice de Winkler ayant une amplitude d'environ 300 unités. L'indice de Huglin a également augmenté pour 6 de ces 9 vignobles et en moyenne de 285 unités, impliquant là aussi des changements de catégories climatiques. Santos *et al.* (2012) ont plus récemment confirmé cette hausse des indices de Winkler et de Huglin en Europe (Figure II.9). Cette hausse est ainsi comprise pour les deux indices entre 100 et plus de 400 unités selon les pays. Les régions où les deux indices ont le plus augmenté se situent en Afrique du Nord où le gain est souvent supérieur à 400 unités en Algérie et en Tunisie. La hausse de l'indice de Winkler est également importante à l'est de l'Espagne et dans le centre et le sud de l'Italie, alors que l'indice de Huglin a augmenté fortement dans de nombreuses régions du sud et de l'ouest de l'Europe (France, Italie, Espagne ...) (Santos *et al.*, 2012).

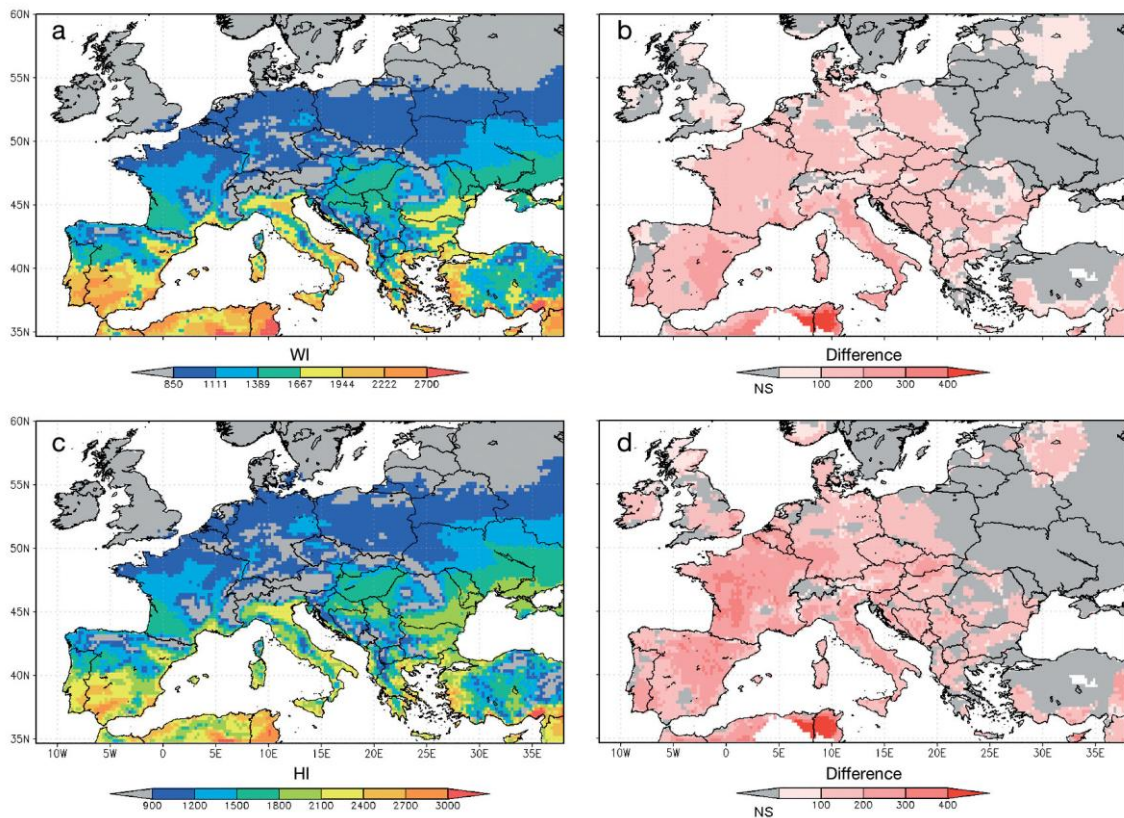


Figure II.9. Indice de Winkler calculé en Europe sur la période 1950-2009 (a) et différence entre les deux médianes de l'indice des périodes 1980-2009 et 1950-1979 (b). Indice de Huglin calculé en Europe sur la période 1950-2009 (c) et différence entre les deux médianes de l'indice des périodes 1980-2009 et 1950-1979 (d).

Source : [Santos *et al.*, 2012]

D'autres auteurs comme White *et al.* (2006) ont réalisé des cartes illustrant les changements prévus aux Etats-Unis concernant les différents indices bioclimatiques (Figure II.10). Les résultats ont été obtenus à partir des simulations du modèle RegCM3 du SRES pour deux périodes : la période dite d'intégration (1961-1989) et la période future avec le scénario A2 (2071-2099). On observe ainsi une augmentation de l'indice des degrés jours pour la saison végétative généralisée et compris entre 600 et 800 unités dans les zones viticoles les plus renommées, ce qui correspondrait dans certains cas à une évolution vers deux catégories climatiques supérieures. Ils se sont également intéressés au nombre de jours chauds ($T_x > 35^\circ\text{C}$), qui devrait augmenter, et au nombre de jours froids ($< -12,2^\circ\text{C}$ en hiver et $< -6,7^\circ\text{C}$ en automne et au printemps) qui devrait diminuer. Ils ont pu ainsi montrer que l'amplitude thermique diurne moyenne sur la saison végétative diminuerait tout comme celle calculée sur la période de maturation du raisin, ce qui serait un frein à la bonne maturation de certains cépages.

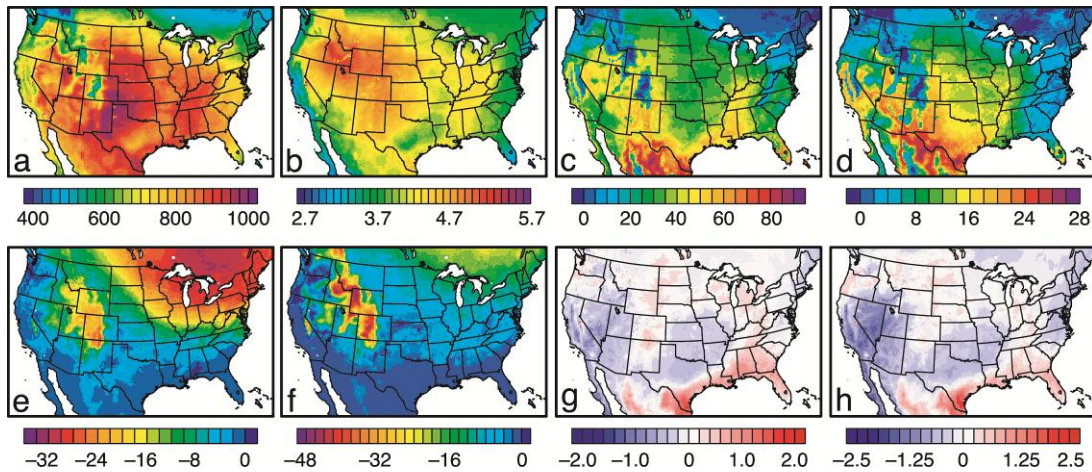


Figure II.10. Changements entre les périodes d'intégration (1961-1989) et future (2071-2099 ; scénario A2) simulés par le modèle RegCM3 du SRES. (a) Degrés-jours ; (b) Température moyenne saisonnière ; (c) Journée chaudes ($T_x > 35^\circ\text{C}$) durant la saison végétative ; (d) Jours chauds ($T_x > 35^\circ\text{C}$) durant la période de maturation ; (e) Jours froids hivernaux ($T_n < -12,2^\circ\text{C}$) ; (f) Jours froids en automne et au printemps ($T_n < -6,7^\circ\text{C}$) ; (g) amplitude thermique diurne moyenne sur la saison végétative ; (h) amplitude thermique diurne moyenne sur la période de maturation.

Source : [White *et al.*, 2006]

En France, une évolution vers des climats viticoles plus chauds est également notée par de nombreux auteurs. Madelin *et al.* (2010) montrent que la température moyenne d'avril à septembre est passée de 15-16°C à 17-18°C selon les stations de référence de la région Bourgogne (Figure II.11). Une augmentation de la température a également été observée dans le Languedoc, dans le Bordelais et en Provence (Tondut *et al.*, 2006 ; Bois et Van Leeuwen, 2008 ; Bridier et Quénel, 2010).

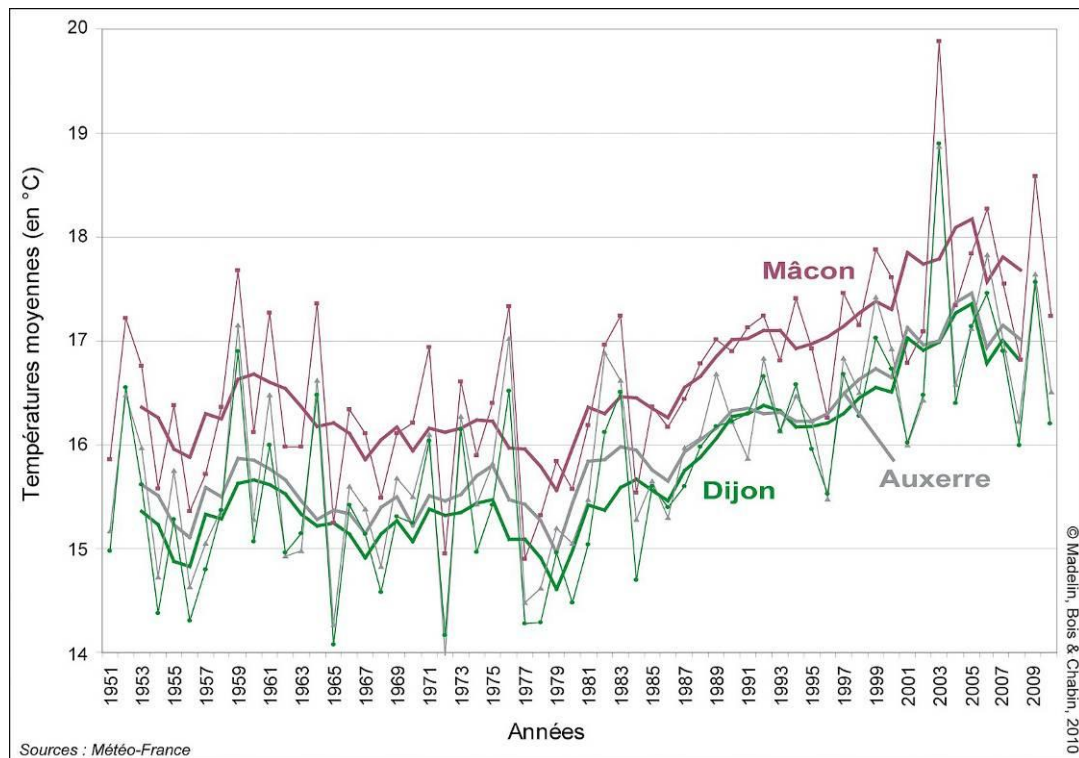


Figure II.11. Evolution de la température moyenne sur la période d'avril à septembre et pour trois stations régionales de Bourgogne.

Source : [Madelin *et al.*, 2010]

Seguin (2007) explique qu'une nette tendance à des indices plus élevés a été montrée sur 7 sites de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) disposant de données climatiques du réseau géré par Agroclim (Angers, Avignon, Bordeaux, Colmar, Dijon, Montpellier, Valence). De la même manière Beltrando et Briche (2010) montrent que l'indice de Huglin est passé de la catégorie de climat très frais à frais à Reims Courcy entre 1979 et 2006. Tondut *et al.* (2006) montrent également une augmentation de la température minimale dans le département de l'Hérault, ainsi que de l'indice de Huglin qui est, depuis 1987, systématiquement supérieur à 2200 alors que celui-ci était compris entre 1700 et 2100 dans les années 1970-1980. Seguin (2007) précise que « ce climat, manifestement plus chaud et plus régulier, est évidemment favorable à la production viticole, comme l'attestent des informations des milieux professionnels sur l'augmentation de la teneur en sucre et la baisse de l'acidité au cours de cette période ».

Ces différentes observations sur l'évolution de la température et des indices bioclimatiques nous interrogent sur le climat futur sous lequel seront cultivés les vignobles. Des simulations, intégrant différents scénarios pour l'avenir, ont donc été faites au sein du GIEC afin d'évaluer notamment les impacts possibles sur les activités agricoles.

II.2. Les simulations futures du climat à partir des modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA)

Afin d'évaluer les impacts futurs des changements climatiques, le GIEC (2001) propose plusieurs scénarios d'émissions de GES pour le XXI^{ème} siècle en accord avec les différentes perspectives socio-économiques et politiques. Les différents scénarios retenus par le groupe d'experts sont ici présentés, ainsi que les conséquences attendues notamment sur la température mais aussi sur l'agriculture et la viticulture.

II.2.1. Les simulations futures du climat mondial

Les MCGA sont des outils indispensables à la simulation du climat futur dans le contexte du changement climatique. C'est pourquoi le GIEC utilise une panoplie de différents modèles globaux afin d'évaluer les évolutions du climat dans les différents continents. Ce sont des outils mathématiques complexes basés sur les équations fondamentales qui régissent l'atmosphère. L'atmosphère et les océans sont ainsi découpés en mailles à 3 dimensions de 200 à 300 km de côté (Lauffenburger, 2007 ; GIEC, 2007 ; Beltrando et Briche, 2010 ; Jouzel, 2011).

II.2.1.1. Les différents scénarios du GIEC

Le GIEC a établi différents scénarios d'émissions de GES pour la planète. Ces scénarios sont le produit de systèmes dynamiques très complexes déterminés par des forces motrices telles que la croissance démographique, le développement socio-économique et l'évolution technologique. Les incertitudes sont donc relativement importantes et ces scénarios ne

constituent que des images possibles du futur. La Figure II.12 ne montre que les quatre grandes familles de scénarios d'émissions car dans la réalité ces derniers sont au nombre de 40. Les scénarios A1 et A2 sont plus tournés vers un monde privilégiant l'économie à l'environnement alors que la situation est inverse pour les scénarios B1 et B2. Ces quatre grands scénarios peuvent en réalité être subdivisés en 6 familles (A1F1-A1T-A1B-A2-B1-B2) et l'ensemble de ces scénarios sont décrits dans le rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (SRES) (GIEC, 2007).

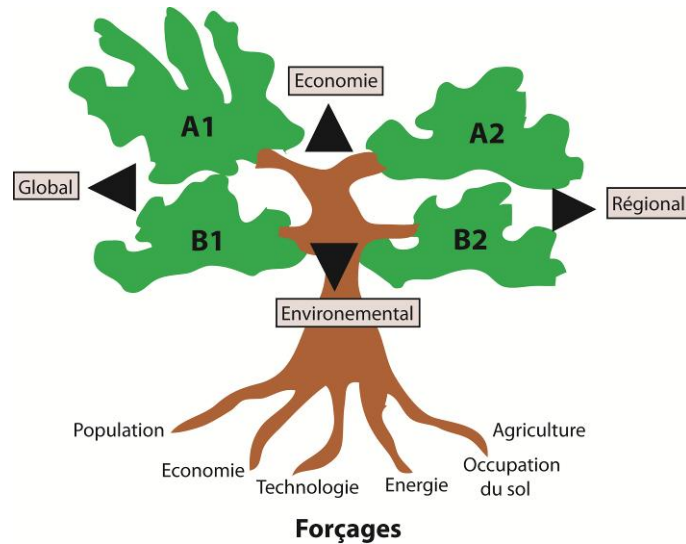


Figure II.12. Différents scénarios du SRES (d'après GIEC, 2001)

Dans le détail voici la définition de chaque type de scénarios :

A1 : Globalisation, accent sur le développement de l'économie au niveau mondial

Ce scénario décrit un monde futur tourné vers un développement économique très rapide avec un pic de population au milieu du 21^{ème} siècle avant un déclin et l'introduction rapide de nouvelles technologies plus respectueuses de l'environnement. La plupart des thèmes fondamentaux sont envisagés de manière commune entre les pays, améliorant ainsi les interactions culturelles et sociales. La famille des scénarios A1 se décompose en trois groupes qui correspondent à différentes alternatives au niveau des changements technologiques. Ils se distinguent donc par les différents accents technologiques qui seront donnés : énergies fossiles (A1F1), énergies non-fossiles (A1T), ou un mixte des deux sources d'énergie (A1B).

A2 : régionalisation, accent sur le développement des économies au niveau régional

Le scénario A2 décrit un monde futur très hétérogène. Le but commun est la préservation des identités locales. Les indices de fécondité entre les pays convergent très lentement ce qui fait que la population croît de manière continue. Le développement économique est clairement orienté au niveau régional et les changements de technologies sont plus fragmentés et plus lents que pour les autres scénarios.

B1 : Globalisation, accent sur le développement durable et l'équité mondiale

Le scénario B1 décrit un monde convergent avec une population mondiale qui atteint un pic au milieu du siècle puis décroît mais avec des changements rapides dans les structures économiques à travers une économie de services et de l'information accompagnés de l'introduction de technologies propres et durables. Le but commun s'oriente vers des solutions globales au niveau de l'économie, l'aspect social et le développement durable mais sans engagement supplémentaire concernant le climat.

B2 : Régionalisation, accent sur le développement durable et l'équité au niveau régional

Le scénario B2 décrit un monde dans lequel sont adoptées les solutions locales aux problèmes économiques, sociales et de développement durable. C'est un monde avec une population en perpétuelle croissance mais à un rythme plus faible que pour A2, des niveaux intermédiaires de développement économiques et des changements technologiques plus divers et moins rapides que pour les scénarios B1 et A1. Pendant que ce scénario est strictement orienté vers la protection environnementale et l'équité sociale, il se concentre sur un développement au niveau local et régional.

II.2.1.2. Vers de nouveaux scénarios.

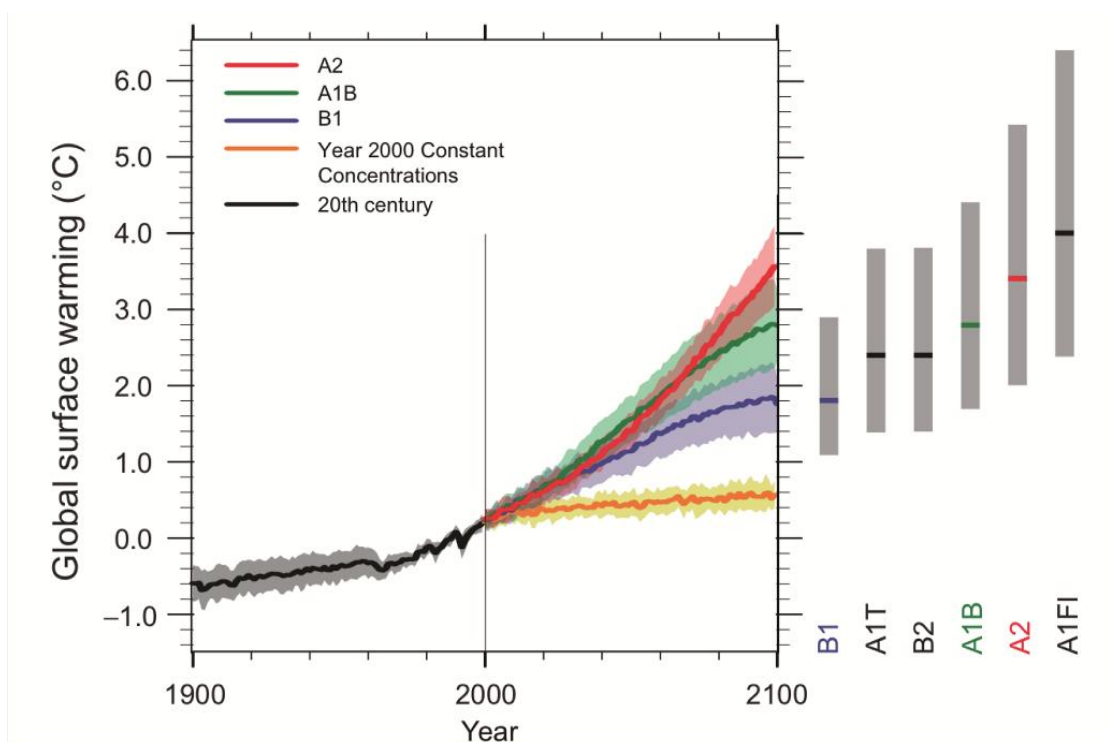
De nouveaux scénarios, qui serviront aux simulations climatiques du 5^{ème} rapport du GIEC, viennent plus récemment d'être publiés (Van Vuuren *et al.*, 2011). En effet, la communauté scientifique a réadapté les précédents scénarios décrits ci-dessus suite à l'évolution du monde socio-économique, des politiques menées et de l'amélioration des techniques de modélisation. Ces nouveaux scénarios désormais appelé « RCPs » ou *Representative Concentration Pathways* sont innovants en de nombreux points. Ils comportent à la fois des scénarios d'émissions élevées de GES et des scénarios d'émissions faibles, prenant en compte la volonté politique de certains pays pour atténuer les changements climatiques. Les scénarios d'émissions du 4^{ème} rapport du GIEC de 2007 ne tenaient pas compte des politiques de mitigations du changement climatique. Deuxième innovation, les scénarios fournissent une information sur une grille de 0,5° de latitude et de longitude (grille de 50 km de côté environ) pour l'utilisation des sols et les émissions de GES. Ils couvrent également une plus longue période (2000-2300) afin d'évaluer les impacts climatiques à plus long terme. Ces nouvelles simulations ont été considérablement améliorées grâce à de meilleures capacités de calcul et la diminution des incertitudes.

II.2.2. Les évolutions attendues du climat

II.2.2.1. Les évolutions du climat futur à l'échelle mondiale

Une augmentation des températures

A partir des scénarios socio-économiques établis par les experts du GIEC, des modélisations climatiques ont été réalisées à l'aide de Modèles de Circulation Générale de l'Atmosphère (MCGA). A l'image des scénarios divergents, les projections en termes d'augmentation de température sont sensiblement différentes (Figure II.13). Le scénario A2, le plus pessimiste, voit une augmentation de la température de surface du globe de 3 à 4°C environ alors que le scénario B1, le plus optimiste, voit une augmentation entre 1,5 et 2,5°C. Les incertitudes sont encore nombreuses autour de ces moyennes, étant donné la complexité du système climatique et des facteurs impliqués dans ces processus. Les prochains scénarios RCPs devraient permettre d'améliorer la fiabilité des sorties de modèles grâce à l'amélioration des techniques de modélisation faite au cours de la dernière décennie.



Source : [GIEC, 2007]

Un changement dans la distribution des températures

Les changements climatiques devraient également bouleverser la courbe de distribution des températures (Figure II.14). L'augmentation de la température provoquera un décalage de la moyenne vers des valeurs plus élevées. Dans le même temps, une augmentation de la

variabilité se produira très certainement avec ainsi plus de contrastes de températures. Enfin, nous devrions assister à une modification de la symétrie de la courbe de distribution et donc cette dernière suivrait une distribution un peu moins normale qu'auparavant. Au final, les épisodes de temps froids et extrêmement froids devraient rester quasi-constants alors que les vagues de chaleurs avec des températures élevées à extrêmement élevées devraient se multiplier. Ces projections ne seraient pas du tout favorable à la vigne, qui comme on l'a vu dans le premier chapitre est une plante très vulnérable à la fois aux chaleurs extrêmes, notamment en période de maturation du raisin et aux épisodes de gel printanier.

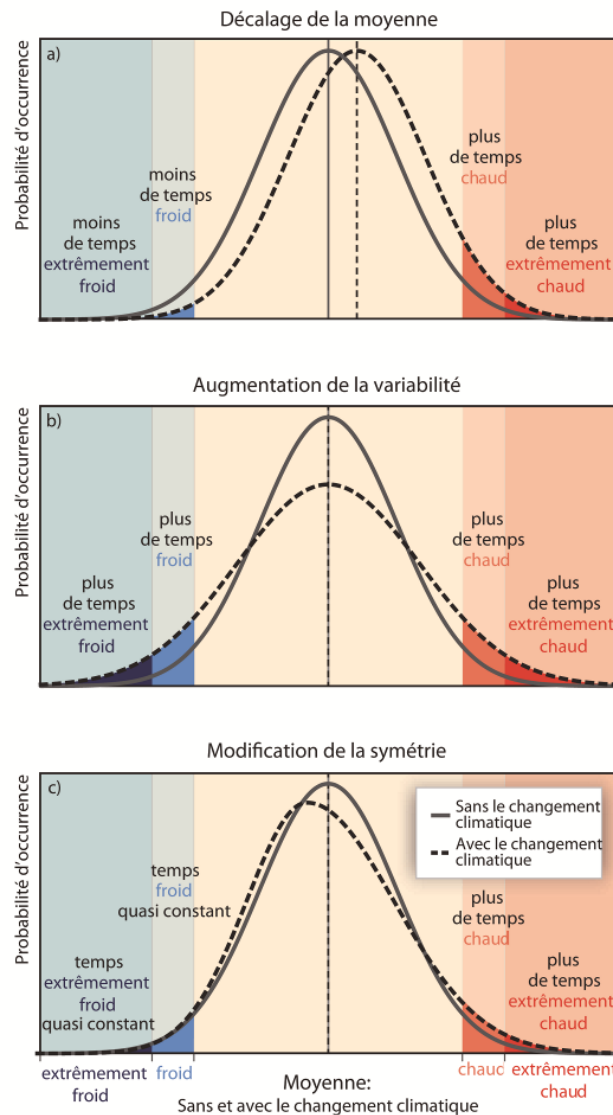


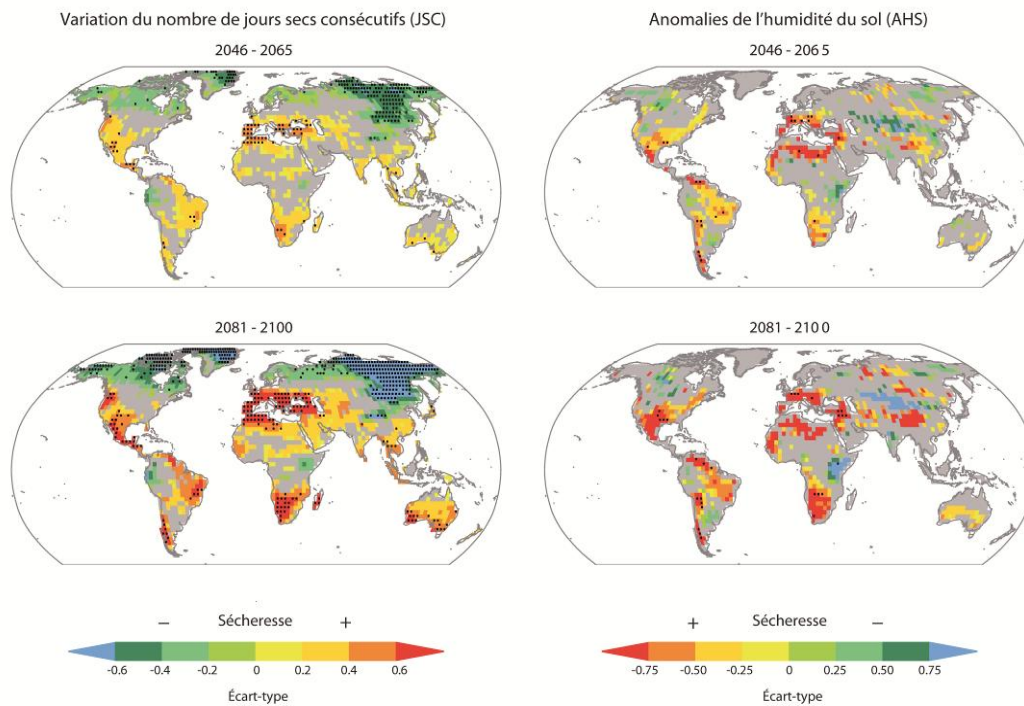
Figure II.14. Effets sur les valeurs extrêmes de l'évolution de la distribution des températures.

Source : [GIEC, 2012]

Une plus forte variabilité spatiale des précipitations

Le réchauffement du système climatique global va également impliquer une évolution d'autres paramètres climatiques, telles que les précipitations et donc l'humidité des sols. Certaines zones devraient connaître ainsi une augmentation des précipitations due

notamment à une évaporation des océans plus importantes alors que d'autres au contraire connaîtront des périodes de sécheresse à répétition (Figure II.15). Selon le scénario A2, les zones les plus concernées par ces risques de sécheresse seront situés dans la plupart des climats méditerranéens de la planète (Afrique du sud, sud de l'Europe, Californie, Chili, Australie) où l'on trouve d'ailleurs une grande partie des vignobles mondiaux. D'autres régions comme le Sahel, le nord-est du Brésil ou du Mexique devraient également connaître une plus grande proportion de jours secs et une humidité des sols en régression (GIEC, 2012).



Source : [GIEC, 2012]

II.2.2.2. Les évolutions des conditions thermiques futures en zones viticoles

Les modèles montrent que le climat va se modifier dans les différentes zones viticoles mondiales. La température moyenne saisonnière devrait sensiblement augmenter selon les différents scénarios envisagés par le GIEC. Jones *et al.* (2005) montrent que les projections du modèle HadCM3, qui a été développé au *Hadley Center* (Gordon *et al.*, 2000 ; Pope *et al.*, 2000) et utilisé pour les scénarios SRES du GIEC, prévoient une augmentation généralisée de la température moyenne de la saison végétative dans 27 régions viticoles pour le scénario A2. Ainsi, la température moyenne devrait augmenter sur la période 2000-2049 d'environ 1,5°C dans la vallée du Rhin, 2°C dans la vallée de Borossa, 2,2°C dans le nord de la Californie et jusqu'à 2,3°C dans la région Bordelaise (Figure II.16). Ces mêmes auteurs précisent qu'il est attendu que l'augmentation de la température soit plus marquée dans les vignobles de l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud, ce qui rejoint ce qui a déjà été observé au cours du XX^{ème} siècle. C'est ainsi que les vignobles du nord-ouest des Etats-Unis devraient connaître la plus forte hausse et à l'inverse ceux d'Afrique du Sud la plus faible. Cette augmentation de la température risque de provoquer des changements de catégories

climatiques pour de nombreux vignobles et certains cépages devraient atteindre leur optimum climatique et devront alors être substitués à d'autres, quand cela sera encore possible.

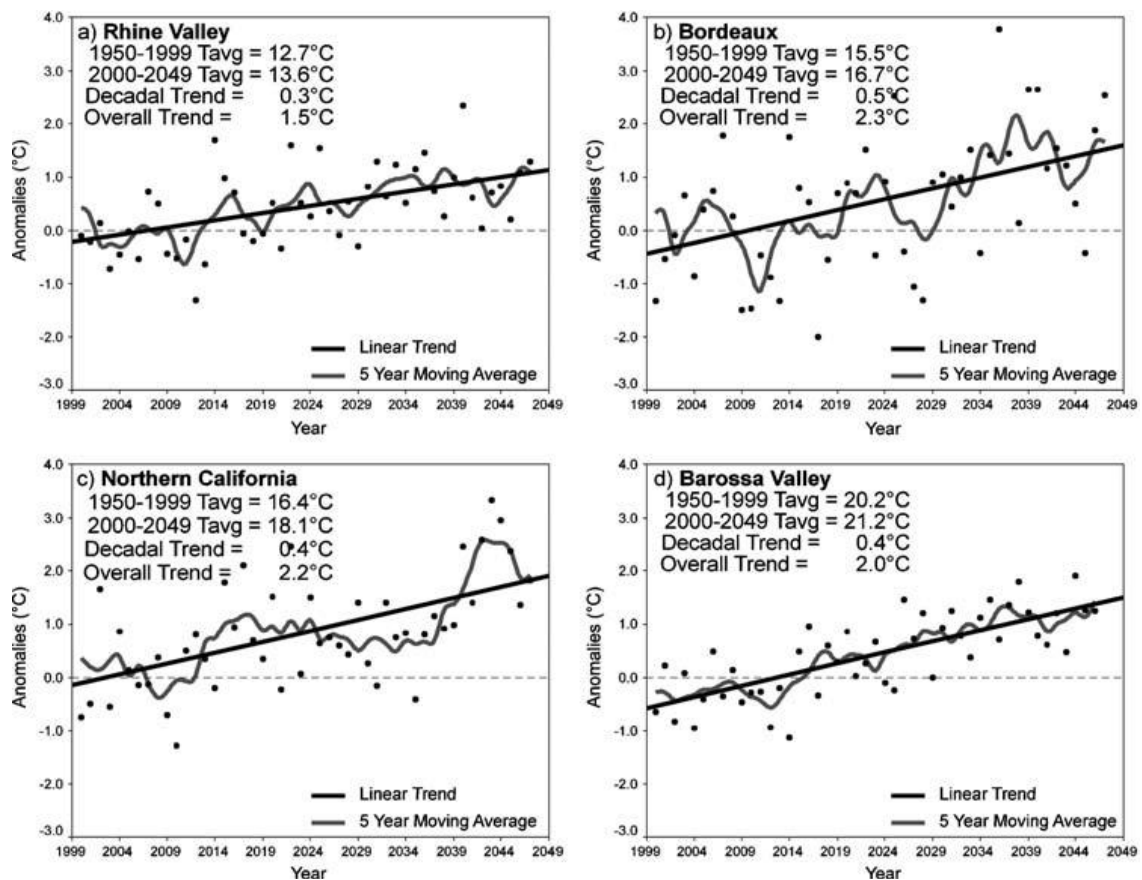


Figure II.16. Evolution de la température moyenne de la saison végétative modélisée (scénario A2) par le modèle HadCM3 pour la vallée du Rhin (a), la région bordelaise (b), le nord la Californie (c) et la vallée de Barossa en Australie (d). Les anomalies ont été calculées à partir de la normale de référence de la période 1950-1999 du modèle. Source : [Jones *et al.*, 2005]

En France, Briche (2011) a proposé des projections de températures extrêmes et dommageables pour la vigne dans le vignoble de Champagne (Figure II.17) pour trois scénarios du SRES et à partir du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France qui possède une résolution de 50 km. Le nombre de jours avec températures inférieures à -2°C devraient diminuer au mois de mars d'après les trois scénarios retenus dans cette étude alors que le nombre de jours avec températures supérieures à 35°C devrait augmenter.

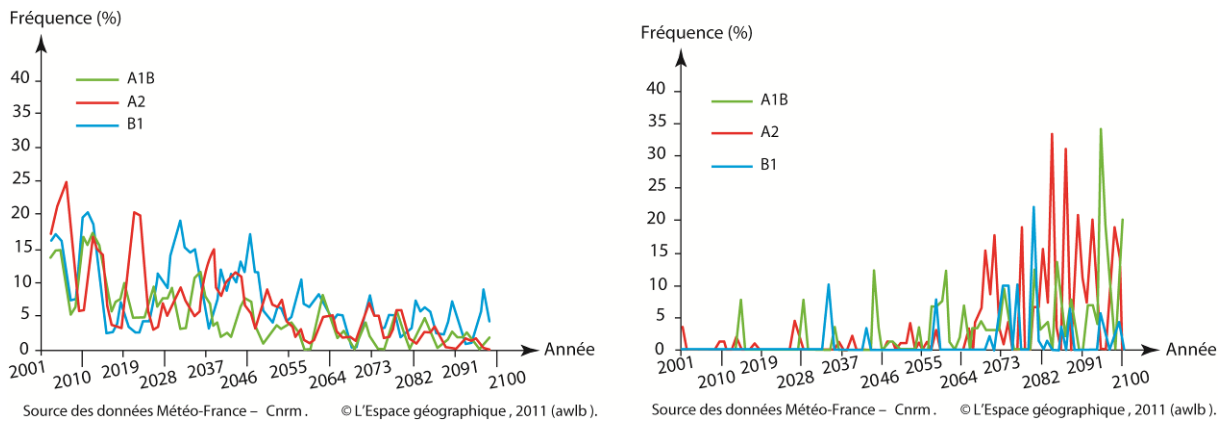


Figure II.17. Moyenne mobile pondérée sur cinq ans des fréquences de températures inférieures à -2 °C en mars pour le point de grille de Reims (Champagne) sur trois scénarios futurs (à gauche) et fréquences des extrêmes chauds (supérieurs à 35 °C) en été (juin, juillet et août) pour les trois scénarios de simulations futures de 2001 à 2100 avec le même point de grille (à droite). Source : [Briche *et al.*, 2011]

II.3. Impacts observés et attendus dans les domaines agricoles et viticoles

II.3.1. L'agriculture face à ces changements climatiques

Les changements climatiques agissent et vont encore agir à différents niveaux d'échelles de temps et d'espace, influençant ainsi la physiologie des plantes, la compétition entre les espèces, et la distribution planétaire des écosystèmes (Lindner *et al.*, 1997). L'agriculture constitue l'un des plus larges secteurs d'emploi dans de nombreux pays développés et en développement (Oram, 1989). D'ici 2020 la population mondiale devrait excéder les 8 milliards d'êtres humains, en sachant qu'actuellement on évalue au nombre de 1 sur 7 les individus souffrant de la famine dans le monde. Les enjeux sont donc très importants, à la fois économiquement, socialement et humainement.

II.3.1.1. Des effets plutôt bénéfiques ...

Les changements climatiques ont des effets sur l'agriculture et nos écosystèmes (Rosenweig et Hillel, 1998; Reddy et Hodge, 2000, Soussana, 2001). Des conséquences ont déjà été observées dans certaines régions dans le monde. La baisse de l'occurrence du gel a été associée avec une augmentation des rendements et une meilleure qualité de la récolte (Harrison *et al.* 2000 ; Nemani *et al.*, 2001). Sirotenko *et al.* (1997) ont observé une plus grande variabilité des rendements en Europe de l'est. Olesen et Bindi (2002) ont montré une augmentation des rendements de blé en Norvège, au Royaume Uni, en France et en Italie depuis les années 1970 (Figure II.18). Nicholls (1997) a également parlé de croissance des rendements concernant la production de blé en Australie. Entre 1960 et 1995, la durée de la saison végétative de diverses plantes de jardins botaniques européens s'est rallongée (Figure II.18).

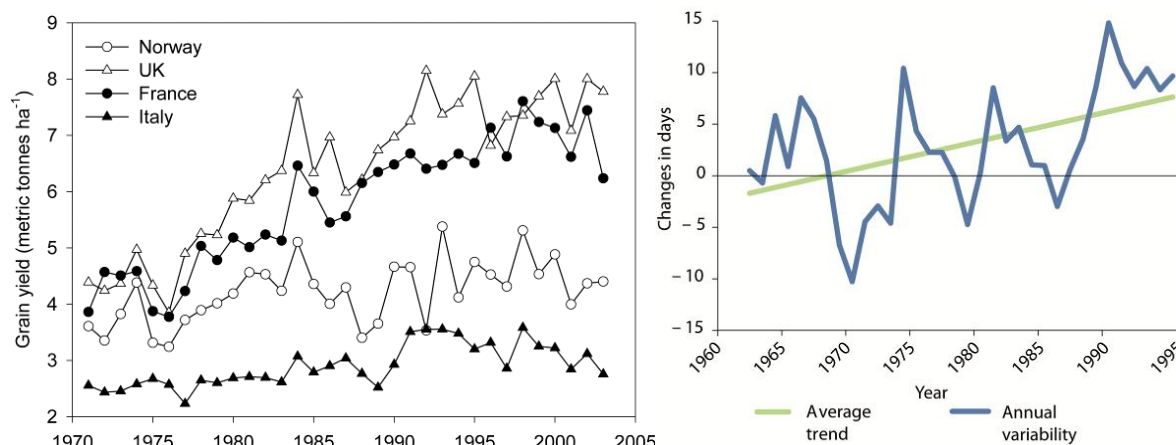


Figure II.18. Evolution des rendements de blé dans quatre pays européens de 1970 à 2005 à gauche, Source : [Olesen et Bindi, 2002], et allongement de la durée de la saison végétative entre 1960 et 1995 à droite (données : Jardins Botaniques Internationaux d'Europe, sauf France, péninsule Ibérique, moyenne et basse Italie et Grèce), Source : [Menzel, 2002 ; Menzel et Fabian, 1999].

II.3.1.2. ... mais un grand nombre d'effets plutôt néfastes

Le Tableau II.1 résume quelques-uns des impacts que peuvent avoir les changements climatiques en termes de températures sur l'agriculture. La hausse de la température provoque notamment une prolifération de parasites, un raccourcissement de la période de gel et très souvent une baisse de l'humidité des sols. Ces observations entraînent en particulier un décalage des cultures plus au nord et des cas de sécheresses dommageables pour l'agriculture dans certains pays.

Tableau II.1. Les effets et impacts des changements climatiques sur l'agriculture (d'après Amphoux et al., 2003)

| Facteur climatique | Effets | Impacts sur l'agriculture |
|---------------------------------|---|---|
| Hausse de la température | Hausse plus importante au nord | Décalage des cultures et rendements plus élevés au nord |
| | Prolifération de parasites | Apparition de nouvelles cultures dans les plus hautes latitudes |
| | Raccourcissement des périodes de gel | Effets nuisibles sur les récoltes Possible utilisation massive de pesticides ayant des impacts sur l'environnement |
| | Impacts sur l'humidité et les ressources en eau | Effets négatifs, risques de sécheresse surtout au sud |

D'après certains scénarios modérés du réchauffement climatique le pourcentage d'espèces végétales stables en 2100 par rapport au nombre d'espèces observé en 1990 pourrait diminuer sensiblement en Europe (Figure II.19). Les régions les plus menacées sont situées dans le sud de l'Europe, du sud de l'Espagne à la Mer Noire en passant par le sud de la France, l'Italie, la Roumanie ou la Croatie. Les régions européennes les plus septentrionales devraient conserver une plus grande part de leur biodiversité (EAA, 2004).

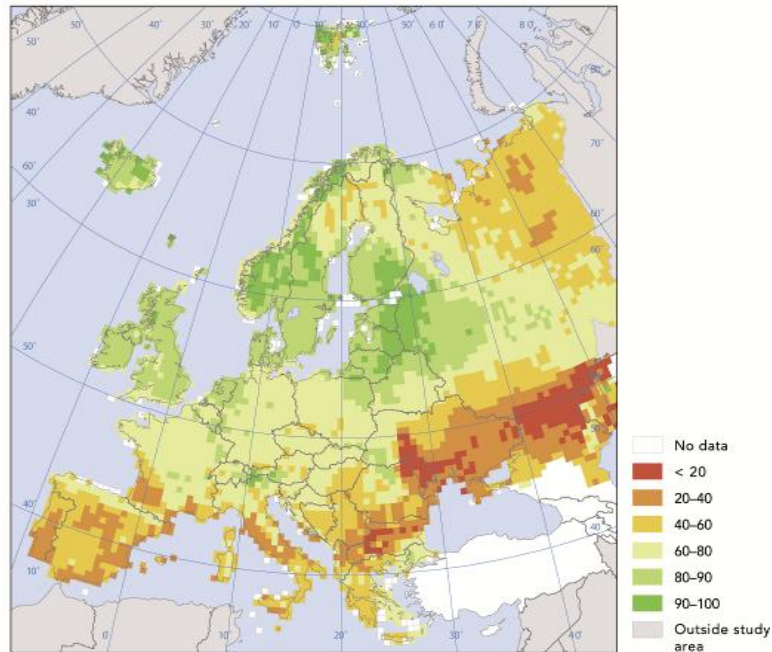


Figure II.19. Pourcentage d'espèces végétales stables en 2100 par rapport au nombre d'espèces en 1990. Le scénario choisit ici est un scénario de réchauffement modéré (+3°C à l'échelle globale et +3,3°C en Europe). Source : [EAA, 2004]

II.3.2. La viticulture face aux changements climatiques

Nous avons vu dans le premier chapitre de cette thèse que la vigne est très sensiblement liée aux facteurs climatiques et en particulier à la température. Celle-ci réagit donc particulièrement aux changements climatiques. Etant également une plante pérenne, à l'inverse du maïs ou du blé par exemple, et son cycle phénologique étant très étudié depuis des siècles, cette plante permet un suivi précieux des impacts des évolutions climatiques.

II.3.2.1. Une précocité des stades phénologiques

Le cycle phénologique de la vigne a été affecté par les derniers changements climatiques. On observe notamment une précocité des différents stades phénologiques liée à la hausse des températures plus ou moins généralisée à l'ensemble des pays viticoles.

En Europe, les différents stades phénologiques se produisent 6 à 25 jours plus tôt aujourd'hui qu'il y a 30 à 50 ans et la durée inter-stades a diminué de 14 à 17 jours (Jones, 2006 ; Ramos *et al.*, 2008). Plus spécifiquement en France, Délécolle *et al.* (1999) et Seguin (2002) ont montré une précocité significative de 3 semaines (Bordeaux) à un mois (Colmar) dans la date de floraison du cépage Chasselas. Les observations phénologiques de Montreuil-Bellay (Val de Loire) ont montré des dates de vendanges avancées de 10 à 20 jours depuis 1976 (Barbeau, 2007). En Alsace, les stades phénologiques interviennent de 15 à 23 jours plus tôt que dans les années 1940 (Figure II.20). Au même moment, la période entre floraison et maturation s'est raccourci de 8 jours. A Beaune, en Bourgogne, ce raccourcissement a été associé à une augmentation de la température maximale du mois d'août depuis 1990 (Bonnardot, 1996) et les dates de vendanges étaient deux semaines en avance à la fin du 20^{ème} siècle que dans les années 1960-70 (Madelin *et al.*, 2008). A

Bordeaux, la saison de croissance de la vigne dure 13 jours de moins que durant la période 1952-1997 (Jones et Davis, 2000).

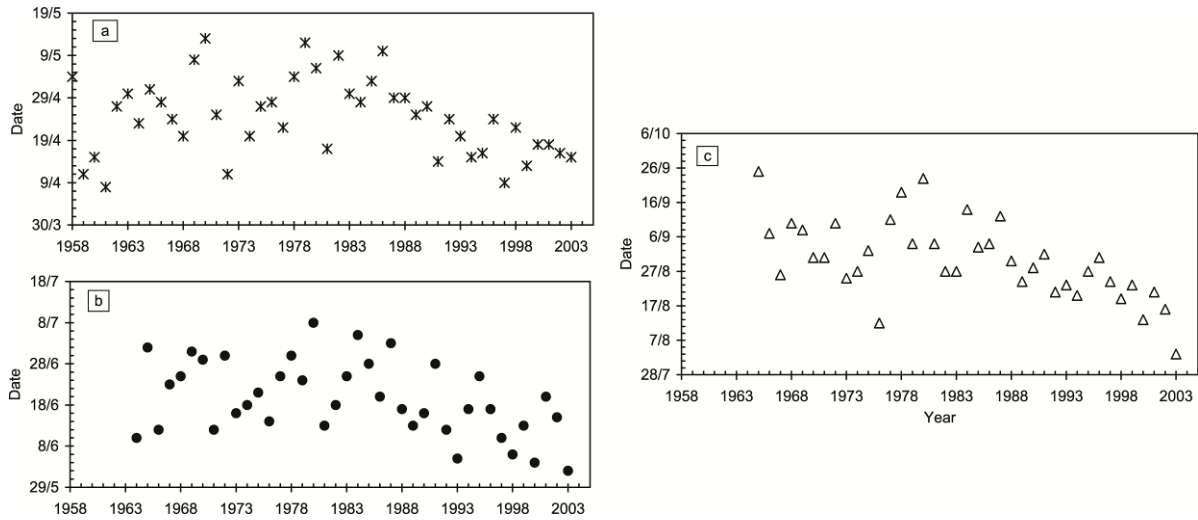


Figure II.20. Evolution des dates des stades de débourrement (a), floraison (b) et véraison (c) du cépage Riesling à Bergheim (Alsace)

Source : [Duchêne et Schneider, 2004]

II.3.2.2. Des migrations des conditions de culture

Dans le passé, la vigne a déjà pu être cultivée à des latitudes bien plus élevées qu'aujourd'hui, du fait de conditions particulièrement clémentes sur de plus ou moins longues périodes. Jones *et al.* (2005) expliquent que la vigne était observée jusqu'au sud de l'Angleterre et au bord de la mer Baltique au courant de l'optimum climatique du IX^{ème} au XIII^{ème} siècle. Aujourd'hui, en raison des changements climatiques actuels, la migration des conditions favorables à la culture de la vigne vers le nord de l'Europe a pu être constatée à nouveau, notamment en Angleterre où les espaces cultivés en vigne gagnent en superficie (Kenny et Shao, 1992 ; Reilly *et al.*, 1996 ; Palutikof, 2000). On considère en effet qu'une hausse de la température de 1°C en moyenne équivaut à une possible migration de la vigne à 160 km vers le nord pour l'hémisphère nord.

Les migrations des conditions de culture ne se font pas uniquement en latitude mais aussi en altitude. C'est par exemple ce qu'ont montré Chabin *et al.* (2007) pour la Bourgogne où les conditions thermiques des Hautes Côtes aujourd'hui sont devenues celles de la Côte il y a une trentaine d'années (Figure II.21).

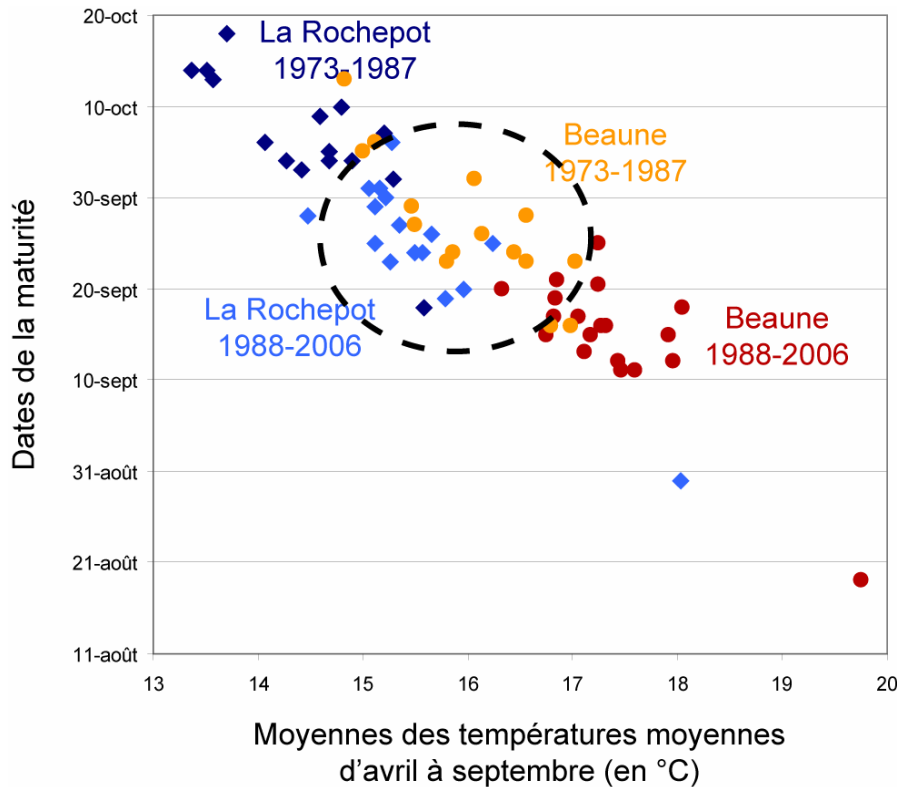


Figure II.21. Relation entre les dates de maturité du raisin et la température moyenne de la saison végétative de la vigne.

Source : [Chabin *et al.*, 2007]

C'est ainsi de nouvelles potentialités viticoles qui pourraient voir le jour d'ici les prochaines décennies dans l'hypothèse de la poursuite du réchauffement climatique alors que d'autres secteurs plus bas en altitude et habituellement plus favorables deviendront moins propices à la culture de la vigne. Enfin, plusieurs études ont également montré les migrations probables de vignobles vers des zones côtières plus fraîches comme en Australie (Webb *et al.*, 2007; Hall et Jones, 2010), en Nouvelle Zélande (Salinger, 1987), Afrique du Sud (Bonnardot et Carey, 2008 ; Bonnardot *et al.*, 2011) ou en Amérique du Nord (Lobell *et al.*, 2006 ; White *et al.*, 2006 ; Jones *et al.*, 2010). Ainsi, certaines terres cultivées aujourd'hui en vigne seront perdues mais d'autres deviendront tout à fait favorables à cette culture. La Figure II.22 illustre la perte potentielle de terres cultivées en vignoble d'ici la fin du XXI^{ème} siècle aux Etats-Unis.

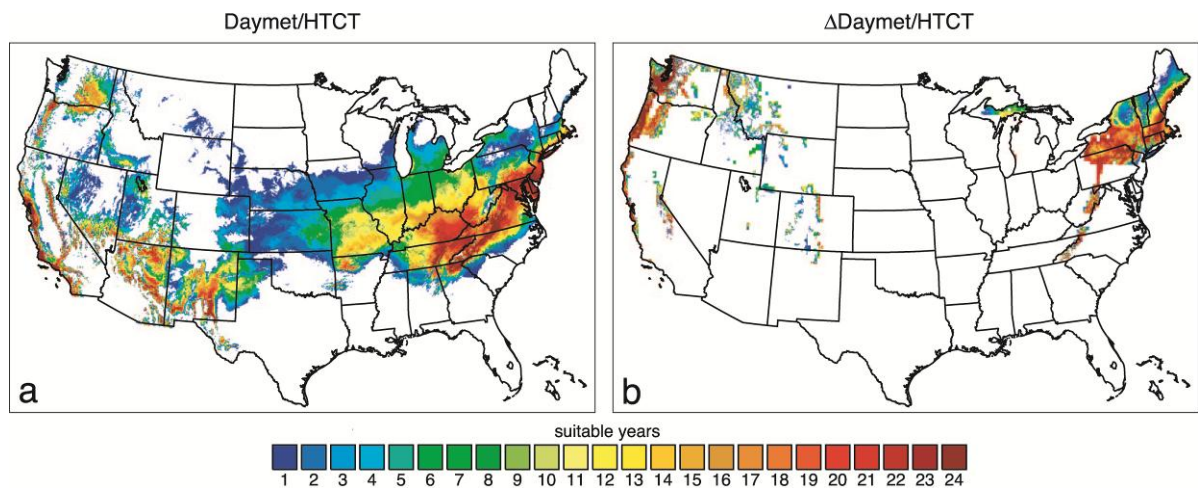


Figure II.22. Nombre d'années (sur des périodes de 24 ans) avec conditions thermiques appropriées pour la culture de cépages tolérants à la chaleur et au froid aux Etats-Unis à la fin du XX^{ème} (a) et du XXI^{ème} siècle.
 Source : [White *et al.*, 2006]

II.3.2.3. Des changements dans la qualité des raisins

Les conditions météorologiques d'une année sur l'autre agissent sur la qualité des vins produits (Galet, 2000). Chaque année correspond alors à un millésime dont la qualité est plus ou moins appréciée. L'augmentation des températures agit ainsi sur la composition chimique des raisins à maturité et donc sur la composition des vins. En effet, il existe une corrélation positive jusqu'à un certain seuil entre la température et la qualité des vins produits (Jones et Davis, 2000 ; Jones *et al.*, 2005 ; Jones, 2007). La Figure II.23 montre la relation entre la température moyenne de la saison végétative et la côte du millésime pour quatre régions viticoles. Il apparaît que la température moyenne optimale de la saison végétative est d'environ 13,7°C en Alsace pour les vins blancs, de 16,7°C dans le Val de Loire pour les vins liquoreux, de 17,3°C pour les vins rouges de Bordeaux et de 18,6°C pour les vins rouges de l'appellation Barolo. Au-delà de ces seuils thermiques, la qualité du vin a tendance à régresser. Nous avons vu que dans le cadre des projections du GIEC les températures moyennes saisonnières vont augmenter et donc la qualité des vins pourraient diminuer dans le cas du dépassement de ces seuils notamment.

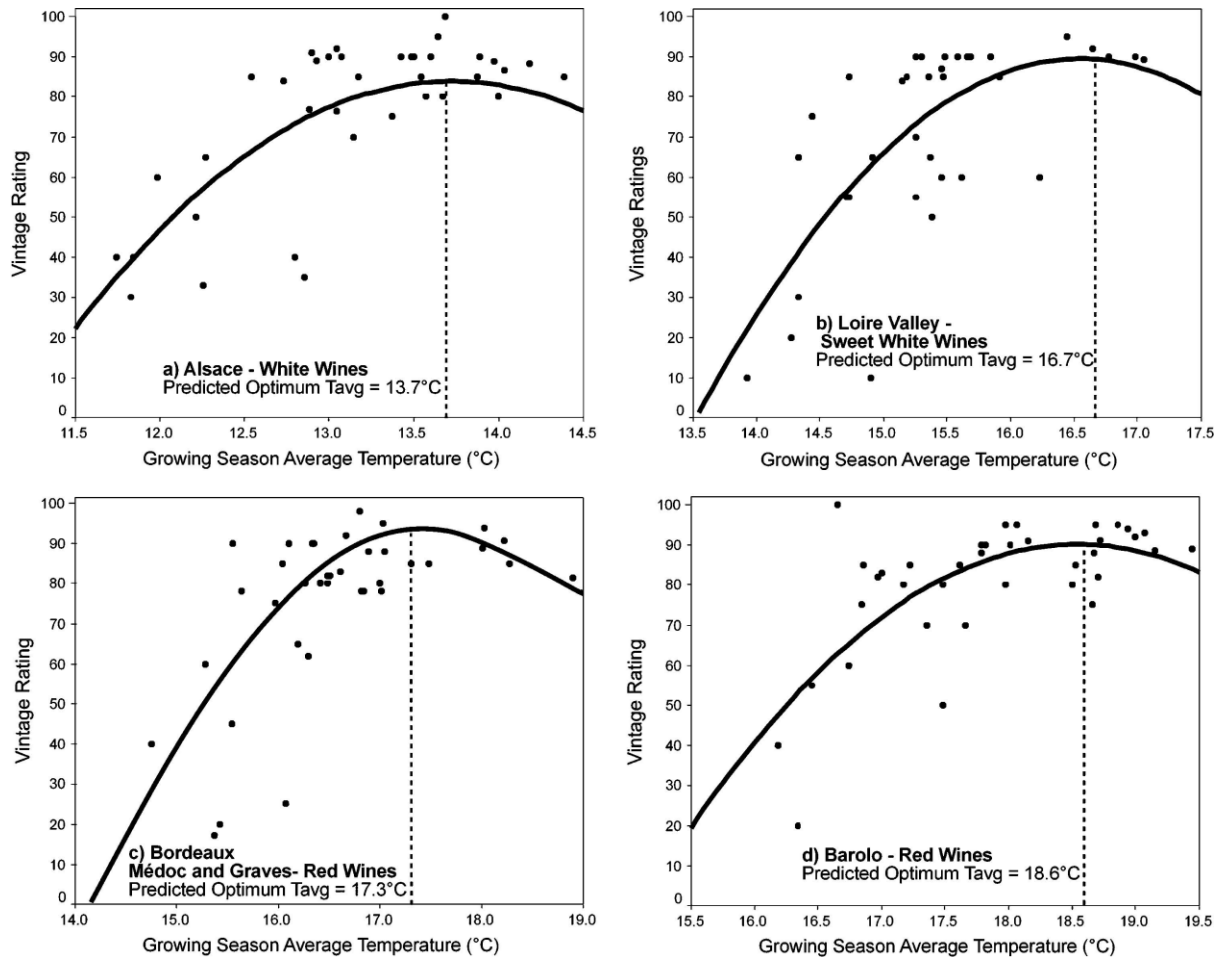


Figure II.23. Relation entre la température moyenne saisonnière et la cote des millésimes pour les vins blancs d'Alsace (a), les vins liquoreux du Val de Loire (b), les vins rouges de Bordeaux et les vins rouges de l'appellation Barolo.

Source : [Jones *et al.*, 2005]

Ces modifications de la qualité des vins sont en grande partie dues aux changements de composition des raisins, en particulier en teneur en sucre et en acidité. Par exemple, dans le Bordelais (France), sur la période 1965-2000, les cépages Cabernet Sauvignon et Merlot ont tous deux vu leur taux de sucre augmenter et leur taux d'acidité diminuer alors que le poids des baies a nettement augmenté (Figure II.24). Ces observations rejoignent les explications de Agenis-Nevers (2006) qui constate qu'un réchauffement accru comporte de nombreux enjeux car les vins risquent d'avoir des degrés d'alcool élevés, une teneur en sucre plus importante et un degré d'acidité plus faible. Ce regain de qualité des vins de Bordeaux s'explique également par un nombre de jours chauds plus important pendant la floraison et la véraison, ainsi qu'une baisse du nombre de jours de pluie pendant la phase de maturation.

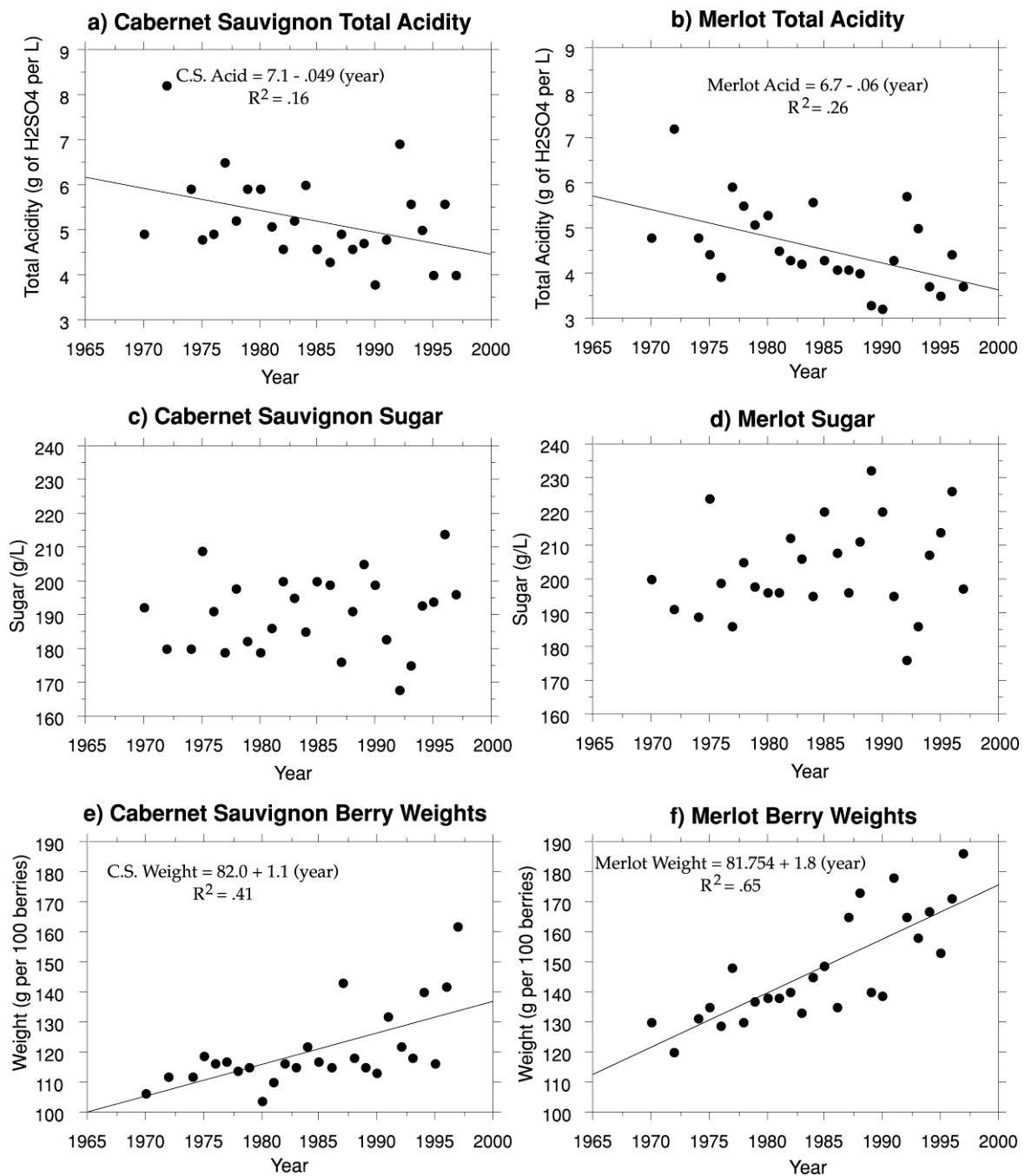


Figure II.24. Evolution de l'acidité totale, du taux de sucre et du poids des baies pour 2 cépages du vignoble bordelais en France.

Source : [Jones et Davis, 2000]

CONCLUSION DU CHAPITRE II

Une observation globale de l'augmentation de la température moyenne est constatée dans les régions viticoles. Cette hausse est beaucoup plus sensible depuis la fin des années 80, en particulier en Europe. En revanche, dans certaines régions viticoles, des différences d'évolution ont été notées entre la température minimale et maximale. Ces changements d'ordre thermique ont des conséquences sur les indices bioclimatiques. Des impacts, notamment en termes de précocité du cycle phénologique, sont observés. Les projections futures des différents MCGA prévoient une hausse de la température moyenne de 1,5°C à plus de 4°C d'ici la fin du XXI^{ème} siècle. De nombreuses questions se posent alors sur la pérennité, à long terme, de la culture de la vigne dans certaines régions. Des adaptations seront à prévoir, concernant les pratiques viticoles, en particulier dans les régions qui ont déjà atteint l'optimum climatique de leurs cépages cultivés. Enfin, d'autres régions devraient, dans un premier temps, bénéficier de ce climat plus doux, avec notamment un regain de qualité des vins produits. Les conséquences globales de cette hausse de la température ont ainsi été présentées. Dans le cadre de cette thèse, nos interrogations se portent sur notre site d'étude : le Val de Loire. Le chapitre 3 présente donc le contexte géographique, climatique et viticole de la moyenne vallée de la Loire. L'évolution de la température, depuis le milieu du XX^{ème} siècle, est également abordée. Enfin, les impacts observés sur les vignobles sont présentés et une discussion sur les adaptations possibles des pratiques viti-viticoles est proposée.

Chapitre III : LES VIGNOBLES DE LA MOYENNE VALLÉE DE LA LOIRE DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les vignobles du Val de Loire, situés à la limite nord de culture de la vigne, connaissent une importante diversité climatique notamment due à leur étendue de la région Nantaise à l'ouest, au Sancerrois à l'est (Figure III.1). Cette thèse se propose d'analyser cette variabilité climatique à la fois spatiale mais aussi temporelle, liée en particulier aux changements climatiques. Ces travaux se focalisent notamment sur la région viticole de la moyenne vallée de la Loire. Afin de pouvoir analyser les résultats de modélisation climatique future pour la région, une connaissance accrue des vignobles et des caractéristiques climatiques est nécessaire. Le contexte géomorphologique et climatique général du Val de Loire sera alors décrit. Les vignobles de la moyenne vallée de la Loire, leurs cépages et la caractérisation de leurs terroirs, seront présentés. Enfin, les dernières évolutions climatiques de la région, leurs impacts sur la viticulture seront abordés et une réflexion sur les effets probables du changement climatique sur ces vignobles sera proposée.

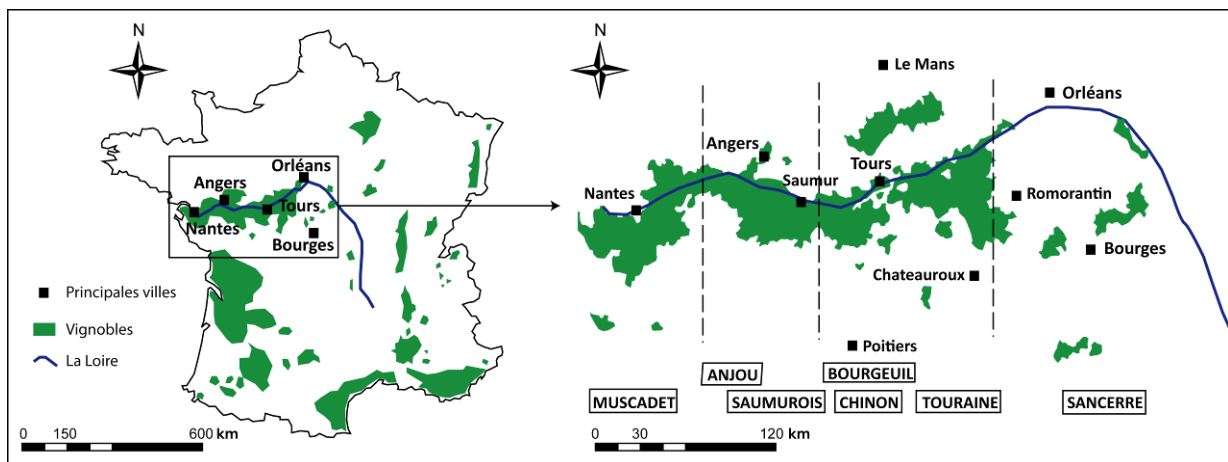


Figure III.1. Localisation des principales villes et vignobles du Val de Loire

Réalisation : [Cyril Bonnefoy]

III.1. Une approche géographique des vignobles de la moyenne vallée de la Loire

Afin de comprendre le contexte géographique d'implantation du vignoble, nous présenterons quelques aspects géomorphologiques et topographiques de la moyenne vallée de la Loire puis les caractéristiques climatiques de la moyenne vallée de la Loire.

III.1.1. Aspects géomorphologiques et topographiques

III.1.1.1. Une région à la rencontre du bassin parisien et du massif armoricain

La moyenne vallée de la Loire ou encore le val d'Anjou marque, avec le net changement de direction du cours de la Loire, le début des influences structurales du socle armoricain (Figure III.2). Mottet (1993) explique qu'avec son orientation sud-est – nord-ouest, le val d'Anjou est sous la dépendance des grandes directions hercyniennes « armoricaines » qui orientent structure et relief de la Bretagne méridionale, de la Vendée et du seuil du Poitou. De part et d'autre de Saumur, la Loire s'enfonce dans une ondulation anticlinale de la couverture crétacée de direction « armoricaine ». La Loire est bordée en rive gauche par le plateau crétacé qui développe, en rive droite, une large terrasse d'alluvions. Cette terrasse dominant de 15 m le lit du fleuve, large de 2 km et longue de 20 km, est le site du vignoble de Bourgueil (Figure III.1), installé sur les sols à graviers des alluvions anciennes. De nombreuses rivières drainent cette terrasse et rejoignent la Loire après un long parcours parallèle de Bourgueil au sud-ouest d'Angers.

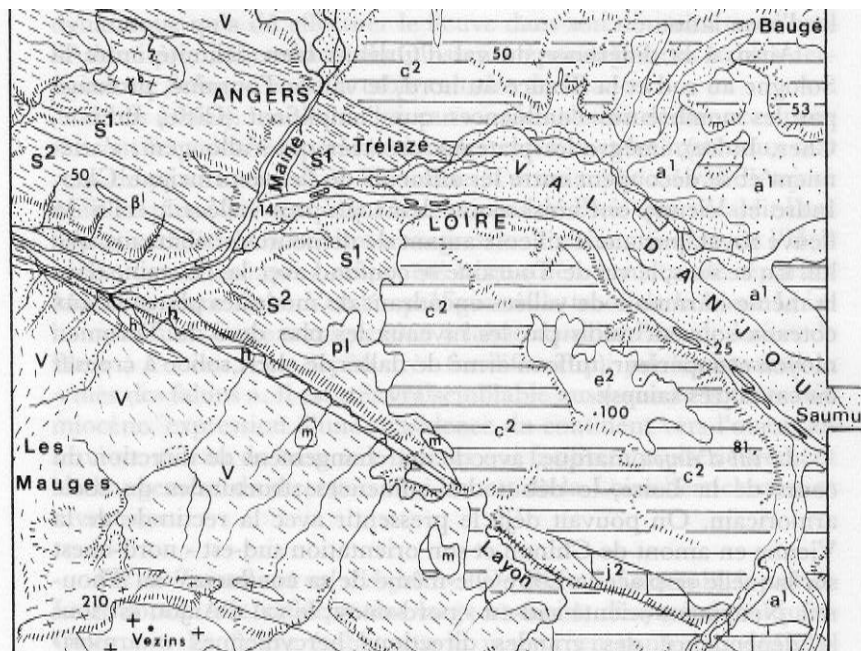


Figure III.2. Le Val d'Anjou et le contact socle armoricain, transgression crétacéo-éocène

Source : [Mottet, 1993]

En rive gauche, au sud-ouest de Saumur, l'influence de la tectonique armoricaine est visible, notamment grâce la faille rectiligne nord-ouest – sud-est délimitant les « Coteaux du Layon » (Figure III.2) sur 50 km et remontant le Jurassique à l'affleurement au milieu des plateaux crétacés. La même tectonique met aussi à l'affleurement au pied des coteaux le socle hercynien. Ce horst émergeant dans les calcaires du Layon (Figure III.3) doit son origine à la tectonique tertiaire qui a fait ici encore rejouer les anciennes directions structurales hercyniennes armoricaines. Le Val d'Anjou, ou encore la limite ouest du bassin parisien, se termine ainsi à l'ouest par l'apparition de socle armoricain.



Figure III.3. Affleurement de la faille rectiligne orienté nord-ouest-sud-est dans les coteaux du Layon, au niveau de la commune de Beaulieu-sur-Layon (©Cyril Bonnefoy)

III.1.1.2. Contexte topographique d’implantation des vignobles

Le contexte géomorphologique de la moyenne vallée de la Loire explique en grande partie les formes et orientations de relief de la région (Figure III.4). Les altitudes sont relativement faibles, comprises entre 0 et 240 m, du lit de la Loire à l’ouest, aux collines du massif des Mauges, plus au sud. Les coteaux du Layon (principaux coteaux viticoles), sont orientées nord-ouest – sud-est, le long de la faille qui partage d’un côté le massif-armoricain et de l’autre les extrémités occidentales du bassin parisien. Plus à l’est, une série de collines et de plateaux très peu élevés entourent la ville de Saumur, de part et d’autre de la Loire. Au sud de Saumur et en redescendant en direction de Montreuil-Bellay, s’étend une plaine aux altitudes également faibles.

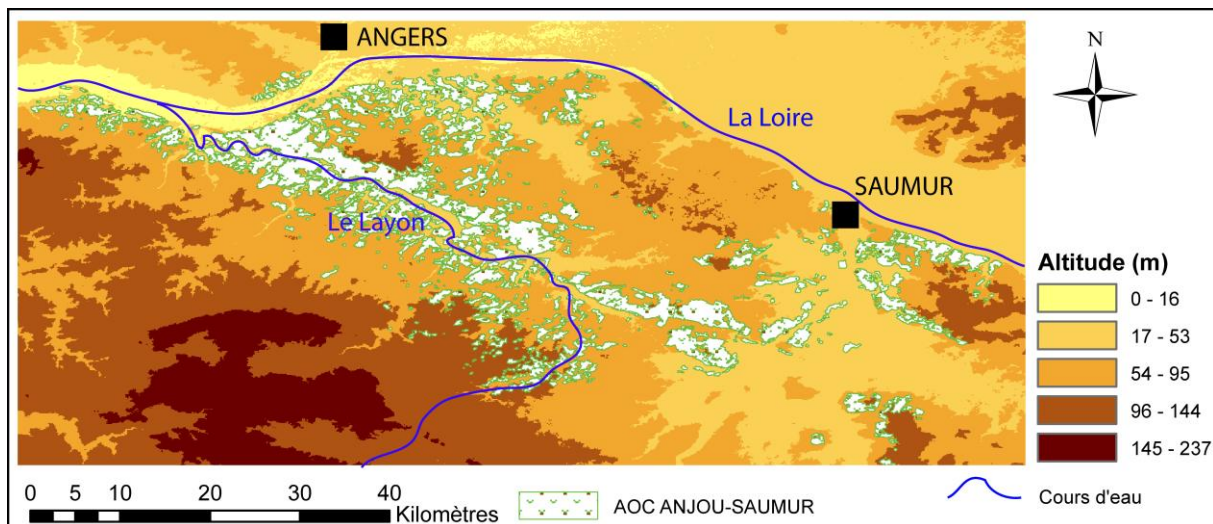


Figure III.4. Relief et vignobles de la moyenne vallée de la Loire (données : INRA-CTV et BD TOPO-49).
Réalisation : [Cyril Bonnefoy]

III.1.2. Les influences climatiques en moyenne vallée de la Loire

Le vignoble du Val de Loire qui s'étend de part et d'autre de la Loire et aux alentours de 47° de latitude nord, se situe aux limites septentrionales de culture de la vigne, tout comme les vignobles d'Alsace, de Champagne et de Bourgogne en France. Il fait donc partie des vignobles cultivés, à l'origine, sous des conditions climatiques relativement fraîches. Cependant sa position le long d'un fleuve et sur des coteaux bien exposés garantit la production de vins de qualité.

III.1.2.1. Contexte climatique régional

L'influence océanique marquée à Nantes, bénéficiant du climat maritime propre à la bordure atlantique française (Planchon, 1994 et 1997), s'atténue en allant vers l'intérieur des terres. En effet, certains caractères climatiques « continentaux » apparaissent progressivement en direction de l'est, à travers les bas plateaux du sud du bassin Parisien (Pédélaborde, 1957 ; Pagney, 1988). D'après la classification des types de climat de Joly *et al.* (2010), un gradient est-ouest apparaît nettement pour la région du Val de Loire : passage d'un climat « océanique franc » à un « climat océanique altéré » dans le Val d'Anjou, puis à un « climat océanique dégradé », au-delà de la Touraine jusqu'au Sancerrois (Figure III.5). Les cumuls pluviométriques annuels sont modérés, atteignant entre 600 et 700 mm selon les stations et ce passage d'un climat « océanique franc » à un « climat océanique dégradé » se remarque également au niveau des régimes pluviométriques. La région nantaise connaît un maximum de pluie d'automne et d'hiver représentatif d'un climat océanique alors que plus à l'est la part des pluies hivernales diminue au profit de pluies d'été. En effet, les régions situées entre Tours et Bourges se retrouvent plus fréquemment sur la trajectoire des dégradations orageuses estivales provenant de la région Bordelaise. Le cumul pluviométrique est ainsi plus élevé durant l'été dans ces régions et le risque de grêle, aléa majeur pour la vigne, y est plus accru.

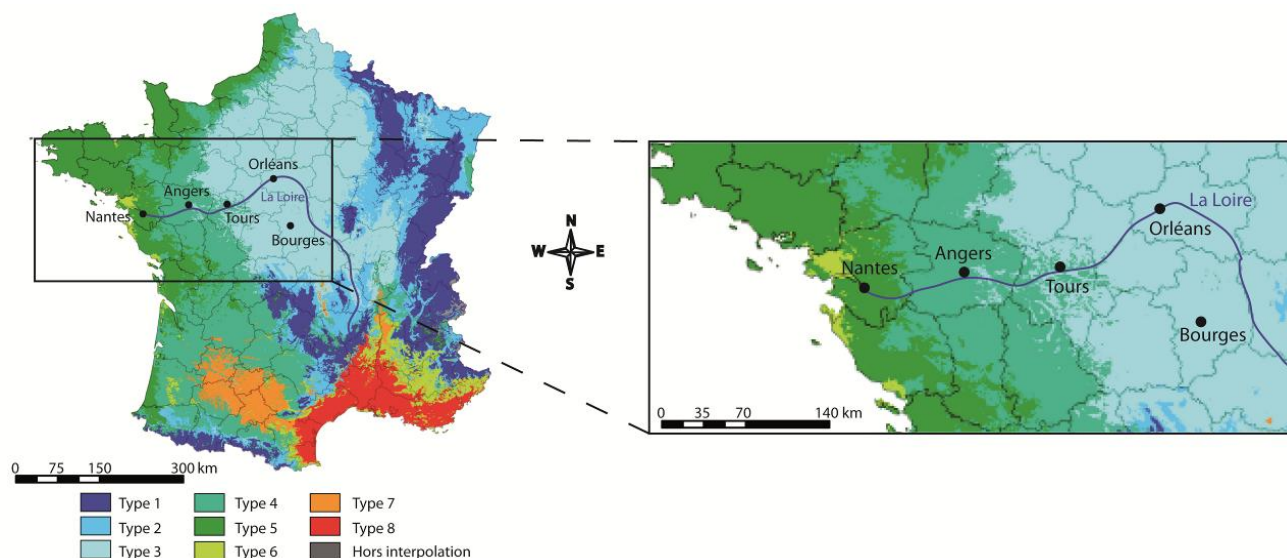


Figure III.5. Typologie climatique du territoire français et du Val de Loire en 8 classes (adapté de Joly *et al.*, 2010)

III.1.2.2. Un zoom sur la moyenne vallée de la Loire

La moyenne vallée de la Loire est intégrée à une échelle plus large à la région viticole du Val de Loire. Elle s'étend de Chalonnes-sur-Loire à l'ouest à Chinon et Bourgueil à l'est. Elle englobe notamment et principalement le Val d'Anjou avec les villes d'Angers et de Saumur. Cette région se retrouve donc dans la zone de transition climatique du climat « océanique franc » de la région nantaise aux caractères plus continentaux de l'Orléanais ou du Sancerrois.

En Anjou, la proximité de l'océan se traduit par des hivers relativement doux, seulement 6 jours de neige par an contre 12 dans le département voisin de l'Indre-et-Loire (Pagney, 1988). Cet avantage, version quantifiée de la douceur angevine, n'est cependant pas obtenu au détriment de la chaleur estivale, les deux départements ayant le même nombre de jours de chaleur ($T_x \geq 30^\circ\text{C}$), 38 par an. Dans la région de Tours, l'ensoleillement est moins important que sur la côte atlantique, mais le climat de l'Indre-et-Loire ne connaît pas vraiment d'extrêmes climatiques. Au centre se trouve la région de Saumur qui connaît des amplitudes thermiques un peu plus marquées du fait de sol crayeux renforçant ces contrastes (rayonnement nocturne plus important). Nous avons vu qu'à l'échelle de Val de Loire, le niveau des précipitations annuelles reste relativement bas. Cette tendance « sèche » est encore plus marquée dans la moyenne vallée de la Loire et surtout dans le val d'Anjou. Les collines du Massif des Mauges en prolongement de celle de Vendée, suffisent à créer un obstacle aux régimes perturbés venant de l'ouest, créant ainsi une zone d'« abri » en Val d'Anjou. Cette zone plus sèche apparaît très clairement sur les cartes de la Figure avec les indices d'aridité de de Martonne et Moral (Figure III.6). Cette zone d'« aridité » est centrée sur la région de Saumur qui se trouve au centre de la cuvette de la moyenne vallée de la Loire et qui est, elle aussi, protégée au sud de la ville par des plateaux crayeux peu élevés mais suffisamment pour créer un obstacle aux précipitations.

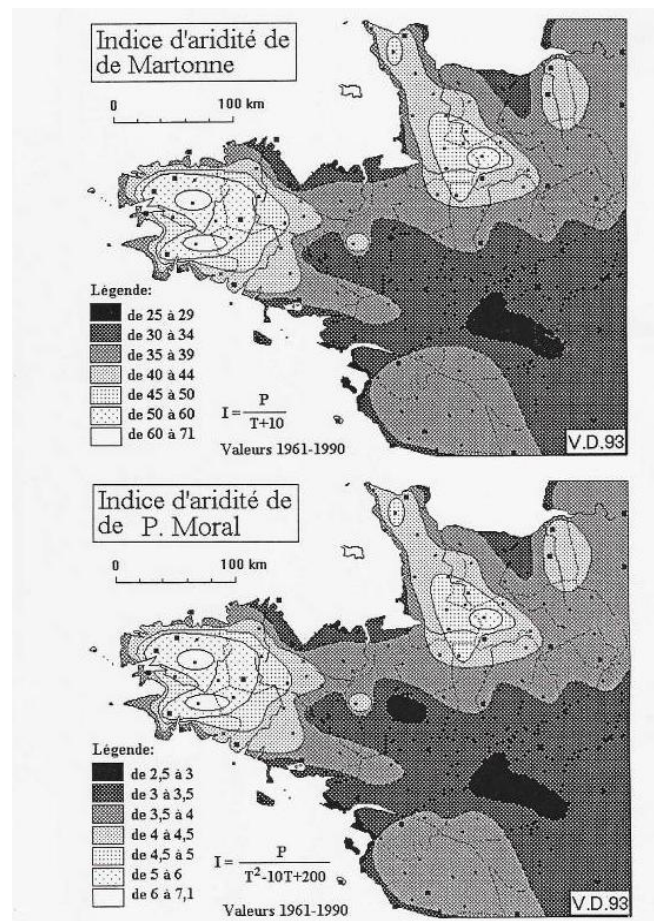


Figure III.6. Deux indices d'aridité dans le nord-ouest de la France sur la période 1961-1990.

Source : [Dubreuil, 1994]

III.2. Approche de la culture terroir en moyenne vallée de la Loire

La notion de terroir est importante au sein de la région du Val de Loire et particulièrement dans la moyenne vallée de la Loire. De nombreux travaux de l'INRA d'Angers ont abouti à des délimitations assez fines de ces terroirs, appelés Unité de Terroir de Base ou UTB. Les différents cépages cultivés à l'échelle du Val de Loire sont ainsi présentés et une approche géopédologique des terroirs de la moyenne vallée de la Loire et des UTB est proposée.

III.2.1. La viticulture en Val de Loire

Du Pays Nantais à la région Centre, le Val de Loire compte une soixantaine de vins d'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC) réalisés à partir de 14 cépages blancs et rouges. Les principales appellations et cépages sont présentés ci-après.

III.2.1.1. Les appellations et sous-ensembles régionaux

Le vignoble du Val de Loire s'étend sur 70 000 ha avec 52 500 ha en AOC, ce qui en fait le 4^{ème} vignoble français d'appellation en superficie (Vaudour, 2003). Le Val de Loire est également le premier producteur d'Appellation d'Origine Protégée (AOP) en vins blancs. La région comporte ainsi une soixantaine AOC et une trentaine d'Appellations d'Origine Vin délimité de Qualité Supérieure (AOVDQS). La carte de la Figure III.7 présente ainsi les

différents découpages sous-régionaux du Val de Loire avec les différentes appellations de vin produit, comme le Muscadet pour le Pays Nantais, le Saumur Champigny pour l'Anjou, le Vouvray en Touraine et le Ménéto dans la région Centre.

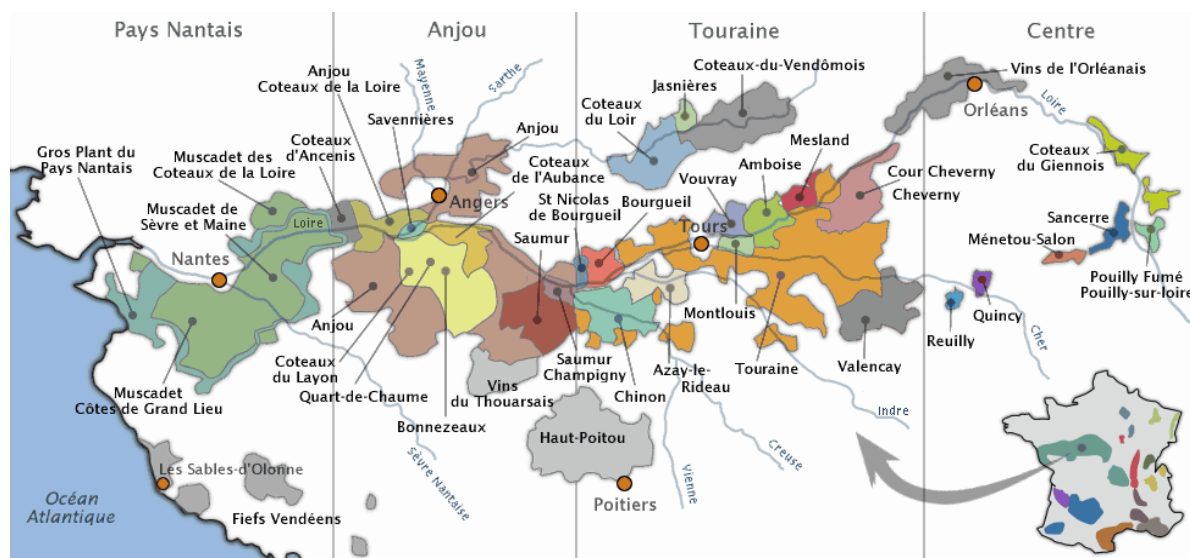


Figure III.7. Carte des AOC du Val de Loire

Sources: [vinsdeloire.fr et ATAV Val de Loire]

III.2.1.2. Les cépages cultivés

Parmi ces appellations, 14 cépages blancs et rouges sont cultivés dans la vallée de la Loire. Les cépages blancs représentent 55% de la surface totale cultivée en vignoble et les plus courants sont le Melon (37% des cépages blancs), le Chenin blanc (28%) et le Sauvignon blanc (18%). Le Cabernet franc (46% des cépages rouges), le Grolleau noir (25%) et le Gamay (15%) sont principaux cépages rouges. La répartition des cépages est variable. Par exemple, à l'ouest, dans la région du Muscadet, le Melon est cultivé pour la production de vins blancs secs, légers et frais. De l'Anjou à la Touraine (moyenne vallée de la Loire), les cépages Gamay, Grolleau et Cabernet franc sont cultivés pour des vins rouges ou rosé alors que le Chenin Blanc est réservé à la production de vins mousseux secs et de vins liquoreux (Coteaux du Layon). Plus à l'est, jusqu'à la région Sancerroise, le Sauvignon blanc domine permet de produire des vins blancs secs.

III.2.2. Caractérisation des Unités Terroir de Base (UTB) en moyenne vallée de la Loire

Depuis le début des années 1970, les terroirs des vignobles du Val de Loire ont bénéficié des travaux menés par R. Morlat, C. Asselin, J. Salette et leur équipe au sein de l'unité de recherches « Vigne-Vins » de l'INRA d'Angers. Ces différentes études seront ainsi présentées après le rappel de quelques définitions sur la notion de terroir viticole.

III.2.2.1. La notion de terroir

La notion de terroir est une notion propre au monde rural français et est d'usage courant dans la filière vitivinicole. Le terroir est cependant une notion parfois difficile à définir du fait d'une multitude de définitions propre à chaque vigneron, chaque discipline et chaque région viticole. C'est ainsi qu'au XVII^{ème} siècle Corneille définissait le terroir comme une « contrée aux terres fertiles ». Au XIX^{ème} siècle Gautier caractérisait le terroir comme une « terre assez limitée, considérée du point de vue de ses qualités ou de ses aptitudes agricoles ». L'usage le plus constant du mot « terroir » depuis les débuts de l'agronomie moderne fait référence au rapport du terroir à la vie rurale et à la production agricole. Le terroir est avant tout un terme propre à l'analyse de l'espace rural et à la description des systèmes agraires. Lebeau (1969) introduit la notion de terroir comme « une étendue de terrain présentant certains caractères qui l'individualisent du point de vue agronomique, dus à ses qualités physiques (relief, climat, exposition, sols) et aux aménagements entrepris par l'Homme (terroir irrigué, terroir drainé, terroir en terrasses) ». Le rapport entre les pratiques agricoles et l'environnement ressort donc assez nettement. Pour l'œnologue, le terroir est défini par « sa capacité à fournir une bonne maturation des raisins d'un cépage approprié quelles que soient les conditions climatiques de l'année » (Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971). Enfin, l'Institut National des Appellations d'Origine (INAO, 1984) définit le terroir comme « un ensemble de terrains qui par la nature plus ou moins variée de leurs sols (caractères agronomiques et géopédologiques), leur situation et leur environnement (topographie, exposition, etc..., influant sur le mésoclimat) se sont révélés par l'expérience et les usages propices à la production des vins fins ». Vaudour (2003) propose de décomposer le terroir en 4 notions types (Figure III.8).

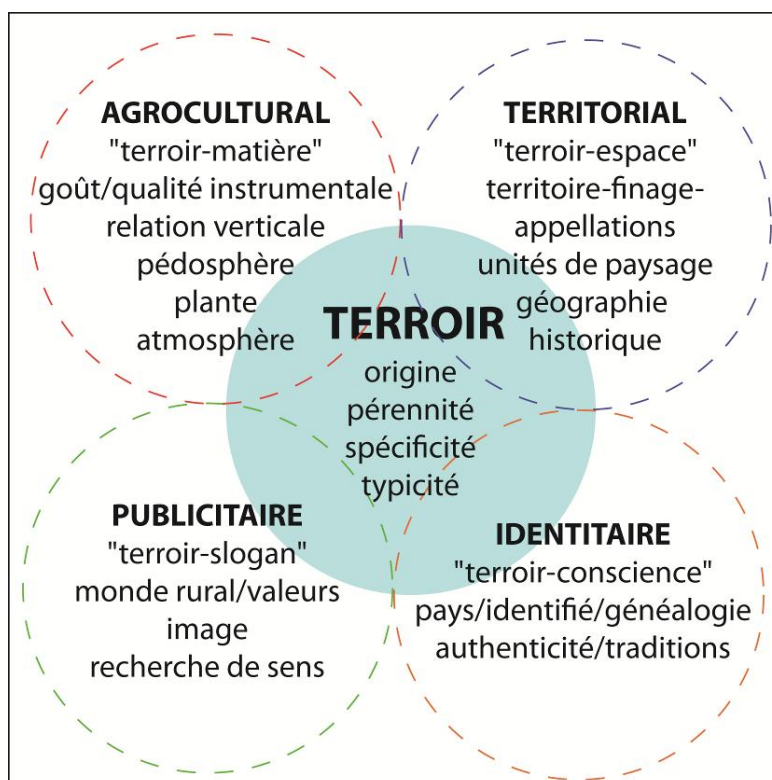


Figure III.8. Typologie des notions de terroir (adapté de Vaudour, 2003)

- Le terroir « agrocultural », aussi appelé « terroir-matière », fait référence à l'aspect technologique et agronomique du terroir. Il illustre les propriétés physiques et les potentialités naturelles qui caractérisent un terroir et un produit final. Cette définition du terroir peut être attribuée au domaine viticole et œnologique. De Serres (2001) explique que « les terrains ont une grande influence sur la qualité ». Bréjoux (1956) écrit que « s'il est bien difficile pour un dégustateur non averti de distinguer un Bourgeuil d'un Chinon, les amateurs savent très bien différencier parmi les Bourgeuil, ceux qui viennent des graviers de ceux issus des tufs ».
- Cette approche déterministe du terroir ne suffit pas, d'où la notion de terroir « territorial » ou encore « terroir-espace » qui représente le terroir dans ses organisations spatiales au sein du milieu physique. Le but de cette approche spatiale est de replacer le terroir « agrocultural », qui se limite souvent à l'échelle de la plante ou du bloc de vigne, à une échelle plus large, celle de l'exploitation, la région voire le continent. Les organisations de l'espace agricole en terroirs sont souvent héritées de l'époque gallo-romaine, voire antérieures (Pitte, 1983). Le terroir viticole est juridiquement organisé et répond à la notion de territorialité par le biais des appellations d'origine (Bailly et Beguin, 1995).
- La troisième approche du terroir se fait par le « terroir identitaire » ou « terroir-conscience » qui se réfère aux significations ethnologique, sociologique et culturelle de l'origine, en lien avec la mémoire et la conscience identitaire. Le mémoire du terroir viticole fonctionne souvent par l'évocation du nom du lieu géographique où il se trouve. Ce nom évoque souvent les caractères du milieu où pousse la vigne (Les Pierres Percées, les Adrets, La Perrière, Les Estangs...) ou des crus légendaires (Petrus, La Tâche, Les Grenouilles, Coulée de Serrant, Hermitage ...).
- Enfin, la dernière approche du terroir et celle du terroir « publicitaire » ou « terroir-slogan », terroir évoqué sous la forme de formules brèves et marquantes, véritables vecteurs de communication. Par exemple en Val de Loire, le slogan que l'on peut lire sur le site internet (vinsdeloire.fr) est « les vins qui ont un fleuve pour terroir ». L'accent est ainsi mis sur les attraits du fleuve quitte à réduire ici la notion de terroir à la Loire. L'objectif touristique derrière n'est bien sûr pas anodin. A l'heure de la mondialisation du marché du vin et d'une concurrence internationale accrue, le marketing est plus que jamais ancré dans la notion de terroir. Vaudour (2003), indique « qu'outre le repère symbolisant la quête des valeurs du monde rural, le terroir publicitaire place le rêve à la portée du verre de vin défini comme vin de terroir ».

Le terroir viticole est donc une notion complexe à définir et les définitions diffèrent d'une discipline à l'autre et selon les pays. Ainsi, l'Organisation Internationale de la vigne et du Vin (OIV) a eu certaines difficultés à parvenir à une définition commune à tous les pays

membres. Elle définit, le terroir vitivinicole comme « un concept qui se réfère à un espace sur lequel se développe un savoir collectif des interactions entre un milieu physique et biologique identifiable et les pratiques vitivinicoles appliquées, qui confèrent des caractéristiques distinctives aux produits originaires de cet espace ». (Résolution OIV/Viti 333/2010).

III.2.2.2. La notion d'UTB en Val de Loire

Les terroirs viticoles du Val de Loire sont associés, aux travaux conduits spécifiquement sur cette thématique par Morlat, Asselin, Salette et leur équipe au sein de l'unité de recherches « Vigne-Vins » de l'INRA d'Angers. S'il est considéré qu'un terroir peut être assimilé à une unité géographique connaissant un climat régional relativement homogène, il existe au sein de cette unité plusieurs unités de terroir appelées Unité Terroir de Base. Une UTB est définie comme la plus petite unité spatiale de territoire valorisable par le vigneron au sein de laquelle le fonctionnement de la vigne est homogène, et la réponse de la plante, reproductible d'un endroit à l'autre de l'UTB. L'approche dite intégrée de Morlat et de l'équipe de l'INRA d'Angers a permis de progresser dans la compréhension des mécanismes de l'interaction « milieu édaphique- macro et mésoclimat », agissant sur la physiologie de la plante. Cette approche prend aussi bien en compte les paramètres dits « amonts » du système (milieu édaphique, mésoclimat) que les paramètres « avals » (comportement de la vigne, typicité du raisin et du vin). Le principe est qu'aucun des paramètres ne peut être étudié séparément sans prendre en compte les autres facteurs du milieu (Morlat, 2001). Ce système complexe « terroir/vigne/vin » est résumé dans la Figure III.9.

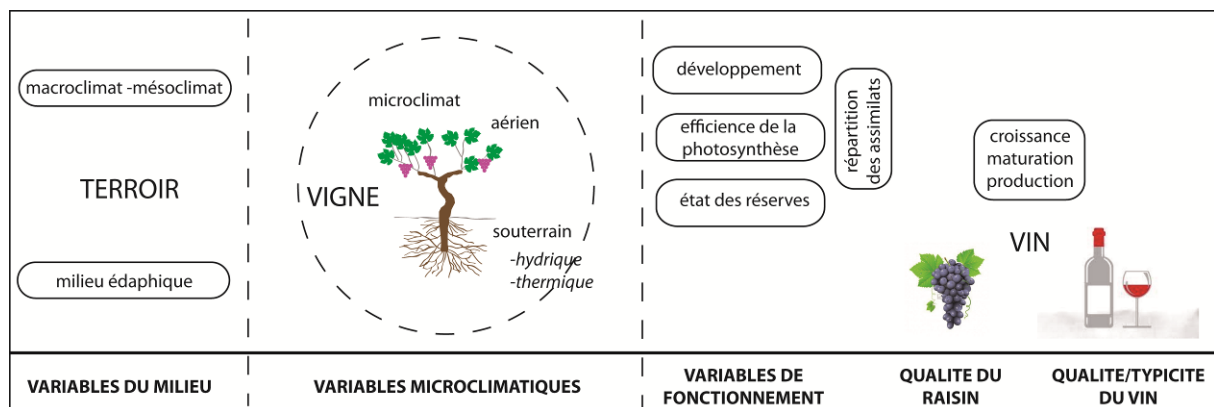


Figure III.9. Représentation en chaîne du système « terroir/vigne/vin » (adapté de Lebon, 1993)

L'unité « fonctionnelle » de terroir se réfère à la caractérisation des propriétés du milieu, vis-à-vis de la plante. Il faut alors caractériser les facteurs du milieu qui conduisent à de telles propriétés. Les critères fonctionnels du milieu physique agissant sur la plante sont donc (Morlat, 2001 ; Carbonneau, 2000) :

- Le climat : suivis météorologiques des températures et des précipitations au cours de la période végétative.

- Le pédoclimat : suivi de la température au voisinage des racines, en début de cycle végétatif, et évolution de la réserve hydrique du sol au cours du cycle.
- La physico-chimie du sol : réserve minérale.

III.2.2.3. L'importance de la géopédologie dans l'UTB

L'identification et la cartographie de l'UTB, s'appuient préférentiellement sur les critères géologiques. Elle traduit notamment les aspects agronomiques et pédologiques à travers le système « roche, altération, altérite » (Figure III.10). Dans ce paragraphe le terme de « milieu » sera fréquemment utilisé pour définir les éléments de ce système. Le « milieu » ainsi décrit n'est pas celui du géographe climatologue mais celui du géopédologue qui considère le sol comme son terrain d'étude. Ce système se base sur « une analyse locale des critères du « milieu » physique fondée sur la détermination de « séquences écogéopédologiques » ou séquences géopédologiques, au travers d'un réseau de parcelles expérimentales où sont définis des paramètres paysagers » (Vaudour, 2003).

Le « milieu » roche est le milieu dans lequel le degré d'altération est le plus faible, la teneur en argile la plus faible, surmontant la roche mère, saine et peu transformée présente à une profondeur inférieure à 60 cm. Sur ce type de milieu, la vigne est souvent précoce et la contrainte hydrique forte. Le « milieu » altérite est celui où la teneur en argile est la plus forte et où la roche en transformation n'apparaît pas avant 120 cm de profondeur. Dans ce type de sol, la contrainte hydrique pour la vigne est faible, sa vigueur importante et son développement relativement tardif. Enfin, le « milieu » altération est le « milieu » intermédiaire dans lequel la roche en transformation se rencontre entre 60 et 120 cm de profondeur.

De 1979 à 1995, des parcelles expérimentales ont été suivies dans les vignobles de Bourgeuil, Chinon, Saumur Champigny avec le cépage Cabernet Franc (Morlat, 1989). Ce réseau regroupait les principales UTB de la région. Les résultats ont permis de mettre en évidence un effet terroir très important sur la composition des raisins et sur la typicité du vin (Morlat, 1989, Asselin *et al.*, 1992, Lebon *et al.*, 1996) en interaction avec le millésime.

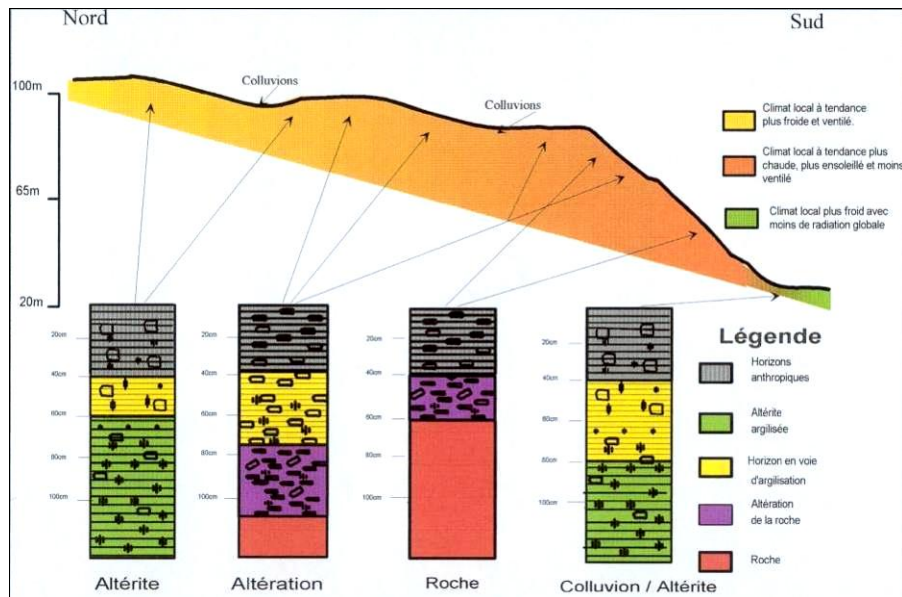


Figure III.10. Toposéquence décrivant le système « roche, altération, altérite »

Source : [Morlat, 2010]

III.2.2.4. La prise en compte de l'environnement paysager dans l'UTB

Outre l'aspect « caractéristique géopédologique » dans l'UTB, une étude de l'environnement paysager a été réalisée pour chaque unité. C'est ainsi que sont abordées les conditions climatiques aériennes locales (Figure III.9) de l'UTB, en s'appuyant sur des règles d'organisation du paysage physique. Ont été déterminés, les masques, l'altitude du lieu, le type de topographie, l'inclinaison et l'orientation de la pente éventuelle. Les masques de nature topographique, végétale ou anthropique, ont été déterminés par l'observation *in situ* des éventuelles obstacles qui s'interposent entre le point d'observation sur l'UTB et l'horizon jusqu'à une distance de 500 m. Cette analyse a été faite dans 8 directions à partir du point d'observation. Cette approche permet d'intégrer à la notion d'UTB les effets connus de plusieurs critères géomorphologiques et topographiques sur les modifications de certains facteurs climatiques, comme l'effet de l'altitude sur la température de l'air et la vitesse du vent, l'effet de l'inclinaison et l'orientation de la pente sur la quantité de radiation globale reçue par unité de surface et les effets des masques sur la vitesse du vent.

Si le climat n'est qu'une composante du terroir, la hausse de la température observée, depuis le début du XX^{ème} siècle, devrait modifier sensiblement le fonctionnement des terroirs viticoles. Il est donc désormais nécessaire de prendre en compte le changement climatique dans les études d'impact du climat sur la vigne.

III.3. Les vignobles de moyenne vallée de la Loire face aux changements climatiques

Les températures de la moyenne vallée de la Loire ont augmenté depuis le milieu du XX^{ème} siècle, provoquant des évolutions dans le cycle végétatif de la vigne et dans la composition biochimique des raisins. La communauté scientifique et viticole s'interroge ainsi depuis peu

sur les évolutions probables du climat dans la région et sur les effets à moyen et long terme sur la culture de la vigne ainsi que sur les éventuelles adaptations de pratiques culturales. La pérennité du découpage en UTB d'un point de vue climatique pourrait notamment être remise en question. En effet, la modification d'une seule des composantes de l'UTB se répercutera sur les autres éléments la composant et notamment sur le comportement de la vigne et donc sur les pratiques culturales. Dans cette partie seront présentées les principales évolutions climatiques constatées en moyenne vallée de la Loire depuis plusieurs dizaines d'années et les effets déjà observés sur le comportement de la vigne et la composition des raisins. Puis, les futurs impacts probables du réchauffement climatique sur la viticulture du Val de Loire seront abordés et ainsi que les éventuelles adaptations possibles et envisageables en termes de pratiques viti-vinicoles.

III.3.1. Evolutions climatiques récentes en moyenne vallée de la Loire

Dans le cadre de la thèse l'évolution de la température depuis le milieu du XX^{ème} siècle dans le Val de Loire a été étudiée. Certaines références à ces résultats sont faites en cette fin de chapitre, afin de pouvoir expliquer le contexte climatique de la région. Les résultats sont néanmoins développés dans le détail dans la partie III. Ces travaux de thèse sont notamment partie du constat de Barbeau (2007) sur l'évolution de différents paramètres climatique, de 1977 à 2006, à la station de Montreuil-Bellay, située au centre de la moyenne vallée de la Loire.

III.3.1.1. Evolution des températures et de l'ensoleillement

Au cours du XX^{ème} siècle la température minimale moyenne annuelle a augmenté de 0,7°C à 1,7°C dans l'ouest de la France et la température maximale moyenne annuelle de 0 à 1,3°C (GIEC, 2007). Les observations climatiques faites dans le Val de Loire sur la deuxième partie du XX^{ème} siècle montrent une nette augmentation des températures (Figure III.11). Les températures minimales moyennes de la saison végétative de la vigne semblent avoir plus augmentées dans la partie océanique du Val de Loire avec une hausse comprise autour de 1,5°C à Angers et Nantes, alors que les maximales ont subi une hausse plus marquée à l'est du bassin. L'observation des températures moyennes annuelles depuis le milieu du XX^{ème} siècle indique une nette tendance au réchauffement depuis la fin des années 80 pour l'ensemble des stations du Centre-Ouest (Bonnefoy *et al.*, 2010). En parallèle, la durée d'insolation a également augmenté, la durée annuelle d'ensoleillement passant de 1800 à plus de 2000 heures et le rayonnement global d'un peu plus de 4000 MJ/m² à 5000 MJ/m² soit environ 25% d'augmentation (Barbeau, 2007).

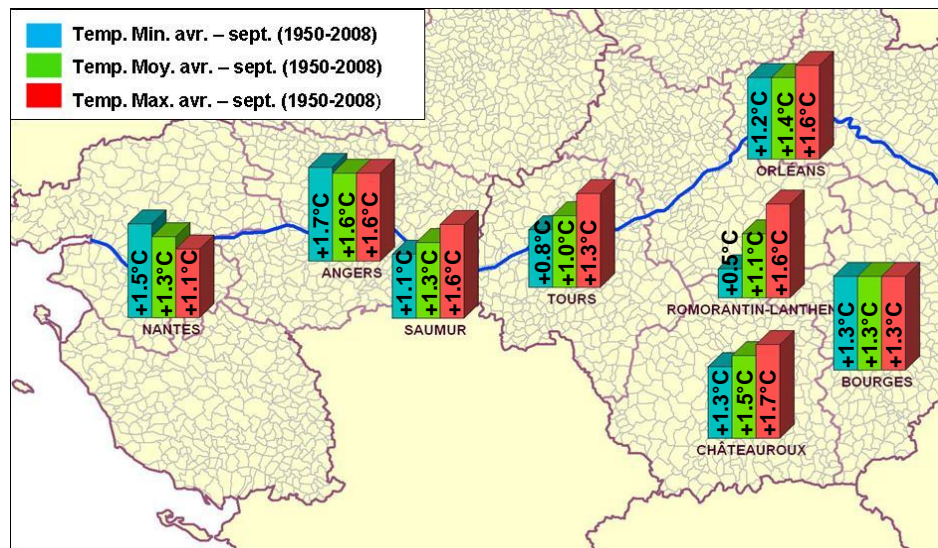


Figure III.11. Augmentation de la température du 1^{er} avril au 30 septembre en Val de Loire, de 1950 à 2008
Source : [Barbeau *et al.*, 2011]

L'augmentation de la température est encore plus marquée sur la saison végétative. La température moyenne de la saison est passée de 14,8°C à 18,1°C soit une hausse de près de 4°C. La température minimale moyenne de la saison est quant à elle passée de 10 à 12°C et la température maximale moyenne de moins de 20°C à plus de 24°C. Enfin la durée d'ensoleillement a augmenté de 1200 à 1500 heures et le rayonnement global de 3000 à plus de 3500 MJ/m².

Suite à la hausse des températures, les indices bioclimatiques ont également subi une augmentation. L'indice de Huglin est passé à une moyenne de 1500 dans les années 1970, ce qui correspond à un climat viticole « frais », à plus de 2000 dans les années 2000, soit dans la catégorie de climat viticole « tempéré » (Bonnefoy *et al.*, 2010). L'indice des degrés jours a augmenté de 50% avec une valeur moyenne passant de 950 dans les années 1970 à 1450 dans les années 2000. Selon les catégories des régions viticoles de l'indice de Winkler, la moyenne vallée de la Loire a évolué de la catégorie « région I » à « région II » (Bonnefoy *et al.*, 2010).

III.3.1.2. Evolution des précipitations et de l'évapotranspiration

La moyenne pluviométrique n'a pas évolué entre 1950 et 2008 mais la variabilité interannuelle a augmenté avec des années soit très humides (PRCP > 700 mm en 1994, 1999, 2000 et 2002), soit très sèches (PRCP < 450 mm en 1990, 1991 ou 2005). L'évapotranspiration annuelle a augmenté, passant de moins de 700 mm à 850 mm en moyenne, ce qui correspond à une hausse de 30%. Sur la saison végétative le cumul annuel de précipitation est d'environ 250 mm avec que très peu d'évolution sur la période, si ce n'est une plus forte variabilité interannuelle, comme constatée à l'échelle annuelle. Cependant, en raison de l'augmentation particulièrement marquée des températures et de l'ensoleillement du 1^{er} avril au 30 septembre, l'évapotranspiration est également plus importante, augmentant ainsi de 1%/an, dépassant désormais les 700 mm.

III.3.2. Les évolutions du comportement de la vigne et de la qualité des raisins

Ces évolutions climatiques en Val de Loire ont un impact sur le comportement de la vigne et la qualité des vins. Barbeau (2007) a ainsi suivi, la relation entre l'évolution climatique et la phénologie des différents cépages présents dans le site expérimental de Montreuil Bellay.

III.3.2.1. Une avancée des stades phénologiques

Les modifications climatiques en Val de Loire ont un impact déjà perceptible sur la vigne. On note une avancée généralisée de l'ensemble des stades phénologiques de la mi-floraison, mi-véraison et de la maturité (date de récolte). Avant 1988, la date de mi-floraison des cépages Gamay, Grolleau, Cabernet-Franc et Cabernet-Sauvignon intervenait souvent dans la première quinzaine de Juin. Ce stade, dans la période post-1988 jusqu'à aujourd'hui, a été très rarement observé après le 15 juin. La mi-véraison du Gamay et du Grolleau se produisait généralement à la fin du mois d'août ou au début du mois de septembre au début des années 1980. Aujourd'hui, ce stade se produit dans la première quinzaine d'août. Enfin, la date de vendange des cépages Gamay et Grolleau a avancé de près de 20 jours depuis 1980 et celle des cépages Cabernet Franc et Cabernet Sauvignon, respectivement de 15 et 10 jours (Figure III.12).

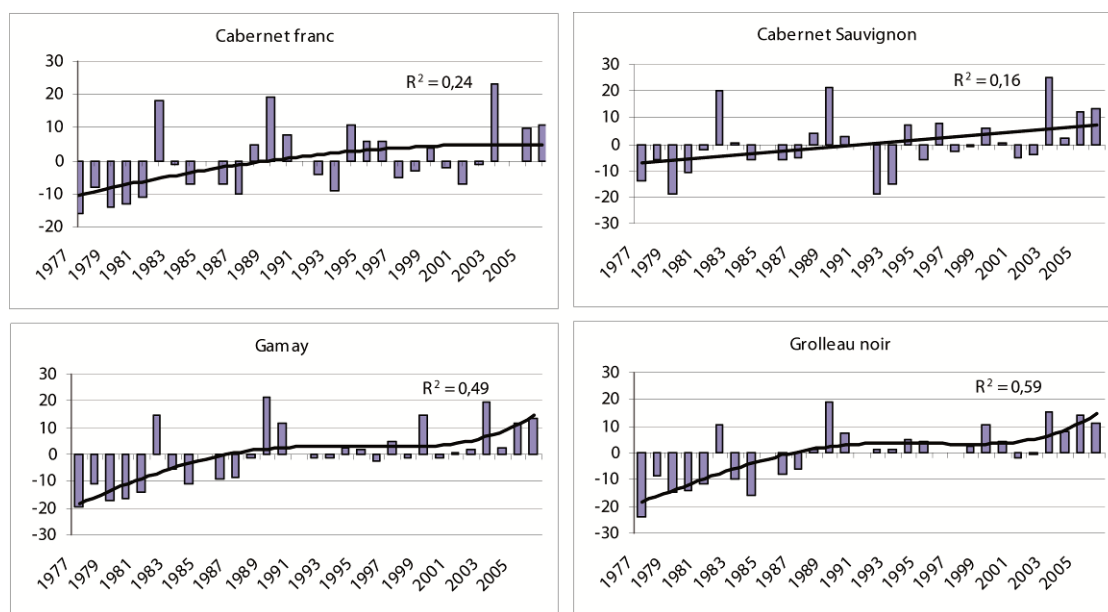


Figure III.12. Evolution des dates de vendanges à Montreuil Bellay (Moyenne vallée de la Loire) de 1978 à 2006.

Source : [Barbeau, 2007]

La durée de la période mi-floraison/mi-véraison apparait être stable pour l'ensemble des cépages. Cependant, la variabilité d'une année à l'autre reste relativement importante. Quant à la période mi-véraison/récolte, celle-ci est également stable malgré une variabilité interannuelle forte pour les cépages Cabernet Franc et Cabernet Sauvignon.

III.3.2.2. Evolution de la composition des raisins

L'évolution climatique a également un impact sur la composition des raisins et donc sur la qualité de la vendange. Les teneurs en sucres ont augmenté alors que les teneurs en acidité ont diminué. Les Cabernets contiennent désormais plus de 220 g de sucre/l contre moins de 180 g/l, il y a une trentaine d'années. La teneur en sucre du Gamay a évolué de 170 g/l à 210 g/l alors que le Grolleau est passé de 150 g/l à plus de 180 g/l. En revanche, l'acidité totale a diminué de 2 points pour l'ensemble des cépages malgré une variabilité interannuelle importante due à la précocité des cépages et la pluviométrie estivale. La teneur en acide malique est responsable de cette diminution et a perdu environ 4 points pour se situer autour de 1 à 2 g/l. C'est pourquoi l'indice de maturité, qui correspond au rapport de la teneur en sucres sur l'acidité totale, a doublé (Figure III.13). Enfin, la teneur en anthocyanes des raisins est passé de 2200 à plus de 2500 g/kg baies pour les cépages Cabernets alors que cette teneur n'a pas évolué pour les cépages plus précoces comme le Gamay et le Grolleau, sans doute dû au fait que la véraison plus précoce se produit désormais en période de fortes chaleurs. Les températures nocturnes étant plus douces, la synthèse des anthocyanes peut ne pas se réaliser aussi bien que pour les cépages plus tardifs.

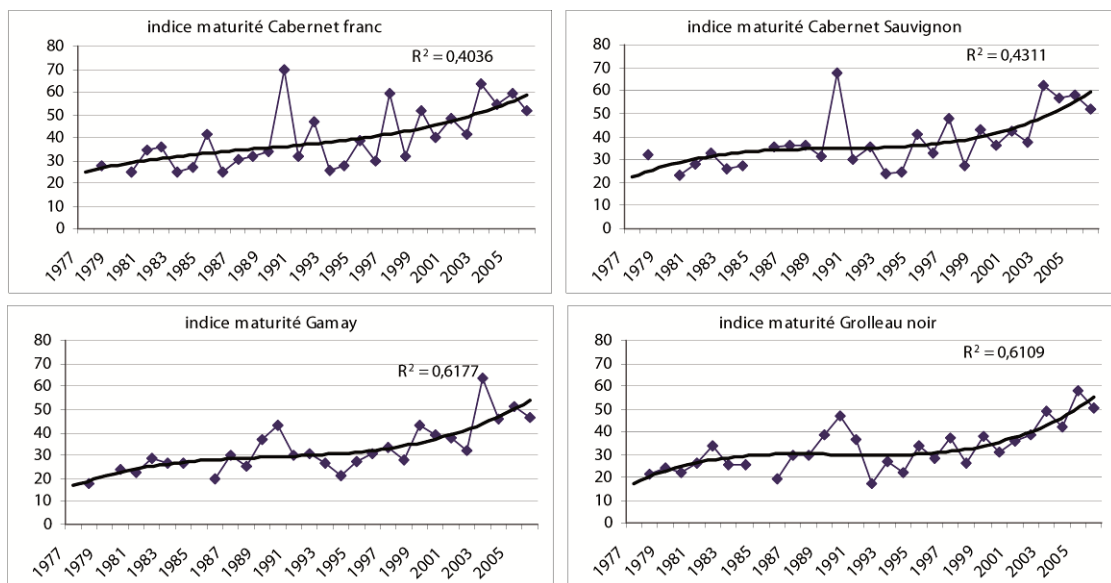


Figure III.13. Evolution de l'indice de maturité de quatre cépages de la moyenne vallée de la Loire à Montreuil Bellay entre 1978 et 2006.

Source : [Barbeau, 2007]

III.3.2.3. Le rôle de l'Homme dans l'évolution de la qualité des vins produits

L'implication directe du climat dans les évolutions de comportement de la vigne et du regain de qualité des raisins est toutefois discutée. En effet, les pratiques agro-viticoles ont évolué, expliquant sans doute une part de l'amélioration de la qualité des vins produits dans la moyenne vallée de la Loire. Auparavant, un désherbage chimique systématique était pratiqué, alors que désormais l'enherbement d'un rang sur deux est effectué (Figure III.14). La vigueur de la vigne est alors moins importante, le rendement augmente et les maladies

cryptogamiques sont moins fréquentes. Cette pratique du désherbage d'un rang sur deux permet en théorie d'améliorer la qualité de la vendange. La gestion de différentes maladies que sont le mildiou, l'oïdium et le botrytis a particulièrement été amélioré grâce à l'usage de molécules fongicides plus performantes et aux techniques d'éclaircissage des grappes et d'effeuillage de la zone des grappes.



Figure III.14. Photo illustrant l'enherbement d'un rang sur deux en moyenne vallée de la Loire (photo prise sur une parcelle à Epiré à 10 km au sud-ouest d'Angers (©Cyril Bonnefoy).

III.3.3. Les vignobles de la moyenne vallée de la Loire menacés par les futurs changements climatiques ?

La moyenne vallée de la Loire a connu de profonds changements en termes de climat et de comportement de la vigne durant la deuxième moitié du XX^{ème} siècle. Depuis le début des années 2000, les conditions climatiques sont plus favorables à un bon fonctionnement de la vigne. Les cépages Cabernet Franc et Cabernet Sauvignon qui était considéré comme à la limite septentrionale de leur culture il y a 30 ans, sont aujourd'hui cultivés sous des conditions climatiques idéales pour exprimer tout leur potentiel (Barbeau, 2007). En 2011, la très réputée appellation Quart-de-Chaume, située dans les Coteaux du Layon, a été classé en Grand Cru. Le Quart-de-Chaume devient alors la première appellation à être classé en Grand Cru dans l'histoire des vignobles du Val de Loire. Cependant, nous pouvons nous demander jusqu'à quand les conditions climatiques resteront optimales pour la culture de ces cépages

traditionnels. Sans doute qu'une partie de la clé de la réponse réside à l'interface des relations sol/climat.

III.3.3.1. Evolutions phénologiques futures

Une étude récente a évalué les impacts des changements climatiques futurs dans les différents vignobles de France à l'aide du modèle STICS (García de Cortázar Autauri *et al.*, 2007). Le modèle STICS adapté à la vigne, est un outil capable de tenir compte des interactions à l'échelle de la parcelle (et donc du système viticole). Il peut également être forcé par des variables d'entrée provenant des scénarios climatiques produits par les MCGA. En effet, ce modèle tient compte du taux de CO₂ de l'air qui agit notamment sur l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en biomasse et sur la transpiration. Dans cette étude le modèle STICS a donc été couplé avec les données simulées du MCGA ARPEGE-Climat pour les scénarios A2 et B2 sur la période 2070-2099. Cette simulation a notamment été réalisée pour la région de l'Anjou en moyenne vallée de la Loire pour le cépage Cabernet Franc. Il en ressort que la sortie de dormance du cépage sera plus tardive de 12 (scénario B2) à 19 jours (scénario A2). En revanche, la précocité des différents stades phénologiques devrait s'accroître. C'est ainsi que le débourrement devrait intervenir entre 17 et 27 jours plus tôt que sur la période de contrôle 1970-2000. La floraison devrait avancer de 12 à 19 jours et la véraison de 29 à 38 jours, réduisant ainsi la durée de la période floraison-véraison qui était restée jusque-là relativement stable. Enfin la date de récolte du Cabernet Franc en Anjou devrait avancer de 17 à 24 jours selon les deux scénarios. La production de biomasse devrait également augmenter avec une hausse des réserves faites par la plante. L'évolution majeure devrait donc être un rétrécissement du cycle végétatif de la vigne.

III.3.3.2. Evolution future de la qualité du vin

La précocité des stades phénologiques pourrait donc s'accroître dans les années à venir et la véraison pourrait se produire sous des conditions nettement plus chaudes qu'aujourd'hui (Morlat, 2006). Le nombre de jours où la température maximale dépassera le seuil des 37°C à Montreuil-Bellay pendant la période de maturation pourrait augmenter de 4 à 9 jours selon les scénarios respectifs B2 et A2 (García de Cortázar Autauri *et al.*, 2007). Madelin *et al.* (2010) ont également évoqué l'évolution des conditions de maturation en Bourgogne. De telles évolutions vont ainsi avoir un impact sur la production de vins beaucoup plus riches qu'autrefois avec des taux de sucre élevés et de faibles acidités. Morlat et Bodin (2006) expliquent que la typicité sensorielle des vins du Val de Loire sera ainsi modifiée.

III.3.3.3. Vers des modifications des pratiques viti-vinicoles?

Une étude a expliqué (Duchêne *et al.*, 2010) l'intérêt d'un changement radical de cépages pour certaines régions viticoles afin de s'adapter aux changements climatiques. En Val de Loire, il faudrait alors choisir des cépages plus tardifs à cycle plus long que ceux cultivés actuellement. Morlat (2006) met en garde et précise que la variabilité climatique et donc les aléas extrêmes, aussi bien chauds, humides, froids ou secs, seront certainement plus

nombreux (GIEC, 2007). Des changements de cépages pourraient alors, certaines années, avoir des conséquences néfastes car les exigences écophysiologiques de certaines vignes ne seraient pas satisfaites. Par conséquent, si des changements de cépages doivent être réalisés, ces derniers devront se faire seulement sur une partie du parcellaire. Dans tous les cas, des changements de pratiques agroviticoles devront être adoptés. Morlat (2006) explique que les dates de taille hivernale devront être retardées afin de contrer la précocité des cépages induite par un climat plus chaud. La hauteur des grappes devra être augmentée et les pentes orientées nord devront être privilégiées afin de garantir suffisamment de fraîcheur à la vigne, notamment en période de maturation. La maîtrise de l'enherbement devra être renforcée afin de gérer le plus équitablement possible le niveau de la concurrence azotée et hydrique. En parallèle, l'augmentation du CO₂ et l'amélioration des conditions héliothermiques augmenteront les rendements, ce qui permettra de jouer sur la dilution des composés diminuant ainsi les taux de sucre par exemple.

III.3.3.4. Vers une gestion des sols contrôlée ?

Selon les projections du modèle STICS (García de Cortázar Atauri *et al.*, 2007) le stress hydrique devrait diminuer pendant la période débourrement-floraison au printemps, mais augmenter pendant la période floraison-vendange, donc en été. Ainsi, les sols superficiels et sableux souffriront plus de ce manque d'eau que les autres sols plus profonds et argileux. Même si les projections concernant les précipitations ne font pas ressortir de tendance claire pour le Centre-Ouest de la France, l'évapotranspiration des sols et des végétaux augmentera du fait d'un niveau thermique plus élevé. Ainsi, l'adaptation aux conséquences des changements climatiques en Val de Loire pourrait se jouer à travers une adaptation des AOC. Morlat (2006) explique qu'en Anjou existe l'AOC générique Anjou Rouge et l'AOC Anjou-Villages de plus grande renommée. Les sols de l'appellation Anjou-Villages sont en général en milieu Roche sur schistes avec des roches volcaniques, roches éruptives et des sables et gravier d'Anjou. Dans le contexte du changement climatique, ces sols seront amenés à souffrir d'autant plus de stress hydrique que l'évapotranspiration augmentera. Le stress hydrique y deviendra ainsi trop intense pour pouvoir envisager d'atteindre des niveaux de qualité propre aux vins de l'appellation Anjou-Villages. Ce type d'UTB pourrait alors être délaissé lors de millésimes très secs dans le cadre de la production de cette appellation, au profit d'UTB en milieu Altérite qui seraient beaucoup moins vulnérables à ce type de stress hydrique. A l'inverse dans le cas de millésime pluvieux, une UTB en milieu Roche serait privilégiée. Morlat (2006) rappelle donc l'importance de réfléchir désormais sur un nouveau concept d'AOC « spatio-temporelle » même si les cartes conseils sur l'adaptation des cépages et types de vin, selon les caractéristiques des UTB, prennent déjà en compte la notion de millésime (Morlat, 2001). Enfin, Barbeau *et al.* (2011) expliquent que le cépage blanc Chenin est un cépage très polyvalent permettant aussi bien la production d'effervescents que de vins blancs secs et liquoreux. Dans les coteaux du Layon, sur les terroirs à sols superficiels, lors d'années trop sèches avec stress hydrique important durant la phase de surmaturation, la photosynthèse peut être bloquée et la teneur en sucre n'évolue ainsi plus et la production de vins liquoreux devient alors impossible. Nous pouvons

ainsi imaginer qu'en cas de stress hydrique plus fréquent dans l'avenir, des sols plus profonds avec une réserve hydrique plus importante seraient privilégiés pour la production de vins liquoreux.

CONCLUSION DU CHAPITRE III

Quelques études ont commencé à s'intéresser à l'évolution climatique en moyenne vallée de la Loire et les conséquences sur le comportement de la vigne (Barbeau, 2007, Neethling, 2012). L'évolution générale du climat semble, pour l'instant, être favorable aux vignobles de la région. Néanmoins, des questions se posent sur l'évolution future du climat et les possibles impacts sur les vignobles et les pratiques culturales. Des études climatiques plus complètes et à différents niveaux d'échelles spatiales et temporelles doivent être menées, afin d'acquérir des connaissances approfondies sur la variabilité spatio-temporelle du climat de cette région viticole. Une bonne connaissance du contexte climatique permettra une meilleure analyse des sorties des modèles climatiques. Ainsi, des réponses concrètes pourront être apportées aux acteurs du terrain qui se doivent de prendre des décisions dès aujourd'hui.

Deuxième partie

Collecte des données et approches méthodologiques

Dans cette deuxième partie, nous présentons les données utilisées dans le cadre de la thèse et les différentes méthodes employées.

Le premier chapitre (chapitre IV) est dédié à la présentation de la méthodologie générale de la thèse et notamment de l'approche multi-scalaire adoptée. Ce chapitre permet d'exposer l'intérêt d'une telle démarche dans le cadre de notre étude, ainsi que les outils utilisés dans l'observation puis la modélisation de la température. Le chapitre V présente l'ensemble des données utilisées et la mise en place d'un réseau de mesures climatiques adapté à l'échelle topoclimatique puis locale (Coteaux du Layon). Les méthodes de traitement de ces données sont également précisées.

Le chapitre VI détaille la construction des modèles multicritères permettant d'expliquer la variabilité spatiale à partir de facteurs topographiques, à l'échelle du site expérimental des Coteaux du Layon.

Enfin, le dernier chapitre (chapitre VII) présente le deuxième outil de modélisation utilisé dans la thèse : le modèle numérique régional RAMS. Les données de paramétrisation du modèle et les données d'observation, ayant servi aux validations des simulations, sont exposées. Le choix des périodes et des dates étudiés dans le cadre de ces simulations est également discuté.

Chapitre IV : OBSERVATION ET MODÉLISATION

DES TEMPÉRATURES A ÉCHELLE FINE :

UNE DÉMARCHE MULTISCALEAIRE

L'étude du changement climatique amène une série de questions sur l'évolution du fonctionnement des géosystèmes aux échelles locales et leur adaptation potentielle future. Un changement global du climat aura obligatoirement des répercussions sur le climat local et sur certaines activités humaines. Les modifications climatiques auront des conséquences dans le domaine agricole, notamment en viticulture. La notion de terroir est pour le viticulteur un élément de mise en valeur de son vignoble et donc un outil *marketing*. L'évaluation des potentialités agroclimatiques actuelles et futures, notamment à travers une meilleure connaissance des variations locales du climat peuvent aider les professionnels viticoles à adapter suffisamment tôt leurs pratiques culturales. Pour cela, une analyse approfondie du climat des régions viticoles à différentes échelles spatio-temporelles doit être conduite (Quénol, 2011). Ce travail de thèse se concentre sur l'analyse de la variabilité spatio-temporelle de la température. En effet, ce paramètre climatique est essentiel dans le développement de la vigne et sert à calculer la plupart des indices bioclimatiques, permettant d'expliquer en partie le déroulement du cycle phénologique et la composition finale des raisins. Ce chapitre présente ainsi la démarche multiscaleaire adoptée dans ce travail de thèse concernant l'analyse de la variabilité spatio-temporelle de la température dans la région viticole du Val de Loire. La méthodologie de mesures climatiques adaptée à l'échelle des terroirs viticoles est ainsi développée. Les outils de spatialisation utilisés également dans le cadre de la thèse sont présentés et leur intérêt dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à échelle fine est discuté.

IV.1. Intérêts de la démarche multiscaleaire dans l'observation et la spatialisation des températures en région viticole

L'étude de la variabilité spatio-temporelle des températures nécessite une approche systémique. En effet, cette variabilité est due à une multitude de facteurs naturels environnementales et anthropiques qui agissent chacun sur la température observée. C'est aux échelles les plus fines que les facteurs locaux vont jouer leur rôle le plus important, alors que l'effet des phénomènes climatiques d'échelles plus larges sera moindre. Dans le contexte du changement climatique, l'analyse de l'évolution du climat régional sur le temps long (plusieurs décennies au moins) doit permettre de recontextualiser l'étude. Des observations à échelle plus fine viennent alors compléter cette étude régionale, afin de comprendre la variabilité spatiale de la température aux échelles topo-climatiques (coteau) et locales (parcelle). L'ensemble de ces observations réalisées à différentes échelles spatio-

temporelles doit aider à évaluer les potentiels impacts des changements climatiques en cours sur les vignobles.

IV.1.1. Observation et étude de la variabilité des températures : une étude à différents niveaux d'échelles spatio-temporelles

La notion d'échelle en climatologie viticole a déjà été abordée dans le tout le premier chapitre de la thèse. Néanmoins, la démarche méthodologique de la thèse doit être développée afin d'expliquer l'importance d'une réflexion autour de l'imbrication de différents niveaux d'échelles spatio-temporelles.

IV.1.1.1. Prise en compte de l'emboîtement des échelles spatio-temporelles

Ce travail de thèse vise à observer et modéliser les températures dans les terroirs viticoles dans le contexte d'un changement climatique. Ainsi, afin d'aider à la compréhension des répercussions climatiques et agronomiques sur une région viticole, le changement climatique nécessite une investigation à différents scalaires (Figure IV.1). Trois niveaux d'échelles spatiales ont été retenus dans cette étude. Le premier niveau d'échelle représente le climat régional qui s'étend sur plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres (Choisnel, 1996). Le climat régional moyen est caractérisé par les observations des stations synoptiques des réseaux nationaux (Météo-France). Au sein même d'une région, les nuances climatiques peuvent alors être importantes, notamment lorsque le relief est accidenté. On étudie alors les topoclimats qui s'étendent de 1 km en montagne à plus de 10 en plaine. Enfin, le niveau scalaire le plus fin est celui du microclimat (de 100 m à quelques cm) qui correspond aux conditions climatiques d'une parcelle ou de quelques rangs de vigne par exemple.

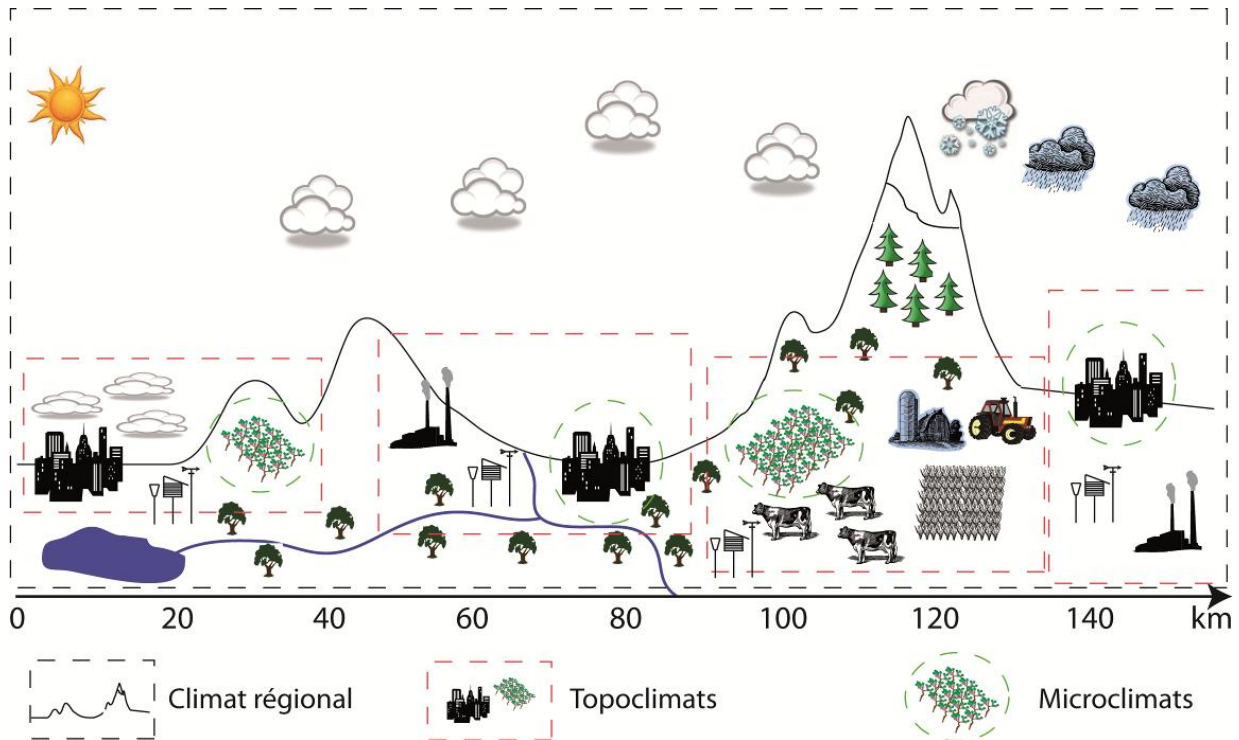


Figure IV.1. Différents niveaux d'échelles spatiales imbriquées dans l'étude climatologique de la thèse (réalisation : Cyril Bonnefoy)

Plus l'échelle s'affine, plus les éléments influant sur la variabilité du climat vont être nombreux. En région peu accidentée, aux reliefs relativement monotone, la variabilité des paramètres climatiques sera peu marquée d'un endroit à l'autre. Cependant, dans les régions viticoles à la topographie contrastée et aux multiples obstacles (forêt, haies ...), la variabilité pourra être parfois marquée. Aux échelles les plus fines, les conditions atmosphériques au niveau de la couche limite (Figure IV.2) sont tributaires des conditions de surface (Yoshino, 1975 ; Oke, 1987). La hauteur de la couche limite varie en fonction du cycle solaire journalier (entre 1 et 2 km) et peut être perturbée par les circulations de larges échelles. C'est dans cette couche limite que s'effectuent les échanges entre sol et atmosphère. La nature du substrat du sol et l'occupation du sol influencent ces échanges et ainsi la variabilité du climat à la surface. A une altitude encore plus faible, de l'ordre de 50 m, la rugosité de la surface terrestre joue également un rôle important dans la variabilité du climat au niveau du sol. En conséquence, plus ces aspérités, diversités topographiques et d'occupation du sol sont importantes plus le climat et en particulier les températures ont une variabilité marquée et complexe dans l'espace. Une très forte variabilité spatiale du climat peut ainsi être observée sur des espaces très restreints comme une propriété viticole. Cette variabilité est même bien souvent supérieure à celle observée à des échelles plus larges, comme à l'échelle de toute une région viticole (Quénol, 2011). L'ensemble de ces éléments perturbateurs du climat à échelle fine doit donc être pris en compte dans l'évaluation du climat d'une région viticole. Cela passe donc par une connaissance rigoureuse du terrain par la nature des sols, l'inclinaison des pentes, les différentes expositions et altitudes des coteaux...

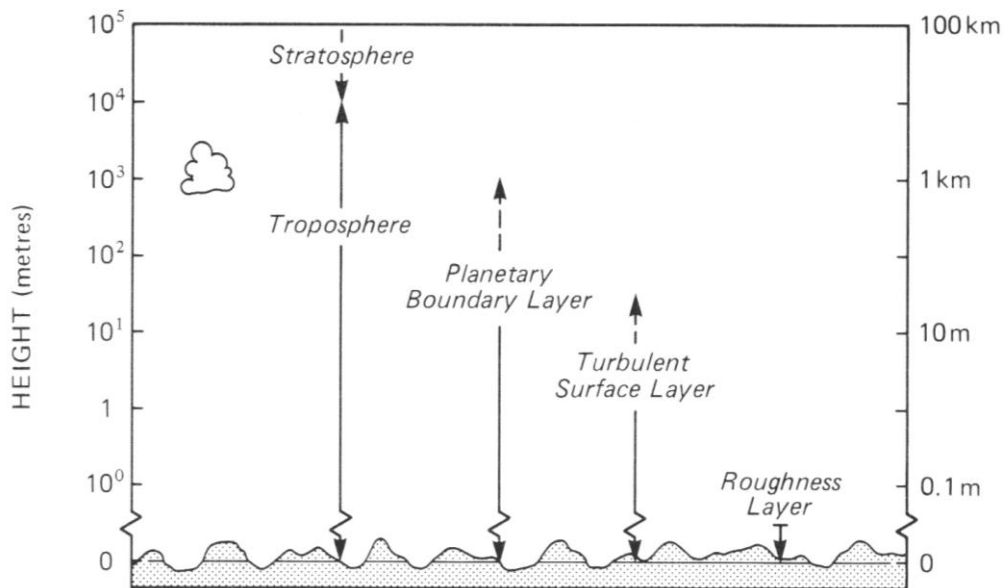


Figure IV.2. Structure verticale de l'atmosphère.

Source : [Oke, 1987]

La dimension spatiale dans la variabilité du climat n'est pas le seul élément à prendre en compte. Il est également nécessaire d'étudier les différents paramètres climatiques à différents niveaux d'échelles temporelles. Comme l'explique Choissnel (1996), « le raisonnement climatique doit prendre en compte la notion d'échelles d'espace imbriquées et respecter un ordre chronologique ». Certains phénomènes climatiques se produisent sur de court laps de temps (tornades, gel, orages ...) alors que d'autres durent parfois jusqu'à quelques jours ou quelques semaines (cyclones, anticyclones, sécheresse ...). La Figure IV.3 présente les principaux phénomènes atmosphériques intervenant à différents niveaux d'échelles spatiales et temporelles. Dans cette thèse, nous travaillons sur trois niveaux d'échelles spatiales. Sur ce schéma, un niveau d'échelle spatiale supplémentaire est présenté : le macroclimat. Il correspond à l'échelle d'un pays, d'un océan ou d'un continent.

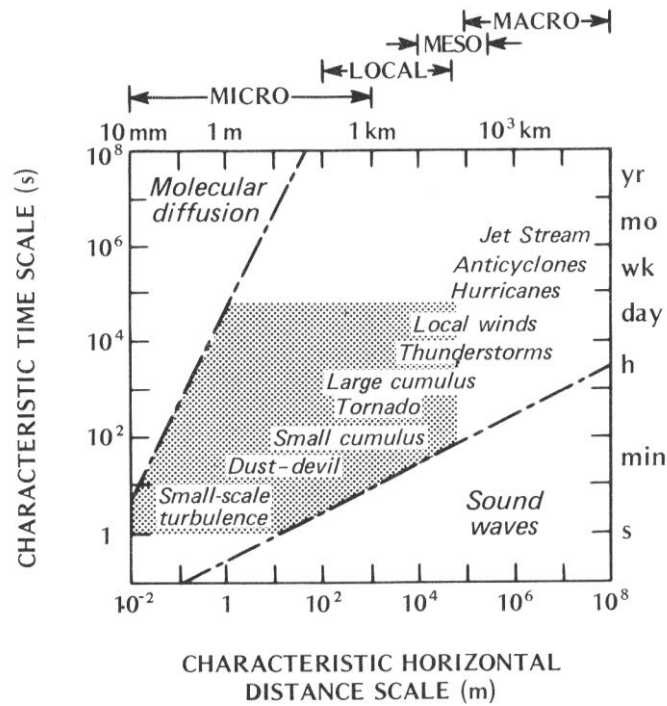


Figure IV.3. Echelles spatio-temporelles des phénomènes atmosphériques. La zone en gris représente le domaine caractéristique de la couche limite.

Source : [Oke, 1987]

Ces différents éléments « perturbateurs » du climat qui interviennent dans la variabilité spatio-temporelle du climat au sein des vignobles peuvent alors être hiérarchisés. Cette hiérarchisation est réalisée dans le cadre d'une approche systémique de la variabilité climatique aux échelles locales (Figure IV.4). Toute modification quelconque d'un élément du système entraîne un changement sur la variabilité spatiale des paramètres climatiques au sein de l'espace étudié. Cependant, certains éléments du milieu sont plus ou moins stables (topographie, hydrographie, sol et sous-sol...) alors que d'autres sont beaucoup plus variables d'un instant à l'autre (temps observé, activités anthropiques...)

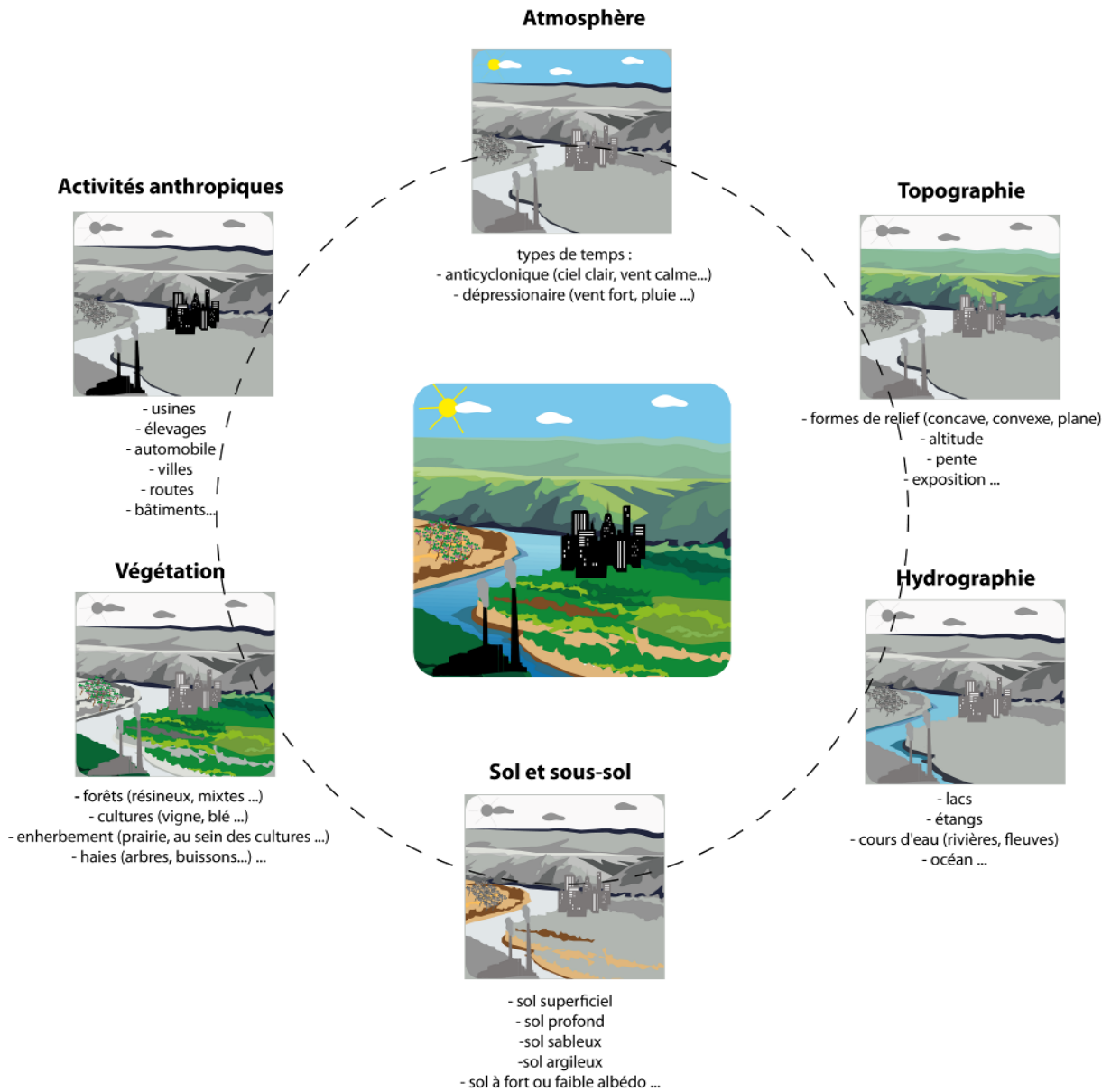


Figure IV.4. Approche systémique de la variabilité spatiale du climat aux échelles locales (adapté de Quénol, 2011)

IV.1.1.2. Approche méthodologique des mesures climatiques adaptées à l'échelle des terroirs viticoles

L'observation du climat aux échelles fines implique une méthodologie d'acquisition des données météorologiques adaptée. Trois types de réseaux météorologiques imbriqués sont utilisés dans le cadre de la thèse :

- Une première partie de l'étude vise à évaluer le climat régional pour poser le contexte climatique général. En effet, cette première approche permet de mettre en évidence les grandes influences climatiques en présence (océanique, continental...). Pour cela le réseau de stations national est utilisé. En France, le réseau de Météo-France permet d'évaluer le climat à l'échelle de la région. Ces stations répondent à des normes internationales² imposées par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), qui visent notamment à minimiser les effets locaux sur le climat (relief, proximité de bâtiments, surface bitumée...). Cette normalisation des données permet de les comparer entre elles dans les différentes régions viticoles. La profondeur temporelle et la continuité de ces données est également un atout, en particulier dans le cas d'étude sur le changement climatique. Une période minimum de 30 années est, par convention, nécessaire pour étudier les normales climatiques.
- Une deuxième partie de l'étude consiste à l'installation de réseaux de stations météorologiques au sein même des vignobles. En effet, le réseau de stations Météo-France n'est pas systématiquement dense dans toutes les régions et l'espacement des stations entre elles ne permet pas d'observer la variabilité spatiale du climat à l'intérieur des terroirs viticoles. Il faut alors mettre en place un réseau de stations météorologiques adapté à l'évaluation de cette variabilité des topoclimats. Contrairement au réseau de stations Météo-France, les stations sont disposées en fonction des facteurs locaux (altitude, pente, exposition...), afin de décrire au mieux les différents climats viticoles. Une étude préalable est donc réalisée afin de préparer de manière la plus optimale l'installation des stations. Le réseau doit quadriller au mieux le terrain d'étude (moyenne vallée de la Loire) afin de pouvoir étudier le maximum de diversités topoclimatiques viticoles. Les mesures des paramètres climatiques se font à un pas de temps régulier (15 min) et de manière simultanée entre les postes de façon à pouvoir comparer les données entre elles. De plus, ces stations sont reliées depuis 2010 à un réseau GSM (*Global System for Global communication*), ce qui permet de récupérer régulièrement du bureau les données, un atout pratique pour la détection d'éventuels dysfonctionnement de matériel de mesures, limitant ainsi les pertes de données.

² Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) (1990), la station météorologique doit être située en terrain dégagé, sur une surface gazonnée et éloignée des bâtiments et des rideaux d'arbres de plus de 10 fois leur hauteur.

- Une dernière et troisième partie de l'étude vise à installer des capteurs de températures en complément des stations complètes. Afin d'évaluer la variabilité microclimatique au sein d'une propriété viticole ou à l'échelle d'une appellation, des capteurs de températures sous abri sont installés directement dans les rangs de vigne. De la même façon que pour les stations météorologiques complètes ces capteurs sont disposés en fonction de la topographie locale, de la nature des sols, de la proximité d'une rivière...ou autrement dit des facteurs locaux qui vont faire varier le climat à l'échelle fine. Des capteurs de température type « Tynitag », présentés dans le chapitre suivant, ont donc été installés dans l'appellation Coteaux du Layon en Anjou. Ces capteurs sont également programmés afin de récupérer les données toutes les 15 min en simultané pour l'ensemble des points de mesures. La collecte des données nécessite encore des déplacements réguliers du chercheur sur le terrain afin d'éviter des pertes trop récurrentes en cas de dysfonctionnement de capteurs. Le principal problème de ce type de matériel est le coût à l'achat qui limite le nombre de postes d'observations (Quénol, 2002).

Dans le cadre de la thèse, un réseau spécifique de station type « Campbell » (décrit dans le chapitre V) a été installé dans l'Anjou et le Saumurois, grâce au programme ANR-JC TERVICLIM. Ce programme, qui a débuté en 2008 et s'est terminé en 2012, visait notamment à évaluer les impacts des changements climatiques dans les terroirs viticoles de différents pays. C'est ainsi qu'en 2012, 22 vignobles étaient équipés dans 14 pays. Le val de Loire, terrain d'étude de la thèse, est l'un des deux sites expérimentaux principaux de ce programme avec l'Afrique du Sud. Pour résumer, l'installation d'un dispositif de mesures adapté aux échelles fines dans les vignobles permet de compléter les réseaux nationaux. L'analyse de ces données aux échelles topoclimatiques et microclimatiques permet d'acquérir une connaissance précise et très fine de la diversité climatique. Enfin, les climatologues travaillent également en étroite collaboration avec les agronomes, par exemple de l'INRA d'Angers pour le Val de Loire, afin de suivre le comportement de la vigne en parallèle de ces mesures climatiques.

IV.1.2. Spatialisation des températures à l'échelle des terroirs viticoles

Les phénomènes climatiques et atmosphériques sont continus dans l'espace alors que les observations (relevés climatiques) sont réalisées de manière ponctuelle. Une partie de ce travail de thèse consiste à trouver l'une des meilleures méthodes statistiques afin de spatialiser les températures relevées par les capteurs à l'échelle des Coteaux du Layon. Plusieurs méthodes de spatialisation existent et diffèrent selon l'échelle de l'étude. En effet, les méthodes géostatistiques seront privilégiées pour l'interpolation de données provenant de réseaux couvrant des surfaces relativement homogènes d'un point de vue topographique. En revanche, sur des espaces très hétérogènes topographiquement, les

facteurs locaux prévalant sur les structures (distance entre les capteurs), les méthodes de modélisation multicritères seront plus adaptées.

IV.1.2.1. De la donnée discrète à la donnée continue

Les relevés des stations et des capteurs météorologiques sont une information ponctuelle intéressante pour le viticulteur. Cependant, les professionnels voudront connaître les risques climatiques sur l'ensemble de leur propriété plutôt qu'en un nombre réduit de points. Le géographe-climatologue propose donc de combler ces lacunes de données dans l'espace par des méthodes de spatialisation. Spatialiser un paramètre climatologique revient à déterminer, à partir des valeurs mesurées ponctuellement sur un espace donné, sa valeur en tout point de l'espace (Merlier, 2001). Outre leur intérêt visuel grâce à la réalisation de cartes sous Système d'Information Géographique (SIG), ces méthodes permettent d'obtenir des données modélisées s'approchant des champs climatiques des paramètres observés à l'origine continu dans l'espace. Le réseau de capteurs ou de stations doit être le plus représentatif possible de la diversité climatique (Feyt *et al.*, 1995) afin de minimiser les biais du modèle. Le choix de la méthode de spatialisation sera également primordial dans la qualité finale du modèle produit (Vigneau, 1994).

Différentes méthodes de spatialisation existent et sont plus ou moins adaptées selon les situations. Les méthodes de spatialisation géostatistique se basent sur le fait que la valeur de la variable étudiée en tout point dépend de celles des postes autour et de la distance à ces postes. Les méthodes de spatialisation multicritères partent du principe que la variabilité de tel ou tel paramètre climatique est fortement liée aux facteurs locaux. A l'échelle des recherches menées dans le cadre de cette thèse, la spatialisation multicritères semble la plus adaptée (Madelin, 2004).

IV.1.2.2. La modélisation multicritères : un outil de spatialisation aux échelles fines

Les méthodes géostatistiques utilisées couramment pour l'interpolation des données météorologiques issues des réseaux météorologiques classiques (ex : Météo-France) sont inadaptées aux échelles fines. Les méthodes de modélisation multicritères sont une alternative à ce problème puisqu'elles reposent sur l'hypothèse que les paramètres climatiques dépendent fortement de facteurs locaux du terrain étudié (Kergomard *et al.*, 2002). A l'échelle d'un vignoble, la température va dépendre très fortement des particularités environnementales du milieu liées aux formes de topographie (fond de vallée, plateau ...), aux caractéristiques du relief (pente, altitude, exposition) mais aussi à la proximité d'une rivière, la présence d'un lac et la composition du sol (argile/limon/sable). Tous ces paramètres environnementaux ont une influence plus ou moins importante sur la variabilité spatiale à échelle fine dans le vignoble. La modélisation multicritères permet donc de mettre en évidence les relations statistiques qui existent entre la variable « température » et les facteurs environnementaux cités précédemment. Le choix des facteurs explicatifs à introduire dans le modèle, est donc une étape préliminaire importante à la réalisation même du modèle. Il est faut alors prendre en compte leur importance relative dans la variabilité de la température et parfois les transformer en variable

numérique exploitable par le modèle statistique. Une connaissance accrue des facteurs explicatifs est importante afin de hiérarchiser ces derniers et éviter toute redondance qui nuirait à la qualité du modèle. Ces méthodes de modélisation multicritères font appel à des démarches purement explicatives contrairement à la modélisation géostatistique. Les deux méthodes sont également parfois combinées entre elles. Les deux méthodes de modélisation multicritères sont la régression simple et la régression multiple. Ces méthodes supposent que la relation entre le ou les facteurs explicatifs et la variable expliquée est linéaire. Dans le cas de relations non-linéaires, les variables explicatives pourront être transformées à l'aide du logarithme. Ainsi, les équations sorties de ces modèles de régression sont appliquées à chaque point de l'espace afin de prédire la température. La construction des modèles statistiques, utilisés dans le cadre de la thèse pour le secteur des Coteaux du Layon, est développée dans le chapitre VI.

IV.2. Modélisation climatique dans le cadre d'étude d'impacts sur le vignoble : intérêts des modèles de circulation régionale de l'atmosphère (MCRA)

La modélisation numérique du climat est également un outil de spatialisation des paramètres climatiques. Elle permet d'évaluer la variabilité spatiale du climat à différentes résolutions et sur des surfaces plus ou moins étendues. Les modélisations du climat futur à échelle globale ou des continents réalisées à l'aide de modèle de circulation générale de l'atmosphère (MCGA) ne sont pas suffisamment fines pour anticiper d'éventuels impacts à l'échelle d'un vignoble. Les topoclimats étant très sensibles à leur environnement (pente, orientation, proximité d'une rivière, d'un plan d'eau ou de l'océan...), des études à échelles fines doivent compléter celles d'aspect plus régionales pour permettre la prise de décision à l'échelle locale, en particulier à l'échelle de la parcelle pour la vigne. C'est pourquoi, l'utilisation de modèles de circulation régionale de l'atmosphère (MCRA) ou modèles méso-échelles sont de plus en plus utilisés dans le cadre d'études d'impacts en viticulture.

IV.2.1. Les sorties régionalisées : des simulations adaptées aux études d'impact.

Les recherches concernant la régionalisation des sorties des MCGA se développent de plus en plus au sein de la communauté scientifique. Cette évolution répond à une demande croissante des décideurs et des acteurs du terrain concernant les impacts futurs des changements climatiques. La résolution des sorties régionalisées est ainsi bien plus adaptée aux différentes prises de décision.

IV.2.1.1. Les MCGA et leurs limites

Dans le chapitre 2, les MCGA ont été abordés brièvement lors de l'introduction des scénarios SRES du GIEC réalisés dans le cadre des changements climatiques globaux. Ces modèles sont basés sur les équations fondamentales qui régissent le fonctionnement de l'atmosphère (Le Treut, 2010) et sont souvent couplés à d'autres modèles qui intègrent la végétation et les océans ; on parle alors de modèle couplé terre-océan-atmosphère. Leur fonctionnement s'appuie donc sur des connaissances de physique de l'atmosphère, de thermodynamique, de

chimie et de biologie. Ainsi, les océans et l'atmosphère sont découpés en boîtes élémentaires (Figure IV.5) de 200 à 300 km de résolution horizontale et de quelques dizaines à quelques centaines de mètres sur la verticale (Lauffenburger, 2007 ; GIEC, 2007 ; Beltrando, 2010 ; Jouzel, 2011). Le temps est aussi découpé en pas de temps élémentaires allant de 15 à 30 minutes.

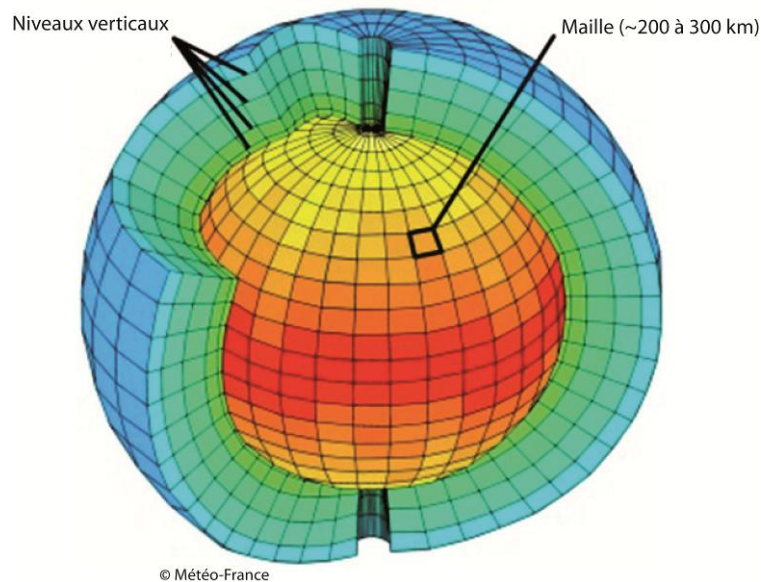


Figure IV.5. Maillage tridimensionnel (longitude, latitude, altitude) d'un modèle global de simulation du climat. Les couleurs représentent la température.

Source: [meteofrance.com]

La principale difficulté de la modélisation est qu'il existe toujours des processus ayant une échelle d'espace et de temps plus petite que la dimension des boîtes élémentaires ou que le pas de temps du modèle (nuages, pluies orageuses, turbulence...). Les modèles incluent donc une représentation de ces processus « sous-maille » qui reproduit leurs impacts à l'échelle de temps et d'espace résolu par le modèle. Cette étape représente la phase de paramétrisation du modèle puisqu'elle consiste à établir un certain nombre de paramètres au sein des équations. Ainsi, l'une des principales difficultés de la modélisation est d'établir l'ensemble des paramétrisations nécessaires et les mieux adaptées aux échelles résolues par le modèle. Les MCGA constituent aujourd'hui les meilleurs outils de simulation des changements climatiques globaux. L'amélioration des techniques de modélisation et de vitesse de calcul a permis d'affiner la résolution horizontale de ces modèles. Ces résolutions sont néanmoins trop faibles pour produire de l'information de qualité nécessaire dans le cas d'études d'impact. Ces résolutions ne permettent également pas de simuler avec précision des phénomènes extrêmes type canicule ou gel local par exemple.

IV.2.1.2. Les apports de la désagrégation dynamique

Il existe, depuis quelques années, une forte demande en particulier pour la mise en place de politiques pertinentes d'atténuation et d'adaptation, pour que le climat futur soit étudié à l'échelle locale et en termes de phénomènes extrêmes. C'est pourquoi les chercheurs ont développé des modèles capables de désagréger le signal global à des échelles régionales. Ces

modèles sont ainsi capables de descendre à des résolutions de plus en plus fines, de l'ordre du kilomètre voire de quelques centaines de mètres. Les mailles de ces modèles se rapprochent de celles sur lesquelles il est possible d'envisager les conséquences du changement pour les activités anthropiques (Beltrando, 2010). Les résultats sont encore assez variables selon les modèles et des progrès restent à faire dans la paramétrisation afin de mieux reproduire les extrêmes climatiques. Leur utilisation est toutefois très précieuse dans des études d'impact des changements climatiques, en particulier en agriculture. En effet, ces sorties de modèles sont de véritables outils de décision, notamment en viticulture, puisque la vigne étant une plante pérenne, les choix d'adaptation des cultures et de pratiques doivent être fait dès maintenant.

IV.2.1.3. Le développement de projets internationaux autour de la régionalisation des sorties de modèles

De nombreux projets visant à améliorer la coopération des scientifiques dans le cadre des modèles du climat ont permis d'affiner les échelles d'analyse. C'est ainsi que le projet ESCRIME est né en France à la suite de la publication du 4^{ème} rapport du GIEC en 2007. Ce projet réunit principalement les chercheurs de Météo France et de l'institut Pierre Simon Laplace (IPSL) et vise notamment à traiter les sorties régionalisées des modèles. Le projet DRIAS a vu également le jour récemment et met à disposition de la communauté scientifique les sorties de modèles désagrégés à 8 km. Ce projet doit aider les groupes de chercheurs travaillant sur les impacts régionalisés des changements climatiques. C'est ainsi que ces scénarios désagrégés ont été réalisés et validés au sein du CERFACS, ces scénarios étant appelés SCRATCH08 (Pagé *et al.*, 2008) et SCRATCH2010 (Pagé et Terray, 2010). Ce projet fournit donc les sorties brutes de modèles mais également des indices à la demande des chercheurs et enfin des informations relatives à des mesures d'adaptation et d'aide à la décision. Enfin, en parallèle diverses revues scientifiques ont publié des numéros spéciaux concernant la modélisation climatique à échelle régionale. En 2007, *Climatic Change* a sorti un numéro spécial faisant le bilan des recherches qui ont été menées dans le cadre du projet européen PRUDENCE (*Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects*). L'objectif principal du projet était de fournir des scénarios du changement climatique à haute résolution spatiale en Europe pour la fin du XXI^{ème} siècle à l'aide des données issues de la désagrégation des sorties des modèles globaux (Christensen et Christensen, 2007). Enfin, plus récemment en 2012, le journal *Climate Research* a publié un numéro spécial sur le modèle régional RegCM4. Ce modèle a été développé au National Center for Atmospheric Research (NCAR) au Colorado et sa dernière version a considérablement amélioré sa flexibilité, sa facilité d'utilisation et son utilité.

IV.2.1.4. Les méthodes de désagrégation d'échelles

Différentes méthodes de désagrégation d'échelles sont utilisées pour obtenir des sorties de modèles à échelles fines. Il existe en réalité trois grandes familles de techniques de régionalisation destinées à affiner l'information climatique fournies par les MCGA :

- Les MCGA à résolution variable (MCGvar).
- Les méthodes de réduction d'échelle statistique.
- Les modèles climatiques régionaux (MCRA) à grilles emboîtées.

Les deux dernières méthodes qui peuvent être combinées entre elles (Giorgi, 2006) sont les deux méthodes développées ci-dessous, du fait notamment de leur utilisation grandissante dans la communauté scientifique :

Désagrégation statistique

Elle fait appel à des techniques statistiques qui permettent de relier les variables de petites échelles aux variables d'échelle régionale ou locale au moyen de modèles ou de fonctions ajustés grâce aux observations réalisées et à l'utilisation de Système d'Information Géographique (SIG) et de Modèle Numérique de Terrain (MNT). Les différentes techniques de désagrégation statistique sont les modèles de régression, les systèmes générateurs et classificateurs de conditions météorologiques, les réseaux neuronaux et les méthodes analogiques et d'échelonnement des régimes climatiques (Christensen *et al.*, 2007).

La méthodologie d'étude à partir des types de temps est la première méthode utilisée en France (Pagé *et al.*, 2008 ; Boé, 2007 ; Boé et Terray, 2008). Cette méthode est appliquée sur des séries d'observation de 1958 à 2008 générées dans la base de données SAFRAN produite par Météo France. La méthode quantile-quantile est la deuxième méthode utilisée pour la désagrégation statistique des sorties de modèles. Elle consiste à associer chaque centile des données d'observations à chaque centile du modèle. Ces relations, qui sont dérivées d'observations, sont ensuite appliquées aux résultats des simulations des MCGA pour le climat futur afin d'obtenir des informations sur les changements climatiques à l'échelle locale. Si ces méthodes de désagrégation statistiques sont moins onéreuses, notamment en temps de calcul par rapport à la désagrégation dynamique, l'hypothèse fondamentale sur quoi elles reposent est que les relations statistiques établies à l'aide de l'information sur le climat actuel sont également valides sous différentes conditions climatiques (Hewitson et Crane, 1996). Cette hypothèse engendre nécessairement une incertitude sur les projections de ce type de modèle, puisque la distribution des différents paramètres climatiques futurs ne sera pas forcément similaire à leur distribution présente.

Désagrégation dynamique

Cette méthode vise à régionaliser les sorties de modèles globaux grâce à l'imbrication de grilles à différents niveaux de résolution. La première grille est ainsi forcée en ses limites par des champs à basses résolutions, souvent issus des MCGA, et la dernière grille contient les données avec la résolution la plus fine. Ces modèles sont appelés Modèle de Circulation Régionale de l'Atmosphère (MCRA). Le passage de l'échelle globale aux échelles régionales se fait par « *downscaling* » ou encore par désagrégation d'échelle (Figure IV.6). Avec l'amélioration de la résolution des sorties du modèle, la topographie, la végétation, l'hydrographie et les caractéristiques des sols sont mieux pris en compte. Cependant, le

mode unidirectionnel ou *one-way* ne permet pas de corriger les éventuelles erreurs ou imprécisions présentes dans le MCGA qui sert de forçage au MCRA, mais est plutôt destiné à ajouter de l'information régionale fine au signal climatique de large échelle. C'est pourquoi il est primordial d'analyser avec précision en amont les champs du modèle global utilisé pour le forçage du MCRA aux limites latérales. Météo France utilise par exemple le modèle ARPEGE-Climat comme modèle global, ce modèle ayant une résolution variable de 50 km sur la méditerranée à 450 km dans le Pacifique (Déqué et Li, 2007). Afin de désagréger le signal d'ARPEGE à des échelles plus fines, ils utilisent le modèle régional ALADIN qui descend à une résolution de 10 km et est aussi appelé « modèle à aire limitée ». Dans ce travail de thèse, le modèle Regional and Atmospheric Modeling System (RAMS) a été utilisé et les détails des données et de la méthodologie employée est développé dans le chapitre VII.

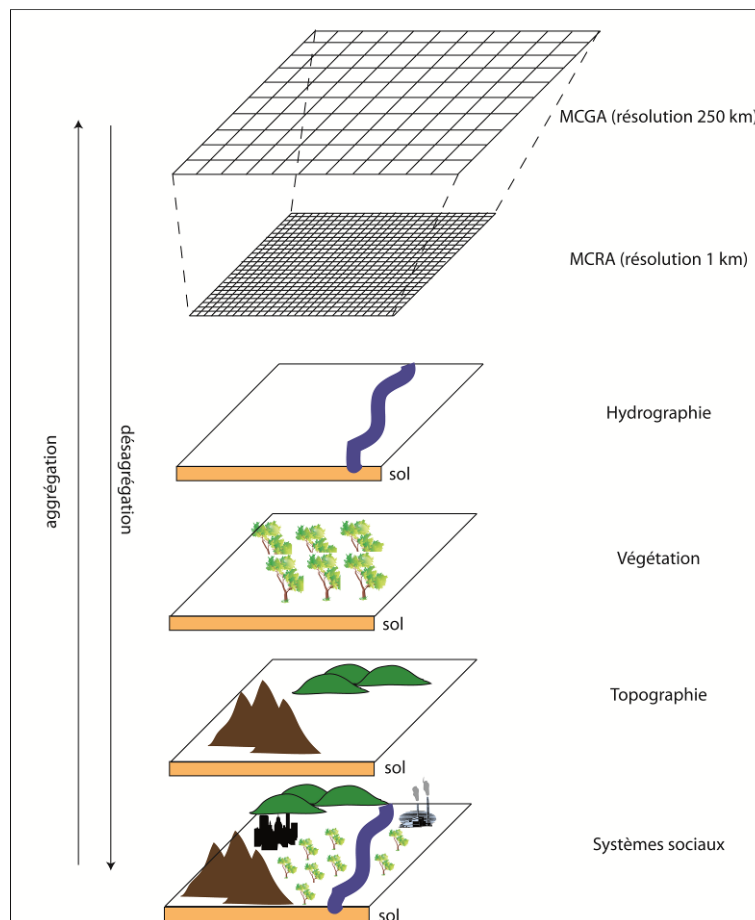


Figure IV.6. Schéma du passage des sorties des MCGA vers les sorties des MCRA (d'après Viner, 2000)

IV.2.2. Changement climatique et viticulture : apport des modèles de circulation régionale de l'atmosphère

Depuis quelques années les études d'impact sur la viticulture utilisant les sorties de MCRA se sont multipliées. Ces modèles, grâce à leur résolution très fine, constituent en effet des outils essentiels pour arriver à évaluer l'impact des changements climatiques en cours et futurs à l'échelle de l'exploitation viticole ou même de la parcelle. Ces modèles servent également à spatialiser des aléas climatiques ponctuellement dommageables pour la vigne. La validation des sorties se fait alors grâce aux données des observations du terrain.

IV.2.2.1. Validation des sorties des modèles

Les modèles régionaux à résolution fine sont évalués à partir de la comparaison des données simulées et observées. En effet les données d'observation des stations météo en place sont plus facilement comparables aux sorties de ces modèles régionaux qui possèdent une résolution plus proche de la donnée observée. L'évaluation de ces modèles est ainsi essentielle pour mesurer la faculté des modèles à reproduire la variabilité spatio-temporelle du climat à échelle fine. Cette connaissance en amont est également nécessaire pour l'interprétation des scénarios futurs du climat. Le travail du géographe consiste donc à analyser et interpréter les sorties des modèles du climat, tout en ayant conscience de l'ensemble des incertitudes interne au modèle mais aussi liées aux comparaisons faites (observations ponctuelles et simulations par maille). Les réseaux de stations nationaux servent donc à la validation des sorties de modèles mais les réseaux implantés plus finement au sein même des propriétés viticoles sont primordiales concernant l'évaluation de la faculté du modèle à reproduire les topoclimats qui caractérisent en grande partie le terroir local. C'est ainsi que différentes études scientifiques ont montré la robustesse grandissante des MCRA et leur apport indiscutable aux géographes climatologues qui travaillent sur ces questions d'impact sur la vigne et d'adaptation de la profession viticole face à ces changements climatiques.

IV.2.2.2. Exemples d'applications en viticulture

Tout comme la modélisation multicritères, les MCRA permettent d'obtenir des champs de températures, humidité, vent... continus dans l'espace et à échelle fine. De plus les sorties de modèles régionaux peuvent être réalisées sur des pas de temps de 12h, 6h, 3h voire horaire qui peuvent être comparés aux données de résolution temporelle fine obtenues à partir des stations météorologiques situées dans les vignobles. Enfin, ces modèles prennent en compte la circulation atmosphérique et les échanges sol-végétation-atmosphère contrairement aux modèles multicritères qui ne fournissent ainsi qu'une information partielle puisque uniquement centrés sur les paramètres géographiques et environnementaux. C'est ainsi que l'utilisation des modèles climatiques régionaux est de plus en plus répandue dans la communauté scientifique, en particulier dans le cas d'étude d'impact en viticulture. Les modèles régionaux permettent d'aboutir à un zonage climatique viticole dans les différentes régions concernées. Des chercheurs utilisant un modèle régional se sont notamment intéressés à la surface de terrain susceptible au XXI^{ème} siècle d'accueillir de la vigne (White *et al.*, 2006). Webb *et al.* (2007) a utilisé un modèle régional et a montré qu'en Australie les zones susceptibles de cultiver du raisin devraient régresser vers la mer, où l'air marin apporte une certaine fraîcheur pour la vigne. Une étude similaire a été menée en Californie (Lobell *et al.*, 2006) et montre aussi que les terres viticoles risquent de migrer vers l'océan Pacifique. En France, une étude s'est concentrée sur l'apport du modèle Regional Atmospheric Modelling System (RAMS) pour évaluer le changement climatique à l'échelle régionale dans différentes régions viticoles françaises (Bonnardot *et al.*, 2012). Après des simulations sur la période de contrôle 1991-2000, des cartes de température à 5 km de

résolution ont pu être proposées pour la période 2041-2050. La Figure IV.7 présente cette carte ainsi que la sortie correspondante à 50 km de résolution du modèle ARPEGE-Climat. Le gain de résolution apparaît ainsi clairement entre les deux sorties de modèles.

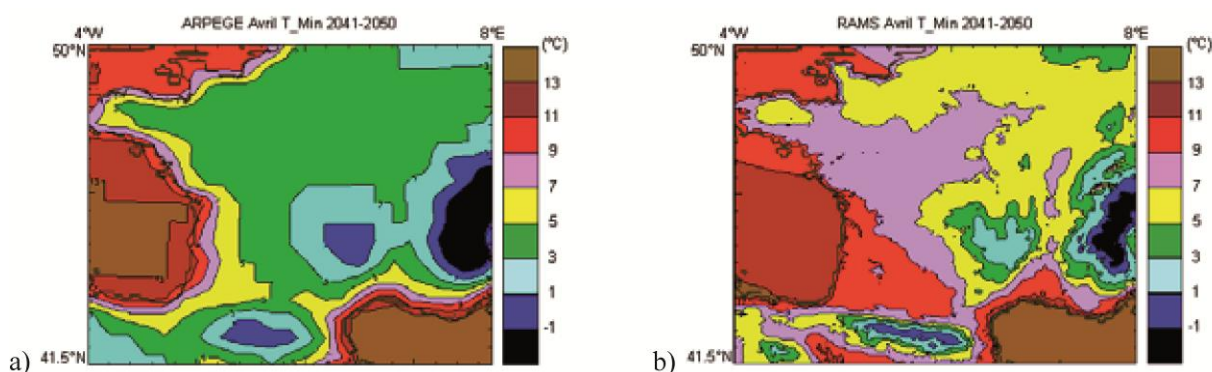


Figure IV.7. Températures minimales d'avril simulées par a) ARPEGE (résolution 50 km) et b) RAMS (résolution 5 km), pour la période 2041-2050 (SRES scénario A2) et pour le domaine de la grille 2.

Source : [Bonnardot *et al.*, 2012]

Les capacités du modèle *Weather Research and Forecasting* (WRF) à modéliser les températures en situation caniculaire en Bourgogne viticole ont été évaluées (Bonnefoy *et al.*, 2009) et une carte d'anomalies des degrés jours durant la canicule de 2003 a ainsi pu être proposée (Figure IV.8). Dans ce cas précis, l'étude a permis de montrer l'intérêt de l'utilisation du modèle pour prévoir des épisodes intenses telle que la canicule de 2003 mais aussi d'avoir une image des conditions thermiques futures probables en Bourgogne puisque des épisodes caniculaires comme en 2003 devraient se multiplier dans les décennies à venir (GIEC, 2007).

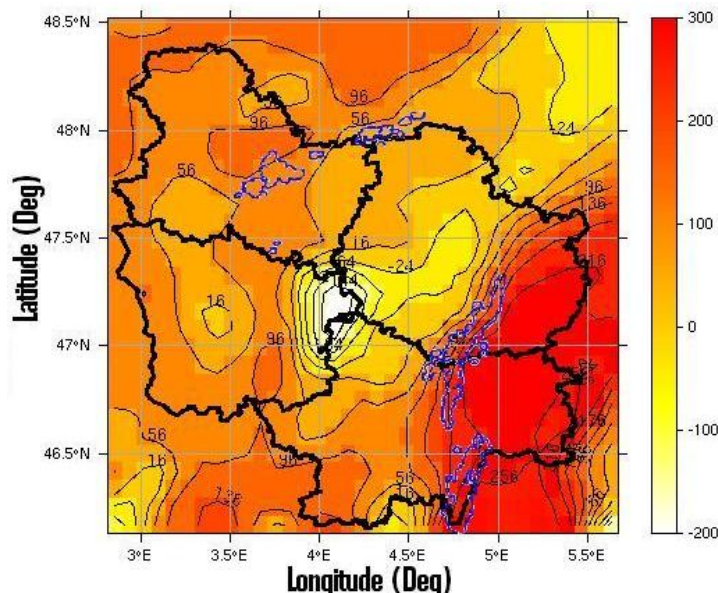


Figure IV.8. Anomalies de degrés-jours cumulés par rapport à la normale de Savigny-Lès-Beaune en date de maturité (19/08/2003) en Bourgogne.

Source : [Bonnefoy *et al.*, 2009]

Le modèle WRF a également et plus récemment servi dans la modélisation du nombre de journées chaudes ($T_x > 30^\circ\text{C}$) durant la saison végétative de la vigne en Bourgogne (Figure

IV.9), à la fois sur une période passée (années 1970) et future (années 2030). Ces simulations ont ainsi mis en évidence une hausse de la fréquence de ce type de journées.

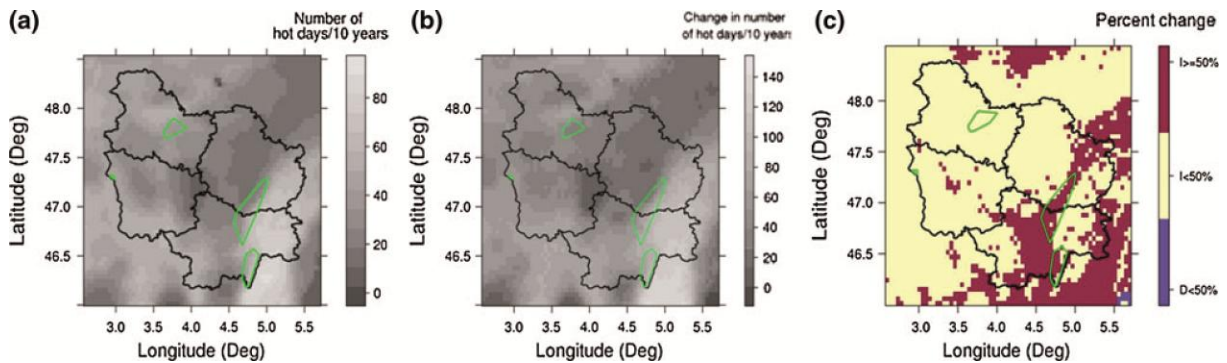


Figure IV.9. Nombre de journées chaudes ($T_x > 30^\circ\text{C}$) durant la saison végétative de la vigne sur la décennie des années 1970 (a) et évolution de ce nombre de jours (b) entre les années 1970 et les années 2030 ; (c) évolution du nombre de jours en pourcentage.

Source : [Xu *et al.*, 2012]

Enfin, les MCRA sont également utilisés sur des secteurs plus restreints et à plus haute résolution spatiale et temporelle. Madelin (2004) a par exemple utilisé le modèle méso-NH de Météo-France pour simuler des champs de températures et de vents à une résolution de 1km lors d'un épisode de gel printanier survenu en 2003. La Figure IV.10 montre les cartes du transect obtenu sur un coteau viticole à deux heures distinctes de la fin de nuit de cet épisode. Ces modélisations d'événements extrêmes passés permettent de comprendre la variabilité spatiale de la température à l'échelle d'un coteau viticole. Les zones à risque gélif plus marqué sont alors mises en évidence. Dans le contexte des études d'impact du changement climatique, ces simulations peuvent aider à anticiper les futures conséquences sur la variabilité spatiale de la température à échelle fine.

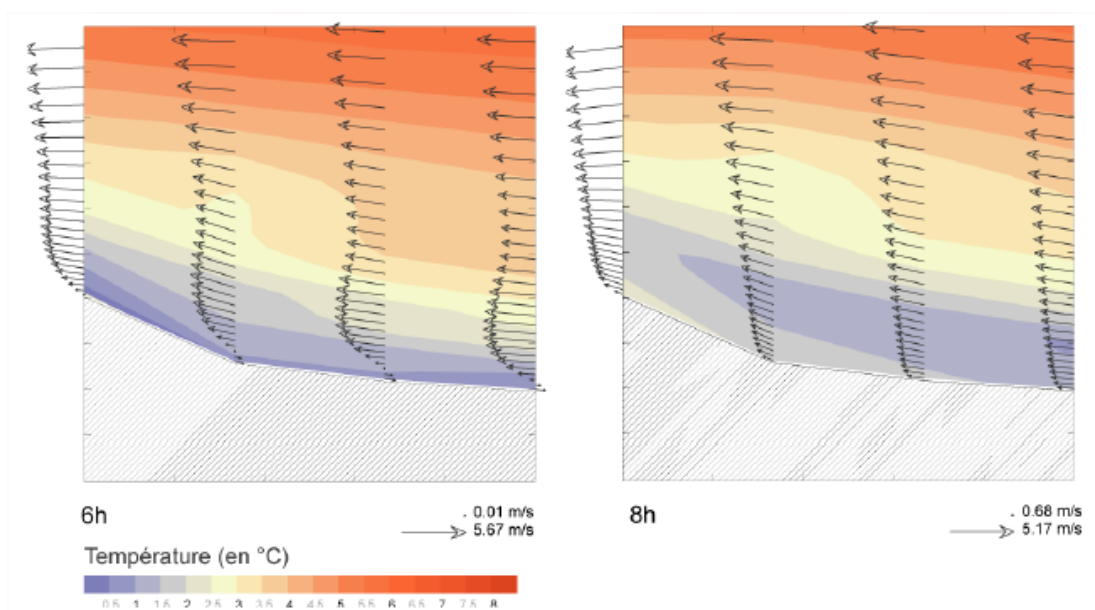


Figure IV.10. Simulation du vent et des températures par le modèle méso-NH à 1 km de résolution sur le transect d'Avize (Champagne) en fin nuit du 16 au 17 Mars 2003.

Source : [Madelin, 2004]

CONCLUSION DU CHAPITRE IV

La démarche méthodologique générale de la thèse a été développée dans ce chapitre. Dans un contexte de changement climatique, la notion de variabilité spatio-temporelle de la température dans les terroirs viticoles et en particulier dans le Val de Loire sera ainsi étudiée avec une approche multiscalaire. Cette méthode va permettre d'acquérir des connaissances approfondies sur la variabilité climatique et plus particulièrement de la température au sein des vignobles du Val de Loire. Les outils de modélisation à la fois statistique et numérique vont permettre une spatialisation de la température au sein de ces terroirs. La mise en place de ce protocole de mesures spécifiques et de modélisation adaptée aux échelles fines s'avérera très utile pour affiner les résultats des MCGA en comblant l'absence de données aux échelles fines dans cette région.

Chapitre V ACQUISITION DES DONNÉES D'OBSERVATION ET APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DU TRAITEMENT DES DONNÉES

Comme expliqué dans le chapitre précédent, l'importance de l'imbrication des échelles spatiotemporelles est au cœur de ce travail de thèse. Ainsi, des jeux de données à différents niveaux d'échelles ont dû être collectés. Dans un premier temps, l'analyse de l'évolution passée du climat est effectuée afin d'évaluer les changements climatiques, notamment en terme de température, qui se sont produits durant les 50-60 dernières années dans le Val de Loire. Dans un second temps, une méthodologie d'acquisition des données a été réalisée à une échelle topoclimatique puis à une échelle plus fine comme celle des Coteaux du Layon. L'analyse de ces données doit notamment permettre d'obtenir une très bonne connaissance de la variabilité spatiale de la température et des indices bioclimatiques, au sein même de ces terroirs viticoles. Une bonne connaissance de la variabilité intra- et inter-sites du climat dans ces vignobles permettra une évaluation plus précise des conséquences éventuelles d'un changement climatique dans la région.

V.1. Acquisition et traitement des données du réseau régional en Val de Loire

Afin d'analyser l'évolution du climat depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, le réseau de stations de Météo France a été utilisé. La zone d'étude a été élargie au centre ouest français pour une analyse plus complète des changements éventuels en termes de température. C'est ainsi 10 stations météorologiques complètes et homologuées par Météo France qui ont pu être utilisées. Une étude préliminaire de ces données a été réalisée afin de s'affranchir de toute rupture statistique dans les séries qui correspondrait à un changement éventuel de site ou de capteurs.

V.1.1.1. Sélection des stations Météo-France

La sélection a été réalisée dans un grand centre-ouest français comprenant les départements du Val de Loire (Loire-Atlantique, Maine-et-Loire, Indre-et-Loire, Loir-et-Cher, Loiret, Cher) et quelques départements frontaliers (Mayenne, Sarthe, Indre, Vienne) soit aux totales 10 départements du centre-ouest de la France.

V.1.1.2. Recherche de stations disponibles dans le centre-ouest français

Le paramètre principal étudié dans cette thèse est la température. Une sélection de stations météorologiques du réseau de Météo France a donc dû être réalisée en fonction de la disponibilité de ce paramètre. Le but de cette pré-sélection de stations était d'avoir des séries, sans perte de données, pour la plus longue période commune possible, à savoir depuis le milieu du XX^{ème} siècle. La Figure V.1 montre le réseau de stations originellement disponible dans le Centre ouest Français. Ce dernier comprend les stations automatiques, manuelles et synoptiques qui sont les stations de référence pour les principales villes de France.

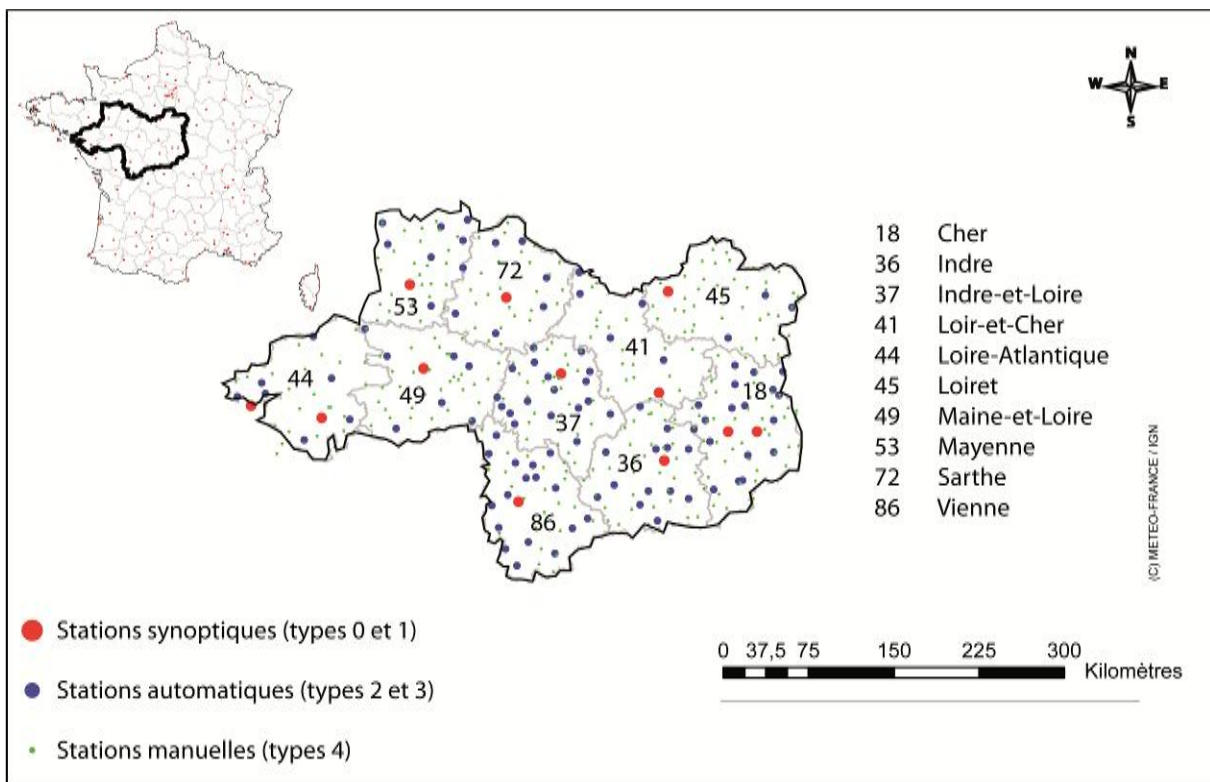


Figure V.1. Stations d'observations Météo-France originellement disponibles dans le centre-ouest Français (d'après Météo-France/IGN)

Le réseau semble plutôt dense mais rapportées à une période d'une soixantaine d'années, les séries complètes sont plus rares. Souvent les métadonnées de Météo-France indiquent que les stations ont eu des pertes de données ou que les stations ont été tout simplement fermées notamment dans le cas de stations manuelles gérées pour un grand nombre par les bénévoles qui effectuent les relevés quotidiens. Les stations synoptiques ont ainsi été privilégiées dans nos choix car ces stations sont les références du climat régional et ainsi facilement inter-comparables entre elles. Elles répondent aux normes de l'OMM développées dans le chapitre précédent. Elles permettent également de décrire avec suffisamment de nuances la variabilité intra-régionale de la température, notamment du fait de leur répartition homogène au sein de la région. Des 409 stations proposées par la climathèque de Météo-France pour les 10 départements, nous ne retenons au final que 12 stations avec les critères requis (Figure V.2). Parmi ces stations, Blois et Saumur ne sont pas

du réseau synoptique mais des stations manuelles. Elles ont cependant été retenues, du fait de la profondeur temporelle des données et de leur proximité au vignoble.

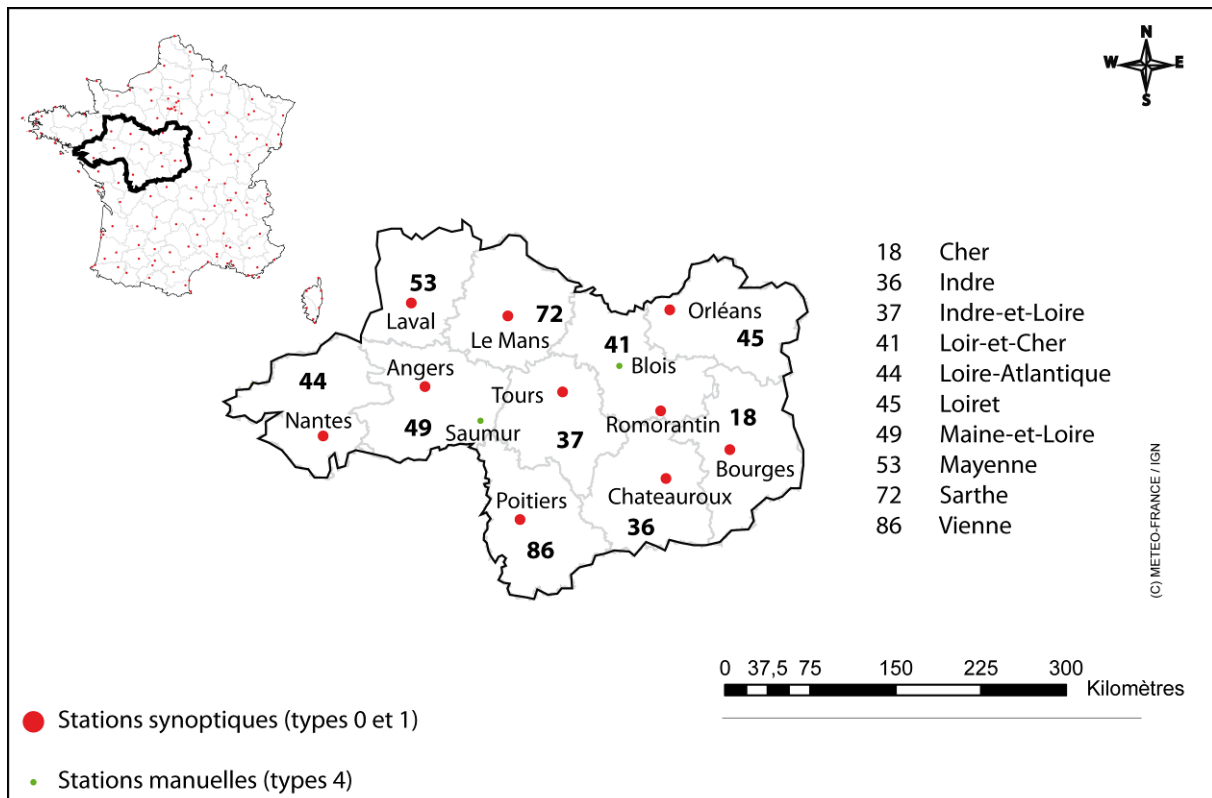


Figure V.2. Stations d'observations Météo-France disponibles dans le Centre ouest Français après sélection pour l'étude dans le cadre de la thèse (d'après Météo-France/IGN)

Une série d'observations météorologiques est considérée comme homogène lorsque les conditions de mesures n'ont pas changé au cours du temps. Parfois la série sera hétérogène du fait d'éléments perturbateurs divers (Choisnel, 1996) comme le changement de capteur ou le changement de l'observateur. En France, le changement de site de mesures serait le facteur qui impliquerait la plus grande hétérogénéité d'une série de données (Mestre, 2000). La deuxième étape de la sélection des stations a été de vérifier tout déplacement éventuel de site de mesures. Les changements de sites sont indiqués sur le portail des données de Météo-France (climathèque). Aucune station n'a été déplacée dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle hormis celles de Laval, Blois et Tours. La station de Laval a été déplacée en 1988 (Figure V.3a) d'un milieu urbain (proche centre-ville) à un milieu péri-urbain (aérodrome). Ce déplacement a causé une hétérogénéité dans la série de températures, en particulier une baisse soudaine de la température après 1988 (Figure V.3b). Une impression de stationnarité de la série ressort du fait que ce refroidissement a annulé la tendance générale au réchauffement dès les années 80 qu'on retrouve pour les stations d'Angers et Saumur. La station de Laval a donc été évincée de l'étude.

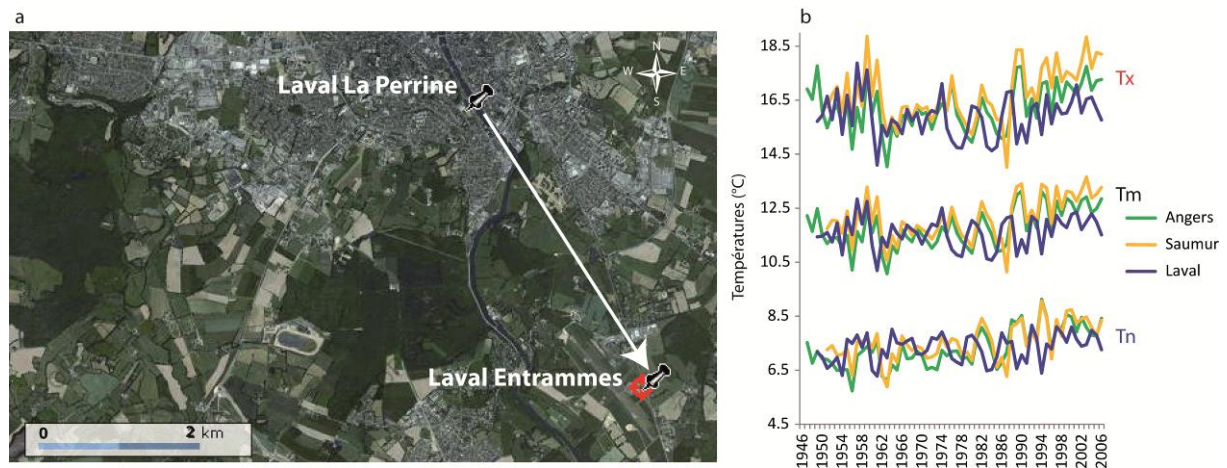


Figure V.3. Déplacement de la station Météo-France de référence pour la ville de Laval en 1988 (a) et effet sur la température (b) vis-à-vis de deux stations de la région n'ayant pas subi de déplacement.

Sources : [Météo-France et Géoportail]

La station de Blois, chef-lieu du département de Loir-et-Cher, a été déplacée en 1973 (Figure V.4a), suite à un changement de site de la Direction Départementale de l'Équipement (DDE) qui gérait jusque-là les relevés météorologiques de la station. Ce passage d'une zone relativement arborée à une zone industrielle très bitumée a modifié le bilan énergétique au voisinage de la station et s'est traduit essentiellement par une hausse brutale de la température minimale (Figure V.4b). En effet, du fait de la proportion de bâti plus importante que celle des espaces verts en zone industrielle, durant la nuit le rayonnement emmagasiné durant la journée est restitué par les bâtiments industriels d'où des nuits plus douces. De plus, la station de Blois a connu plusieurs pertes de données en 1958, 1971, 1973 et 1974. La station de Blois, malgré son intérêt certain du fait de sa localisation au cœur du Val de Loire et à proximité des vignobles, a donc logiquement été écartée de l'étude.

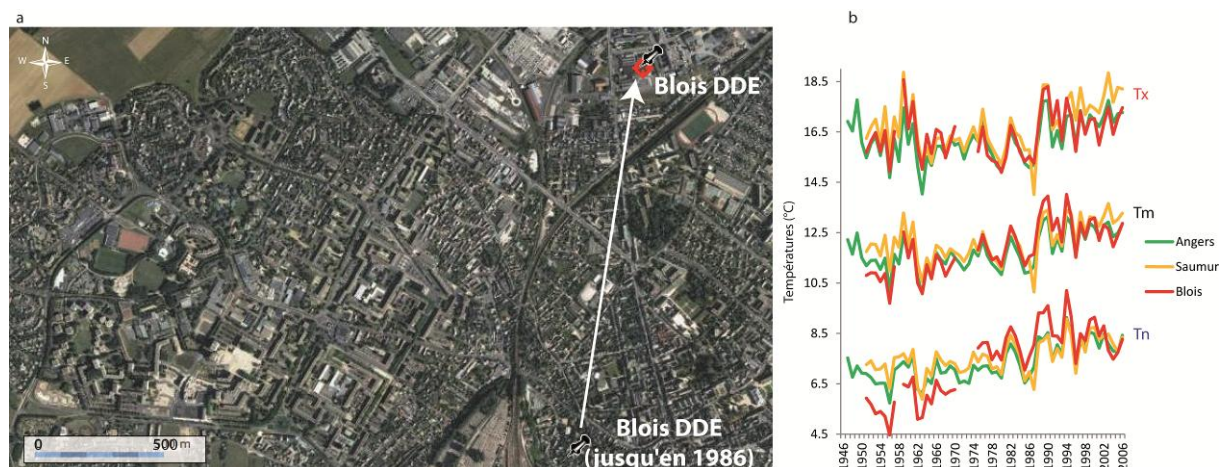


Figure V.4. Déplacement de la station Météo-France de référence de la ville de Blois en 1986 (a) et effet sur la température (b) vis-à-vis de deux stations de la région n'ayant pas subi de déplacement.

Sources : [Météo-France et Géoportail]

Enfin, la troisième station à avoir subi un changement de site est la station synoptique de Tours. Cette dernière a été déplacée (Figure V.5a) d'une zone urbaine à l'aérodrome de la ville, zone péri-urbaine, en 1964. Ce déplacement a conduit à une baisse de la température

pour la station de référence de Tours (Figure V.5b). Cependant, étant donné la date de ce déplacement en tout début de période, la station de Tours a été conservée pour l'étude.

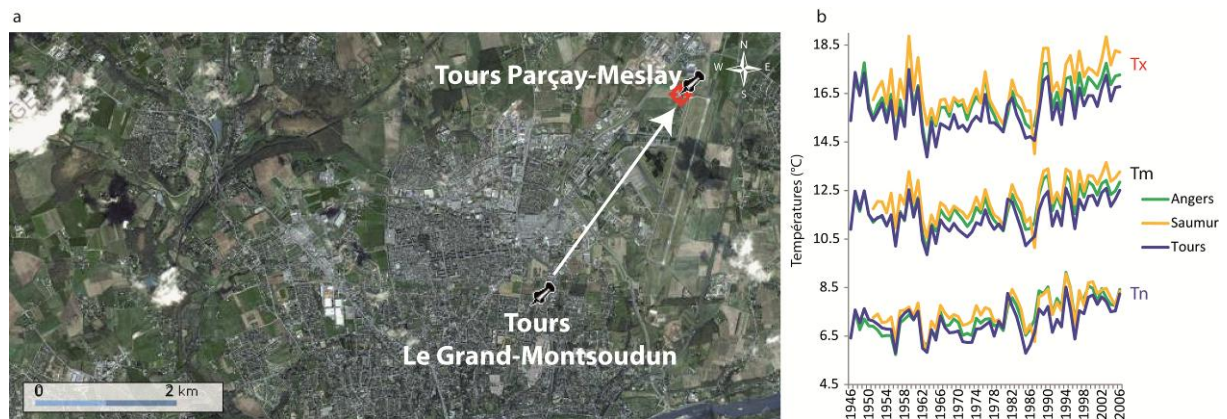


Figure V.5. Déplacement de la station Météo-France de référence pour la ville de Tours en 1964 (a) et effet sur la température (b) vis-à-vis de deux stations de la région n'ayant pas subi de déplacement.

Sources : [Météo-France et Géoportail]

V.1.2. Analyse de l'évolution des températures et des indices bioclimatiques

Afin d'établir un diagnostic climatique sur les 50-60 dernières années dans le Val de Loire, les données issues du réseau national Météo-France ont été utilisées. Les indices bioclimatiques ont été calculés à partir des données journalières de quatre stations pour lesquels nous disposons des données journalières. Une recherche de rupture à l'aide de tests statistiques a été effectuée sur l'ensemble des séries de données pour pouvoir mettre en évidence une ou des éventuelles discontinuités liées à l'évolution naturelle du climat. Enfin, dans les cas de rupture détectée, les tendances des températures et des indices bioclimatiques ont été calculées et leur significativité vérifiée par tests statistiques.

V.1.2.1. Les données mobilisées pour l'analyse climatique régionale

Les données des stations Météo-France sélectionnées pour l'étude ont donc été utilisées afin de caractériser l'évolution temporelle des températures dans le centre-ouest de la France et plus particulièrement au sein du Val de Loire (Figure V.6) depuis le milieu du XX^{ème} siècle. Un récapitulatif des données utilisées dans cette analyse régionale des températures et un descriptif des stations sont proposés dans le Tableau V.1. Les données annuelles ont été calculées à partir des données mensuelles puis analysées sur la période 1946-2010 pour Nantes, Tours, Châteauroux, Bourges, Poitiers, le Mans et Orléans, 1947-2010 pour Angers, 1951-2010 pour Saumur et 1953-2010 pour Romorantin.

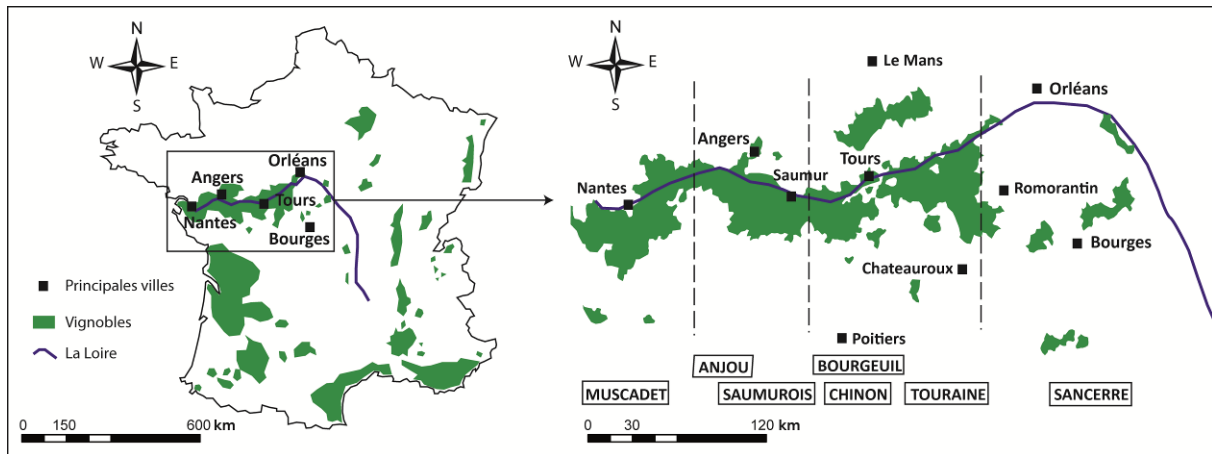


Figure V.6. Zone d'étude : carte du Val de Loire montrant la localisation des vignobles et des stations météorologiques utilisées dans la thèse. (d'après Météo-France/IGN)

Les données journalières de Nantes, Angers et Saumur sont disponibles de janvier 1950 à septembre 2010 et de janvier 1960 à septembre 2010 pour Tours. L'évolution des différents indices bioclimatiques a été étudiée. Les degrés-jours (DJ) ont été calculés pour chaque année durant la saison phénologique (avril-octobre). Cet indice, aussi nommé indice de Winkler, est en effet largement utilisé grâce à ses corrélations significatives avec les différentes dates phénologiques. L'indice de Huglin (Huglin et Schneider, 1998) a aussi été calculé pour chaque année durant la période d'avril à septembre, cet indice étant habituellement utilisé comme un indicateur de concentration en sucre dans les grappes. Ces deux indices ont permis de classer les stations en fonction de leurs caractéristiques climatiques viticoles. L'indice de fraîcheur des nuits (Tonietto, 1999 ; Tonietto et Carbonneau, 2004) a également été étudié. Cet indice correspond habituellement à la température minimale moyenne du mois de septembre (période de maturation des grappes) dans l'hémisphère nord, mais dans ce travail la température minimale moyenne entre la mi-août et la mi-septembre a été utilisée, puisque le réchauffement observé cause déjà une précocité dans les stades phénologiques. En effet Barbeau (2007) a montré que la date moyenne de récolte dans la vallée de la Loire a été avancée autour du 15 septembre. L'indice de fraîcheur des nuits a permis de classer les nuits en différentes catégories des plus froides aux plus chaudes. Cette classification a également permis de comparer les conditions nocturnes de maturation des raisins autour de chaque station et les moyennes calculées pour différentes périodes de référence (1961-1990/1971-2000 et 1981-2010).

Tableau V.1. Caractéristiques des stations Météo-France (noms usuels) retenues pour l'étude et périodes disponibles concernant les températures minimales et maximales

| Stations | Altitude (m) | Latitude | Longitude | Situation | Données mensuelles | Données journalières |
|-------------|--------------|------------|------------|---|--------------------|----------------------|
| Nantes | 26 | 47°09'00"N | 01°36'30"W | Aéroport- Plaine | 1945-2010 | 1950-2010 |
| Angers | 50 | 47°28'42"N | 00°36'48"W | Plaine | 1947-2010 | 1950-2010 |
| Saumur | 69 | 47°15'06"N | 00°04'24"W | Jardin des plantes Plateau peu élevé (50 m au-dessus de la Loire) | 1951-2010 | 1950-2010 |
| Tours | 96 | 47°25'00"N | 00°42'00"E | Plateau (50 m au-dessus de la Loire) | 1946-1964 | 1960-1964 |
| | 108 | 47°26'36"N | 00°43'36"E | Aérodrome – Plateau (un peu plus de 50 m au-dessus de la Loire) | 1964-2010 | 1964-2010 |
| Châteauroux | 158 | 46°52'06"N | 01°44'24"E | Aérodrome Plaine | 1946-2010 | |
| Bourges | 161 | 47°03'30"N | 02°21'30"E | Aérodrome Plaine | 1946-2010 | 1950-2010 |
| Poitiers | 123 | 46°35'36"N | 00°18'48"E | Aérodrome Plaine | 1946-2010 | |
| Le Mans | 48 | 47°56'42"N | 00°11'36"E | Aérodrome Plaine | 1946-2010 | |
| Romorantin | 83 | 47°19'06"N | 01°41'12"E | Aérodrome Vallée légèrement encaissée | 1953-2010 | |
| Orléans | 125 | 47°59'00"N | 01°46'36"E | Aérodrome Plateau (environ 35 m au-dessus de la Loire) | 1946-2010 | |

Données : [Météo-France]

V.1.2.2. Calcul de ruptures statistiques dans les séries de températures et pour les indices bioclimatiques

L'hétérogénéité des mesures liée à un déplacement éventuel d'une station est écartée pour 9 des 10 stations, étant donné l'absence de déplacement des stations. Les données de la station de Tours ont été traitées avec plus de prudence sur le début de la période étant donné le déplacement de la station en 1964. Le test statistique de Pettitt a été utilisé sur les séries de données de températures mensuelles et journalières et sur la période 1953-2010, commune aux stations, afin de détecter d'éventuelles ruptures (Pettitt, 1979). Le logiciel Kronostat®, développé à l'UMR CNRS 5569 dans le laboratoire HydroSciences de Montpellier, a servi à calculer ces ruptures statistiques. Ce même test a été appliqué sur les séries de données des indices bioclimatiques sur la période 1950-2010 pour Nantes, Angers et Saumur et 1960-2010 pour Tours. Ce test statistique est largement utilisé dans la communauté scientifique afin d'étudier des changements dans le comportement des précipitations et des températures (Sutherland *et al.*, 1991 ; Vannisten et Demarée, 1991 ; Dikbas *et al.*, 2010). Il permet de détecter d'éventuelles ruptures dans les séries de données à n'importe quel moment (t) de 1 à n, en comparant les deux distributions de part et d'autres de cet instant t. Par conséquent, ce test est très sensible à tout changement dans les moyennes de ces deux distributions et plus particulièrement au milieu d'une série temporelle (Costa et Soares, 2009). La robustesse de ce test a notamment été démontrée par Lubès *et al.* (1994) et Lubès-Niel *et al.* (1998) à travers des applications en hydrologie.

V.1.2.3. Calcul des tendances des températures et des indices bioclimatiques

Dans ce travail et en cas de ruptures, les tendances des températures ont été calculées pour les différentes stations en soustrayant les moyennes pré- et post-rupture. Le même nombre d'années a été conservé pour les deux périodes pour pouvoir comparer l'évolution des températures entre les stations. De la même manière, les tendances des différents indices bioclimatiques ont été calculées sur la période de 60 ans. La significativité de ces tendances a été testée à l'aide du test de Mann-Whitney qui indique si les moyennes des deux distributions sont significativement différentes. Ce test est à l'origine du test de Pettitt et divise la série étudiée en deux échantillons respectivement de taille m et n (Georgin et Gouet, 2005). Les valeurs des deux échantillons sont regroupées et classées par ordre croissant. On calcule alors la somme des rangs des éléments de chaque sous-échantillon dans l'échantillon total. Une statistique est définie à partir des deux sommes ainsi déterminées, et testée sous l'hypothèse nulle d'appartenance des deux sous-échantillons à la même population.

V.2. Mise en place du protocole de mesures topoclimatiques en Anjou et Saumurois et traitement des données

Afin d'obtenir des données climatiques plus fines directement issues des vignobles, un réseau de stations météorologiques a été mis en place dans l'Anjou et le Saumurois. Afin de définir au mieux ces différents topoclimats viticoles, une étude préliminaire des sites d'implantation a été réalisée.

V.2.1. Installation du réseau de stations météorologiques en Anjou et Saumurois

Le réseau de stations de Météo-France étant trop lâche pour étudier les topoclimats viticoles du secteur Anjou-Saumur, un réseau fin de stations météorologiques complètes a été installé entre Angers et Saumur dès 2008 grâce à la collaboration de l'INRA d'Angers et dans le cadre du programme international ANR-JC 07-194103 TERVICLIM.

V.2.1.1. Choix des sites viticoles pour l'installation des stations

Un réseau de 11 stations météorologiques a ainsi été installé dans les vignobles classés en AOC en Anjou et Saumurois (région située entre Angers et Saumur) à partir de 2008 de façon à représenter les différents types de topoclimats viticoles rencontrés dans la région. Ce réseau (Figure V.7) permet d'étudier le climat rencontré sur ces terroirs et en partie d'expliquer les types de vins produits. Les altitudes de l'AOC restent relativement modestes avec un faible dénivelé. Elles varient de 11 m près du lit de la Loire à 130 m sur les plus hauts plateaux et l'altitude moyenne est de 68 m. A l'image de la topographie la pente moyenne au sein de ces vignobles n'est que de 2°, variant de 0° à près de 18°. Les caractéristiques des stations installées sont réunies dans le Tableau V.2 et rendent compte de la diversité

topographique de l'AOC, l'altitude des stations variant de 22 m à 98 m pour une altitude moyenne de 60 m et les pentes de 0,64° à 12,77° pour une valeur moyenne de 2,8°. Les données topographiques (altitude, pente et expositions) ont été extraites du Modèle Numérique de Terrain à 80 m de résolution qui nous a été fourni par la Cellule Terroir Viticole (CTV) de l'INRA d'Angers. Ce MNT a été produit sur demande de la CTV en 1994 par un prestataire de service de l'université de Sophia-Antipolis. Il est issu d'une numérisation des courbes de niveaux des cartes IGN topo 25. Sa résolution planimétrique (XY) est de 80 m et la résolution altimétrique (Z) est de 1 m.

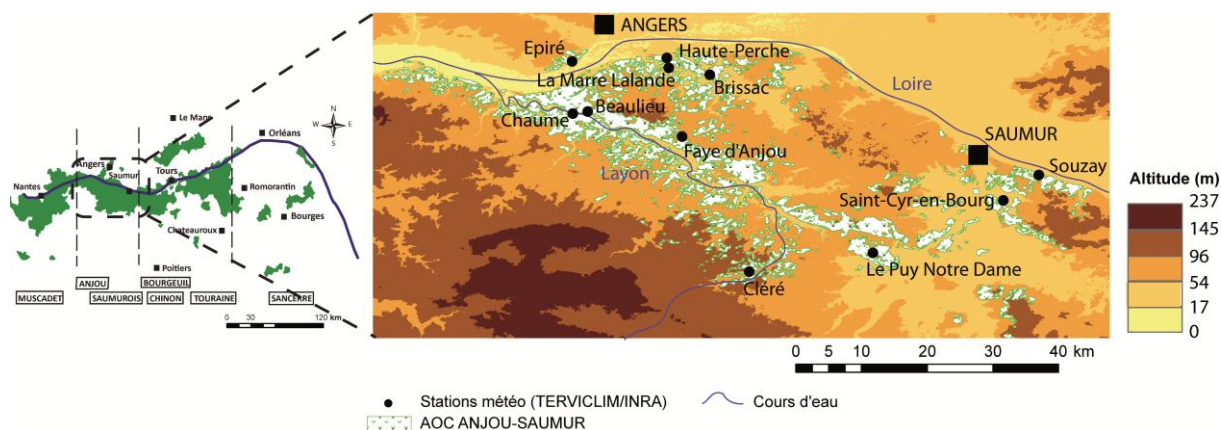


Figure V.7. Zoom sur le réseau de stations météorologiques TERVICLIM/INRA installé dans les terroirs viticoles d'Anjou et du Saumurois.

Source : [TERVICLIM/INRA-CTV et BD TOPO-49]

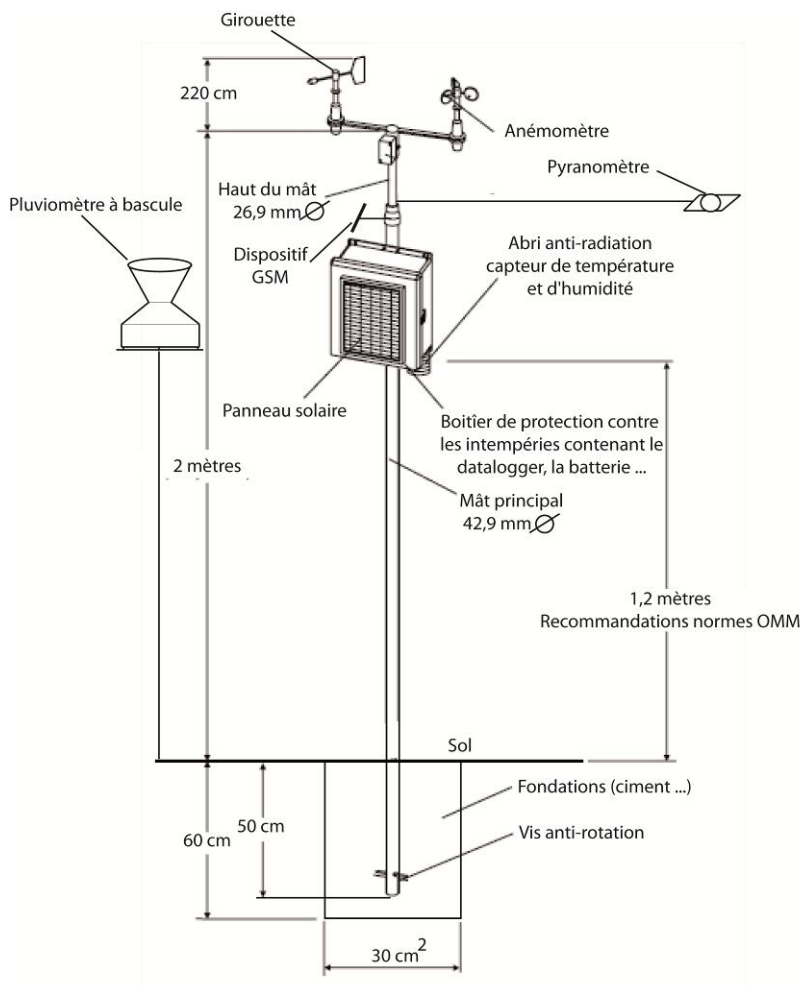
Tableau V.2. Localisation et caractéristiques des stations du réseau TERVICLIM/INRA

| Stations | Latitude | Longitude | Altitude (m) | Pente (°) | Exposition | Situation |
|--------------------|------------|-----------|--------------|-----------|------------|---|
| Beaulieu | 47°19'12"N | 0°37'12"W | 80 | 2,64 | Ouest | Plateau surplombant la vallée du Layon |
| Brissac | 47°22'12"N | 0°21'36"W | 55 | 2,93 | Sud-Ouest | Plaine alluviale proche de la Loire |
| Chaume | 47°19'12"N | 0°38'24"W | 22 | 1,79 | Sud | Bas de coteau au fond de la vallée du Layon |
| Cléré | 47°06'N | 0°24'W | 98 | 2,16 | Sud | Plateau surplombant la vallée du Layon |
| Epiré | 47°14'24"N | 0°37'48"W | 39 | 12,77 | Sud-Est | Bas de parcelle surplombant la Loire |
| Faye d'Anjou | 47°17'24"N | 0°17'24"W | 90 | 0,99 | Nord | Plateau surplombant la vallée du Layon |
| Haute-Perche | 47°23'24"N | 0°31'12"W | 45 | 1,02 | Sud-Ouest | Plaine alluviale proche de la Loire |
| La-Marre-Lalande | 47°22'48"N | 0°30'36"W | 56 | 0,64 | Est | Plaine alluviale proche de la Loire |
| Le-Puy-Notre-Dame | 47°07'12"N | 0°13'12"W | 95 | 2,54 | Sud-Ouest | Sommet de colline |
| Saint-Cyr-en-Bourg | 47°12'N | 0°03'35"W | 35 | 0,76 | Nord-Est | Plaine au sud de la Loire |
| Souzay | 47°13'48"N | 0°0'36"W | 48 | 2,47 | Nord | Bas de parcelle proche de la Loire |

Données : [TERVICLIM/INRA-CTV]

V.2.1.2. Présentation du matériel et du protocole de mesures

Ces stations automatiques (Campbell Sci. Inc., Logan Utah) enregistrent la température, l'humidité, la direction et la vitesse du vent, la radiation globale et les précipitations toutes les 15 min sauf pour Brissac, Faye d'Anjou, Haute-Perche et La-Marre-Lalande qui ont été programmées pour enregistrer les données toutes les heures. Les sondes de température (CS215) sont toutes placées dans des abris anti-radiation naturellement ventilés (T351 RS) à 1,5 m du sol environ et la station est autonome en énergie du fait d'une alimentation reliée à un panneau solaire. Le schéma de la Figure V.8 présente une installation type pour ce genre de station.



Pluviomètre à bascule
(Mai 2009/Le Puy-Notre-Dame)



Installation du dispositif GSM
(mai 2009/Le Puy-Notre-Dame)

Figure V.8. Schéma d'une station météorologique Campbell du réseau TERVICLIM/INRA (adapté de Campbell Scientific®)

Les détails sur les appareils de mesures climatiques sont précisés dans le Tableau V.3, l'étalonnage des appareils étant effectué au préalable en usine. Enfin, ces stations ont été équipées pour la plupart en 2010 de système GSM (Global System for Mobile Communications) afin d'éviter de multiples déplacements sur le terrain mais surtout des pertes répétées de données. En effet ce système qui dote la station d'une carte SIM et d'une antenne, permet de l'interroger à distance depuis le bureau à tout moment. Le chercheur

peut ainsi détecter un dysfonctionnement directement du laboratoire et ainsi se rendre sur le terrain pour y remédier.

Tableau V.3. Informations constructeur sur les différents capteurs météorologiques des stations Campbell (d'après Campbell Scientific®).

| Type de sonde | Etendue de mesure | Précision | Temps de réponse avec le filtre | Résolution en sortie |
|--------------------|-------------------|---|---|----------------------|
| Thermomètre | -40°C à 70°C | à 25°C: ±0.3°C entre -5 et 40°C: ±0.4°C entre -40 et 70°C: ±0.9°C | <120 sec (63% du temps de réponse avec 1m/sec de mouvement d'air) | 0.01°C |
| Sonde CS215 | | | | |
| Hygromètre | 0 à 100% HR | à 25°C: ±2% entre 10 et 90% ±4% entre 0 et 100% | <10 sec (63% du temps de réponse avec 1m/sec de mouvement d'air) | 0.03% HR |

| Type | Diamètre de l'entonnoir | Hauteur totale | Sensibilité de l'auget | Sortie |
|--------------------|-------------------------|----------------|------------------------|---|
| Pluviomètre | ARG100 | 254 mm | 340 mm | En standard réglage à 0.20 mm par basculement Contact sec au moment du basculement |

| Type | Seuil | Vitesse Max | Plage | Précision | Résolution | Durée de vie |
|------------------|-------|-------------|-----------|------------------------|---|-----------------|
| Girouette | W200P | 0.6 m/sec | >75 m/sec | 360° d'angle mécanique | ±2° pour des vents stables de plus de 5 m/sec | ±0.2° 10 ans |

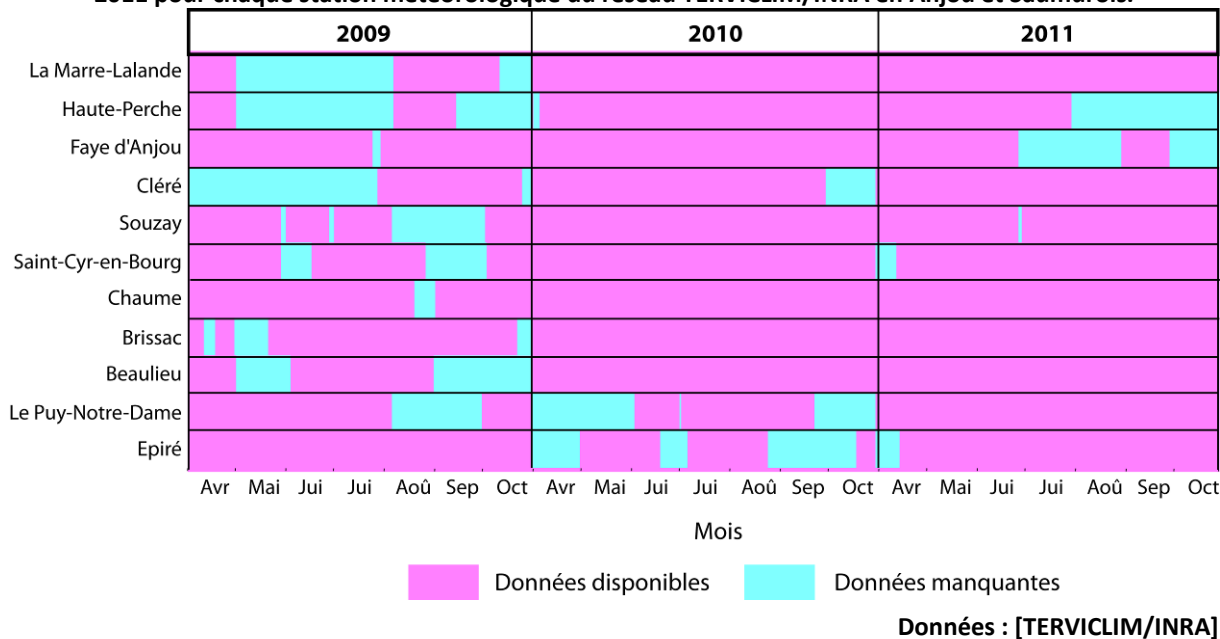
| Type | Vitesse de démarrage | Vitesse Max | Précision | Constance de distance | Durée de vie |
|-------------------|----------------------|-------------|-----------|---|------------------|
| Anémomètre | A100R | 0.2 m/sec | >75 m/sec | ±0.1 m/sec (0.3 à 10 m/sec) ±1% (10 à 55 m/sec) ±2% (>55 m/sec) | 2.3 m >20 ans |

| Type | Précision | Etendue de mesure /Bande spectrale | Sensibilité à la température | Stabilité à long terme | Température/humidité de fonctionnement |
|--------------------|-----------|---|------------------------------|------------------------|--|
| Pyranomètre | CS300 | ±5% pour le rayonnement total 0 à 2000 W/m ² 300 à 1100 nm | <1% entre 5 et 40°C | <2% par an | -40°C à 55°C 0 à 100% HR (peut être submergé) |

V.2.1.3. Disponibilité des données pour l'étude

Les stations ont été installées au courant de l'année 2008, pour la plupart durant l'été. Le Tableau V.4 résume, tous paramètres confondus, les données journalières, disponibles et manquantes sur les trois saisons végétatives (avril-octobre) de 2009 à 2011. Il apparaît ainsi de manière évidente que l'installation en 2010 du réseau GSM, permettant d'interroger les stations à distance, a permis de limiter considérablement les pertes de données liées à d'éventuels dysfonctionnements d'appareils de mesures. La saison 2009 est donc celle avec le plus de manques dans les séries de données alors que 2010 et 2011 sont beaucoup plus complètes.

Tableau V.4. Disponibilité des données journalières sur les trois saisons végétatives de la vigne de 2009 à 2011 pour chaque station météorologique du réseau TERVICLIM/INRA en Anjou et Saumurois.



V.2.2. Méthodologie pour la caractérisation des topoclimats

Une classification ascendante hiérarchique a été appliquée aux séries de températures des stations météorologiques pour la saison 2010, afin de caractériser les différents topoclimats d’Anjou et du Saumurois. Les indices bioclimatiques ont également été calculés et les climats viticoles ainsi comparés.

V.2.2.1. Etude des températures moyennes saisonnières

Dans ce travail, la température minimale et maximale mensuelle a été calculée pour chaque mois de la saison végétative 2010 (1^{er} Avril-31 Octobre). Une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été appliquée aux séries de températures journalières pour distinguer d’éventuels groupes de stations au comportement distinct. En effet, la classification ascendante hiérarchique a pour objectif de déterminer une hiérarchie entre des groupes d’individus que nous analysons sous la forme d’un dendrogramme. La CAH nécessite de choisir une distance entre individus, ou plus généralement une dissimilarité et un indice d’agrégation. Différents indices de regroupement peuvent être alors adoptés mais le plus communément utilisé est l’indice d’agrégation de Ward, appelé également indice d’agrégation moyen (Cornillon *et al.*, 2010). Cet indice a donc été choisi avec la distance euclidienne pour la CAH qui a été appliquée aux données de températures des stations d’Anjou et du Saumurois. La statistique descriptive de chaque classe a ensuite été calculée afin de différencier les caractéristiques différenciant chaque groupe de stations.

V.2.2.2. Etudes des indices bioclimatiques

De la même manière qu'à l'échelle régionale, l'indice des degrés-jours de Winkler et l'indice d'Huglin ont aussi été calculés pour 9 stations qui n'avaient aucun manque de données pour la saison végétative de 2010. L'indice de fraîcheur des nuits a également été calculé pour les 9 mêmes stations sur la période de mi-août à mi-septembre. Ces calculs ont permis de différencier un peu plus précisément les conditions climatiques des divers sites viticoles en Anjou et Saumurois.

V.3. Mise en place d'un protocole de mesure de la température dans les Coteaux du Layon et traitement des données

La variabilité spatiale de la température dans un site des Coteau du Layon, situés au sud-ouest d'Angers, a été étudiée. Ce site est réputé pour les vins liquoreux qui y sont produits avec notamment l'appellation Grand Cru Quarts-de-Chaume. Un réseau fin de capteurs thermiques a été installé au printemps 2008 en prenant en compte les différentes informations topographiques et environnementales dont nous disposons afin de représenter au mieux le site de 600 ha. Les données disponibles ont ensuite été analysées dans le but d'étudier la variabilité spatiale de la température et des indices bioclimatiques sur le site viticole.

V.3.1. Protocole de mise en place du réseau et données disponibles

Comme pour les stations météorologiques complètes, l'installation des capteurs a nécessité une étude préliminaire du site afin de le caractériser de la manière la plus exhaustive possible. Le protocole de mise en place du réseau est décrit ci-après et les données disponibles sont également présentées.

V.3.1.1. Installation du réseau de mesures à échelle fine

Durant le mois d'avril 2009, 21 capteurs de températures, placés dans des abris naturellement ventilé (*RS3 solar radiation shield, Onset[®], MA, USA*) ont été installés dans les rangs de vigne des Coteaux du Layon (Figure V.9) afin d'évaluer la variabilité spatiale de la température au sein des parcelles. Avant de se lancer dans l'installation du matériel, des contacts auprès de viticulteurs ont été récupérés auprès de l'INRA d'Angers et des entretiens ont eu lieu par la suite afin de demander l'autorisation aux professionnels. Tous les viticulteurs ont répondu positivement à notre demande et chaque parcelle a pu ainsi être annotée sur une carte avec le nom de son propriétaire. Par la suite, nous avons fourni à la fin de chaque saison végétative des rapports climatiques mensuels pour chaque viticulteur impliqué dans le projet.

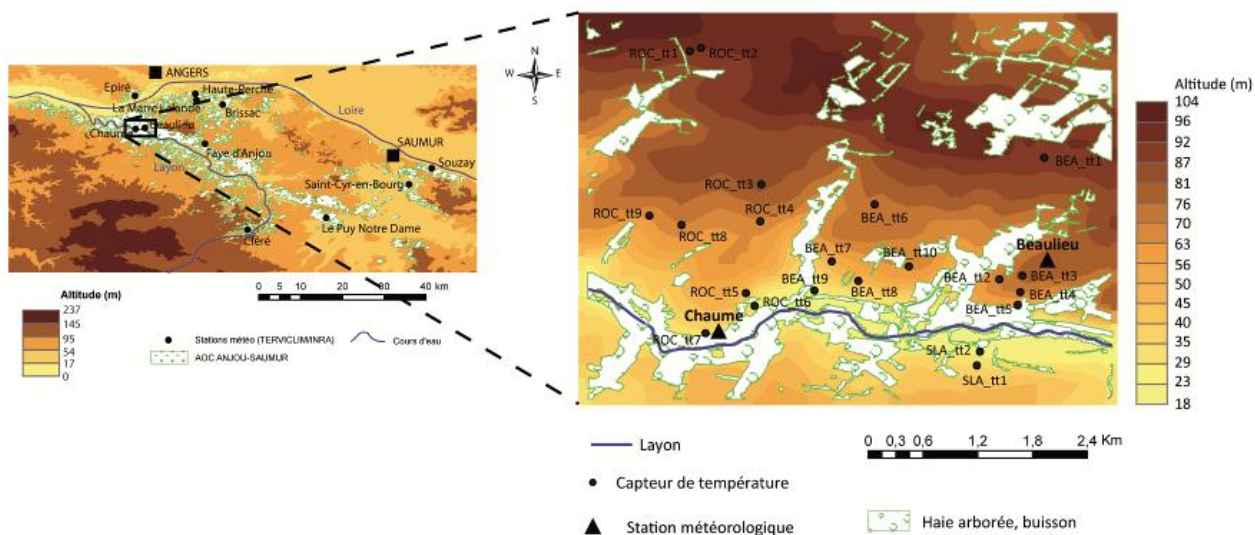


Figure V.9. Zoom sur le réseau de capteurs de température installé dans les Coteaux du Layon.
Données : [TERVICLIM/INRA-CTV et BD TOPO-49]

Les capteurs installés, Tinytag Talk 2 (*Gemini Data Loggers Ltd., UK*), sont dotés d'un enregistreur de température et d'une sonde (10K NTC). Ils enregistrent la température de -40°C à 125°C avec une précision à 0,4°C et une résolution de 0,05°C ou mieux (Tableau V.5). Ils ont été programmés afin d'enregistrer la température à l'intérieur de la canopée toutes les 15 min et 1 mètre au-dessus du sol (Figure V.10). Par conséquent et en comparaison avec des stations météorologiques traditionnelles, la température peut être légèrement sous-estimée la nuit et surestimée le jour.

Tableau V.5. Informations constructeur sur les capteurs de température type « Tinytag Talk 2 »

| Data logger Type: TK-4023 | |
|-----------------------------|--|
| Capacité totale de mesures | 16 000 mesures |
| Type de mémoire | Non Volatile |
| Démarrage différé | jusqu'à 45 jours |
| Options d'arrêt | Quand plein/Après n lectures/ Jamais (écriture par dessus les anciennes données)) |
| Types de mesure | Actuel/Min/Max |
| Intervalle d'enregistrement | 1 seconde à 10 jours |
| Alarmes | Deux alarmes programmables |
| Amplitude d'enregistrement | -40°C à 125°C |
| Type de capteur | 10K NTC Thermistor (sonde externe) |
| Résolution de la mesure | ≤ 0.05°C |
| Stabilité de la température | ±0.01°C/°C à partir de 25°C |
| Précision de la mesure | 0.4°C (0°C<T<70°C) et 0.4°C à 0.8°C (-20°C<T<0°C) |



Source : [Gemini®]

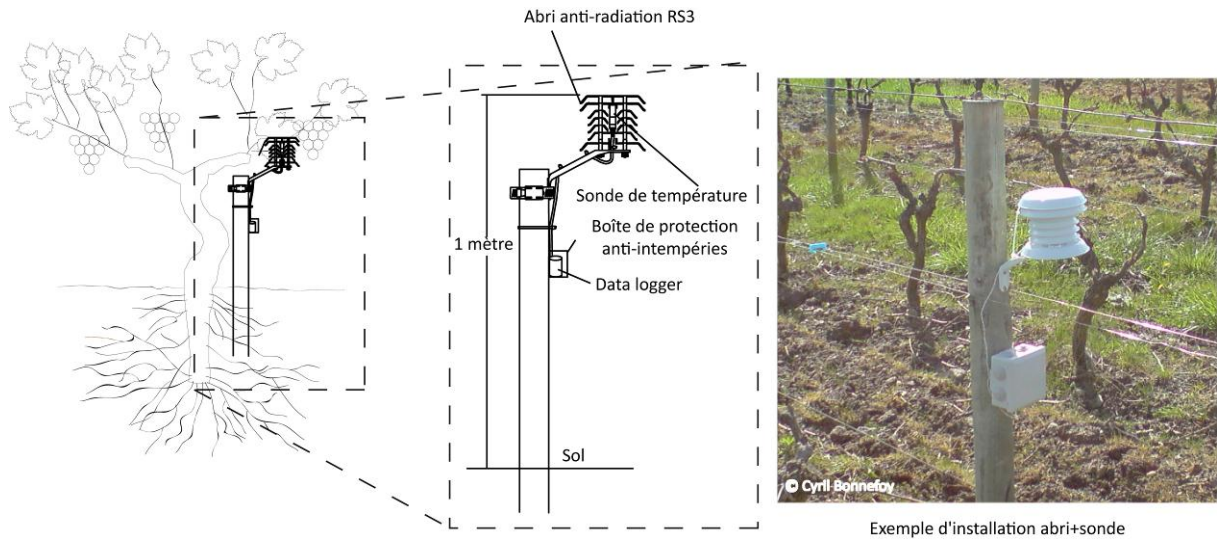


Figure V.10. Schéma du dispositif de mesure de la température dans les rangs de vigne du vignoble des Coteaux du Layon (d'après Gemini®).

Ces capteurs ont été disposés en fonction de l'altitude, des pentes, des orientations et des unités de terroirs de base (Morlat et Bodin, 2006), comme le montre la Figure V.11, dans l'une des plus célèbres appellations (Quarts-de-Chaume) où des vins liquoreux sont produits après le développement de la pourriture noble, le *Botrytis-Cinerea* (Barbeau *et al.*, 1999).

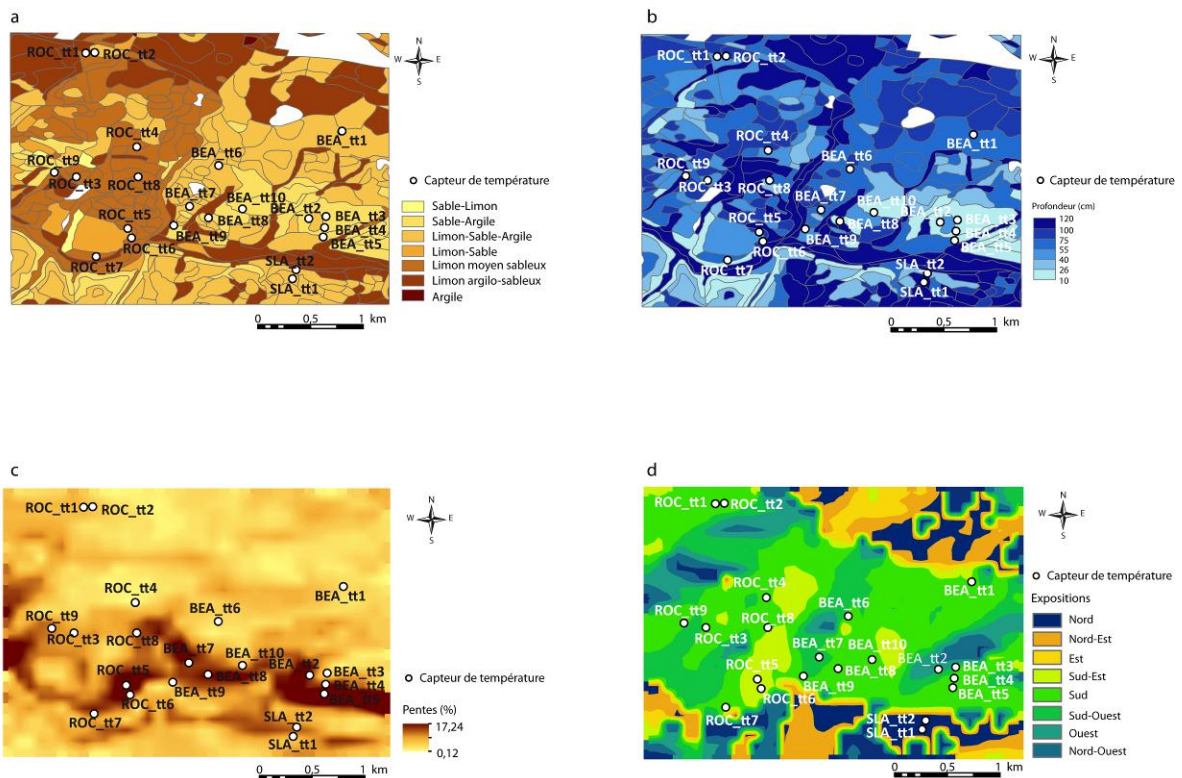


Figure V.11. Exemple de cartes ayant aidé aux choix de position des capteurs (a : Textures des sols par UTB ; b : Profondeur des sols par UTB ; c : Pentes en pourcentage ; d : Expositions).

Données : [Terviclim/INRA-CTV]

V.3.1.2. Description des capteurs et données disponibles pour l'étude

Les données environnementales extraites de la base de données du modèle numérique de terrain Anjou/Saumurois pour chaque capteur sont présentées dans le Tableau V.6. Les capteurs sont donc situés à des altitudes variant de 25 m à Roc_tt6 à plus de 90 m à Roc_tt1 et Roc_tt2. Le dénivelé est d'environ 70 mètres, ce qui se rapproche de celui de l'ensemble du site qui est d'environ 80 m. La pente varie quant-à-elle de 1,6° à Bea_tt6 à 18,8° à Bea_tt4 et couvre l'ensemble des différentes pentes observées sur le site. Les orientations des pentes sont majoritairement de sud avec 8 orientations sud-ouest, 4 sud-est et 6 sud. Un capteur est situé sur une parcelle avec une orientation ouest et Sla_tt1 et Sla_tt2 sont les deux seuls avec une orientation nord. Les différentes positions sur les coteaux sont présentes avec 5 capteurs sur les plateaux qui surplombent la vallée, 4 capteurs situés en haut de coteau et 5 en bas de coteau. Enfin, 7 capteurs sont à mi- coteau, ce qui représente le plus grand nombre de capteurs.

Tableau V.6. Caractéristiques des 21 capteurs de températures installés sur le site des Coteaux du Layon

| Capteurs | Altitude (m) | Pente (°) | Orientation | Position |
|----------|--------------|-----------|-------------|--|
| Bea_tt1 | 90 | 2,0 | Sud-Est | Plateau surplombant la vallée du Layon |
| Bea_tt2 | 72 | 6,2 | Ouest | Haut de coteau |
| Bea_tt3 | 80 | 2,9 | Sud- Ouest | Haut de coteau |
| Bea_tt4 | 73 | 9,5 | Sud | Mi-coteau |
| Bea_tt5 | 58 | 18,8 | Sud | Bas de coteau |
| Bea_tt6 | 74 | 1,6 | Sud-Ouest | Plateau surplombant la vallée du Layon |
| Bea_tt7 | 52 | 8,4 | Sud-Ouest | Haut de coteau |
| Bea_tt8 | 49 | 9,3 | Sud-Ouest | Mi-coteau |
| Bea_tt9 | 27 | 7,6 | Sud-Ouest | Bas de coteau/fond de vallée/proche Layon |
| Bea_tt10 | 68 | 5,0 | Sud-Ouest | Mi-coteau |
| Roc_tt1 | 94 | 4,0 | Sud | Plateau surplombant la vallée du Layon |
| Roc_tt2 | 93 | 3,4 | Sud | Plateau surplombant la vallée du Layon |
| Roc_tt3 | 83 | 1,2 | Sud | Plateau surplombant la vallée du Layon |
| Roc_tt4 | 69 | 6,0 | Sud-Est | Mi-coteau |
| Roc_tt5 | 45 | 10,4 | Sud-Est | Mi-coteau |
| Roc_tt6 | 25 | 8,5 | Sud-Est | Bas de coteau/fond de la vallée/proche Layon |
| Roc_tt7 | 35 | 9,9 | Sud | Bas de coteau/fond de la vallée |
| Roc_tt8 | 63 | 6,4 | Sud-Ouest | Mi-coteau |
| Roc_tt9 | 71 | 5,4 | Sud-Ouest | Haut de coteau |
| Sla_tt1 | 31 | 7,6 | Nord | Mi-coteau |
| Sla_tt2 | 31 | 7,6 | Nord | Bas de coteau/fond de vallée/proche Layon |

Données : [MNT-résolution 80 m/INRA-CTV]

Le Tableau V.7 présente les données journalières disponibles pour chaque capteur durant les trois saisons végétatives de 2009 à 2011. Le pourcentage de pertes de données le plus important est pour l'année 2010, alors que l'année 2009 est celle avec le moins de pertes de données. En 2009, seuls les capteurs Roc_tt7 et Bea_tt9 ont eu des pertes de données sur quelques journées. Le capteur Bea_tt9 sera cependant exclu de l'étude car celui-ci a dysfonctionné sur l'ensemble de la période donnant de manière assez fréquente des valeurs aberrantes.

Tableau V.7. Disponibilité des données journalières sur les trois saisons végétatives de la vigne de 2009 à 2011 pour chaque capteur de température dans les coteaux du Layon



Données : [TERVICLIM]

V.3.2. Méthodes de caractérisation du climat à échelle fine

Comme pour les stations météorologiques, une CAH a été appliquée aux séries de températures de la saison végétative 2009, afin d'isoler des groupes de capteurs aux caractéristiques communes. Deux épisodes extrêmes climatiques ont également été étudiés et les indices bioclimatiques, habituellement analysés à une échelle régionale, ont été calculés et comparés entre eux.

V.3.2.1. Caractérisation des capteurs de températures

De la même manière que ce qui a été fait pour les données des stations météorologiques du réseau de l'Anjou et du Saumurois, une CAH (méthode de Ward) a été appliquée aux séries de données de températures minimales et maximales journalières de la saison végétative 2009. En effet, cette saison est celle avec le moins de perte de données. La saison végétative, se déroulant habituellement du 1^{er} Avril au 31 Octobre a été écourtée de 17 jours dans notre cas, le dernier capteur ayant été installé le 18 Avril 2009. Statistiquement, il était plus rigoureux de conserver des séries de données complètes avec un maximum de capteurs disponibles. Cette méthode a ainsi permis de distinguer des groupes de capteurs aux comportements distincts. Elle a permis également de fournir des éléments explicatifs de la variabilité spatiale de la température sur le site.

V.3.2.2. Etude de la variabilité spatiale de la température

L'évolution des températures durant la saison végétative 2009 (avril à octobre) a été présentée pour les cinq capteurs les plus contrastés, qui ont été sélectionnés grâce à la classification ascendante hiérarchique. Afin d'étudier la variabilité spatiale de la température dans le cas d'événements extrêmes, les températures ont aussi été analysées durant un événement de gel tardif en Mars 2010 et d'une vague de chaleur en Août 2009. En effet, comme on a pu le voir précédemment, le gel printanier pourrait devenir problématique pour les viticulteurs. Les températures hivernales étant plus douces, le débourrement interviendrait plus tôt dans la saison. Ainsi, les bourgeons seraient plus vulnérables face à ce gel tardif en raison de leur avancée phénologique. Durant les journées très chaudes, les températures au-dessus du seuil de 35°C pourraient être dommageables pour la vigne et causer l'échaudage des baies et leur dessèchement (Crespy, 1992 ; Dokoolzian et Bergqvist, 2001).

V.3.2.3. Etude de la variabilité des indices bioclimatiques

L'indice des degrés-jours de Winkler et l'indice d'Huglin ont été calculés sur la même période pour 19 capteurs (sans le capteur Roc_tt7 pour qui manquaient des données journalières). Ces indices n'ont pas été comparés avec ceux calculés à une échelle régionale mais ils permettent de montrer une micro-variabilité des températures intéressantes à cette échelle. L'indice de fraîcheur des nuits a également été calculé à partir de ces données et sur la période de mi-août à mi-septembre.

CONCLUSION DU CHAPITRE V

Dans ce chapitre, nous avons détaillé l'approche méthodologique au centre de ce travail de thèse et qui vise à établir un protocole de mesures climatiques à différents niveaux d'échelles imbriquées. Les données du réseau national permettent l'évaluation du changement climatique dans le centre-ouest français et en particulier dans le Val de Loire. Des réseaux de stations et de capteurs thermiques ont été installés afin de combler le manque de données climatique dans les vignobles de moyennes vallées de la Loire. Ces réseaux servent plus particulièrement à étudier la variabilité spatiale de la température et des indices bioclimatiques et d'acquérir une connaissance fine de cette variabilité, plus particulièrement lors d'épisodes extrêmes pour la vigne. Les réseaux de stations et de capteurs thermiques apportent de l'information ponctuelle. Une autre étape de ce travail de thèse vise à spatialiser la température à partir des capteurs installés dans les Coteaux du Layon. Cette spatialisation se fait grâce à la construction de modèles multicritères qui permettent d'expliquer la variabilité spatiale de la température grâce à des données topographiques et environnementales. Cette approche méthodologique de la modélisation des températures est présentée dans le suivant.

Chapitre VI : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE LA MODÉLISATION SPATIALE DE LA TEMPÉRATURE DANS LES COTEAUX DU LAYON

L'un des objectifs de la thèse est d'étudier la variabilité spatiale à échelle fine dans les Coteaux du Layon et notamment de déterminer les facteurs locaux qui permettent d'expliquer au mieux cette variabilité. Ce chapitre présente les données utilisées dans la construction des modèles multicritères qui serviront à spatialiser la température en tout point de l'espace de notre site d'étude. Les étapes préliminaires à la réalisation des modèles sont ainsi décrites puis la construction des modèles et l'automatisation de la procédure sont ensuite développées.

VI.1. Sélection et préparation des données utiles à la construction des modèles multicritères

Une sélection des données thermiques enregistrées par les capteurs de températures de 2009 à 2011 a été faite en amont de la construction des modèles multicritères. De plus, la base de données issue du Modèle Numérique de Terrain (MNT) proposée par l'INRA a été utilisée pour extraire les différents facteurs explicatifs à intégrer aux modèles. Certaines données ont dû être reformulées sous une forme numérique exploitable pour la modélisation.

VI.1.1. Les données de températures issues des capteurs thermiques

Les données de températures disponibles sur le site d'étude des Coteaux du Layon ont été présentées dans le chapitre V. Une sélection a été faite, en amont de la construction du modèle, au sein de cette base de données. Cette étape de sélection des données thermiques est ainsi décrite dans la première partie de ce chapitre.

VI.1.1.1. Objectifs et sélection des données de températures

Les relevés des données de températures d'avril 2009 à octobre 2011 étaient disponibles pour la construction de notre modèle. Cependant, un travail de sélection des données a été réalisé, afin d'optimiser le poids statistique de nos calculs. Nous disposions originellement de 20 capteurs, Bea_tt9 ayant été écarté de l'étude pour les raisons précisées dans le chapitre V. Il semblait tout d'abord intéressant de conserver les plus longues séries de données pour notamment maximiser le nombre de mois et jours étudiés par le modèle. Toutefois, en partant sur cette idée, seulement 10 capteurs possèdent des séries complètes, sans lacune, du 18 avril 2009 au 31 octobre 2011 (cf. Chapitre V/Figure V.15). Une modélisation à partir de seulement 10 capteurs ne serait pas rigoureuse statistiquement. Une deuxième solution

consisterait à retirer toutes les journées où au moins un capteur possède une donnée manquante. Dans ce cas de figure, l'ensemble des années 2010 et 2011 seraient enlevées de l'étude. Par conséquent la saison végétative 2009 a été retenue, puisqu'étant celle avec le moins de pertes de données et donc le maximum de séries de températures complètes sur l'ensemble de la période avril-octobre (cf. chapitre V/Figure V.15). Au final, nous disposons de 6 mois ou 197 journées potentiellement modélisables. Le mois de juin a dû être écourté de 12 jours, le capteur Roc_tt7 n'ayant pas de données entre le 17 et le 28 juin 2009. La moyenne de ce mois a donc été calculée sur 18 journées pour l'ensemble des capteurs, afin que les moyennes soient comparables entre elles. Enfin, expliquer des écarts de températures journaliers trop faibles entre les capteurs n'ayant pas réellement de sens, une seconde sélection de journées avec une variabilité spatiale marquée a été réalisée. Le seuil arbitraire de 1,5°C entre le 2^{ème} décile et le 8^{ème} décile a été fixé aussi bien pour les températures minimales que pour les maximales. En effet, la résolution des capteurs étant de 0,4°C, un seuil de 1°C serait trop bas alors qu'un seuil de 2°C limiterait considérablement le nombre journées potentiellement modélisables. Après cette nouvelle sélection, le nombre de journées modélisables est passé de 197 à 47 pour les températures minimales et de 197 à 25 pour les maximales.

VI.1.1.2. Les températures minimales

La spatialisation de la température minimale peut être une aide très utile vis-à-vis de la prévention des zones à risques de gel dans le vignoble. De plus, ce paramètre thermique est l'un des plus aisés à spatialiser grâce à un modèle multicritères car dans les zones aux caractéristiques topographiques variées les facteurs locaux ont une influence importante sur la variabilité spatiale de la température minimale et prévalent sur les grandes tendances spatiales (Madelin, 2004). La température minimale a été modélisée dans ce travail de thèse afin d'obtenir des données thermiques en tout point de l'espace et d'évaluer l'importance des phénomènes d'inversion pouvant, dans certains cas, accentuer le risque de gelées.

VI.1.1.3. Les températures maximales

La spatialisation de la température maximale a également été réalisée puisque cette modélisation peut également s'avérer très intéressante, en particulier dans le cas d'épisodes caniculaires pour connaître les zones du vignoble aux températures les plus extrêmes. En revanche, cette spatialisation est en général plus complexe que celle de la température minimale, en particulier en terrain peu accidenté. En effet, en journée le rayonnement solaire provoque beaucoup de turbulence dans l'air au niveau du sol d'où un brassage significatif de l'air dans la couche limite et des situations beaucoup plus complexes à modéliser à l'aide d'un modèle statistique linéaire. Les situations avec une topographie peu variée donnent très souvent des champs thermiques homogènes. Cependant, certains cas de modélisation de la température maximale réalisés en milieu montagneux donnent parfois de très bons résultats (Barry, 2001 ; Lhotellier, 2005). Le dénivelé est tel que le gradient altitudinal est marqué et les relations entre facteurs topographiques et température sont fortes.

VI.1.2. Les données topographiques issues du modèle numérique de terrain

Nous disposons du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de l'INRA d'Angers pour la région de l'Anjou et du Saumurois. Les prédicteurs des modèles multicritères ont ainsi été extraits de cette base de données à l'aide d'un SIG. Certaines données ont nécessité une transformation avant d'être intégrées à la modélisation.

VI.1.2.1. L'altitude et la pente

Les deux premiers paramètres qui ont été récupérés pour chaque capteur à partir du MNT de l'Anjou et du Saumurois sont l'altitude et la pente. Ces deux paramètres ont été extraits à la maille du MNT, c'est-à-dire à 80 m de résolution horizontale. Les facteurs topographiques tels que l'altitude et la pente sont des éléments explicatifs essentiels de la variabilité de la température au sein des vignobles. Dans le chapitre I, nous avons expliqué l'influence de chacun de ces facteurs sur la variabilité spatiale de la température.

VI.1.2.2. L'orientation

L'extraction de l'orientation pour chaque capteur sous SIG à la résolution spatiale de 80 m donne des données allant de 0° à 360°. Ces données ne peuvent pas être intégrées telles quelles en tant que données quantitatives dans un modèle multicritère. Il a donc fallu transformer ces données angulaires et au final décomposer l'orientation en 2 composantes (Figure VI.1).

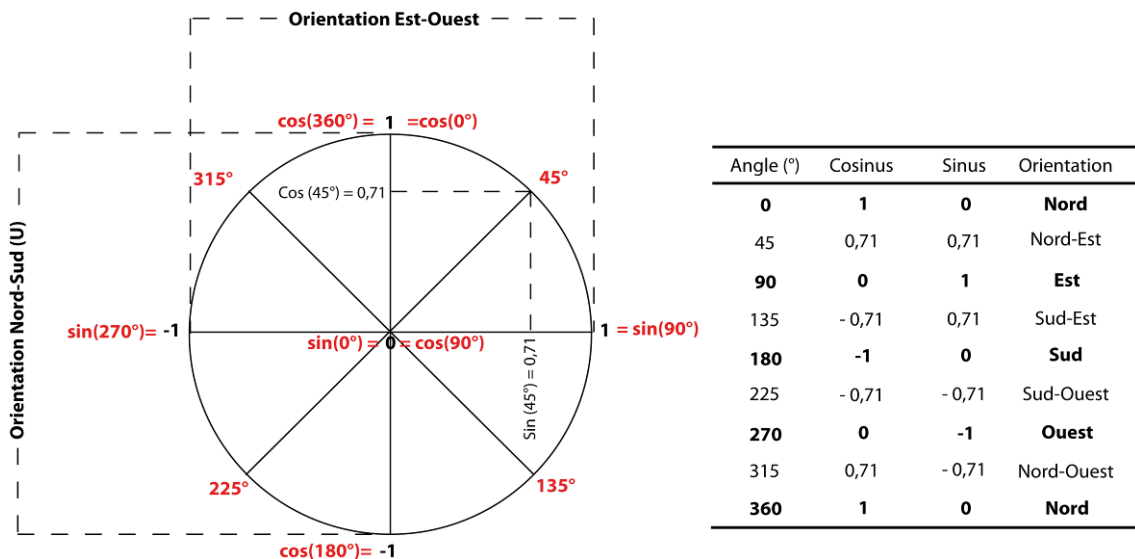


Figure VI.1. Décomposition de l'orientation de la pente en deux composantes : orientation nord-sud et orientation est-ouest (réalisation : Cyril Bonnefoy)

Les calculs des deux composantes liées à l'orientation de la pente sont très simples et se basent ni plus ni moins sur la trigonométrie. L'orientation nord-sud que nous appellerons U correspond au cosinus de l'angle de l'orientation en radian alors que l'orientation est-ouest ou V correspond au sinus de l'angle en radian. Les formules sont donc les suivantes :

Orientation Nord-Sud : $U = \cos(\alpha)$
 Orientation Est-Ouest : $V = \sin(\alpha)$
 avec α l'angle de l'orientation en radians

Deux couches d'information ont ainsi été créées à partir de la calculatrice raster sous le logiciel ArcGis, la couche correspondant à l'orientation nord-sud et celle de l'orientation est-ouest. Les données de chaque capteur ont ainsi été extraites, ces données étant ainsi toutes comprises entre -1 et 1. Les valeurs attribuées à chaque capteur ne correspondent pas stricti-sensu à la valeur de la maille mais ont été calculées par la méthode du plus proche voisin. Les différents descripteurs potentiels des modèles sont présentés dans la Figure VI.2.

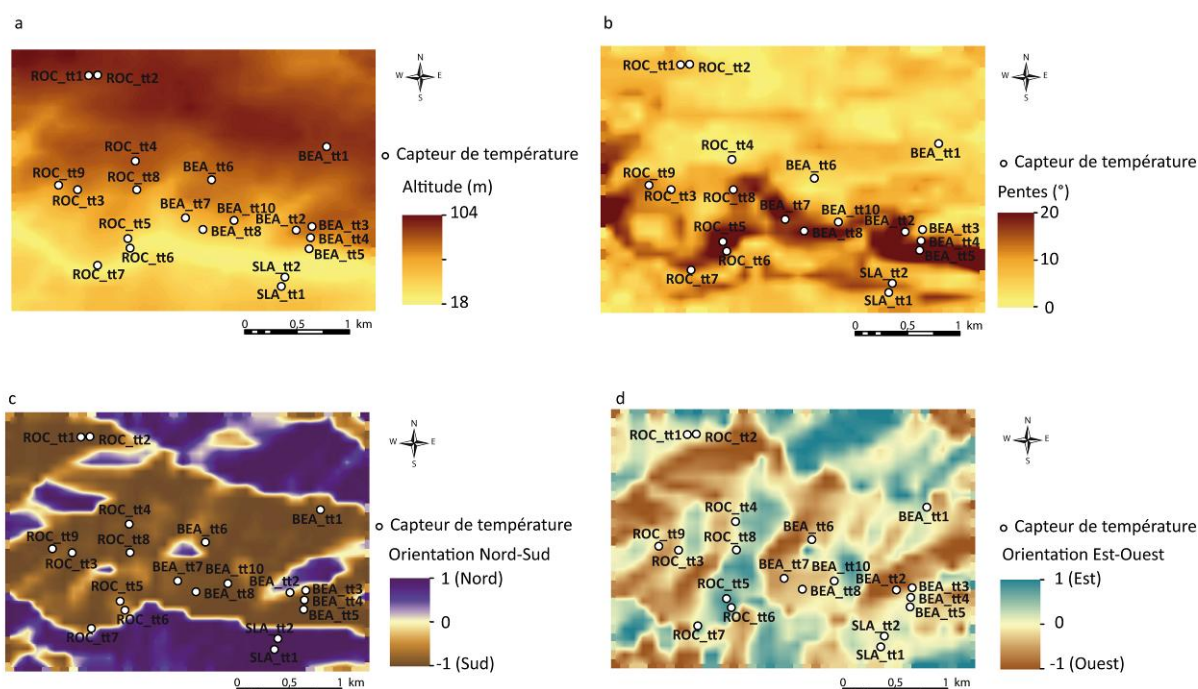


Figure VI.2. Données altitudinales (a), d'inclinaison des pentes (b), d'orientation nord-sud (c) et d'orientation est-ouest (d) extraites du MNT à 80 m de résolution et utilisées dans la construction du modèle multicritères. Données : [Terviclim/INRA-CTV]

VI.1.3. Etudes des relations linéaires simples entre les descripteurs retenus et la température

Avant de lancer la modélisation des températures mensuelles puis journalières, les températures minimales et maximales moyennes de la saison végétative 2009 ont été confrontées à chaque facteur explicatif un par un (altitude, pente, U et V). Les ajustements ont tous été considérés comme linéaires et les coefficients de détermination ont été calculés afin de quantifier la part de variance de la température expliquée par le facteur topographique. Dans le cas d'une relation linéaire significative, la droite de régression a été tracée. Ces graphiques, traduisant la relation linéaire simple entre la température et un facteur topographique, ont ensuite aidé à déterminer les capteurs s'écartant le plus de la relation. Suite à cette étude préliminaire à la construction du modèle multicritères, les

descripteurs à intégrer dans la modélisation ont pu être retenus et une matrice de corrélation entre ces différents descripteurs a été réalisée afin d'observer d'éventuelles redondances entre les facteurs explicatifs de la future modélisation.

VI.2. Construction du modèle et automatisation de la procédure

L'objectif principal était donc la construction de modèles multicritères au pas de temps mensuel puis journalier. Nous cherchons à expliquer la température observée par les différents éléments descriptifs du relief que nous avons décrit dans la première partie de ce chapitre. La méthode de régression multiple pas à pas a ainsi été choisie et la procédure de modélisation a été automatisée afin de fournir des cartes spatialisées pour l'ensemble des mois et des dates.

VI.2.1. Choix de la méthode de régression linéaire multiple

La régression multiple pas à pas est l'une des méthodes les plus répandues pour chercher la part explicative des facteurs locaux dans la variabilité de la température à échelle fine (Agnew et Palutikof, 2000; Ninyerola *et al.*, 2000; Tveito et Schöner, 2002; Ustrnul et Czekierda, 2003). La méthode de la régression multiple pas à pas choisie est ainsi présentée dans un premier temps. La méthodologie ayant permis l'automatisation de la procédure est ensuite introduite.

VI.2.1.1. La régression multiple : définition

Nous cherchons à expliquer la variabilité spatiale des températures minimales et maximales sur le site d'étude des Coteaux du Layon, à partir des caractéristiques topographiques. Nous voulons ainsi savoir la part explicative de chaque variable extraite du MNT dans cette variabilité. Cette modélisation, en partant de données ponctuelles enregistrées par les capteurs thermiques, permettra d'obtenir une donnée de température en tout point de l'espace. La part explicative du modèle ne sera jamais parfaite car d'autres facteurs non pris en compte dans la régression peuvent intervenir. Dans le cadre de cette thèse, étant donné notamment les échelles sur lesquelles nous travaillons, la méthode de régression linéaire multiple pas à pas a été choisie. Nous supposons donc que les relations entre la température et nos prédictors sont linéaires. Cette hypothèse peut sembler forte, car comme l'explique Lhotellier (2005) ou Carrega (1994) les relations entre variables explicatives et la température ne sont pas forcément linéaires. Néanmoins, de nombreuses études ont pu montrer l'intérêt de l'utilisation des régressions linéaires dans la compréhension des relations entre les éléments topographiques, environnementaux et la variabilité spatiale de la température (Raible *et al.*, 1999; Res et Unger, 2004; Svensson, 2004; Madelin et Beltrando, 2005; Lhotellier, 2006; Szymanowski et Kryza, 2006; Střelcová *et al.*, 2007; Szymanowski et Kryza, 2011; Suomi et Kryza, 2012). De plus, les régressions linéaires multiples possèdent un triple avantage comme l'explique Lhotellier (2005) : « la simplicité du modèle en lui-même, la facile compréhension des résultats (si l'on s'élève de 100 m en

altitude, la température baisse de 0,65°C...) et leur très accessible implémentation ». Le modèle final donnera donc une équation qui permettra de calculer la température pour chaque maille de l'espace à la résolution du MNT. La variable dépendante ou le prédicant est donc ici la température (Y) alors que les facteurs topographiques sont les variables explicatives ou prédicteurs (X1, X2, X3 ...). Le modèle final se présentera ainsi comme suit :

$$Y = a X_1 + b X_2 + c X_3 + d X_4 + e$$

Les coefficients précédant chaque prédicteurs (a, b, c et d) sont appelés les coefficients de régression ou régresseurs. Les ordres de grandeur des prédicteurs (variables explicatives) peuvent parfois être très différents. C'est pourquoi, une standardisation des coefficients de régression est nécessaire afin d'expliquer la part de chaque variable dans le modèle (Carrega, 1994). Dans le cas de notre étude le procédé de modélisation des températures est résumé par la Figure VI.3.

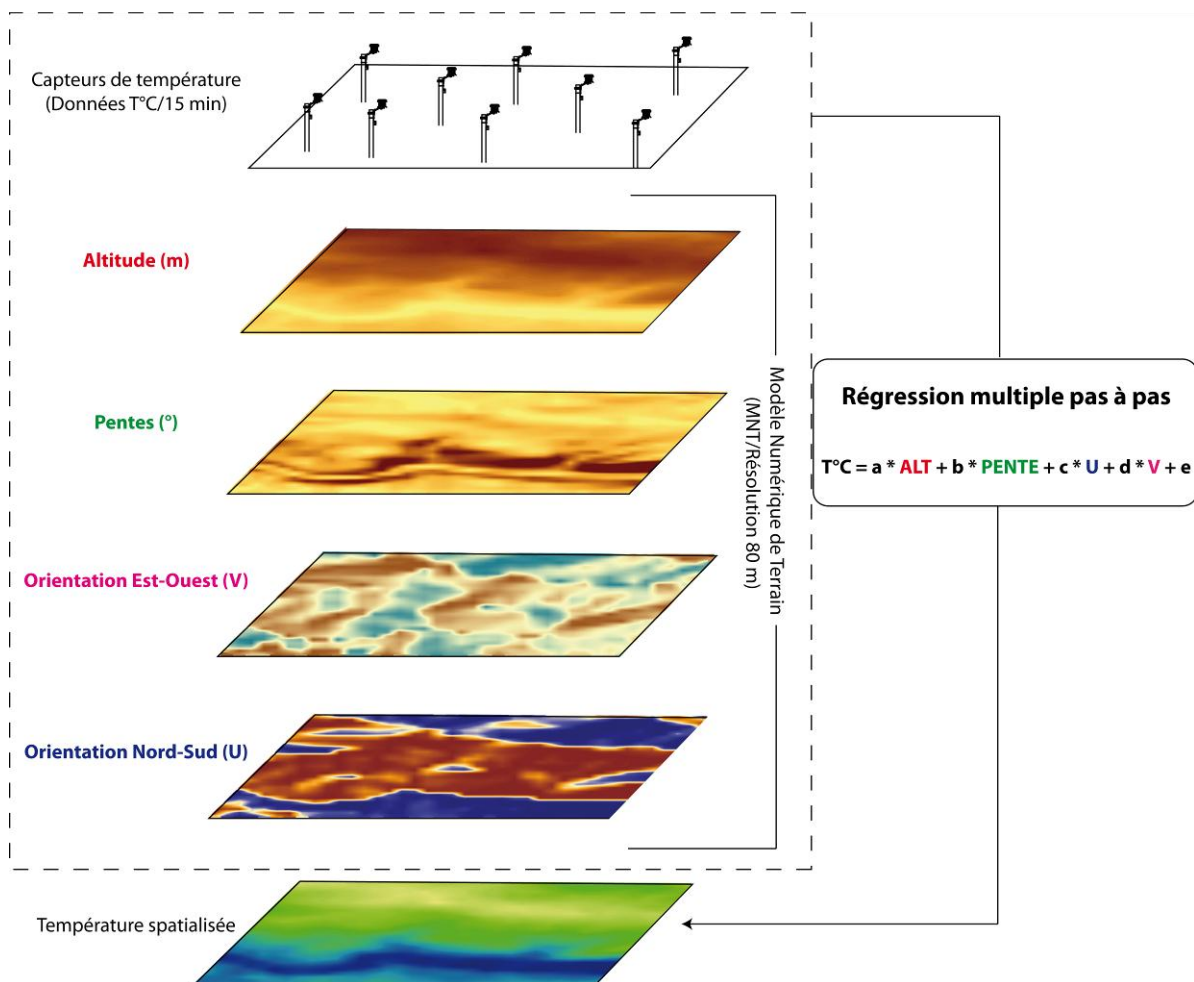


Figure VI.3. Schéma récapitulatif du modèle multicritères permettant de spatialiser la température dans le site des Coteaux du Layon.

Données : [Terviclim/INRA-CTV]

Les différents couches d'informations sont récupérées sous SIG à la résolution du MNT, soit 80 m et l'équation du modèle de régression multiple est appliquée sur l'ensemble des

mailles du MNT pour aboutir sur des champs thermiques spatialisés sur la totalité du site viticole des Coteaux du Layon.

VI.2.1.2. Choix de la méthode de régression multiple pas à pas

Différentes méthodes de régression multiple sont proposées par les différents logiciels de statistiques disponibles. Pour cette étude, nous avons travaillé avec le logiciel de statistique R et nous avons choisi la méthode de régression multiple pas à pas avec sélection des variables grâce au critère AIC (*Akaike Information Criterion*). Dans notre cas, nous avons 4 prédicteurs potentiels soit 2^4 ou encore 16 modèles possibles (dont 1 qui ne sort aucun descripteur) pour chaque mois ou dates modélisés. Le critère AIC permet ainsi de faire le tri entre ces variables et de sélectionner ainsi le meilleur modèle. Dans la littérature nous pouvons voir que deux critères sont principalement utilisés pour sélectionner le meilleur modèle (Faraway, 2002 ; Szymanowski *et al.*, 2011) : le critère AIC (*Akaike Information Criterion*) et le critère BIC (*Bayesian Information Criterion*). Le principe des critères AIC et BIC consiste à pénaliser la vraisemblance des paramètres estimés associée aux données, traduisant la qualité de l'ajustement, soit par le nombre de paramètres indépendants du modèle, soit par le nombre de paramètres indépendants du modèle et de la taille de l'échantillon. Ces critères peuvent être vus comme des critères sélectionnant le modèle réalisant le meilleur compromis entre ajustement aux données et parcimonie du modèle. Le meilleur modèle au sens du critère AIC ou BIC est celui pour lequel la valeur du critère est la plus faible. Dans le cadre de la construction de notre modèle, nous utilisons donc le critère AIC qui se définit de la façon suivante :

AIC (Akaike Information Criterion, 1973)

$$\text{AIC} = - 2 * \text{LogLik} + 2 * K$$

où **LogLik** représente la log-vraisemblance des paramètres associée aux données,

K désigne le nombre de paramètres indépendants dans le modèle

n est le nombre d'individus composant l'échantillon.

Il ne serait pas raisonnable de penser explorer manuellement les 16 modèles possibles afin de sélectionner « le meilleur » au sens du critère AIC. Différentes stratégies sont proposées par le logiciel R. Ces dernières doivent être choisies en fonction de l'objectif recherché et des moyens de calculs disponibles. Nous allons résumer les trois types d'algorithmes possibles par ordre croissant de temps de calcul nécessaire, c'est-à-dire par nombre croissant de modèles considérés parmi les 16, et donc par capacité croissante d'optimalité. Ces trois algorithmes sont appelés algorithmes pas à pas (Geaghan, 2007) :

➤ **Procédure automatique ascendante (*forward*)**

A chaque pas, une variable est ajoutée au modèle. Cette variable est celle dont la valeur de p ($\text{Pr}(>|t|)$) associée à la statistique partielle du test de Fisher, qui compare les deux modèles,

est minimum. La procédure s'arrête lorsque toutes les variables sont introduites ou lorsque la valeur de p reste plus grande qu'une valeur seuil fixée par défaut à 0,5.

➤ **Procédure automatique descendante (*backward*)**

L'algorithme démarre dans ce cas de Figure du modèle complet avec toutes les variables explicatives. A chaque pas itératif, la variable associée à la plus grande valeur de p est éliminée du modèle. La procédure s'arrête lorsque les variables restant dans le modèle ont des valeurs de p plus petites qu'un seuil fixé par défaut à 0,1.

➤ **Procédure automatique mixte (*both*)**

Cet algorithme introduit une étape d'élimination de variable après chaque étape de sélection afin de retirer du modèle d'éventuelles variables qui seraient devenues moins indispensables du fait de la présence de celles nouvellement introduites.

Le modèle original ne comprenant que 4 descripteurs potentiels, le temps de calcul de notre algorithme est limité. Nous avons donc fait le choix d'optimiser la sélection des variables dans nos modèles et nous avons ainsi utilisé la troisième procédure, la procédure mixte.

VI.2.2. Automatisation de la procédure de modélisation

Le logiciel statistique R propose donc une fonction pour réaliser des régressions multiples avec l'option de la sélection par le critère AIC. L'algorithme du modèle a donc été réalisé avec cette fonction et la construction du programme est décrite ci-après.

VI.2.2.1. Réalisation de l'algorithme pour la réalisation de la régression multiple

La librairie MASS du logiciel R permet de réaliser des régressions linéaires multiples pas à pas grâce aux fonctions `lm` pour *linear model* et `stepAIC` pour la sélection du modèle par une procédure pas à pas et à l'aide du critère AIC. Les Tableaux d'entrées du modèle ont été préparés comme le montre l'étape n°1 sur la Figure VI.4. Le premier Tableau contient les variables explicatives, c'est-à-dire l'altitude, la pente et les deux composantes U et V de l'orientation pour les 20 capteurs. Le second Tableau contient les données de températures journalières dans le cas de la Figure VI.4 mais la procédure était la même avec les données mensuelles. Les données n'ont pas été standardisées, afin que chaque variable garde son poids original dans la régression. Une boucle a ainsi été créée dans le programme sous R afin de réaliser les régressions pour l'ensemble des journées ou mois. Le Tableau de sortie est présenté dans la partie n°2 de la Figure et contient donc les différents coefficients de régression standardisés des facteurs explicatifs ressortant par journées ou mois, la constante de l'équation et la qualité générale du modèle soit le coefficient de détermination multiple ajusté (R^2_{aj}). En effet, le coefficient de détermination multiple du modèle doit être ajusté car le R^2 a tendance à augmenter à mesure que l'on ajoute des variables dans le modèle, ce qui rendrait ainsi impossible la comparaison de différents modèles avec des nombres de variables différents. Il doit donc être ajusté, c'est dire corrigé des degrés de liberté du modèle. Sa valeur est donc toujours inférieure à la valeur du R^2 initial. Cependant, dans le

cas de notre modélisation, le nombre de variables est réduit et les deux valeurs ne diffèrent que très peu.

VI.2.2.2. Automatisation de la procédure pour la réalisation des cartes de températures spatialisées

Le choix a été fait de réaliser l'ensemble de la modélisation sous R puis de n'effectuer que la finalisation des cartes sous ArcGis. En effet, les bibliothèques GDAL et Raster ont été utilisées afin que R intègre les données spatialisées sous forme de matrice. Les données extraites du MNT pour chaque maille (altitude, pente, U et V) ont donc été transformées en matrice (Figure VI.4) pour faciliter les calculs sous R. Le programme de la régression multiple est alors lancé et nous obtenons le Tableau contenant les coefficients de régression non-standardisés. Puis, un autre algorithme a été créé afin d'appliquer l'équation de la régression multiple pour chaque pixel du MNT. En d'autres termes, le logiciel R se sert des informations des matrices correspondant aux variables explicatives en les multipliant, le cas échéant, par les coefficients de régression issus du Tableau de sortie des modèles. L'étape n°3 de la Figure VI.4 montre la procédure et ainsi l'obtention d'une matrice finale pour chaque journée retenue ou mois avec une donnée de température pour chaque maille du MNT. La dernière étape, la n°4, consiste à ouvrir les matrices de R, transformées en image sous le logiciel ArcGis afin de finaliser la mise en page des cartes que nous souhaitons.

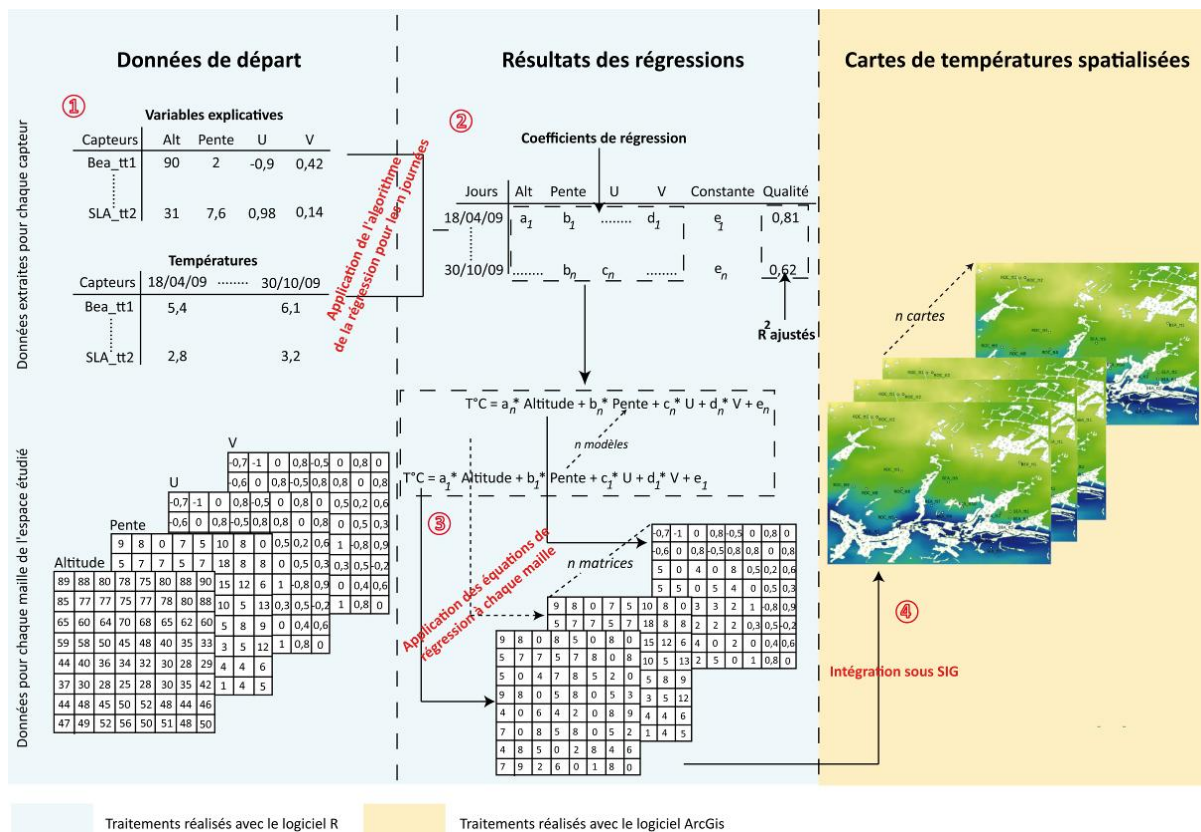


Figure VI.4. Schéma récapitulatif des étapes de la procédure d'automatisation des modèles multicritères issues des régressions multiples pas à pas (exemple pour le calcul des modèles journaliers).

VI.3. Approche méthodologique de l'interprétation des résultats

Les résultats des modèles mensuels et journaliers ont ensuite été analysés dans le détail. Dans un premier temps la qualité des différents modèles, c'est-à-dire la valeur des coefficients de détermination multiples ajustés a été étudiée. Dans un second temps le signe de chaque coefficient de régression a été commenté et enfin, dans un troisième et dernier temps les résidus des modèles ont été contrôlés.

VI.3.1. Etude de la qualité des modèles

Comme expliqué précédemment dans ce chapitre, les coefficients de détermination multiple ajusté (R^2_{aj}) ont été extraits des résultats de l'algorithme pour chaque équation de régression. La valeur de ces coefficients indique la qualité générale du modèle, c'est-à-dire la part de la variabilité de la température expliquée par le modèle. Ainsi, plus cet indicateur de qualité du modèle se rapproche de 1, plus le modèle permet d'expliquer la variabilité spatiale de la température et donc de spatialiser avec confiance ce paramètre sur l'ensemble du site d'étude. Des cartes ont ainsi été réalisées pour le mois et la date avec le meilleur R^2_{aj} et ces cartes sont alors commentées.

VI.3.2. Etude des coefficients de régression

Les coefficients de régression ont également été extraits des résultats de l'algorithme pour chaque équation de régression. Le signe de ces coefficients nous indique le sens de la relation entre la température et le prédicteur. Les coefficients de régression standardisés ont été calculés et ont permis de voir les poids respectifs de chaque variable dans le modèle. Ces différents paramètres ont alors été commentés dans les résultats.

VI.3.3. Etude des résidus des modèles

L'analyse des résidus d'un modèle multicritères est primordiale car elle permet de vérifier l'ajustement individuel des modèles (points aberrants) et l'ajustement global en vérifiant, par exemple, qu'il n'y a pas de structures récurrentes. Les boîtes à moustaches, représentant la dispersion des résidus par capteurs, ont ainsi été réalisées pour les modèles journaliers. Les résultats de ces boîtes à moustache sont alors commentés. Il existe également des méthodes dites de *cross-validation*. Ces méthodes permettent de vérifier la robustesse des modèles. Par exemple Madelin (2004) utilise cette technique pour valider des modèles multicritères afin de spatialiser l'aléa gélif en Champagne. Dans le cas de notre étude, il n'apparaissait pas pertinent d'utiliser la méthode de « cross-validation », étant donné le faible échantillon de capteurs (20).

CONCLUSION DU CHAPITRE VI

Ce chapitre a présenté la méthodologie de construction des différents modèles multicritères afin d'aboutir à une spatialisation de la température sur le site expérimental des Coteaux du Layon. Le nombre de jours potentiellement modélisables a été nettement réduit par différents critères de sélection. Cependant, ces journées sont celles avec une variabilité spatiale de la température marquée qui peut entraîner des différences thermiques importantes d'une parcelle à une autre. Si ces situations ne sont pas les plus fréquentes, elles peuvent entraîner des risques majeurs pour la vigne lors d'épisodes extrêmes tels une canicule ou une nuit radiative de printemps avec gel. La construction et les résultats de ces modèles aideront ainsi à comprendre la part des facteurs explicatifs choisis dans cette variabilité et permettront de spatialiser la température pour certaines dates ou mois et ainsi d'obtenir des champs thermiques continus en tout point de l'espace viticole. Ces modèles ne se veulent pas « parfaits » mais doivent servir à expliquer une partie de la variabilité spatiale de la température dans les vignobles. Enfin, les relations entre prédicteurs et température sont ici supposées linéaires alors que dans certains cas ces types de relations peuvent être non-linéaires. Ces cas de non linéarité seront discutés dans le chapitre X. Enfin, l'un des inconvénients des méthodes de spatialisation fondées sur des régressions linéaires multiples et des variables explicatives du relief, est qu'elles ne prennent pas en compte la circulation atmosphérique et introduisent l'action de la topographie de manière plus ou moins intuitive. La modélisation numérique du climat, à partir des MCRA, s'avère alors être un autre outil de spatialisation de la température, intégrant la dynamique atmosphérique. Dans le chapitre suivant, l'apport du modèle régional RAMS en termes de spatialisation est notamment présenté à travers l'approche méthodologique adoptée pour la thèse.

Chapitre VII : OUTIL DE MODÉLISATION

NUMÉRIQUE DU CLIMAT : LE MODÈLE RÉGIONAL

RAMS DONNÉES ET APPROCHE

MÉTHODOLOGIQUE

Le modèle numérique régional *Regional Atmospheric Modelling System* (RAMS) a été utilisé dans le cadre de cette thèse, avec pour objectif d'évaluer l'apport d'un tel outil dans une étude d'impact du climat sur la viticulture. Le modèle a été expérimenté à différentes résolutions et sur différentes périodes. Ces modélisations ont été réalisées dans le cadre du projet TERVICLIM et grâce à l'accès aux moyens de calcul du Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur (CINES) au travers de l'allocation de ressources 2011 (projet : uhb6342) attribuée par le Grand Equipement National de Calcul Intensif (GENCI). Tout d'abord, dans une approche de validation, des simulations ont été effectuées lors de quelques épisodes extrêmes de canicules ou de gel printanier observés sur le domaine du val de Loire à fine résolution horizontale. Puis, dans un contexte de modélisation climatique, deux décennies ont ainsi été simulées, la période de référence 1991-2000 et les projections 2041-2050 selon le scénario A2. La comparaison de ces deux périodes doit amener à évaluer l'évolution de la température d'ici à l'horizon 2050 en moyenne vallée de la Loire. La vigne étant sensible aux événements extrêmes tels le gel tardif ou les fortes vagues de chaleur (canicule), quatre épisodes extrêmes passés et un épisode futur ont été simulés. Ce chapitre présente donc, dans un premier temps, le fonctionnement général du modèle climatique régionale RAMS. Les périodes d'études choisies sont également justifiées et les données d'entrée du modèle décrites. Les données d'observations, ayant servi au contrôle des sorties du modèle, sont alors présentées. Enfin, l'approche méthodologique de l'analyse des résultats des différentes modélisations est développée.

VII.1. Présentation du modèle régional RAMS, des périodes étudiées et des paramètres climatiques retenus pour la modélisation

Le modèle régional RAMS est un modèle numérique permettant la modélisation de phénomènes atmosphériques à aire limitée et haute résolution. Il semble donc intéressant de vérifier l'apport d'un tel modèle dans une étude d'impact des changements climatiques sur une région viticole. Dans cette première partie, le choix des périodes et des paramètres climatiques à modéliser est présenté, dans un premier temps, puis le fonctionnement général et la paramétrisation du modèle est décrite.

VII.1.1. Le choix des périodes et des paramètres climatiques modélisés

VII.1.1.1. Période de référence et période future

La modélisation numérique fait appel à des ressources informatiques considérables pour la réalisation de calculs complexes. Il fallait donc trouver un compromis entre temps de calcul et choix des périodes à étudier. La période de contrôle étudiée, que nous appellerons également période de référence, correspond à la décennie 1991-2000. Cette décennie a été choisie dans le cadre du projet TERVICLIM car cette période fait partie du passé relativement récent et les simulations sur de plus longues périodes passées et sur de plus grands domaines ont déjà été validés par de nombreux auteurs en Europe de l'Ouest (cf chapitre IV). En parallèle de cette période de référence, la décennie 2041-2050 a été simulée comme période future selon le scénario A2. Ce scénario du GIEC est l'un des plus pessimistes mais avant 2070, les projections du scénario A2 sont très proches de celles du scénario A1B qui est le scénario intermédiaire (cf Chapitre II/Figure II.13). Les deux projections commencent à réellement diverger après seulement 2070 (Trenberth *et al.*, 2007). De plus, cette décennie est une période du futur proche à seulement 30 ans de la période actuelle, ce qui est de meilleure utilité pour les viticulteurs. En effet, la vigne est une plante pérenne qui devient productive qu'au bout de 4 à 5 années et qui reste rentable économiquement pendant 50 à 60 ans. Les décisions des acteurs du terrain doivent donc être prises dès maintenant, d'où l'intérêt de telles simulations. La simulation des périodes 1991-2000 et 2041-2050 a été réalisée jusqu'à la résolution de 5 km (grille 2). Pour des raisons de temps de calcul évidentes, seulement quelques mois clés (avril, juillet et août) pour la vigne ont été modélisés au pas de temps journalier. Une attention toute particulière a été portée sur les températures minimales du mois d'avril et sur l'évaluation de l'aléa gélif. Le cumul des degrés jours de ce même mois a également été calculé. Les températures maximales et notamment les valeurs extrêmes supérieures à 35°C (seuil de canicule) ont été étudiées pour les mois de juillet et d'août. Enfin, les températures minimales et en particulier l'indice de fraîcheur des nuits ont été analysés pour le mois d'août puisqu'à terme, la précocité du cycle végétatif pourrait décaler la période de maturation.

VII.1.1.2. Choix de quatre épisodes extrêmes passés et d'un épisode extrême futur

Quatre épisodes extrêmes pour la vigne ont également été simulés. Dans un premier temps, l'année 2003 qui pourrait être une année type à l'horizon 2100 (GIEC, 2007), a fait l'objet de deux simulations. La première concerne la période du 8 au 10 avril qui a vu un épisode de gel tardif dans de nombreux vignobles français et notamment dans le Val de Loire. La seconde correspond à la période caniculaire de début août. La période la plus chaude de l'épisode, c'est-à-dire du 7 au 10 août, a ainsi été simulée. Deux autres vagues de chaleur plus récentes et survenues en août 2009 et juillet 2010 ont été également simulées. L'ensemble de ces simulations ont été réalisées jusqu'à la résolution de 200 m, correspondant à la grille 4 et à un pas de temps horaire. Enfin, un épisode caniculaire type de la période 2041-2050 a également été simulé à la même résolution.

VII.1.2. Le modèle RAMS et les données d'entrée

VII.1.2.1. Présentation générale du modèle RAMS

Le modèle RAMS est un modèle météorologique développé à l'université du Colorado afin d'aider à la simulation et à la prévision des phénomènes atmosphériques à méso-échelle, c'est-à-dire à aire limitée par opposition aux modèles globaux (Cotton *et al*, 2003). Ce modèle régional a été construit de façon à prendre en compte la dynamique (équations du mouvement) et la thermodynamique atmosphérique (équations de thermodynamique), tout en tenant compte des mouvements verticaux de l'atmosphère, non-négligeables à ces échelles. Ces différentes équations sont complétées par les équations de conservation de la masse et de continuité du rapport de mélange pour chaque sorte d'hydrométéores pronostiqués. Dans le cas où la résolution du modèle est suffisamment fine pour que le phénomène physique soit pris en compte, les équations sont alors dites « explicites » ; en revanche, si la résolution est trop lâche pour prendre en compte de tels phénomènes, qui se déroulent à une échelle inférieure à la maille, des paramétrisations plus ou moins complexes peuvent être engagées pour arriver à modéliser le phénomène en question. Le modèle RAMS permet ainsi d'évaluer les processus à petite échelle tels que la turbulence, la convection, la microphysique ou encore les processus radiatifs, qui jouent un rôle prépondérant aux échelles fines. Ce modèle à aire limitée nécessite donc un certain nombre de paramétrisations qui doivent être adaptées à chaque phénomène ou situation modélisé. Ces paramétrisations sont très complexes et prennent notamment en compte l'ensemble des phénomènes atmosphériques comme le rayonnement solaire et terrestre, les mécanismes décrivant la formation des nuages et des précipitations, la convection nuageuse, les effets cinématiques dus à la topographie et les échanges de chaleur latente et sensible entre le sol et l'atmosphère... Enfin ce modèle prend en compte des domaines imbriqués qui peuvent descendre à des résolutions très fines, comme 200 m dans le cas de cette thèse. Ces résolutions fines sont ainsi très utiles dans le cas d'étude d'impacts du climat sur la vigne.

VII.1.2.2. Le forçage du modèle RAMS et le système d'imbrication des grilles

Les modèles météorologiques à aire limitée comme RAMS nécessitent d'être forcés aux limites de la grille 1 par des champs à échelle synoptique. Pour les simulations climatiques le modèle méso-échelle RAMS (v6.0) a été initialisé et forcé toutes les 6 heures aux limites latérales par les champs 3D issus des simulations du modèle ARPEGE-Climat (v3) (Déqué, 2001) de Météo-France, qui ont simulé une succession de conditions climatiques pour la période de référence et pour le scénario A2. Le modèle ARPEGE-Climat, qui prend en compte les forçages tant anthropiques que naturels (incluant les émissions biogéniques, volcaniques et le forçage solaire), reproduit les caractéristiques climatiques moyennes de la période 1971-2000 sur l'Europe de l'Ouest (Terray *et al.*, 2010). Dans le cas de simulation réelle des

épisodes extrêmes sur le domaine du val de Loire (épisode gélif de 2003, canicules de 2003, 2009 et 2010), le forçage est assuré par les champs 3D des réanalyses d'ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast). Les champs synoptiques pour le forçage aux limites latérales du modèle à méso-échelle issus d'ARPEGE ou des réanalyses d'ECMWF sont à la résolution horizontale de 50 km. Le transfert d'échelle est ainsi assuré par le modèle RAMS avec les différentes grilles imbriquées. Dans cette étude, la grille 1 a une résolution de 25 km (1500 km x 1500 km) et correspond au forçage de grande échelle sur l'Océan Atlantique Nord et l'Europe. La position de la grille 1 a été adaptée en fonction des différentes situations lors de la modélisation des événements extrêmes. La grille 2 a une résolution horizontale de 5 km (935 km x 935 km) et représente les circulations locales sur la France en prenant en compte les hétérogénéités de surface et permet ainsi de fournir des informations plus adaptées à l'échelle régionale. Enfin la grille 3 a une résolution de 1 km et la grille 4 de 200 m, grilles qui permettent d'évaluer la variabilité spatiale de la température à l'échelle des terroirs viticoles. Toutes les grilles échangent des informations entre elles de manière bidirectionnelle, c'est le *two-way nesting*. La Figure VII.1 résume le système d'imbrication des grilles du modèle RAMS avec les différents forçages mis en en place suivant les modélisations. Dans une démarche de simulation climatique future, il est à noter que les simulations de validation pour les périodes extrêmes réelles (2003, 2009, 2010) ont été simulées avec seulement le forçage aux limites latérales. Il n'y a pas eu d'assimilation de données types : radiosondages locaux ou observations de stations au sol. Ainsi, nous avons pu évaluer les limites du modèle méso-échelle à prévoir les maxima ou les minima des températures dans ces cas extrêmes.

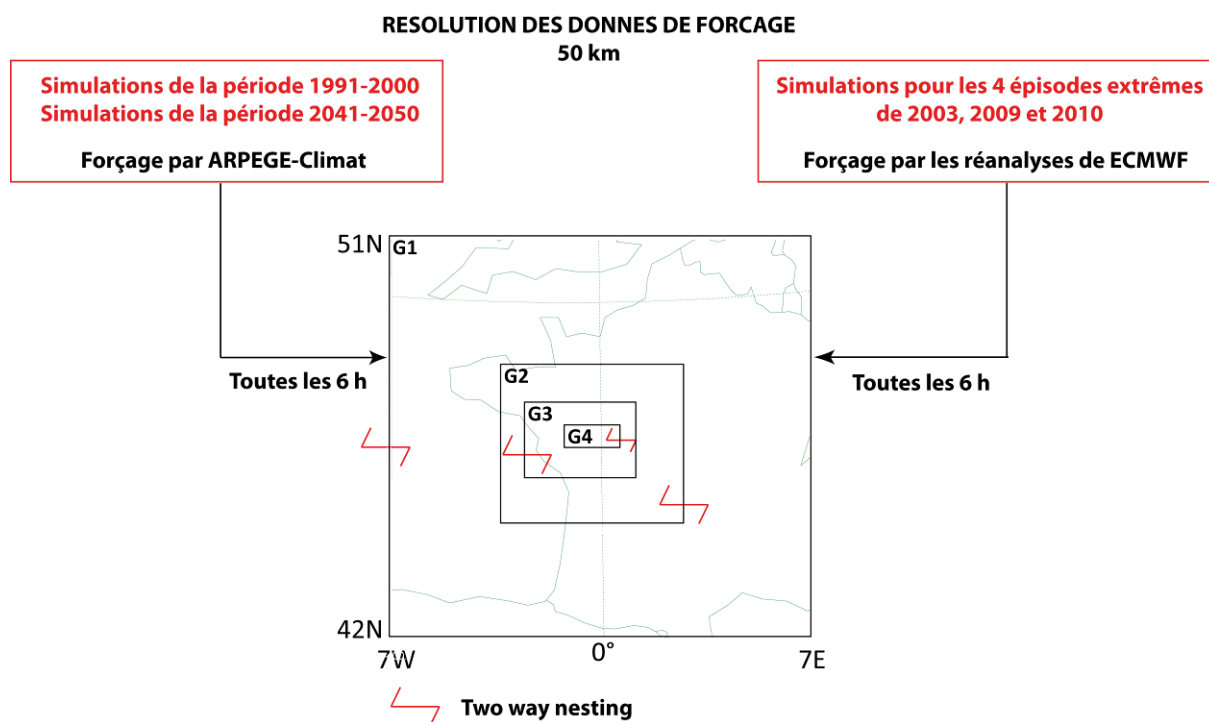


Figure VII.1. Système de grilles imbriquées du modèle RAMS avec les différents forçages aux limites de la grille 1

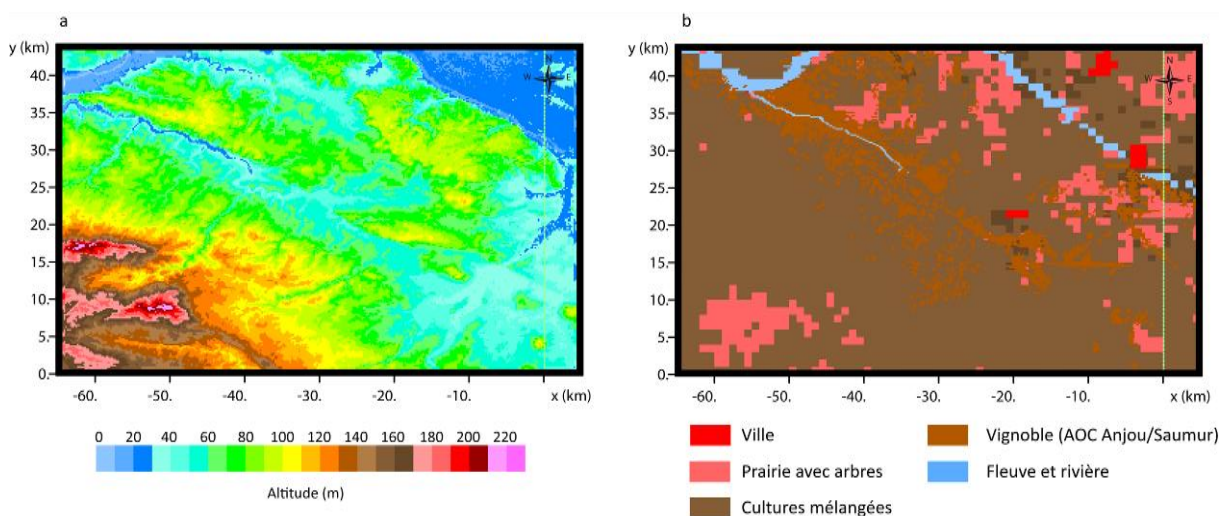
Données : [RAMS]

VII.1.2.3. La base de données environnementales du modèle

Le modèle RAMS est couplé à un modèle de sol/végétation qui comprend plusieurs niveaux à l'intérieur du sol et prend en compte les différentes caractéristiques de la texture du sol et du couvert végétal (LEAF3, Walko *et al.*, 2000). La topographie correspond quant à elle à la désagrégation des données de l'USGS (United States Geological Survey).

VII.1.2.4. La base de données environnementales supplémentaire pour la grille 4

Afin d'affiner les sorties du modèle RAMS pour la grille 4, des informations supplémentaires ont été intégrées. Dans un premier temps les données du SRTM *Shuttle Radar Topography Mission* à la résolution de 90 m ont été ré-échantillonnées à la résolution de la grille 4 (200 m) puis intégrées aux modélisations. La topographie est ainsi beaucoup plus précise pour cette grille (Figure VII.2a). Comme précisé précédemment, le modèle comprend à l'origine ses propres classes de végétation mais ne distingue pas spécifiquement la vigne d'une autre culture. La vigne, pour le modèle RAMS, fait partie de la classe « cultures mélangées ». La localisation de l'AOC Anjou-Saumur (INRA-Angers) a ainsi été intégrée à la grille 4 afin que le modèle puisse intégrer la vigne en tant que culture à part entière (Figure VII.2b). Les données du sol ont également été complétées pour la grille 4. Le modèle RAMS possède initialement 12 classes de sol issues de la nomenclature USDA, c'est-à-dire issues de la carte mondiale des sols FAO-UNESCO qui diffèrent des nomenclatures françaises des types de sols. La classification de Jamagne est présentée par la Figure VII.3, ainsi que les correspondances en pourcentage d'éléments (sable/limon/argile) dans les sols du val de Loire. Une correspondance a donc dû être établie entre la base de données de la Cellule Terroir Viticole d'Angers (cf Chapitre III) et celle de RAMS. La résolution de cette base de données a été ramenée à la résolution de 200 m, correspondant à celle de la grille 4 du modèle RAMS.



L'année 2003 a connu une sécheresse prématurée au printemps qui s'est poursuivie dans la plupart des régions viticoles françaises durant la saison estivale. Le printemps en Val de Loire a été sec contrairement à l'été qui a été fourni en précipitations orageuses. Du fait de la situation hydrique particulière des sols et du démarrage précoce de la végétation au printemps durant cette année, des images MODIS/Terra du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) à 250 m de résolution ont pu être téléchargées pour les dates clés de 2003 sur la plateforme *EOS Data Gateway*. Elles ont permis de compléter la base de données environnementales de la grille 4 pour cette année particulière. Enfin, les images SST (*Sea Surface Temperature*) de MODIS pour les mêmes dates ont été récupérées et intégrées aux simulations de 2003 car les anomalies positives de température des océans au large de l'Europe de l'Ouest étaient marquées cette année-là.

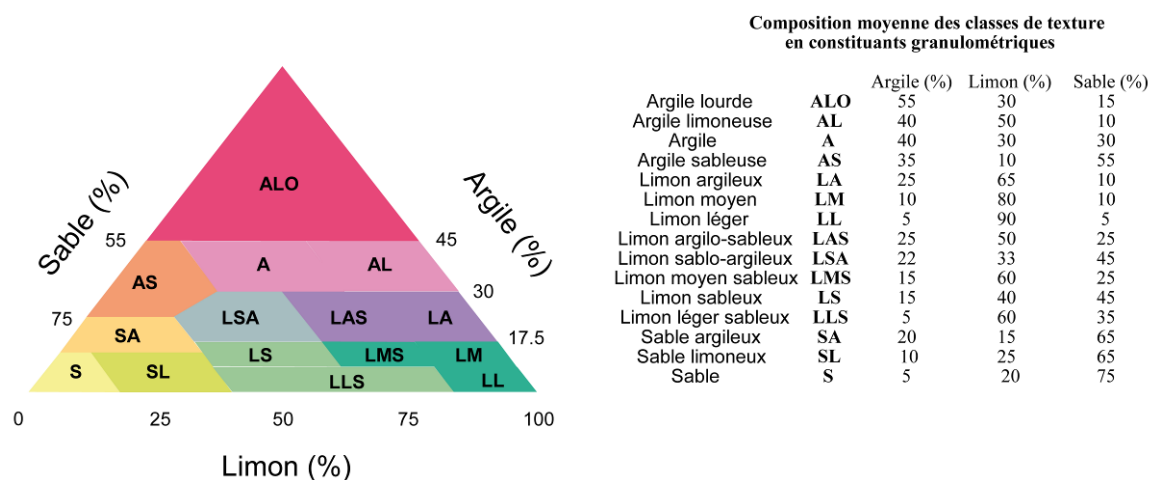


Figure VII.3. Triangle des textures de Jamagne et pourcentages d'argile, sable et limon par type de sols dans le Val de Loire.

Source : [INRA-Angers]

VII.2. Approche méthodologique du traitement des sorties du modèle RAMS

La deuxième et dernière partie de ce chapitre se focalise sur l'approche méthodologique ayant servi au traitement des sorties du modèle RAMS. Les données d'observation qui ont été comparées aux simulations sont présentées et les différents traitements statistiques ayant été appliqués sont décrits.

VII.2.1. Méthodologie de contrôle des sorties de la période de référence 1991-2000

Les sorties de la période de contrôle 1991-2000 ont été analysées dans le but (1) d'évaluer la méthode de désagrégation dynamique du modèle RAMS en comparant les simulations aux données d'observations issues de stations météorologiques, (2) évaluer les biais générés par le forçage de grande échelle, (3) montrer les différences spatiales et (4) évaluer la contribution de la modélisation régionale à réduire les biais de grande échelle en comparant les sorties de RAMS à celles d'ARPEGE-Climat.

VII.2.1.1. Les données d'observations retenues pour le contrôle des modélisations

Les données d'observation ponctuelles aux stations de Montreuil-Bellay, Saumur et Angers étaient disponibles au pas temps de journalier sur la période 1991-2000. Ces données d'observations ont ainsi été comparées aux sorties de RAMS et d'ARPEGE-Climat pour les mailles correspondantes, respectivement aux résolutions de 5 et 50 km.

VII.2.1.2. Etudes des biais et calcul du RMSE

Une analyse statistique descriptive a été réalisée pour chaque paramètre thermique étudié, en utilisant les données simulées et observées afin d'évaluer les sorties numériques ainsi que l'apport du modèle régional à fournir des simulations régionales détaillées. Pour cela des graphiques cartésiens croisant les biais des deux modèles ARPEGE-Climat et RAMS ont été réalisés. Les biais ont été calculés en soustrayant les valeurs observées des stations aux valeurs modélisées pour les mailles correspondantes. La première bissectrice de chaque graphique a été tracée afin de visualiser la position du nuage de point par rapport à cette droite qui correspondrait à une égalité parfaite des biais de RAMS et ARPEGE-Climat. Enfin, l'ordre de grandeur des erreurs entre les valeurs observées et simulées des modèles a été calculé grâce au RMSE (Root Mean Square Error). Ce calcul a été effectué sur les données mensuelles et non journalières. En effet, dans le cadre de modélisation climatique sur des périodes assez longues, comparer des données journalières simulées avec des données journalières observées n'a pas réellement de sens. Le modèle reproduit, en revanche des moyennes thermiques mensuelles ou saisonnières comparables avec les moyennes des données observées.

VII.2.1.3. Calcul de la significativité de la différence entre observation et simulation

Une deuxième étape de l'analyse des simulations a été d'effectuer le test t de Student afin de déterminer si les séries de températures observées étaient significativement différentes ou non des séries simulées. Le test t de Student permet ainsi de comparer deux moyennes en testant l'égalité des moyennes de deux échantillons indépendants et permet ainsi de prouver que la différence entre les deux moyennes est significative ou non. Le test part de l'hypothèse nulle H_0 qui considère que les deux moyennes sont identiques. Si la valeur de p est inférieure au niveau de significativité du test qui est fixé ici à 5%, alors l'hypothèse nulle est rejetée et les moyennes sont donc significativement différentes.

VII.2.2. Approche méthodologique de l'analyse et de l'interprétation des sorties de la période future 2041-2050

Les mêmes paramètres thermiques et pour les mêmes mois que sur la période de référence, ont été extraits des simulations de la décennie 2041-2050. Les conclusions sur l'évolution des températures et des indices simulée n'ont été tirées que des résultats pour lesquelles la différence entre l'observation et la simulation n'était pas significative sur la période de

référence. Une hypothèse a donc été posée sur le fait que la distribution des paramètres climatiques modélisés par RAMS serait la même entre la période future et la période de référence. L'un des buts principaux de cette simulation était d'évaluer l'évolution thermique future en moyenne vallée de la Loire et les impacts possibles en viticulture, en particulier sur les risques climatiques pour la vigne liés aux extrêmes thermiques.

VII.2.3. Approche méthodologique de l'analyse des sorties pour quatre épisodes extrêmes passés et futurs

L'objectif principal de la simulation d'épisodes extrêmes passés était de contrôler la capacité du modèle régional RAMS à reproduire les séries de températures horaires des différentes stations d'observations étudiées. La reproduction des valeurs minimales et maximales journalières a également été contrôlée. Enfin, un épisode caniculaire futur a été modélisé afin de le comparer aux épisodes passés précédemment simulés.

VII.2.3.1. Description des situations synoptiques de chaque épisode

Avant de procéder à l'analyse des résultats des simulations, les situations synoptiques de chaque épisode ont été commentées. Les cartes d'analyse des champs de pression en surface ont ainsi été extraites des bulletins climatiques hebdomadaires publiés par Météo-France. De même, les cartes de réanalyse des températures à 850 hpa (environ 1500 m) ont été récupérées du site internet : www.wetterzentrale.de. Ces cartes ont été dans certains cas comparées aux données synoptiques de la grille 1 ou de la grille 2 de RAMS.

VII.2.3.2. Approche méthodologique de l'analyse statistique de la distribution des températures observées par rapport aux températures simulées pour les 4 épisodes passés

Quatre épisodes extrêmes passés ont été simulés à échelle fine (200 m) grâce au modèle numérique RAMS. L'année 2003 ayant été très particulière avec des gelées tardives au mois d'avril et une période caniculaire au mois d'août, les deux épisodes ont été simulés et les données horaires simulées ont été confrontées aux observations horaires dont nous disposons pour les stations de Montreuil-Bellay et Beaulieu-sur-Layon. La station de Beaulieu-sur-Layon utilisée pour le contrôle des sorties de RAMS n'est pas la même que celle du réseau TERVICLIM/INRA présentée dans le chapitre V. Cette station est une station manuelle appartenant à Météo-France et gérée par un bénévole. Cette station est située à proximité du bourg de Beaulieu-sur-Layon. Enfin, la station de Montreuil-Bellay est celle gérée par le lycée viticole de la ville et est directement implantée dans les vignes expérimentales. Seules, ces deux stations météorologiques de Météo-France ont pu être utilisées pour cette année 2003 car nous ne disposons des données horaires que de ces deux stations sur la grille4. Deux autres épisodes extrêmes plus récents en août 2009 et juillet 2010 ont été modélisés. Le réseau de stations TERVICLIM/INRA installé en 2008 a permis de confronter les séries de données de 8 stations en 2009 et 9 stations en 2010 avec les simulations de RAMS aux mailles correspondantes. Les graphiques cartésiens croisant les

données observées et simulées ont été réalisées pour les 4 épisodes extrêmes. Le coefficient de détermination (R^2) a été commenté, ainsi que la significativité de la relation linéaire. La valeur du R^2 détermine la part de variance des températures expliquée par le modèle RAMS. Enfin, les pentes des droites de régression ont également été commentées, puisque une pente se rapprochant de 1 est synonyme d'une non dérive du modèle. Une dérive de la modélisation indiquerait que le modèle RAMS a tendance à systématiquement surestimer ou sous-estimer les valeurs maximales ou minimales ou les deux par exemple. La droite de régression aurait ainsi tendance à « dériver ». Les cartes des champs thermiques simulés ont ensuite été sorties pour certaines dates.

VII.2.3.3. Approche méthodologique de l'analyse des sorties pour un épisode caniculaire « type » de la décennie 2041-2050

Un épisode extrême « type » de la décennie 2041-2050 a été simulé et les données de quatre stations de moyenne vallée de la Loire ont été extraites afin d'observer la distribution des températures horaires. Les champs thermiques des différentes grilles ont également été extraits et comparés aux épisodes caniculaires de 2003, 2009 et 2010.

CONCLUSION DU CHAPITRE VII

Le modèle RAMS est un véritable outil de spatialisation à échelle fine des différents paramètres climatiques. Il s'avère donc très utile en climatologie viticole car il permet d'évaluer la variabilité spatiale du climat dans les différents terroirs viticoles de manière suffisamment fine pour en évaluer les conséquences sur le comportement de la vigne. Néanmoins, ce type de modélisation fait appel à des temps de calculs importants et comme nous l'avons vu des choix ont dû être pris quant aux périodes modélisées. Le modèle a donc été paramétrisé en fonction des périodes modélisées et de la région d'étude. Les simulations sur la période de contrôle (1991-2000) et des événements extrêmes passés (2003, 2009, 2010) permettent d'analyser la capacité du modèle à reproduire ces épisodes en comparant notamment les sorties avec des données d'observations sur le terrain. Enfin, les simulations futures ont permis d'évaluer l'évolution probable de la température selon le scénario A2, à une résolution de 5 km, en moyenne vallée de la Loire.

Troisième partie

Analyse multiscalaire des températures dans le Val de Loire

Cette troisième partie présente les résultats issus de l'analyse des températures à différents niveaux d'échelles spatiales et temporelles.

Le premier chapitre propose une analyse diagnostic de l'évolution climatique dans le centre-ouest français depuis le milieu du XX^{ème} siècle. Ces résultats permettent de dresser un Tableau du contexte climatique en Val de Loire. Le second chapitre est consacré aux résultats des analyses menées à l'échelle topoclimatique puis locale avec notamment l'étude de la variabilité spatiale de la température dans un site expérimental des Coteaux du Layon.

Enfin, le troisième et dernier chapitre développe les résultats des modélisations de la température à échelle fine dans les Coteaux du Layon.

Chapitre VIII : ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE

DES TEMPÉRATURES DANS LE CENTRE-OUEST

FRANÇAIS DEPUIS LE MILIEU DU XX^{ÈME} SIÈCLE

Ce chapitre présente les résultats à l'échelle régionale dans le Val de Loire. Les nuances climatiques du centre-ouest français où se trouve notamment le Val de Loire sont donc étudiées. Cette analyse doit permettre de dresser un bilan de l'évolution des températures dans la région depuis le milieu de XX^{ème} siècle. Ce chapitre présente donc le contexte climatique régionale de cette étude. Des tests de rupture ont été réalisés sur les séries de températures annuelles pour une dizaine de stations et les tendances de l'évolution des températures ont été calculées sur l'ensemble de l'année et pour la saison végétative de la vigne (avril-septembre). L'évolution des indices bioclimatiques a également été analysée sur la même période et des tests de rupture ont été appliqués afin de détecter tout changement de tendance dans les séries de températures.

VIII.1. Les principaux caractères climatiques régionaux

Les caractères climatiques régionaux et notamment thermiques (période 1961-1990) sont présentés dans ce paragraphe afin d'évaluer la variabilité des températures au sein du grand-ouest français.

VIII.1.1. Les influences climatiques dominantes

Le Val de Loire, par sa position, est influencé par des nuances océaniques à l'ouest de la région qui se dégradent vers l'est avec l'expression de la continentalité. Malgré une topographie peu variée (0 à 250 m environ), intrinsèquement celle-ci peut avoir un rôle sur la variabilité des températures tout comme l'environnement des stations et notamment la nature du substrat constituant le sol pour les influences aux échelles plus locales. Enfin, la latitude joue un rôle également sur la variabilité spatiale des températures mais un rôle très modéré, du fait de positions latitudinales relativement peu variées entre la station la plus au nord et celle la plus au sud.

VIII.1.1.1. La dégradation de l'influence océanique vers l'est

L'influence océanique marquée à Nantes, station bénéficiant du climat maritime propre à la bordure atlantique française (Planchon, 1994 et 1997), s'atténue lorsqu'on se dirige vers l'intérieur des terres (Tableau VIII.1) et certains caractères climatiques « continentaux » apparaissent progressivement en direction de l'est, à travers les bas plateaux du sud du bassin parisien (Pédélaborde, 1957 ; Pagney, 1988). A Nantes, qui représente bien le climat

maritime atlantique, les hivers y sont les plus doux avec la température moyenne du mois de janvier la plus élevée de toutes les stations (5,3°C) et des étés sans grande chaleur (température moyenne du mois de juillet de 19,1°C). L'amplitude thermique annuelle reste ainsi relativement faible (13,8°C). Cette douceur hivernale liée à la proximité de l'océan s'atténue progressivement vers l'Est. Les autres stations (hormis Angers et Saumur) connaissent toutes des hivers plus rigoureux avec une température moyenne en janvier comprise entre 3,2 et 4,1°C. L'amplitude thermique annuelle de ces mêmes stations est plus élevée en raison d'un été plutôt chaud ; elle atteint par exemple près de 16°C à Bourges et à Châteauroux.

VIII.1.1.2. Les effets locaux liés à la topographie et l'environnement des stations

A l'effet de la continentalité s'ajoute l'influence de l'altitude ou, plus précisément, de la topographie. En effet, plusieurs stations de référence dans cette étude (Tours, Bourges, Poitiers et Orléans) sont situées sur des plateaux peu élevés (environ 100 à 150 m), mais toutefois suffisamment surélevés par rapport aux vallées qui les traversent, y compris la Loire, pour entraîner des nuances climatiques. Par ailleurs, bien que située dans une vallée très peu encaissée, Romorantin ressort comme la station la plus froide en hiver (température minimale moyenne en janvier de 0,2°C). Cette station est située dans une plaine sableuse, donc sur des sols qui amplifient les effets du rayonnement nocturne (Oke, 1987 ; Escourrou, 1981). De telles caractéristiques permettent ainsi de comparer la station de Romorantin à celle de Mont-de-Marsan dans les Landes (Avila, 1986). Dans les deux cas, l'affaiblissement du vent sur des espaces à dominante forestière (forte rugosité ; Pinty *et al.*, 1989) aggrave les possibilités de gelées de rayonnement. A l'inverse, et pour les mêmes raisons liées au rayonnement des sols sableux, Romorantin fait partie des stations les plus chaudes en été.

VIII.1.1.3. Les effets de la position latitudinale

La position latitudinale, même si les différences entre les stations sont moins marquées qu'en longitude, a également un effet sur les températures. Par exemple, à altitude et situation comparable, la température moyenne de janvier à Orléans est de 1°C plus basse que celle de Poitiers. De la même manière, en été le mois de juillet est de 0,6°C plus chaud à Poitiers qu'à Orléans. Sur l'ensemble de l'année, cette différence sur la température moyenne est de +0,6°C pour Poitiers et de +0,5°C sur la saison végétative. Les intercomparaisons sont beaucoup moins réalisables entre les autres stations, celle-ci ayant très souvent des altitudes différentes.

Tableau VIII.1. Températures moyennes mensuelles et saisonnières dans le Centre-Ouest français pour dix stations climatiques représentatives (normales 1961-1990).

| Station | Temp. (en °C) | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Aoû | Sep | Oct | Nov | Déc | saison végétative | An |
|-------------|---------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-------------------|------|
| Nantes | Tmax | 8.3 | 9.6 | 12.1 | 14.8 | 18.2 | 21.8 | 24.3 | 23.9 | 21.7 | 17.3 | 12.0 | 8.9 | 20.8 | 16.1 |
| | Tmoy | 5.3 | 6.2 | 8.0 | 10.3 | 13.5 | 16.8 | 19.1 | 18.7 | 16.7 | 13.1 | 8.5 | 6.0 | 15.9 | 11.9 |
| | Tmin | 2.4 | 2.8 | 3.9 | 5.9 | 8.9 | 11.8 | 13.8 | 13.4 | 11.8 | 8.9 | 5.0 | 3.0 | 10.9 | 7.6 |
| Angers | Tmax | 7.6 | 9.0 | 11.9 | 14.8 | 18.3 | 22.0 | 24.6 | 24.2 | 21.8 | 17.0 | 11.2 | 8.1 | 21.0 | 15.9 |
| | Tmoy | 4.7 | 5.6 | 7.7 | 10.1 | 13.4 | 16.8 | 19.0 | 18.7 | 16.5 | 12.6 | 7.8 | 5.3 | 15.7 | 11.5 |
| | Tmin | 1.8 | 2.2 | 3.5 | 5.4 | 8.6 | 11.5 | 13.4 | 13.1 | 11.2 | 8.2 | 4.3 | 2.5 | 10.5 | 7.1 |
| Saumur | Tmax | 7.5 | 9.2 | 12.2 | 15.4 | 19.1 | 22.1 | 25.6 | 24.9 | 22.3 | 17.3 | 11.3 | 8.0 | 21.6 | 16.3 |
| | Tmoy | 4.6 | 5.8 | 8.0 | 10.6 | 14.0 | 16.8 | 19.7 | 19.2 | 16.9 | 12.9 | 7.9 | 5.2 | 16.2 | 11.8 |
| | Tmin | 1.8 | 2.4 | 3.7 | 5.8 | 8.9 | 11.5 | 13.8 | 13.4 | 11.4 | 8.5 | 4.5 | 2.4 | 10.8 | 7.3 |
| Le Mans | Tmax | 7.0 | 8.5 | 11.5 | 14.6 | 18.3 | 21.9 | 24.4 | 23.9 | 21.4 | 16.6 | 10.7 | 7.7 | 20.8 | 15.6 |
| | Tmoy | 4.1 | 5.0 | 7.1 | 9.7 | 13.2 | 16.6 | 18.7 | 18.3 | 15.9 | 12.1 | 7.2 | 4.8 | 15.4 | 11.1 |
| | Tmin | 1.2 | 1.5 | 2.7 | 4.8 | 8.1 | 11.3 | 13.1 | 12.6 | 10.4 | 7.6 | 3.7 | 1.9 | 10.0 | 6.6 |
| Tours | Tmax | 6.6 | 8.1 | 11.2 | 14.4 | 18.1 | 21.7 | 24.7 | 24.3 | 21.6 | 16.6 | 10.4 | 7.1 | 20.8 | 15.4 |
| | Tmoy | 3.9 | 5.0 | 7.2 | 9.8 | 13.2 | 16.6 | 18.9 | 18.6 | 16.3 | 12.2 | 7.2 | 4.5 | 15.5 | 11.1 |
| | Tmin | 1.3 | 1.8 | 3.2 | 5.1 | 8.3 | 11.4 | 13.1 | 12.9 | 10.9 | 7.9 | 3.9 | 2.0 | 10.3 | 6.8 |
| Orléans | Tmax | 6.0 | 7.6 | 10.8 | 14.3 | 17.9 | 21.6 | 24.5 | 24.1 | 21.2 | 16.2 | 9.9 | 6.5 | 20.6 | 15.0 |
| | Tmoy | 3.2 | 4.2 | 6.6 | 9.3 | 12.8 | 16.2 | 18.5 | 18.2 | 15.8 | 11.7 | 6.6 | 3.8 | 15.1 | 10.6 |
| | Tmin | 0.3 | 0.8 | 2.4 | 4.3 | 7.8 | 10.7 | 12.6 | 12.3 | 10.3 | 7.3 | 3.3 | 1.1 | 9.7 | 6.1 |
| Romorantin | Tmax | 6.8 | 8.8 | 11.9 | 15.2 | 18.9 | 22.5 | 25.3 | 24.7 | 22.0 | 17.0 | 10.7 | 7.4 | 21.4 | 15.9 |
| | Tmoy | 3.5 | 4.7 | 6.8 | 9.5 | 13.1 | 16.2 | 18.4 | 17.9 | 15.4 | 11.5 | 6.6 | 4.1 | 15.1 | 10.6 |
| | Tmin | 0.2 | 0.6 | 1.7 | 3.8 | 7.2 | 10.0 | 11.6 | 11.1 | 8.8 | 6.1 | 2.6 | 0.8 | 8.8 | 5.4 |
| Chateauroux | Tmax | 6.3 | 8.2 | 11.1 | 14.4 | 18.2 | 21.7 | 25.0 | 24.2 | 21.6 | 16.7 | 10.3 | 6.9 | 20.9 | 15.4 |
| | Tmoy | 3.4 | 4.7 | 6.9 | 9.7 | 13.2 | 16.5 | 19.1 | 18.7 | 16.3 | 12.1 | 6.9 | 4.0 | 15.6 | 10.9 |
| | Tmin | 0.5 | 1.2 | 2.6 | 4.9 | 8.2 | 11.2 | 13.2 | 13.1 | 11.0 | 7.6 | 3.5 | 1.2 | 10.3 | 6.5 |
| Bourges | Tmax | 6.2 | 8.2 | 11.3 | 14.6 | 18.3 | 22.0 | 25.2 | 24.6 | 21.8 | 16.7 | 10.2 | 6.8 | 21.1 | 15.5 |
| | Tmoy | 3.3 | 4.7 | 7.0 | 9.8 | 13.3 | 16.7 | 19.2 | 18.8 | 16.3 | 12.1 | 6.8 | 4.0 | 15.7 | 11.0 |
| | Tmin | 0.5 | 1.2 | 2.7 | 5.0 | 8.3 | 11.3 | 13.3 | 13.0 | 10.8 | 7.6 | 3.5 | 1.1 | 10.3 | 6.5 |
| Poitiers | Tmax | 7.2 | 9.1 | 11.8 | 14.9 | 18.5 | 22.2 | 25.1 | 24.6 | 21.9 | 17.2 | 11.0 | 7.8 | 21.2 | 15.9 |
| | Tmoy | 4.2 | 5.4 | 7.3 | 9.8 | 13.3 | 16.6 | 19.1 | 18.6 | 16.3 | 12.4 | 7.3 | 4.7 | 15.6 | 11.3 |
| | Tmin | 1.1 | 1.7 | 2.7 | 4.8 | 8.1 | 11.1 | 13.1 | 12.7 | 10.7 | 7.6 | 3.6 | 1.6 | 10.1 | 6.6 |

Données : [Météo-France]

VIII.1.2. Le Saumurois : un climat plus doux.

Après l'étude des moyennes thermiques de la ville de Saumur, cette dernière apparaît avec un climat plus doux que les stations voisines et notamment que celle d'Angers pourtant située à proximité et à altitude comparable. Ceci s'explique en grande partie par la situation de la ville de Saumur au centre et fond du bassin de la Loire.

VIII.1.2.1. Une saison végétative très douce.

Saumur connaît la saison végétative la plus douce de tout le Val de Loire après Nantes avec plus de 16°C de température moyenne sur la période avril-septembre. Toutefois cette station se démarque plus particulièrement des autres stations en raison de son été chaud. Cette station enregistre la température maximale moyenne en juillet la plus élevée de tout le Val de Loire (25,6°C), 1°C de plus qu'à Angers à altitude comparable et située qu'à 45 km

au nord-ouest de la ville de Saumur. La différence entre les moyennes annuelles des deux mêmes stations n'est que de 0,3°C car l'hiver est légèrement plus frais à Saumur (continentalité) mais sur la saison végétative la différence est plus marquée (0,5°C) car le printemps est plus précoce à Saumur et l'été plus chaud.

VIII.1.2.2. Une douceur due à la situation particulière du bassin du Saumurois.

Ce climat apparemment plus clément que dans les autres stations s'explique par la situation géographique de la station au centre du bassin inférieur de la Loire. A l'échelle régionale, celle-ci est donc protégée à l'ouest et au sud-ouest par les plateaux et collines les plus élevés de l'espace étudié (les Mauges atteignent 216 m au Puy des Gardes). Saumur se trouve donc relativement abritée des circulations perturbées d'origine atlantique (Escourrou, 1982 ; Quénot *et al.*, 2008). Enfin, à une échelle topoclimatique, les plateaux peu-élevés au sud-ouest de la ville, surplombant la Loire sur sa rive gauche sont suffisamment élevés pour créer une sorte d'abri sur la ville de Saumur.

Ainsi, les nuances climatiques au sein du Val de Loire sont bien présentes et s'expliquent notamment par la distance des stations par rapport à l'océan ou à la Loire, à leur position latitudinale, à la nature des sols et à leur altitude. Le Saumurois en ressort particulièrement privilégié, avec des températures relativement élevées toute l'année par rapport aux autres stations, et avec la deuxième température moyenne annuelle la plus élevée après Nantes, marquant ainsi une rupture dans l'évolution générale vers la continentalité lorsqu'on se dirige vers l'est. Enfin, Romorantin se caractérise par une forte amplitude thermique annuelle et également par de fortes amplitudes thermiques journalières expliquées par sa situation en plaine sableuse. Ces contrastes climatiques régionaux montrent d'une part que les conditions bioclimatiques de la vigne et la qualité du raisin qui en résulte peuvent être différentes d'un vignoble à l'autre, d'autre part, que certaines stations sont plus exposées au gel tardif que d'autres (ex : Romorantin).

VIII.2. Evolution des températures depuis le milieu du XX^{ème} siècle.

L'évolution des températures depuis le milieu du XX^{ème} siècle a été étudiée et les résultats sont développés dans ce paragraphe. Une première analyse a été réalisée sur les moyennes annuelles et une autre s'est focalisée sur les moyennes de la saison végétative de la vigne.

VIII.2.1. Les principales variations thermiques depuis 1948

Depuis 1948, la température n'a cessé de fluctuer, au grès notamment des oscillations naturelles du climat. Cependant depuis la fin des années 1980, une tendance au réchauffement a été notée dans l'ensemble des stations du Grand-Ouest français au même

titre que dans les autres grandes régions viticoles françaises (Seguin, 2007 ; Madelin *et al.*, 2008 ; Briche, 2011). L'origine climatique de la rupture a notamment été associée à des changements dans l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) avec un indice positif récurrent depuis les années 1987-1988 (Cassou, 2004).

VIII.2.1.1. Vers une augmentation des températures dès la fin des années 80...

L'observation des températures moyennes annuelles depuis le milieu du XX^{ème} siècle indique une nette tendance au réchauffement depuis la fin des années 80 pour l'ensemble des stations du Centre-Ouest (Figure VIII.1a). Cette tendance semble cependant moins évidente en fin de période avec une baisse de la température à la fin des années 2000. Cette baisse est due à une série d'hivers plus rigoureux notamment ceux de 2005-2006, 2008-2009 et 2009-2010. Cette baisse est d'ailleurs moins visible sur le graphique d'évolution des températures moyennes de la saison végétative (Figure VIII.1b) qui se réfère à la moyenne calculée sur la période avril-septembre.

VIII.2.1.2. ... mais des variations thermiques déjà marquées de 1948 à 1980

Si la tendance est au réchauffement depuis la fin des années 1980, des variations thermiques ont été constatées de 1948 à la fin des années 1980. Sur la Figure VIII.1, nous pouvons observer un premier maximum de température dans l'après-guerre qui connaîtra un pic autour de 1958. Cet optimum climatique a rapidement été suivi par un rafraîchissement dans les années 1970. Ces variations plus modestes et à plus courte période sont déjà bien connues et décrites dans la littérature (Pédelaborde, 1957 ; Pagney, 1988).

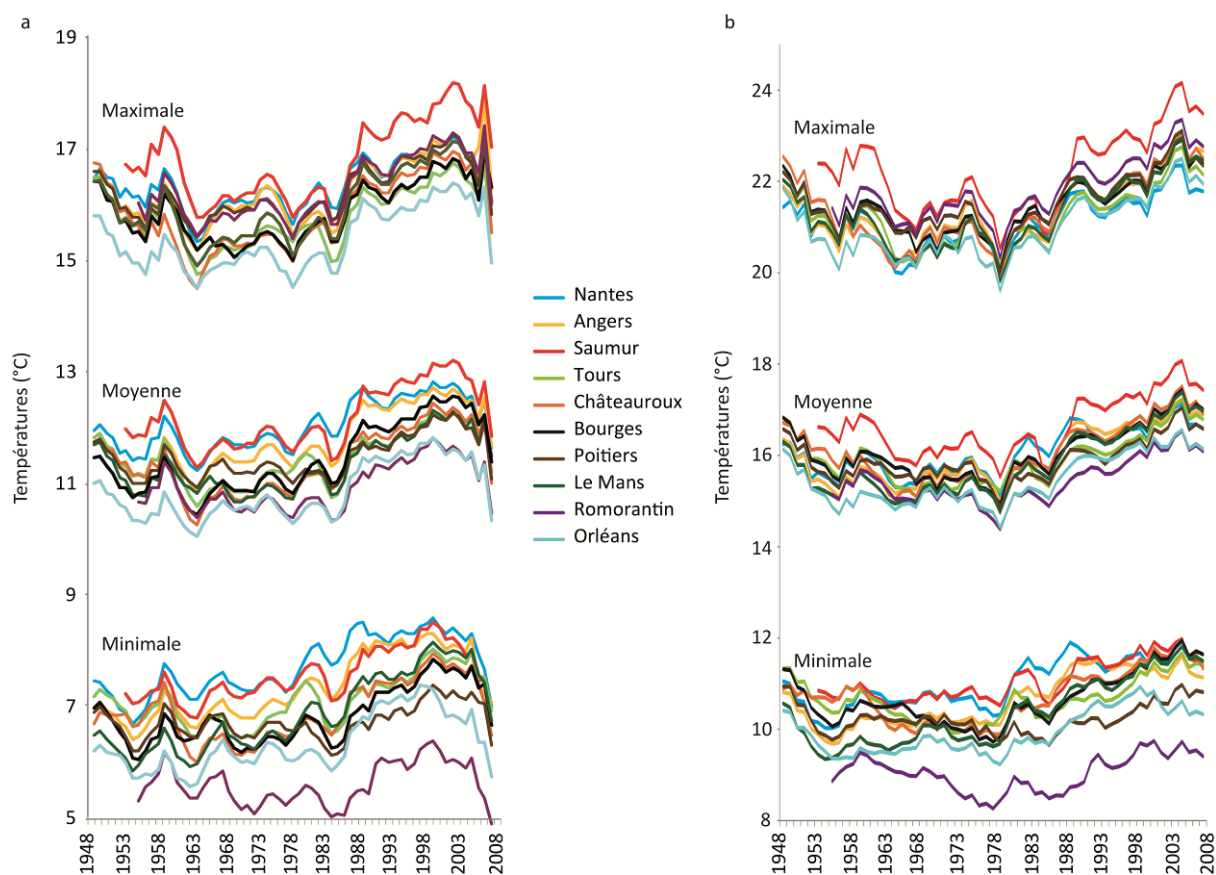


Figure VIII.1. Evolution des températures moyennes annuelles (a) et sur la saison végétative d'avril à septembre (b) (selon une moyenne mobile calculée sur une fenêtre de 5 ans) dans le Val de Loire de 1948 à 2010

Données : [Météo-France]

VIII.2.2. Une rupture climatique dans la fin des années 1980 : analyse des tendances de températures

La température a augmenté depuis le milieu du XX^{ème} siècle et particulièrement depuis la fin des années 1980 (Figure VIII.1). De plus, le test statistique de Pettitt révèle certaines ruptures ($Pr > 0,01^{***}$) dans les séries de températures. L'année 1987 a ainsi été déterminée comme une année de rupture pour les séries de températures maximales de toutes les stations. L'augmentation de température entre les périodes de pré- et post-rupture est comprise de 0,8°C à Nantes à 1,3°C à Saumur (Tableau VIII.2). En revanche, pour les séries de températures minimales, l'année de rupture est plus variable suivant les lieux, allant de 1980 à Nantes ou Angers à 1993 à Poitiers. L'augmentation de la température minimale est comprise entre 0,6°C à Poitiers et 1,2°C au Mans. Toutes ces tendances sont significatives au seuil de 0,01% en accord avec le test de Mann Whitney.

Tableau VIII.2. Les ruptures climatiques dans les séries de données annuelles (statistiquement significatives au seuil de 99%) dans le Centre-Ouest français (selon le test statistique de Pettitt) et les tendances associées (Tm post-rupture – Tm pré-rupture). En rouge les hausses les plus fortes et en bleu les plus faibles.

| Stations | Rupture Tm | Tendance Tm | Rupture Tn | Tendance Tn | Rupture Tx | Tendance Tx |
|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
| Nantes | 1980 | +0,8 | 1980 | +0,9 | 1987 | +0,8 |
| Angers | 1987 | +1,0 | 1980 | +1,0 | 1987 | +1,0 |
| Saumur | 1987 | +1,0 | 1987 | +0,7 | 1987 | +1,3 |
| Tours | 1987 | +0,9 | 1987 | +0,8 | 1987 | +1,0 |
| Châteauroux | 1987 | +1,2 | 1986 | +1,1 | 1987 | +1,2 |
| Bourges | 1987 | +1,0 | 1987 | +0,9 | 1987 | +1,0 |
| Poitiers | 1987 | +0,7 | 1993 | +0,6 | 1987 | +0,9 |
| Le Mans | 1987 | +1,2 | 1980 | +1,2 | 1987 | +1,2 |
| Romorantin | 1987 | +0,8 | 1991 | +0,7 | 1987 | +1,0 |
| Orléans | 1987 | +0,9 | 1987 | +0,8 | 1987 | +1,0 |

Données : [Météo-France]

Toutes les stations régionales utilisées sont localisées dans les villes principales de cette région. Si leur climat ne coïncide pas exactement avec celui où les vignobles sont cultivés, elles permettent d’appréhender l’évolution générale du climat dans cette région viticole. De plus toutes les stations répondent aux normes internationales de l’Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et en conséquence sont protégées d’un éventuel effet d’îlot de chaleur urbain. Néanmoins, les différences de températures ont été vérifiées pour la saison 2010 entre les deux stations synoptiques d’Angers et Saumur et respectivement les stations du réseau TERVICLIM/INRA d’Epiré et Souzay, qui sont en fait leurs homologues rurales, situées à quelques kilomètres de ces stations Météo-France. Si nous regardons les résultats du test de Mann Whitney, il n’y a aucune différence significative entre les stations urbaines et rurales concernant les températures minimales. Si nous nous intéressons aux températures maximales, il n’y a aucune différence significative entre Saumur et Souzay mais les différences sont significatives entre Angers et Epiré. Ce dernier résultat peut s’expliquer par la position sur un coteau exposé au sud-est en bordure de Loire pour la station d’Epiré, ce qui fait que les températures maximales enregistrées peuvent y être légèrement plus élevées qu’à Angers même.

VIII.2.3. L’évolution des températures sur la saison végétative

Les séries de températures ont également été étudiées sur la saison végétative de la vigne (Tableau VIII.3). Les températures minimales ont ainsi augmenté sur l’ensemble de la période (1948-2010 : 58 années) de 0,6°C à Poitiers et Romorantin (tendances non-significatives) à 1,7°C à Nantes, Angers et Bourges. Les températures maximales ont augmenté de 1,7°C pour la plupart des stations, la tendance étant non-significative pour Saumur, mais de 2,3°C pour Châteauroux et Le Mans. Enfin les températures moyennes ont

augmenté de 1,2°C à Tours, Poitiers et Romorantin à 2,3°C pour Le Mans, les tendances étant toutes significatives.

Tableau VIII.3. Tendances de l'évolution des températures moyennes calculées sur la saison végétative de la vigne (avril-septembre).

| | Tn | | | | Tx | | | | Tm | | | | | |
|-------------|------------------|---------------------------|----------------|----------|------------------|---------------------------|----------------|------|------------------|---------------------------|----------------|------|------|--------|
| | Tendance (°C/an) | Tendance (°C) (1953-2010) | R ² | p | Tendance (°C/an) | Tendance (°C) (1953-2010) | R ² | p | Tendance (°C/an) | Tendance (°C) (1953-2010) | R ² | p | | |
| Nantes | +0,03 | +1,7 | 0,34 | <0,01 | Nantes | +0,03 | +1,7 | 0,14 | NS | Nantes | +0,03 | +1,7 | 0,24 | <0,05 |
| Angers | +0,03 | +1,7 | 0,46 | <0,001 | Angers | +0,03 | +1,7 | 0,28 | <0,02 | Angers | +0,03 | +1,7 | 0,41 | <0,001 |
| Saumur | +0,02 | +1,2 | 0,24 | <0,05 | Saumur | +0,03 | +1,7 | 0,14 | NS | Saumur | +0,03 | +1,7 | 0,19 | <0,1 |
| Tours | +0,02 | +1,2 | 0,20 | <0,1 | Tours | +0,03 | +1,7 | 0,17 | <0,2 | Tours | +0,02 | +1,2 | 0,21 | <0,1 |
| Châteauroux | +0,02 | +1,2 | 0,25 | <0,05 | Châteauroux | +0,04 | +2,3 | 0,28 | <0,02 | Châteauroux | +0,03 | +1,7 | 0,30 | <0,02 |
| Bourges | +0,03 | +1,7 | 0,35 | <0,01 | Bourges | +0,03 | +1,7 | 0,18 | <0,2 | Bourges | +0,03 | +1,7 | 0,27 | <0,05 |
| Poitiers | +0,01 | +0,6 | 0,11 | NS | Poitiers | +0,03 | +1,7 | 0,20 | <0,1 | Poitiers | +0,02 | +1,2 | 0,19 | <0,1 |
| Le Mans | +0,04 | +2,3 | 0,62 | <0,00001 | Le Mans | +0,04 | +2,3 | 0,25 | <0,05 | Le Mans | +0,04 | +2,3 | 0,45 | <0,001 |
| Romorantin | +0,01 | +0,6 | 0,04 | NS | Romorantin | +0,03 | +1,7 | 0,19 | <0,1 | Romorantin | +0,02 | +1,2 | 0,16 | <0,2 |
| Orléans | +0,02 | +1,2 | 0,33 | <0,01 | Orléans | +0,03 | +1,7 | 0,24 | <0,05 | Orléans | +0,03 | +1,7 | 0,31 | <0,01 |

Données : [Météo-France]

Le réchauffement climatique se manifeste de manière généralisée dans tout le Val de Loire et, à une plus large échelle, sur l'ensemble du centre-ouest de la France, avec une rupture climatique des températures moyennes annuelles autour de la fin des années 1980. La tendance au réchauffement de la saison végétative a également été démontrée et dans tous les cas, cette hausse de température a et va avoir un impact sur les indices bioclimatiques de la vigne et donc, sur la phénologie des vignobles de Val de Loire.

VIII.3. L'impact du réchauffement climatique sur les indices bioclimatiques

L'augmentation des températures généralisée à la région du Val de Loire a provoqué une hausse des indices bioclimatiques. Cette évolution pour les indices de Winkler, Huglin et l'indice de fraîcheur des nuits a ainsi été analysée.

VIII.3.1. Les degrés jours de Winkler

Concernant l'indice de Winkler, le test statistique de Pettitt détecte des ruptures ($Pr > 0,01^{***}$) dans les séries de données : notamment en 1986 à Angers et Saumur mais en 1981 à Nantes et Tours. Le test t de Student a montré une augmentation significative de l'indice de Winkler entre les périodes pré- et post-ruptures (Figure VIII.2) : +167 DJ à Tours à +239 DJ à Saumur. Ainsi, Saumur est désormais classé dans le climat viticole n°2 (1371-1649 DJ) en référence à la classification de Winkler. Cela correspond initialement à des climats comme celui de Napa (USA), Budapest (Hongrie) ou Santiago (Chili) (Vaudour, 2003). Les autres stations sont classées dans la première catégorie (<1371 DJ) où on peut trouver Dijon (France), Bordeaux (France) ou Coonawara (Australie) et qui correspond aux climats viticoles les plus frais.

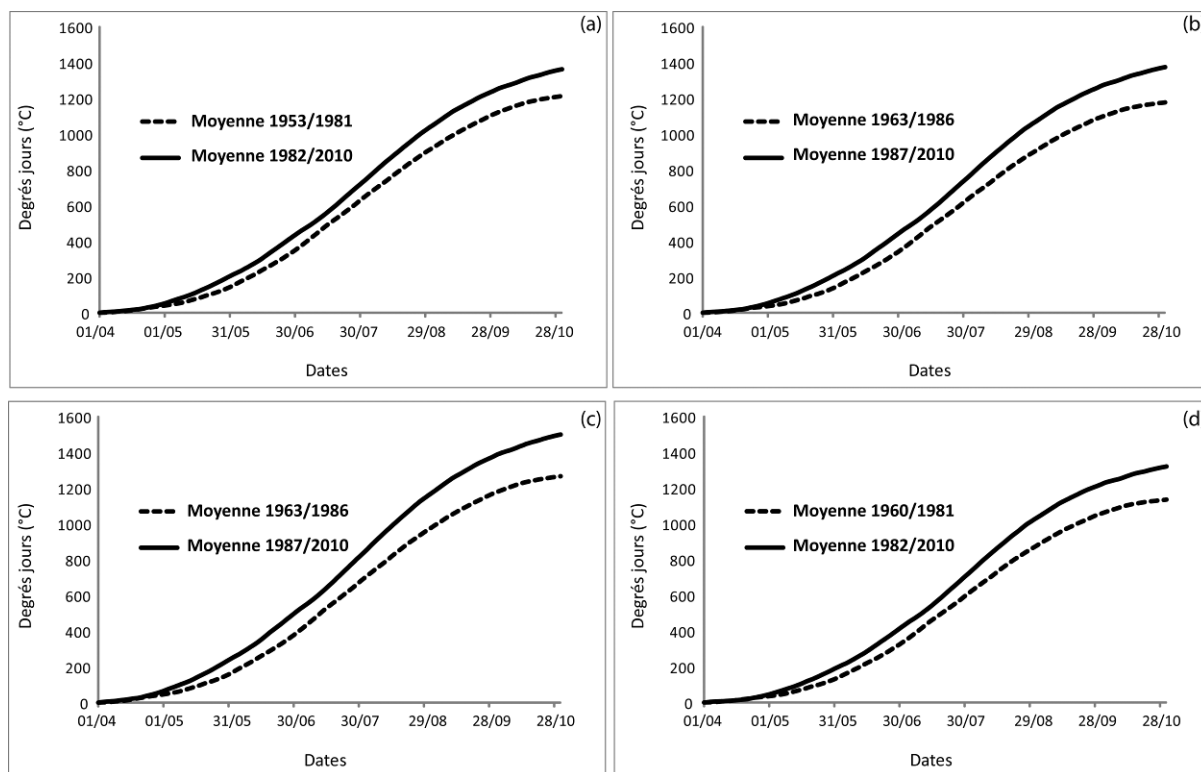


Figure VIII.2. Evolution moyenne des degrés jours, au cours de la saison végétative (1^{er} avril-31 octobre), dans le Val de Loire avant et après la rupture d'homogénéité des séries climatiques observée à Nantes (a), Angers (b), Saumur (c) et Tours (d).

Données : [Météo-France]

Cette hausse de l'indice des degrés jours de Winkler a des conséquences sur la phénologie de la vigne. L'apport de chaleur pour chaque phénophase étant atteint plus tôt dans la saison, les viticulteurs observent déjà une plus grande précocité de ces stades, parfois de 15 jours à 3 semaines, comme cela a pu être montré en Bourgogne ou dans le Bordelais (Jones *et al.*, 2005 ; Madelin *et al.*, 2008). De plus, la croissance de la vigne et, en particulier, la maturation, se déroule désormais sous des conditions plus chaudes, notamment au mois d'août. Le test de Pettitt nous indique pour les températures maximales du mois d'août une rupture climatique en 1986 à Saumur ($Pr > 0,01^{***}$) et Nantes ($Pr > 0,05^{**}$) et en 1988 à Angers ($Pr > 0,01^{***}$) et Tours ($Pr > 0,05^{**}$). Les températures moyennes entre la période pré- et post-rupture ont augmenté d'environ 2°C selon les stations, passant de 24,6°C à 26,8°C à Saumur, de 23,7°C à 25,3°C à Nantes, de 24,2°C à 26°C à Angers et de 24,3°C à 26°C à Tours. Ces changements bioclimatiques ont des impacts sur les caractéristiques du raisin récolté, notamment la quantité de sucre et l'acidité et donc, sur la typicité des vins produits.

VIII.3.2. L'indice de Huglin

L'évolution de l'indice d'Huglin est étudiée ici sur la plus longue période possible et pour les mêmes stations que pour le précédent indice des degrés jours. La Figure VIII.3 montre que l'indice de Huglin a également augmenté depuis le milieu du XX^{ème} siècle et laisse donc supposer que les caractéristiques des climats viticoles du Val de Loire ont changé. durant la

même période (Figure VIII.3). Le test statistique de Pettitt confirme une rupture ($Pr > 0,01^{***}$) en 1981 à Nantes, 1986 à Saumur et 1988 à Angers et Tours.

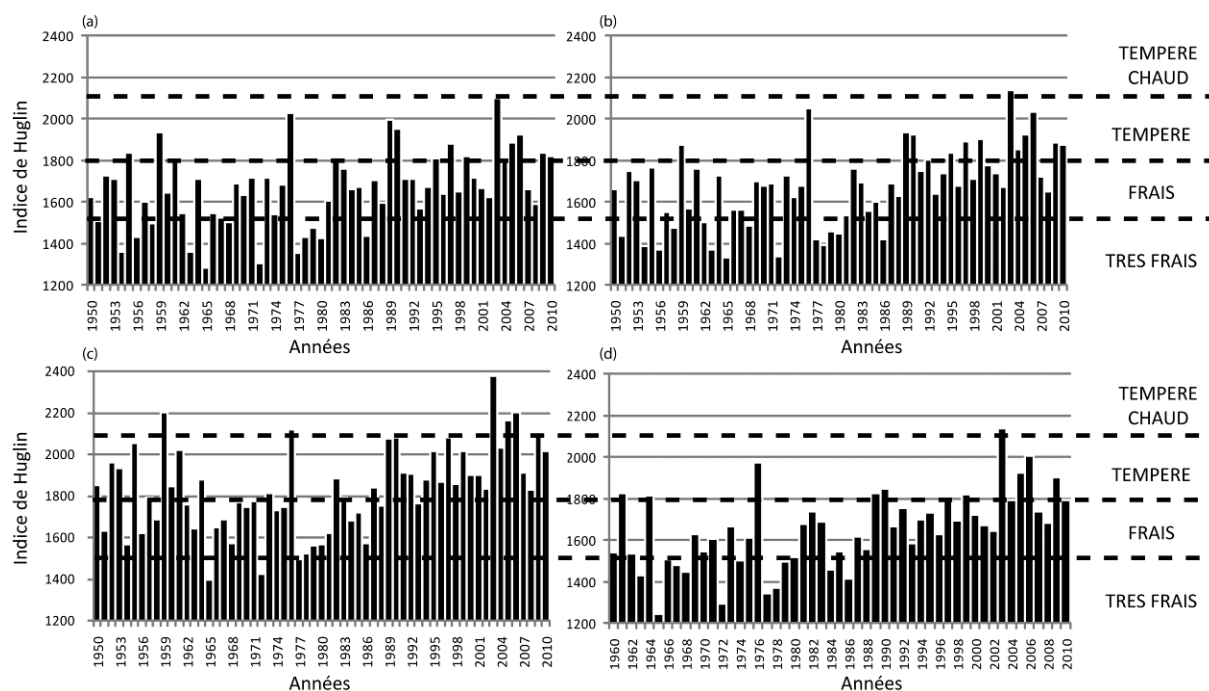


Figure VIII.3. Evolution temporelle de l'indice héliothermique de Huglin dans le Val de Loire pour quatre stations météorologiques (a : Nantes, b : Angers, c : Saumur et d : Tours) sur la période 1950-60/2010.

Données : [Météo-France]

Ces stations étaient à l'origine classées parmi les régions aux climats viticoles frais avant leur rupture mais elles tendent maintenant à être classées dans le climat viticole tempéré, comme cela a été observé auparavant à Toulouse ou Bordeaux (France). Le climat de Saumur était tempéré avant la rupture et peut maintenant être considéré comme tempéré chaud comme cela était le cas à Montpellier (France), Santiago (Chili) et Madrid (Espagne), il y a une trentaine d'années (Vaudour, 2003). Enfin, si nous observons le profil de l'indice pour toutes les stations, Saumur semble plus sensible aux périodes chaudes. En effet, la variabilité temporelle semble plus marquée en amplitude que dans les autres stations, d'où sans doute la réaction plus prononcée de Saumur au réchauffement climatique contemporain. Cette hypothèse reste cependant à confirmer. L'augmentation de ces indices peut avoir des implications pour la composition des grappes de raisin et la phénologie de la vigne, les deux étant très liés. Chaque cépage nécessite un certain apport de chaleur pour débourrer, fleurir ou mûrir (Val Leuwen *et al.*, 2008). Avec le changement climatique, ces apports pourraient être atteints plus tôt dans la saison, ce qui signifierait des stades phénologiques plus précoces. En prenant en compte les projections climatiques (GIEC, 2007), certains cépages devront être substitués à d'autres plus adaptés aux nouvelles caractéristiques climatiques (variétés plus tardives).

VIII.3.3. L'indice de fraîcheur des nuits

En ce qui concerne l'indice de fraîcheur des nuits la Figure VIII.4. montre l'importance de chaque classe de l'indice en pourcentage pour les périodes de référence de 30 ans : 1961-1990, 1971-2000 et 1981-2010. En prenant l'indice basé sur la température minimale moyenne calculée sur la période 1961-2010, les conditions nocturnes les plus douces étaient observées à Nantes (13°C) et les plus fraîches à Tours (12,4°C), bien que les deux valeurs tombent dans la même catégorie de nuits.

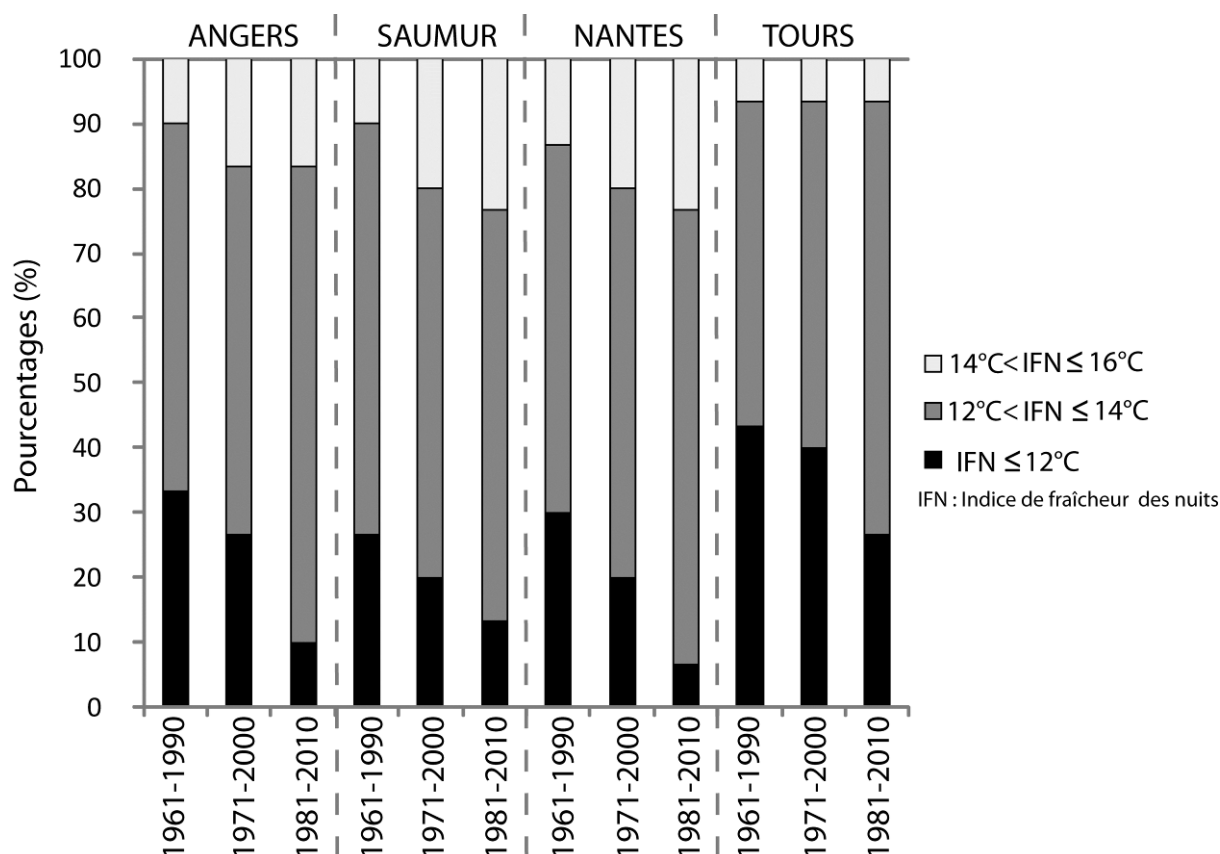


Figure VIII.4. Evolution de l'indice de fraîcheur des nuits pour quatre stations météorologiques dans le Val de Loire sur trois périodes de calcul des normales climatologiques.

Données : [Météo-France]

Le pourcentage avec des conditions nocturnes froides a diminué depuis la période 1961-1990. La diminution la plus marquée a été observée à Nantes (1961-1990 : 30%, 1971-2000 : 20%, 1981-2010 : 6,7%). Dans le même temps, le pourcentage de nuits avec des conditions climatiques très fraîches a augmenté partout, sauf à Saumur où les températures minimales semblent avoir progressé plus rapidement encore. En conséquence, la catégorie de nuits fraîches (1961-1990 : 10%, 1971-2000 : 20%, 1981-2010 : 33,3%) à Saumur a plus augmenté que celui des nuits très fraîches. Ces nuits fraîches deviennent plus fréquentes dans les autres stations, sauf à Tours (influences continentales) où le pourcentage reste stable. En général, de moins en moins de nuits froides sont observées durant la période de maturation. Les indices de fraîcheur des nuits restent dans les catégories les plus froides ou fraîches dans

la Vallée de la Loire mais si les températures continuent à augmenter, les conditions climatiques nocturnes durant la période de maturation des grappes seront plus chaudes, ce qui pourrait modifier la synthèse des anthocyanes et des acides abscessiques. Des conditions plus fraîches la nuit et de plus grandes amplitudes thermiques entre la nuit et le jour sont bénéfiques à cette synthèse. Ainsi, si ces conditions changeaient, les caractéristiques des vins de Loire changeraient aussi. Cependant, puisque tous les indices bioclimatiques impliquent des seuils, tous ces résultats doivent être pris avec précaution.

CONCLUSION DU CHAPITRE VIII

A l'échelle régionale, les nuances climatiques entre des stations peuvent être marquées. En effet, nous avons vu qu'à l'échelle du Centre-Ouest français et, en particulier, du Val de Loire, ces nuances existent et sont dues en partie à la distance des stations à l'océan, à la topographie et à leur position latitudinale. Ainsi, Saumur, par sa position d'abri, ressort comme la station la plus chaude de toutes les stations alors que Romorantin, de par sa position dans une « vallée » au sol sableux, connaît des amplitudes thermiques relativement élevées. Ces contrastes des conditions climatiques viticoles expliquent, en partie, la diversité des vins produits dans cette région. Le réchauffement climatique contemporain vient modifier ces caractéristiques climatiques. Le changement de tendance dans les séries de températures apparaît notamment à la fin des années 80. Cette hausse des températures se répercute sur les indices bioclimatiques viticoles. Ainsi, les degrés jours ont augmenté de plus de 230 DJ à Saumur entre les périodes moyennes observées avant et après la rupture climatique. L'indice de Huglin place désormais les vignobles du Val de Loire dans des climats plus doux (tempéré à tempéré chaud). Ces changements de caractéristiques des climats viticoles peuvent expliquer une plus grande précocité saisonnière du développement de certains stades phénologiques de la vigne dans le Val de Loire (Neethling, 2012).

Chapitre IX : VARIABILITÉ SPATIALE DES TEMPÉRATURES DANS LE VIGNOBLE D'ANJOU ET DU SAUMUROIS

Ce travail de thèse se concentre plus particulièrement sur la région Angevine et le Saumurois situés en moyenne vallée de la Loire. Les températures ont été analysées au sein de ces terroirs viticoles à l'aide du réseau de stations (TERVICLIM/INRA) implanté depuis 2008 qui a permis une analyse de la variabilité temporelle des températures et des indices bioclimatiques au cours d'une saison végétative mais surtout spatiale avec une caractérisation des différents topoclimats viticoles rencontrés dans la région. Une autre partie de ce travail a consisté à évaluer les conditions thermiques dans un site viticole des Coteaux du Layon où sont produits des vins liquoreux à la suite du développement d'un champignon spécifique : le *Botrytis Cinerea*. Deux épisodes de températures dits « extrêmes » pour la vigne ont pu être étudiés sur la période 2009-2011.

IX.1. Analyse des températures en Anjou et Saumurois

Les données de températures des stations du réseau TERVICLIM/Inra en Anjou et Saumurois ont été étudiées pour la saison végétative de 2010, cette saison ayant le moins de perte de données au niveau des séries de températures et afin de calculer les indices bioclimatiques correspondants pour cette saison.

IX.1.1. Analyse des moyennes mensuelles de la saison végétative

L'analyse des valeurs mensuelles des séries de températures issues des 9 stations n'ayant connu aucune perte de données, permet de mettre en évidence des nuances thermiques entre les différents sites. Le Tableau IX.1 présente ces moyennes et permet de distinguer différents groupes de stations. Les températures minimales restent relativement fraîches durant la saison végétative, ne dépassant les 10°C que durant l'été climatologique (juin-août). Si on regarde la moyenne saisonnière des températures minimales, les valeurs les plus douces sont enregistrées en Saumurois (Souzay, Saint-Cyr-en-Bourg) et à proximité de la Loire (Brissac, Haute-Perche, La Marre-Lalande) avec des températures supérieures à 10,5°C. Les stations de plateaux comme Beaulieu, Cléré et Faye-d'Anjou sont légèrement plus fraîches avec des valeurs entre 10,2°C et 10,5°C. Enfin la station la plus froide du réseau est Chaume qui est située en bas de coteau à proximité de la rivière du Layon, secteur habitué aux inversions thermiques à répétition durant les phases de temps calme et clair, favorisant le refroidissement radiatif. La température moyenne saisonnière des températures minimales pour Chaume est ainsi inférieure de 1,6°C à celle des stations les plus douces. Il est également intéressant de noter qu'au début de la saison, au mois d'Avril, la station de

Chaume connaît des températures minimales nettement inférieures aux autres stations avec des risques de gelées accrues pour les bourgeons de la vigne.

Tableau IX.1. Températures minimales (a) et maximales (b) moyennes mensuelles pour 9 stations météorologiques du réseau TERVICLIM/INRA durant la saison végétative 2010 (avril-octobre).

| a | AVRIL | MAI | JUIN | JUILLET | AOÛT | SEPTEMBRE | SAISON |
|------------------|-------|-----|------|---------|------|-----------|--------|
| Beaulieu | 5.2 | 7.7 | 12.3 | 14.0 | 12.6 | 9.4 | 10.2 |
| Brissac | 5.8 | 8.3 | 12.6 | 14.4 | 13.1 | 9.6 | 10.6 |
| Chaume | 4.3 | 7.3 | 11.8 | 13.2 | 11.8 | 8.1 | 9.4 |
| St Cyr-en-Bourg | 5.9 | 8.7 | 12.8 | 14.3 | 13.0 | 9.2 | 10.6 |
| Souzay | 6.0 | 8.7 | 13.2 | 14.8 | 13.4 | 9.9 | 11.0 |
| Cléré | 5.3 | 8.0 | 12.2 | 13.9 | 12.9 | 9.5 | 10.3 |
| Faye d'Anjou | 5.5 | 8.1 | 12.4 | 14.1 | 12.9 | 9.7 | 10.5 |
| Haute-Perche | 6.6 | 8.5 | 12.9 | 14.8 | 13.5 | 10.0 | 11.0 |
| La Marre Lalande | 6.0 | 8.6 | 12.6 | 14.5 | 13.3 | 9.7 | 10.8 |

0 à 4,9°C 5 à 9,9°C 10 à 14,9°C

| b | AVRIL | MAI | JUIN | JUILLET | AOÛT | SEPTEMBRE | SAISON |
|------------------|-------|------|------|---------|------|-----------|--------|
| Beaulieu | 17.5 | 18.2 | 23.9 | 27.4 | 24.8 | 22.1 | 22.3 |
| Brissac | 17.3 | 18.2 | 23.6 | 27.2 | 24.2 | 21.9 | 22.1 |
| Chaume | 19.0 | 19.6 | 25.2 | 28.7 | 26.1 | 23.5 | 23.7 |
| St Cyr-en-Bourg | 18.9 | 19.7 | 25.1 | 28.8 | 26.5 | 23.5 | 23.7 |
| Souzay | 18.7 | 19.6 | 24.7 | 28.2 | 25.7 | 23.3 | 23.4 |
| Cléré | 17.3 | 18.3 | 23.7 | 27.4 | 25.5 | 22.6 | 22.5 |
| Faye d'Anjou | 17.2 | 17.8 | 23.5 | 27.0 | 24.2 | 21.7 | 21.9 |
| Haute-Perche | 18.2 | 18.4 | 23.9 | 27.7 | 24.7 | 22.2 | 22.5 |
| La Marre Lalande | 17.6 | 18.6 | 24.1 | 27.7 | 24.7 | 22.3 | 22.5 |

15 à 19,9°C 20 à 24,9°C 25 à 29,9°C

Données : [TERVICLIM/INRA]

Les températures maximales sont également contrastées entre les différentes stations suivant leur altitude, leur situation sur les coteaux et leur position par rapport à la Loire. La température moyenne maximale ne dépasse pas les 20°C avant le mois de Juin pour toutes les stations. Sur l'ensemble de la saison, les stations les plus chaudes sont une nouvelle fois dans le Saumurois avec Souzay (23,4°C) et Saint-Cyr-en-Bourg (23,7°C) mais également dans le fond de la vallée du Layon à Chaume (23,7°C). En effet, à l'inverse du phénomène d'inversion pour les températures minimales, sa position en bas de coteaux et ainsi relativement abritée sur un versant sud, favorise l'échauffement du site lors des après-midi. Les stations de plateaux et situées à proximité de la Loire connaissent des moyennes thermiques inférieures du fait de la ventilation plus importante des hauts de coteaux et de leur altitude, ainsi que des brises plus fraîches provoquées par la Loire. La saison chaude avec des températures maximales supérieures à 25°C est plus ou moins longue selon les stations. Elle dure 2 mois pour la plupart des sites viticoles mais 3 mois à Saint-Cyr-en-Bourg et Chaume avec des températures maximales moyennes entre 25,1°C et 28,8°C. Souzay n'a que deux mois avec une température maximale moyenne supérieure à 25°C mais celle du

mois de juin est toute proche du seuil avec 24,7°C. Le mois de juillet, comme dans la plupart des régions des mêmes latitudes est le mois le plus chaud. Les stations enregistrant les températures maximales les moins élevées sont Faye-d'Anjou, Cléré et Beaulieu pour les mêmes raisons évoquées précédemment.

Par conséquent, les amplitudes thermiques les plus élevées sont relevées à Chaume avec une amplitude thermique moyenne saisonnière de 14,3°C. Dès le mois d'avril, cette même station enregistre l'amplitude la plus forte avec 14,7°C. Les matinées y sont souvent fraîches avec parfois des gelées, mais les après-midi relativement doux du fait de la faible altitude et de la situation en bas de coteau. En plein été, si les journées sont chaudes à Chaume, les matinées restent assez fraîches et donc les amplitudes jour-nuit restent marquées. Quant aux plateaux et aux sites proches de la Loire, les amplitudes y sont plus faibles, toutes inférieures à 12°C, hormis dans le Saumurois qui connaît des nuits plus fraîches et des journées plus chaudes du fait de sa situation particulière discutée dans le chapitre précédent.

IX.1.2. Classifications et caractérisation des stations météorologiques

Des différences de températures modérées sont donc observées entre les neuf stations installées dans les vignobles d'Anjou et du Saumurois. Ces différences mettent en évidence leur situation géographique. Deux classification ascendante hiérarchique (CAH) réalisées sur les données de la saison végétative 2010, montre que 53% de la variance totale de la température minimale et que 77% de la variance totale de la température maximale sont expliquées respectivement par une partition en 4 et une en 3 classes (Figure IX.1 et IX.2). Concernant la température minimale, les stations météorologiques de Faye d'Anjou, Beaulieu et Cléré situées sur des plateaux plus ou moins élevés (altitude >70 m et pente <3%) sont regroupés dans la première classe (Figure IX.2a). Cette classe est caractérisée (Tableau IX.2) par une variabilité temporelle de la température minimale relativement modérée et d'une température minimale moyenne pour la saison de 10,5°C. La seconde classe est composée de toutes les stations situées au sud d'Angers, proches de la Loire et donc largement influencées par le fleuve (Haute-Perche, La Marre Lalande, Brissac). Cette classe est aussi caractérisée par une faible variabilité temporelle de la température et de l'une des températures minimales moyennes saisonnières les plus élevées (11°C), toutes ces stations bénéficiant des brises plutôt douces venant de la Loire. Chaume se présente comme la seule station de la troisième classe, la seule d'ailleurs à être située au fond d'une vallée avec les températures minimales les plus fraîches du secteur. Les stations de Saint-Cyr-en-Bourg et Souzay sont dans la quatrième classe puisqu'elles sont situées dans la région de Saumur, qui est connu comme un endroit particulièrement chaud dans la moyenne vallée de la Loire.

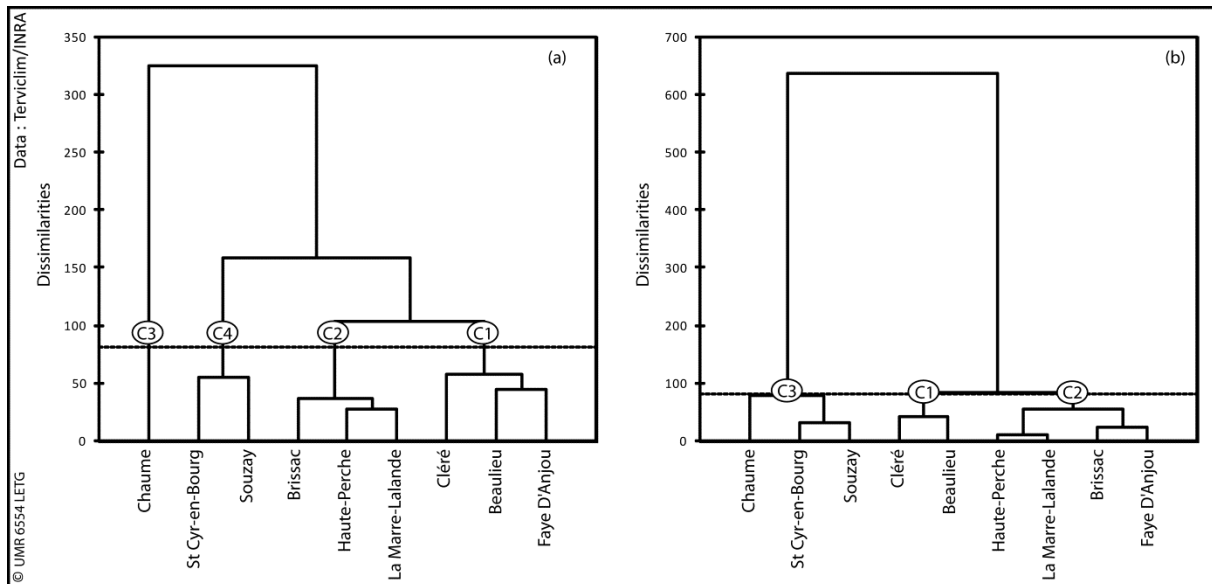


Figure IX.1. Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique appliquée sur les séries de données de températures de la saison végétative 2010 (a : températures minimales, b : températures maximales) du réseau TERVICLIM/INRA en Anjou et Saumurois.

Données : [TERVICLIM/INRA]

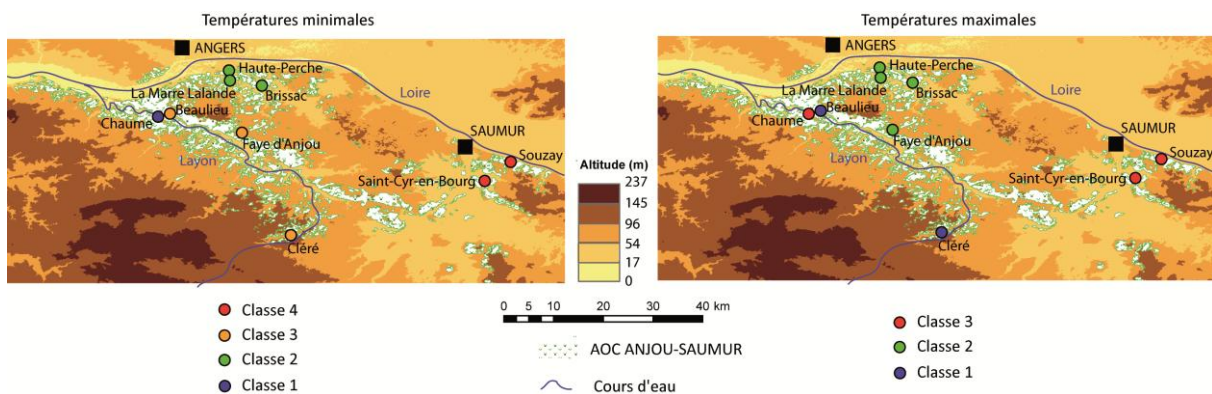


Figure IX.2. Localisation des stations météorologiques utilisées pour la classification ascendante hiérarchique et indication de leur appartenance aux différentes classes.

Données : [TERVICLIM/Inra]

En ce qui concerne les températures maximales, Cléré et Beaulieu sont dans la 1^{ère} classe mais la station de Faye d'Anjou est dans la seconde classe avec Haute Perche, la Marre Lalande et Brissac. Le Tableau IX.2 révèle le fait que ces deux premières classes sont très proches avec des températures modérément chaudes dues à une altitude plus élevée pour certaines stations de plateau et à la proximité de la Loire pour d'autres. La troisième classe est composée des endroits les plus chauds : Chaume, en rapport avec sa position en fond de vallée, Saint-Cyr-en-Bourg et Souzay, correspondant à la région la plus chaude de Saumur. Cette analyse permet de distinguer des différences de comportement des températures en fonction de l'environnement de la station et implique de possibles différences pour la croissance de la vigne durant la saison végétative.

Tableau IX.2. Caractéristiques des différentes classes issues des classifications ascendantes hiérarchiques réalisées pour les séries de températures de la saison végétative 2010 pour le réseau de stations de l'Anjou et du Saumurois.

| | Températures minimales (°C) | | | | Températures maximales (°C) | | | |
|------------|-----------------------------|----------|----------|----------|-----------------------------|----------|----------|------|
| | Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 | Classe 4 | Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 | |
| Minimum | 0,5 | 1,3 | -1,2 | 1,1 | Minimum | 10,9 | 10,5 | 11,6 |
| Quartile 1 | 7,0 | 7,8 | 6,3 | 7,7 | Quartile 1 | 18,9 | 18,9 | 20,0 |
| Médiane | 11,2 | 11,6 | 10,2 | 11,7 | Médiane | 22,8 | 22,7 | 23,9 |
| Quartile 3 | 13,7 | 14,1 | 13,0 | 14,1 | Quartile 3 | 26,3 | 26,2 | 27,4 |
| Maximum | 19,7 | 20,0 | 19,9 | 19,9 | Maximum | 35,0 | 34,9 | 36,1 |
| Moyenne | 10,5 | 11,0 | 9,7 | 11,1 | Moyenne | 22,5 | 22,3 | 23,7 |
| Variance | 17,3 | 16,8 | 20,1 | 16,9 | Variance | 30,4 | 30,4 | 29,8 |

Données : [TERVICLIM/INRA]

IX.2. Analyse des indices bioclimatiques en Anjou et Saumurois

Cette variabilité spatiale des températures a une influence sur celle des indices bioclimatiques. Ces indices ont été calculés dans le chapitre précédent pour les stations d'Angers et de Saumur mais ne permettaient pas de se rendre compte de la variabilité des différents topoclimats présents en Anjou et Saumurois. Les stations du réseau TERVICLIM révèlent ainsi que les stations se classent dans différentes catégories climatiques viticoles en accord avec la classification des différents indices (Figure IX.3 et Tableau IX.3).

IX.2.1. Les degrés jours

Le calcul des degrés jours pour les stations Météo-France d'Angers et de Saumur ont montré que la première pouvait être classée en région 1 qui correspond aux climats viticoles les plus frais et la seconde en région 2. Les stations du réseau TERVICLIM/INRA confirment cette différence pour la saison 2010 entre les stations situées en Saumurois (Souzay et Saint-Cyr-en-Bourg) et les autres stations d'Anjou. En effet, les deux stations du Saumurois sont les deux seules stations à dépasser les 1400 DJ. A l'inverse, les stations de Faye-d'Anjou et Brissac sont les deux seules stations à avoir leur indice inférieur à 1300 DJ. La station de Faye-d'Anjou est située sur un plateau en altitude légèrement orienté nord et la station de Brissac est un peu plus éloignée de la Loire que les stations voisines. Ces deux stations bénéficient donc moins des avantages de la proximité du fleuve. La différence de degrés jours entre la station avec l'indice le plus élevé et celui le plus faible (182 DJ) est équivalent à la hausse de l'indice à l'échelle régionale depuis le milieu du XX^{ème} siècle (+167 DJ à +239 DJ). Cette observation montre entre autre les possibilités d'adaptation de la région aux futurs changements climatiques.

IX.2.2. L'indice de Huglin

A l'échelle régionale, l'analyse de l'indice d'Huglin a également montré des différences entre la station de Saumur et celle d'Angers. Saumur est désormais, depuis les années 2000, dans la catégorie climatique « tempéré chaud » alors qu'Angers est classé en « climat tempéré ». En 2010, les stations du réseau TERVICLIM/INRA, situées en Saumurois n'ont pas atteint le



niveau de « climat tempéré chaud » mais font partie avec Chaume des stations avec l'indice le plus fort, en raison des températures maximales plus élevées, mesurées sur ces sites viticoles. Ces trois stations, en 2010, ont donc été classées en « climat tempéré » avec Cléré, Haute-Perche et La-Marre-Lalande alors que les autres stations étaient en « climat frais ». Une nouvelle fois l'amplitude maximale de cet indice bioclimatique entre les stations (268 DJ) représente pratiquement l'amplitude d'une catégorie climatique et l'augmentation enregistrée depuis le milieu du XX^{ème} siècle.

IX.2.3. L'indice de fraîcheur des nuits

L'analyse régionale depuis le milieu du XX^{ème} siècle a montré une augmentation des températures minimales en période de maturation des raisins mais l'indice de fraîcheur des nuits reste malgré tout dans des catégories fraîches pour l'ensemble du Val de Loire. Le calcul de l'indice de fraîcheur des nuits pour la saison 2010 en Anjou et Saumurois révèle des conditions climatiques nocturnes au-dessus de 12°C partout, sauf à Chaume où les conditions sont plus froides (11,2°C). Au contraire, cet indice est plus élevé à Beaulieu (12°C) situé sur un plateau, bien que situé à seulement 1,5 km de Chaume, au fond de la vallée du Layon, près de la rivière.

Tableau IX.3. Indices bioclimatiques dans l'Anjou et le Saumurois pour la saison végétative 2010

| | INDICE DE WINKLER | INDICE DE HUGLIN | INDICE DE FRAÎCHEUR DES NUITS |
|------------------|-------------------|------------------|-------------------------------|
| Beaulieu | | 1792.8 | 12.0 |
| Brissac | 1274.1 | 1773.0 | 12.3 |
| Chaume | 1317.5 | 1951.4 | 11.2 |
| St Cyr-en-Bourg | 1432.7 | 2014.7 | 12.3 |
| Souzay | 1421.6 | 1976.3 | 12.6 |
| Cléré | | 1815.5 | 12.2 |
| Faye d'Anjou | 1250.4 | 1746.2 | 12.4 |
| Haute-Perche | 1339.9 | 1835.5 | 12.7 |
| La Marre Lalande | 1334.2 | 1841.8 | 12.4 |

| | | | |
|---|-----------|---------|---------------------|
|  | REGION II | TEMPERE | NUITS FRAÎCHES |
|  | REGION I | FRAIS | NUITS TRES FRAÎCHES |

Données : [TERVICLIM/INRA]

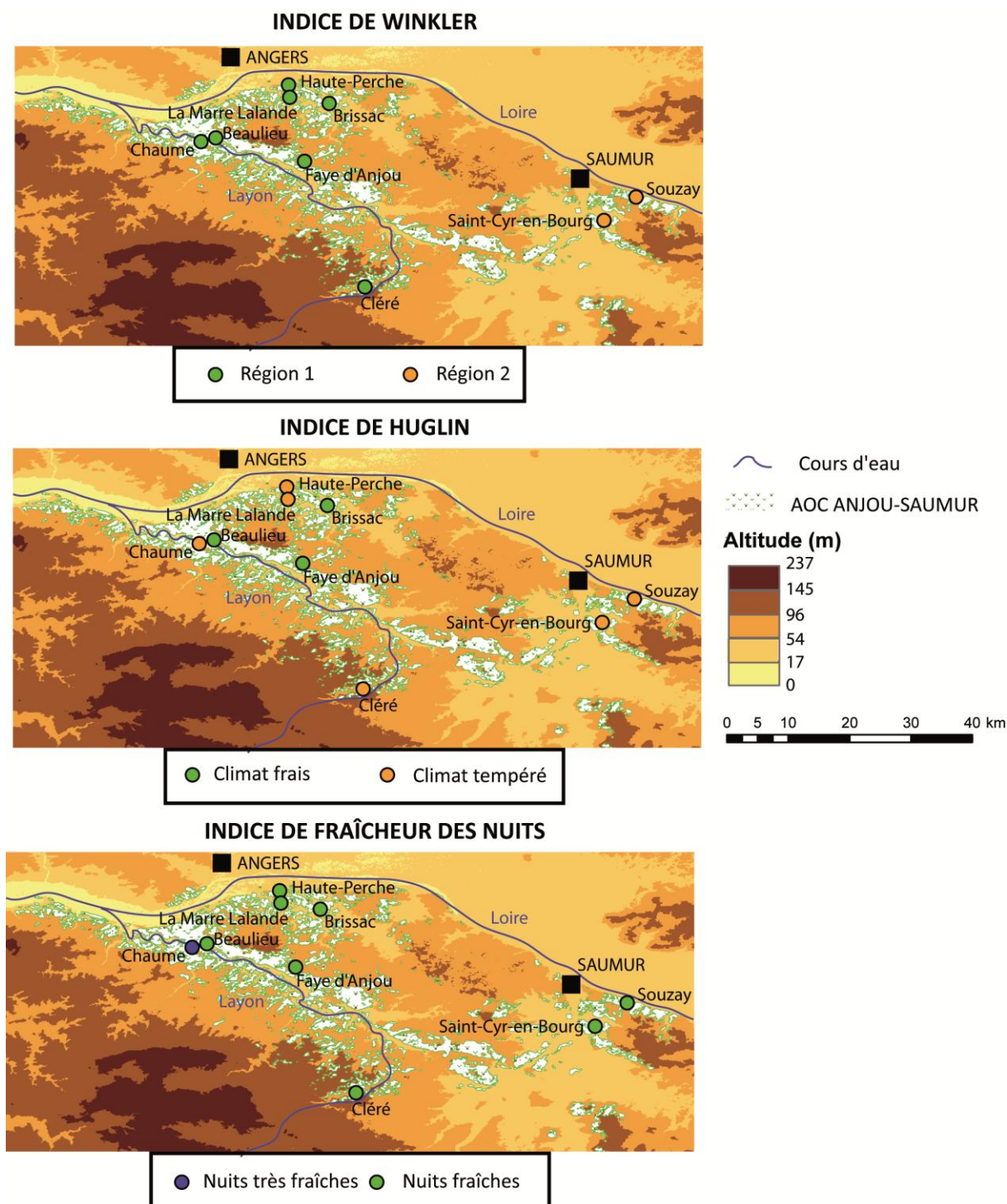


Figure IX.3. Cartes des indices bioclimatiques en Anjou et Saumurois pour la saison végétative 2010.
Données : [TERVICLIM/INRA]

Des différences de températures et d'indices sont observées entre les différentes stations en relation avec leur position plus ou moins proches de la Loire. Dans les Coteaux du Layon, une différence assez marquée entre Chaume et Beaulieu est observée avec une importante variabilité de la température à Chaume et des températures moins contrastées à Beaulieu car sur un plateau plus ventilé. En conséquence, le climat de cette région où des vins liquoreux sont produits mérite d'être analysé plus précisément.

IX.3. Analyse climatique dans les Coteaux du Layon

Dans cette dernière partie du chapitre IX, la variabilité spatiale des températures au sein de vignobles des Coteaux du Layon est évaluée. Les moyennes thermiques ont été calculées et deux épisodes dits « extrêmes » pour la vigne ont été étudiés. Enfin, les indices bioclimatiques, habituellement calculés à une échelle régionale, ont été analysés afin de caractériser l'importante variabilité sur cet espace viticole de seulement 600 ha.

IX.3.1. Analyse des températures minimales et maximales journalières

Les séries de températures minimales et maximales journalières de la saison 2009 ont été analysées, car cette saison contient le moins de séries lacunaires. Deux CAH ont été préalablement effectuées, à partir des données journalières, afin de classer les différents capteurs de la même manière que pour les stations météorologiques complètes du réseau Anjou/Saumurois.

IX.3.1.1. Classifications et caractérisation des capteurs

Le dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique (Figure IX. 4) montre que 80% de la variance totale de la température minimale et que 73% de la variance totale de la température maximale peuvent être expliquées chacune par 5 classes. Le Tableau IX.4 présente la statistique descriptive de chaque classe et la Figure IX.5 l'appartenance de chaque capteur à telle ou telle classe.

Pour les températures minimales, la classe avec la moyenne saisonnière la plus élevée est la classe 1 (11,5°C). Les capteurs composant cette classe sont situés sur les mi-coteaux ou bien en haut de parcelle aux pentes légères (pente moyenne de 3,9°). L'altitude moyenne de ces capteurs est de 76 m, ce qui en fait la classe avec les capteurs les plus élevés. Les inversions thermiques fréquentes expliquent donc pourquoi cette classe est celle avec les températures minimales les plus élevées. La classe 2 est assez proche de la première avec une altitude moyenne de 75 m et des pentes légèrement plus marquées (4,6° en moyenne). Les inversions thermiques favorisent donc des nuits plutôt douces pour les capteurs de cette classe 2 (11,1°C de moyenne) mais contrairement à ceux de la classe 1 qui sont localisés le plus souvent en haut de coteau, ces derniers sont sur les bas de parcelle mais encore relativement élevés en altitude ou sur un plateau. Ainsi, certaines nuits des lacs d'air froid peuvent s'y former localement. La classe 3 comprend les capteurs les moins élevés (18 à 25 m) et les seuls à être situés sur le versant nord. Les deux capteurs qui composent cette classe sont situés à proximité du Layon, en fond de vallée sur des pentes modérées (3,9 à 4,1°). Les inversions thermiques font que ces capteurs enregistrent des températures plus basses. L'unique capteur de la classe 5 est exactement dans la même situation, avec même les nuits les plus fraîches (9,9°C de moyenne), mais est exposé au sud-ouest avec un espace arboré assez dense en fond de parcelle et à proximité du capteur, qui bloque ainsi l'écoulement de l'air et favorise la formation de lac d'air froid plus conséquent que sur le versant nord. Enfin, la classe 4 regroupe deux capteurs de mi-coteau aux altitudes

intermédiaires (33 à 60 m) et aux pentes assez marquées (6,7° à 7,2°). La température moyenne (11°C) est donc supérieure à celle des deux dernières classes décrites ci-dessus, notamment grâce aux pentes plus importantes qui permettent une bonne circulation de l'air sur le coteau.

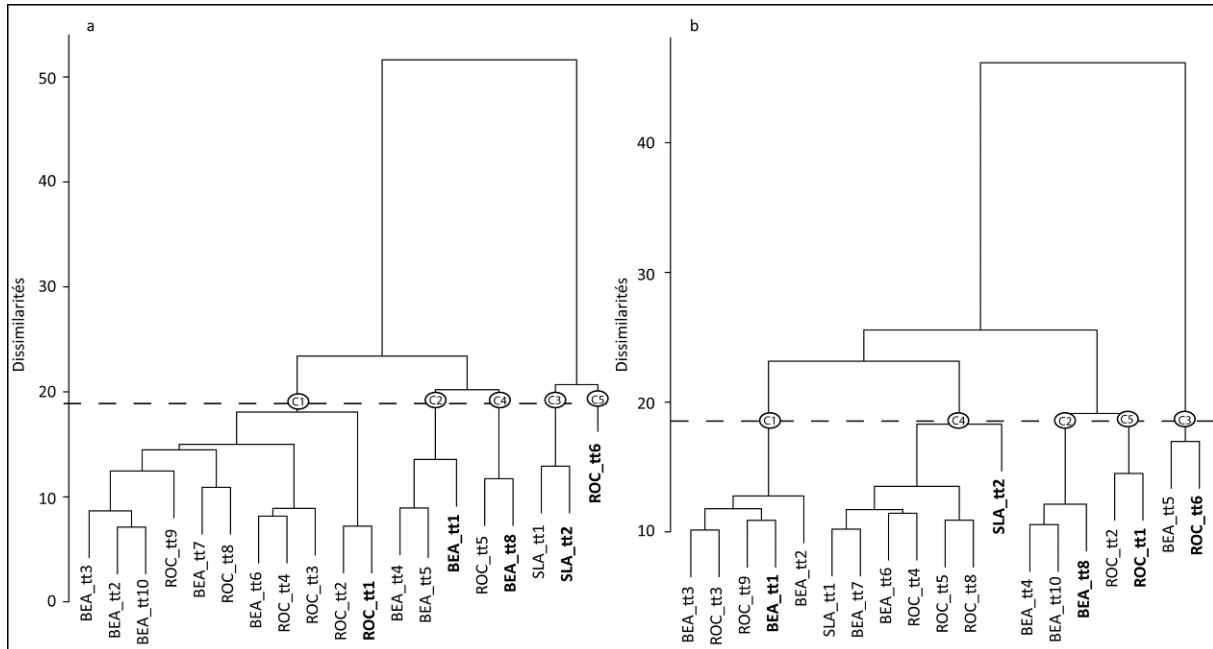


Figure IX.4. Dendrogrammes des classifications ascendantes hiérarchiques appliquées sur les séries de données journalières de températures de la saison végétative 2009 (a : température minimale, b : température maximale) du réseau de capteurs implanté dans le site des Coteaux du Layon.

Données : [TERVICLIM]

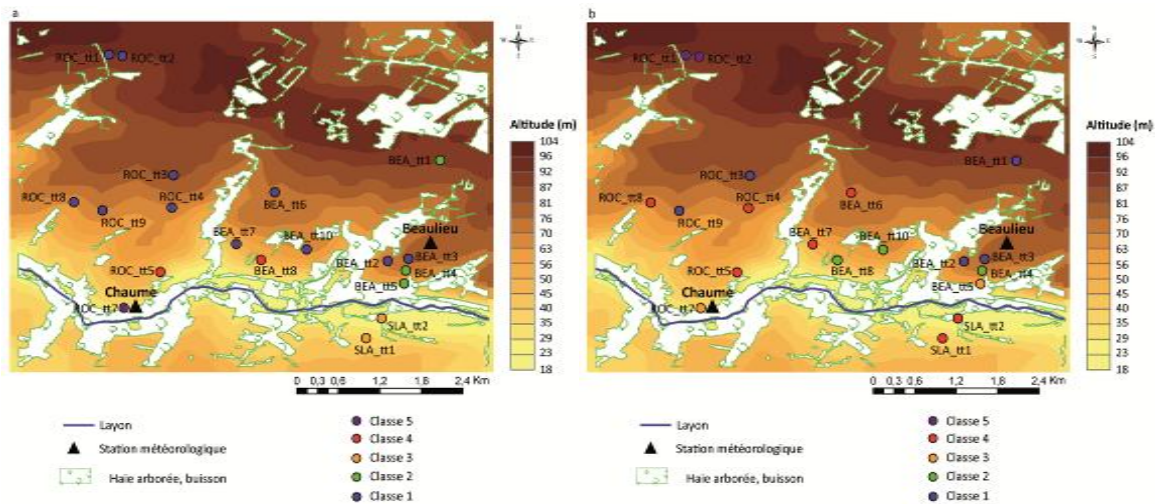


Figure IX.5. Localisation des capteurs de températures utilisés pour les classifications ascendantes hiérarchiques et indication de leur appartenance aux différentes classes.

Données : [TERVICLIM/Inra]

Tableau IX.4. Caractéristiques des différentes classes issues des classifications ascendantes hiérarchiques réalisées pour les séries de températures journalières de la saison végétative 2009 dans le site des coteaux du Layon.

| | Températures minimales (°C) | | | | | Températures maximales (°C) | | | | | |
|------------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|------|
| | Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 | Classe 4 | Classe 5 | Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 | Classe 4 | Classe 5 | |
| Minimum | 3,3 | 3,2 | 2,2 | 2,9 | 2,0 | Minimum | 12,6 | 13,3 | 13,4 | 12,7 | 12,6 |
| Quartile 1 | 9,6 | 9,2 | 8,4 | 8,9 | 7,6 | Quartile 1 | 21,2 | 21,7 | 22,4 | 21,4 | 21,2 |
| Médiane | 11,5 | 11,1 | 10,6 | 11,1 | 9,7 | Médiane | 24,2 | 25,1 | 26,4 | 24,6 | 24,6 |
| Quartile 3 | 13,5 | 13,2 | 12,7 | 13,2 | 12,2 | Quartile 3 | 27,5 | 28,4 | 29,9 | 27,7 | 27,9 |
| Maximum | 20,9 | 20,3 | 18,8 | 20,4 | 17,5 | Maximum | 36,9 | 38,4 | 40,0 | 37,8 | 39,0 |
| Moyenne | 11,5 | 11,1 | 10,4 | 11,0 | 9,9 | Moyenne | 24,3 | 25,1 | 26,1 | 24,7 | 24,7 |
| Variance | 9,5 | 9,4 | 10,6 | 10,6 | 10,5 | Variance | 24,3 | 26,8 | 29,8 | 23,0 | 27,3 |

Données : [TERVICLIM/INRA]

Pour les températures maximales, la classe 5 comprend les deux capteurs les plus élevés (94 et 95 m) sur un haut de parcelle à la pente modérée mais suffisante pour garantir une bonne exposition « climatologiquement » parlant, c'est-à-dire de sud. Les températures maximales peuvent ainsi temporairement, lors d'épisodes de fortes chaleurs avec un bon ensoleillement, être très élevées (par exemple : 39°C, le 15 Août 2009). Lors de temps un peu plus perturbés, la règle de décroissance de la température avec l'altitude s'applique et les températures maximales sont plus faibles qu'en contrebas. La classe 1 est assez proche des caractéristiques de la classe 5 avec une altitude moyenne de 80 m et des capteurs situés en haut de coteau ou sur le plateau. Etant donné l'altitude, la température moyenne est la plus fraîche de celles des différentes classes et les valeurs extrêmes élevées sont moins marquées que dans la classe 5, du fait d'expositions moins favorables (pas d'exposition directe au sud) et de pentes plus faibles sur les parcelles les mieux exposées. Les classes 2 et 4 sont relativement proches avec essentiellement des capteurs de mi-coteau, même si la classe 2 a une température maximale moyenne un peu plus élevée du fait d'expositions plus favorables. Enfin la classe 3 contient les deux capteurs aux températures maximales les plus élevées (26,1°C), avec des capteurs situés en bas de parcelle bien abrités du vent par les haies environnantes.

IX.3.1.2. Variabilité spatiale des températures durant la saison végétative 2009.

Les 19 capteurs de températures utilisés pour l'étude climatologique de la saison végétative 2009 montrent une variabilité spatiale de la température importante. La Figure IX.6 illustre les contrastes durant la saison végétative 2009 entre 5 positions, correspondant à des capteurs représentatifs de chaque classe de la classification ascendante hiérarchique (en gras sur la Figure IX.4). Il apparaît que ces capteurs sont localisés dans les principales configurations que nous retrouvons sur le terrain qui correspondent aux différentes orientations, altitudes et pentes. Sla_tt2 est situé à l'altitude la plus faible du réseau et avec une orientation nord. Roc_tt7 a une orientation sud et est situé au bas d'une pente alors que Bea_tt1 et Roc_tt1 sont en haut sur le plateau. Enfin Bea_tt8 est à mi-pente avec une orientation sud également. Beaucoup de nuits avec inversion thermique sont observées, particulièrement lorsque le ciel est dégagé et que les conditions radiatives sont réunies. En conséquence, la plus basse température minimale moyenne de la saison (9,6°C) est

enregistrée par le capteur Sla_tt2 (capteur le plus bas, au fond de la vallée). A l'opposé, les capteurs Bea_tt1 et Roc_tt1 enregistrent les températures minimales moyennes saisonnières les plus hautes, respectivement 10,7°C et 11,1°C. Cependant, quand le ciel est couvert, les températures minimales les plus basses sont plutôt observées à des altitudes plus élevées (plateau, en haut de parcelle...). La température maximale moyenne saisonnière varie de 23,6°C au capteur le plus élevé (Bea_tt1) à 24,2°C au point le plus bas (Sla_tt2) et sur la mi-pente exposée au sud au capteur Bea_tt8. Ainsi, l'amplitude thermique maximale est observée en bas de pente alors que celle-ci est beaucoup plus limitée aux sommets des parcelles.

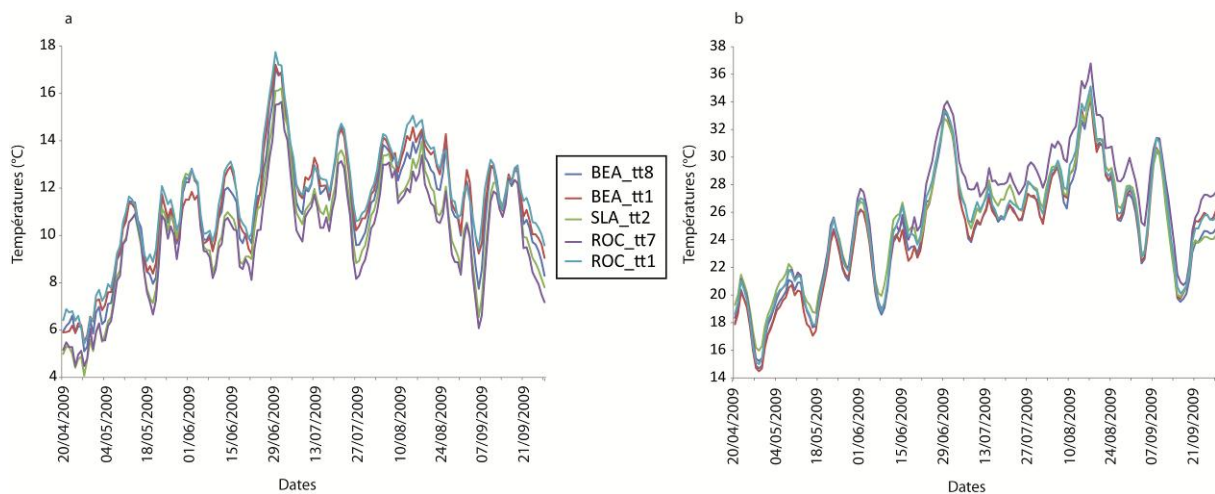


Figure IX.6. Evolution des températures minimales (a) et maximales (b) pour 5 capteurs représentatifs dans les vignobles des Coteaux du Layon durant la saison végétative de 2009.
Données : [TERVICLIM/INRA]

IX.3.2. Analyse de deux événements climatiques « extrêmes »

Ces différences de température moyenne entre les capteurs peuvent être bien plus marquées, au jour le jour et notamment durant des événements extrêmes. Dans cette étude, deux événements climatiques ont été analysés : un épisode de gel printanier et une vague de fortes chaleurs.

IX.3.2.1. L'épisode de gel printanier du 15 mars 2010.

Un épisode de gel s'est produit le 15 mars 2010 et même si le débourrement de la vigne ne s'était pas encore manifesté, il est intéressant de comprendre comment les températures à une échelle locale ont réagi à une telle configuration climatique. La carte d'analyse de surface du 15 Mars 2010 pour l'Europe (Figure IX.7.a) montre un système de hautes pressions centrée au large des côtes bretonnes, advectant de l'air particulièrement froid dans un flux de nord-ouest assez humide (Figure IX.7.b). La conséquence est une baisse rapide de la température sur la plupart des régions françaises (Figure IX.8) et

particulièrement dans le Val de Loire avec des gelées sous abri fréquentes de Nantes (-1,7°C à Bouguenais) à Orléans (-0,6°C) et le Sancerrois (-1,2°C à Nevers). Cette nuit-là, après une nuit claire et sans vent la température est descendue à -4,7°C sur les sols sableux de Romorantin. En moyenne vallée de la Loire, les températures minimales étaient également sous 0°C avec -0,1°C à Angers et -1,2°C à Saumur.

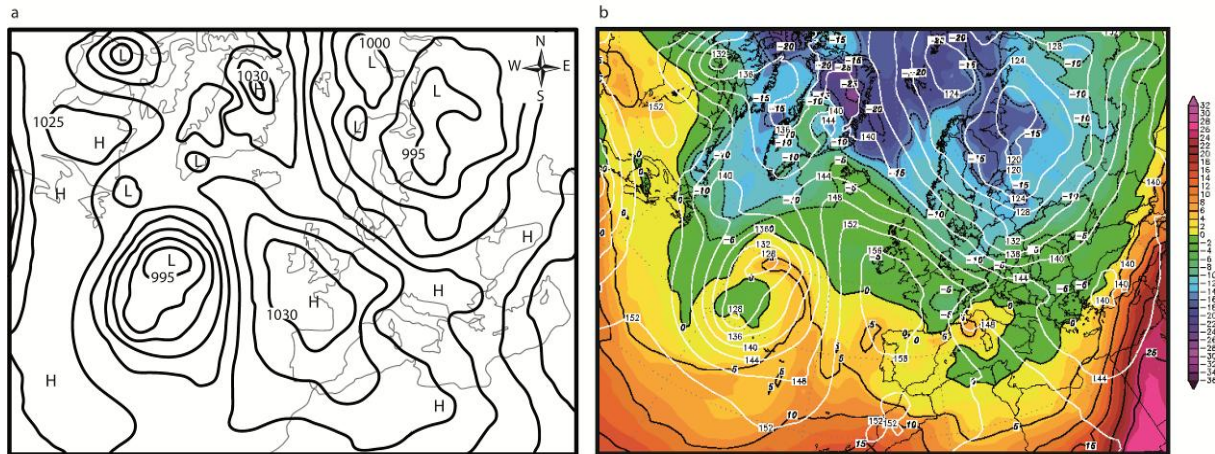


Figure IX.7. Analyses des champs de pression en surface à 12h TU (a) et des températures à 850 hpa à 0h TU (b) sur l'Europe durant un épisode de gel (15 Mars 2010).
Source : [<http://www.wetterzentrale.de>]

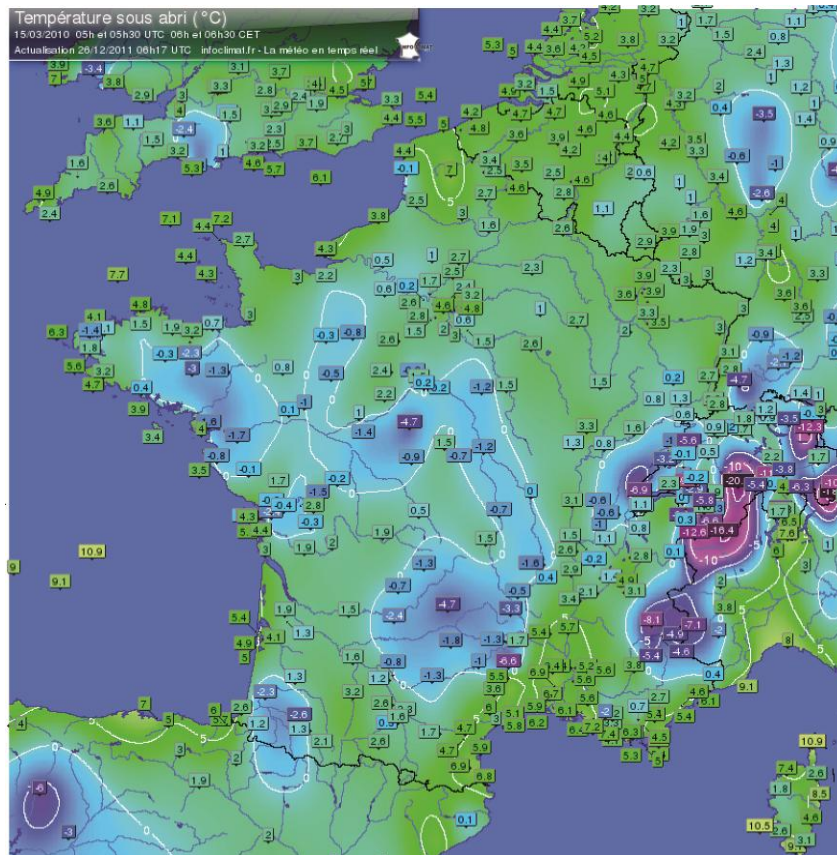


Figure IX.8. Températures relevées, par des stations synoptiques et amateurs, à 5h UTC (6h heure française) lors de la journée du 15 Mars 2010.
Source : [www.infoclimat.fr]

Les autres stations du réseau TERVICLIM/INRA ont montré des températures minimales entre $-2,1^{\circ}\text{C}$ à Saint-Cyr-en-Bourg et $0,6^{\circ}\text{C}$ à Haute Perche qui a ainsi évité le seuil conventionnel du gel. La même nuit, la variabilité spatiale de la température a été encore plus forte dans les Coteaux du Layon à échelle fine (Figure IX.9) où la température a chuté entre $1,3^{\circ}\text{C}$ et $-3,1^{\circ}\text{C}$. Le gel le plus sévère ($<-2^{\circ}\text{C}$) a été observé en bas des parcelles, près du Layon alors que les températures sont restées positives en haut des pentes et sur les plateaux. La situation est caractéristique d'un ciel clair, sans nuage, ce qui peut être très dommageable pour la vigne, particulièrement quand celle-ci a débourré (fin Mars à début Avril).

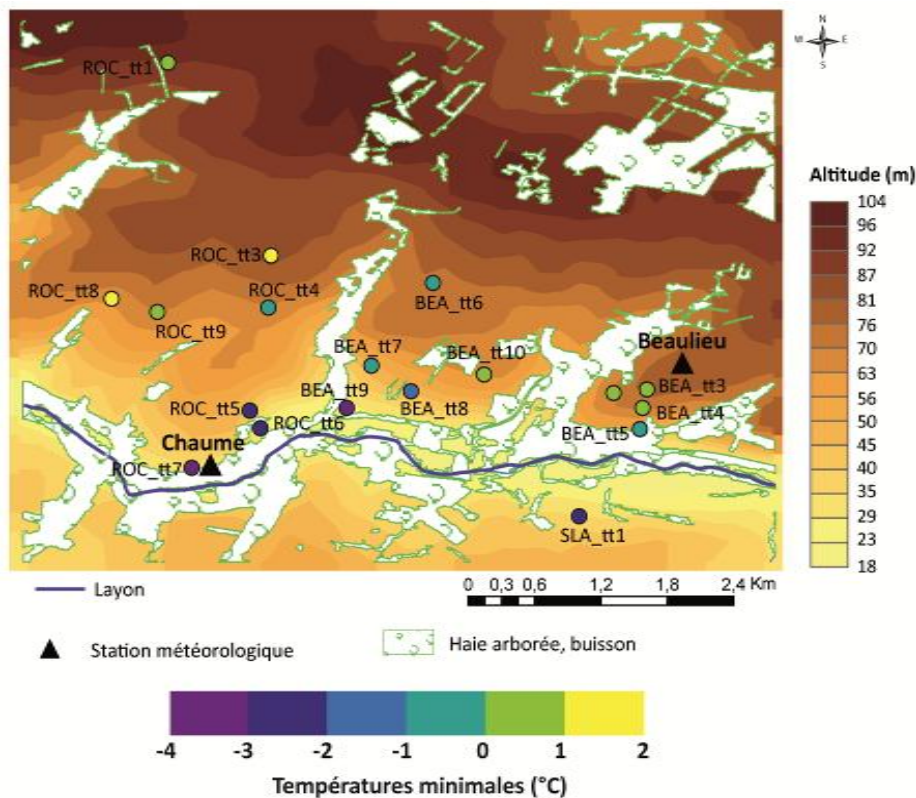


Figure IX.9. Températures minimales relevées lors de l'épisode de gel du 15 mars 2010 sur le site des Coteaux du Layon.

Données : [TERVICLIM]

IX.3.2.2. L'épisode de fortes chaleurs du 15 Août 2009

La vague de chaleur a commencé le 15 Août 2009 et a duré 5 jours au total avec un léger rafraîchissement le 17. Les températures ont fréquemment dépassé le seuil des 35°C , dommageable pour la vigne (échaudage et dessèchement des baies). La carte d'analyse en surface du 15 Août 2009 (Figure IX.10a.) montre une dorsale anticyclonique traversant l'Europe mais aussi un système de basses pressions arrivant de l'Espagne et advectant de l'air tropical sur toute la France (Figure IX.10b). La carte de la Figure IX.11 montre l'ampleur de cette advection, la plupart des stations d'observations enregistrant ce jour-là des

températures maximales entre 30 et 38°C. Les régions les plus touchées par cette canicule sont dans le sud-ouest et le Lyonnais.

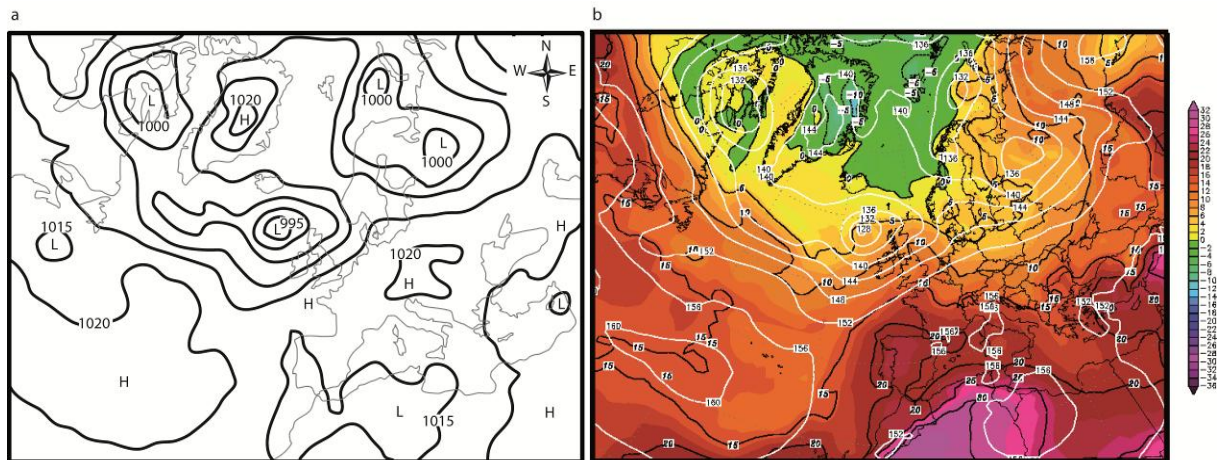


Figure IX.10. Analyses des champs de pression en surface à 12h TU (a) et des températures à 850 hp à 0h TU (b) sur l'Europe durant un épisode caniculaire (15 Août 2009)

Source : [<http://www.wetterzentrale.de>]

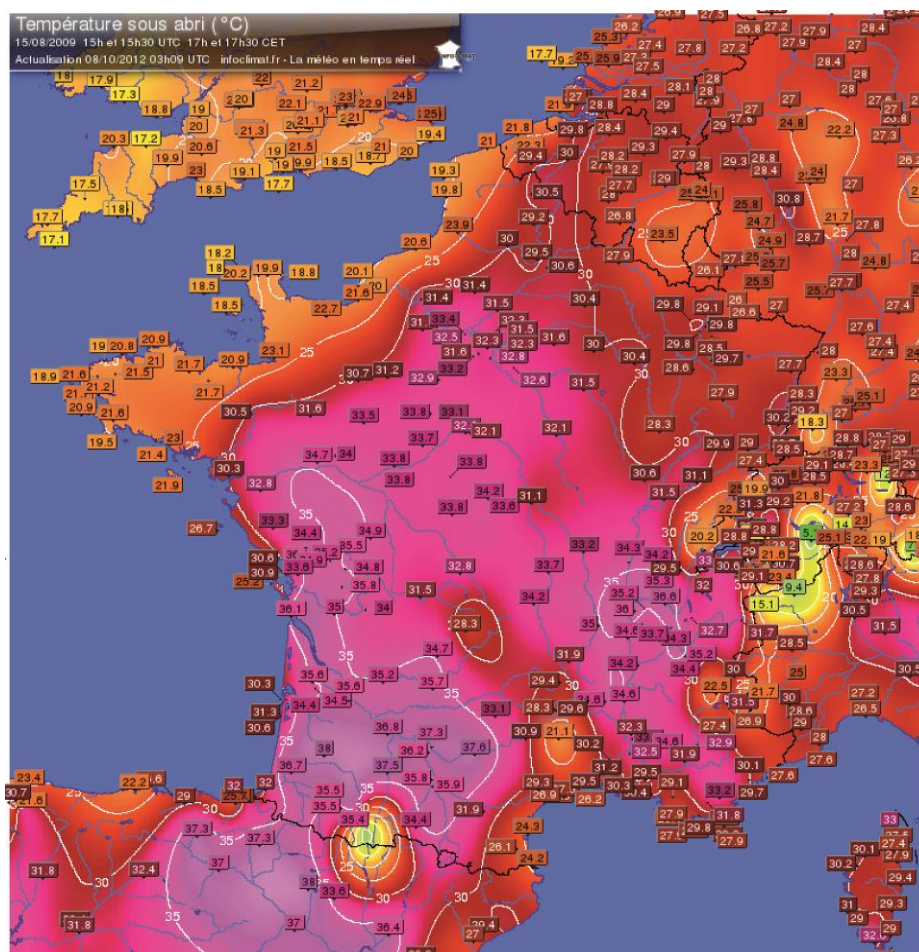
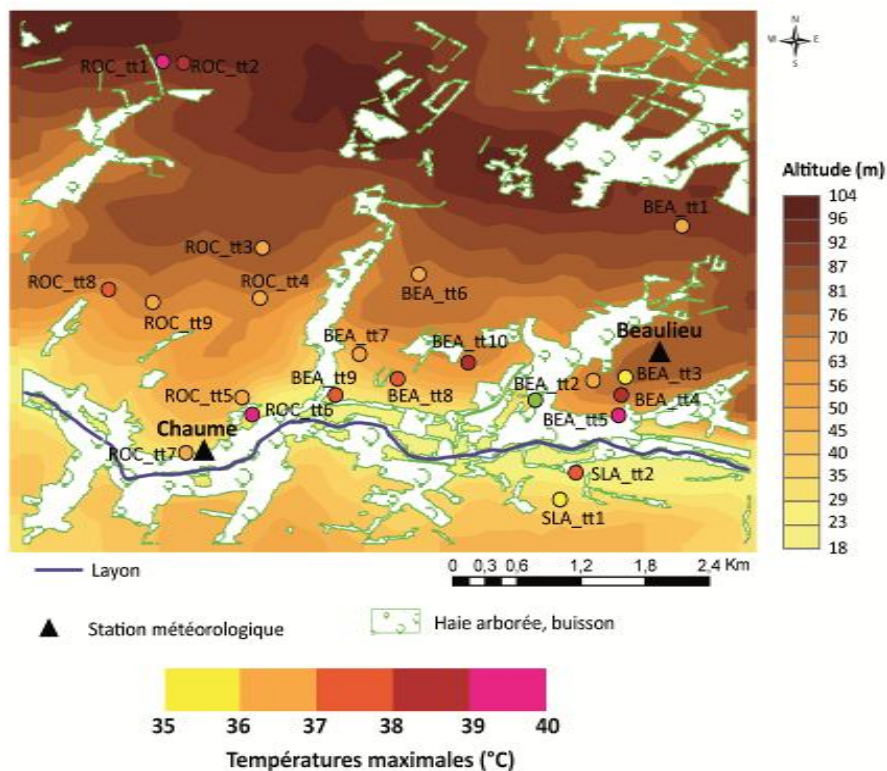


Figure IX.11. Températures relevées, par des stations synoptiques et amateurs, à 15h UTC (17h heure française) lors de la journée du 15 Août 2009

Source : [www.infoclimat.fr]

La vallée de la Loire est également soumise directement à cette advection d'air très chaud en provenance du Maghreb. Ce type de situation peut se produire chaque année au moins une fois mais cet évènement a été un épisode particulièrement intense. La température maximale a atteint 34,9°C à Angers et 36,7°C à Saumur, selon les relevés de Météo-France. Une fois de plus et en lien avec la topographie contrastée, les différentes orientations, pentes et les caractéristiques variées des sols en présence, la variabilité spatiale de la température était bien plus marquée à l'échelle fine des Coteaux du Layon avec des températures maximales entre 35,9°C et 40°C (Figure IX.12). La répartition de la température était cependant plus complexe que pour l'épisode de gel mais les températures les plus élevées étaient en général enregistrées en fond de vallée avec une orientation sud, alors que les températures les moins chaudes étaient observées à des altitudes plus élevées sur les parcelles bien ventilées ou en versant nord. La température maximale aura dépassé de partout le seuil de très fortes chaleurs (>35°C) qui peut dans certains cas causer de graves dommages à la vigne, spécialement lorsque ce seuil est atteint ou dépassé pendant plusieurs jours de suite. Les capteurs Roc_tt1 et Roc_tt2 qui sont situés en bordure de plateau ont connu des maximales très élevées entre 38,4 et 39°C. Lors de l'étude des moyennes thermiques, la situation particulière de ces deux capteurs exposés plein sud en haut de parcelle a été abordée. C'est en partie cette situation qui explique ces températures bien plus élevées que pour le capteur Bea_tt1, par exemple, qui est à la même altitude sur le plateau sur une parcelle plane donc avec une exposition moins favorable.



Données : [TERVICLIM]

IX.3.3. Analyse des indices bioclimatiques

D'habitude utilisés à une échelle régionale, les différents indices bioclimatiques ont été calculés pour la saison 2009 dans le site des Coteaux du Layon afin d'évaluer au mieux les différences qui peuvent exister entre les parcelles à une échelle fine.

IX.3.3.1. L'indice des degrés jours.

La Figure IX.13a montre les indices des degrés jours calculés pour 19 capteurs qui n'avaient aucunes données manquantes durant cette saison végétative. Dans ces vignobles les degrés jours varient de 1184 à 1481 DJ. En accord avec la classification de l'indice régionale de Winkler (Figure IX.13b), la plupart des capteurs seraient classés en Région I, correspondant à la région viticole la plus fraîche (850-1389 DJ). Cependant, 8 des 19 capteurs ont des valeurs qui correspondent plus à la région II (1389-1667 DJ). Cela montre à quel point le climat peut être diversifié d'un point de vue thermique à une échelle aussi locale. Les indices les plus élevés sont calculés sur les mi-pentes et/ou sur un versant exposé sud, alors que les indices les plus faibles se retrouvent soit aux endroits les plus élevés, soit dans les points les plus bas et/ou sur un versant exposé nord.

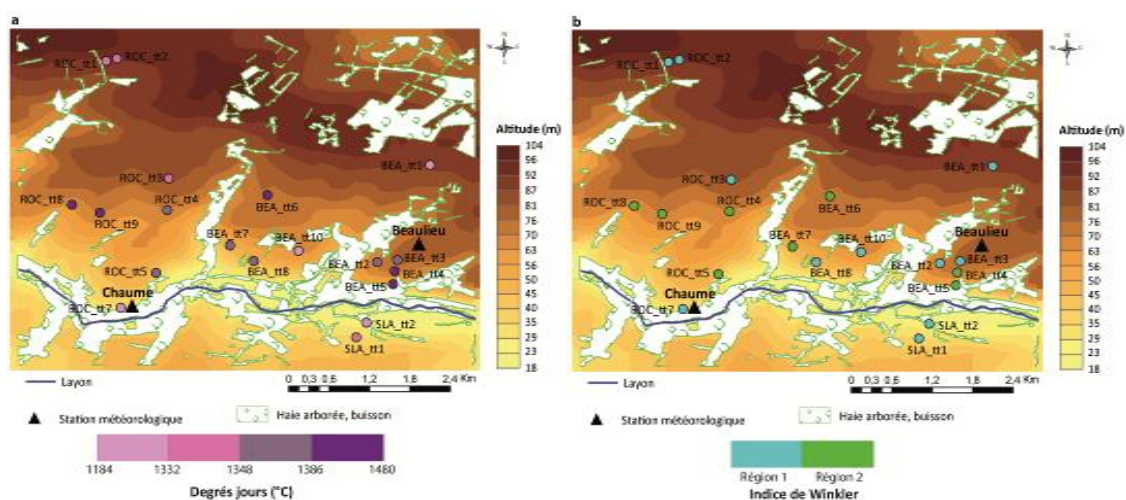


Figure IX.13. Indices des degrés jours (a) dans le site des Coteaux du Layon pour la saison végétative 2009 et classification du climat viticole selon l'indice de Winkler (b)

Source : [TERVICLIM]

IX.3.3.2. L'indice d'Huglin.

Concernant l'autre indice calculé et basé sur la formule de Huglin, il varie de 1953 à 2191 (Figure IX.14.a). Ainsi, presque tous les capteurs seraient dans le type de climat tempéré, alors qu'un seul capteur se situerait dans la catégorie climat tempéré chaud (2100-2400). Une différence de plus de 200 unités pour un tel indice n'est pas anodine sur seulement 600 ha de vignobles. Les indices les plus faibles se retrouvent sur les points les plus élevés et les indices les plus forts aux points les plus bas avec une orientation sud. En effet les plus hautes températures maximales sont régulièrement observées en fond de vallée et l'indice de

Huglin prend plus en considération ces températures maximales que l'indice de Winkler, qui n'est basé que sur les températures moyennes.

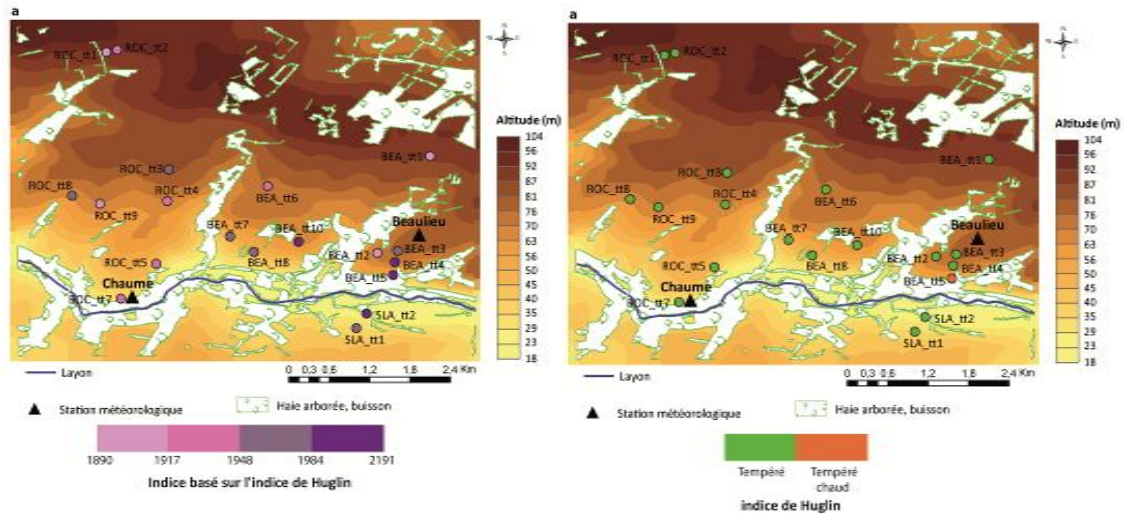


Figure IX.14. Indices calculés selon la formule de Huglin (a) dans le site des Coteaux du Layon pour la saison végétative 2009 et classification du climat viticole selon Huglin (b)

Source : [TERVICLIM]

IX.3.3.3. L'indice de fraîcheur des nuits.

L'indice de fraîcheur des nuits est corrélé ($R^2=0,72$) avec l'altitude (Figure IX.15) en raison des fréquentes inversions thermiques observées dans le secteur (Bonnefoy *et al.*, 2009). En conséquence, l'indice le plus bas ($9,6^{\circ}\text{C}$) est enregistré par le capteur avec l'altitude la plus faible (28 m sur un versant nord). A l'opposé, les nuits sont plus douces en haut des pentes avec un indice au-dessus de 12°C au-delà d'une altitude de 65 m environ. L'effet de ces inversions thermiques sur l'indice de fraîcheur des nuits est très visible sur la carte de la Figure IX.16. Ainsi, les conditions nocturnes peuvent-elles être classées en deux catégories dans les Coteaux du Layon : nuits froides aux points les moins élevés et nuits très fraîches aux points les plus hauts. Cette fraîcheur nocturne est très bénéfique pour la vigne, particulièrement durant cette période de maturation où les arômes et la couleur des grappes se développent (Calame *et al.*, 1977).

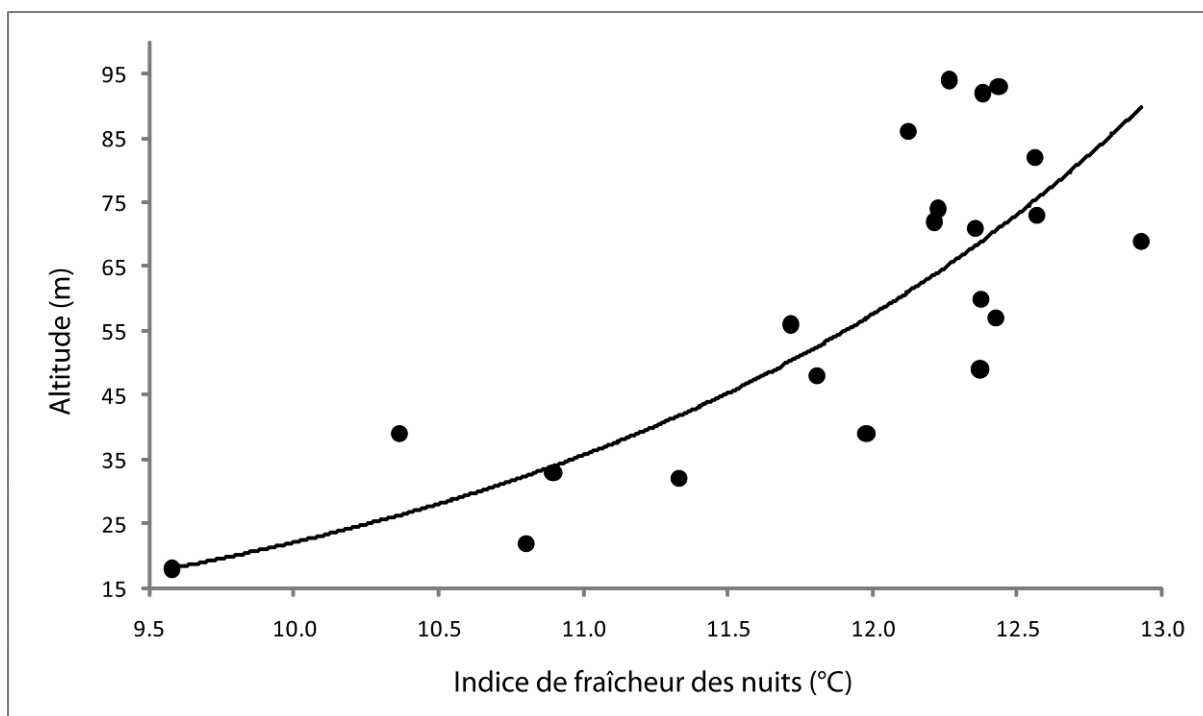


Figure IX.15. Indice de fraîcheur des nuits pour 21 capteurs de température dans les vignobles des Coteaux du Layon en 2009 (calculé sur la période de mi-Août à mi-Septembre). $R^2=0,72$ /Equation de la courbe : $y=0,19 * \exp(0,48x)$

Données : [TERVICLIM]

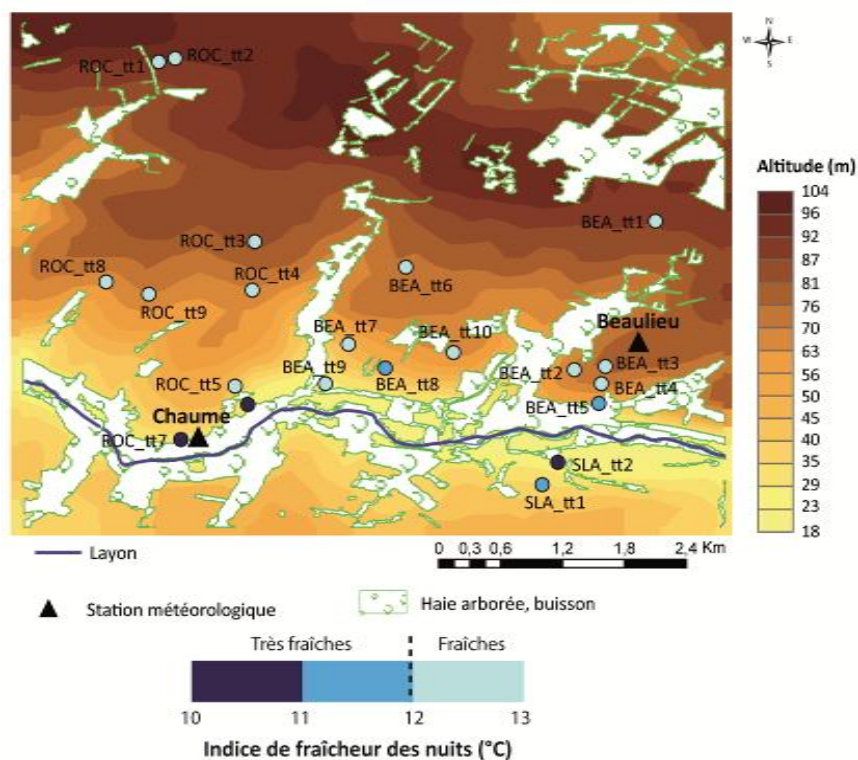


Figure IX.16. Indice de fraîcheur des nuits calculé sur la période 15 août-15 septembre 2009 dans le site des Coteaux du Layon.

Données : [TERVICLIM]

CONCLUSION DU CHAPITRE IX

La variabilité spatiale de la température au sein des terroirs viticoles d'Anjou et du Saumurois est à relier avec les conditions locales des différentes stations, c'est-à-dire leur positionnement sur un plateau plus ou moins élevé, en bas de coteau ou bien encore à proximité de la Loire. La région du Saumurois s'est particulièrement démarquée de cette étude, confirmant les observations faites par la station de référence Météo-France de Saumur. Ainsi, ce secteur de la moyenne vallée de la Loire connaît un climat plus doux que les autres stations du réseau. L'analyse du chapitre VIII sur les moyennes de températures depuis 1953 a montré une hausse plus importante des valeurs que dans les autres terroirs de la région. Par conséquent ce secteur du Val de Loire devrait être l'un des premiers à être concerné par les conséquences du changement climatique alors que d'autres terroirs seront à privilégier dans le même temps, du fait de leurs températures moins élevées. La dernière partie de ce chapitre a démontré que la variabilité spatiale des températures pouvait être également aussi marquée voire plus à l'échelle d'un seul et unique site viticole. En effet, des différences de moyennes thermiques sont observées entre les différents capteurs installés dans les coteaux du Layon, du fait de la topographie plus accidentée, de la présence de la rivière du Layon, de la diversité des sols ... La diversité des indices bioclimatiques en est donc une conséquence logique. Enfin, cette variabilité, dans le cas d'épisodes « extrêmes » comme le gel printanier ou une canicule, explique que certaines parcelles sont plus vulnérables que d'autres à ces aléas. Dans le chapitre suivant, la construction d'un modèle statistique multicritère, pour ce secteur des coteaux du Layon, est présentée. L'analyse de ce site viticole a donc pu être menée un peu plus loin afin notamment de comprendre quels sont les différents facteurs environnementaux qui interviennent dans cette variabilité de la température et à quel degré chacun d'entre eux interviennent.

Chapitre X : MODÉLISATION SPATIALE DES TEMPÉRATURES DANS LE VIGNOBLE DES COTEAUX DU LAYON

La variabilité spatiale de la température au sein du site des Coteaux du Layon a été étudiée dans le chapitre précédent. Des pistes explicatives concernant les causes de cette variabilité ont également été introduites. Cependant, aucune relation statistique entre la température et les éléments topographiques et environnementaux n'a été calculée. Ce chapitre propose de revenir sur cette variabilité et de mettre en évidence les facteurs explicatifs liés à la topographie et à l'environnement des capteurs thermiques. Des modèles multicritères ont ainsi été développés afin de comprendre le rôle et le poids de l'ensemble des capteurs dans la variabilité spatiale de la température. La première partie de ce chapitre présente l'étude préliminaire sur les prédicteurs potentiels et les relations linéaires simples entre ces facteurs et la température. Cette première étape a alors permis de sélectionner les prédicteurs essentiels à prendre en compte dans le modèle statistique. Une régression linéaire multiple pas à pas a ensuite été appliquée sur les séries de températures mensuelles moyennes et journalières. Ces traitements ont été réalisés à la fois sur les séries de températures minimales et maximales. Afin de faciliter les calculs, dans l'ensemble du développement du modèle, les relations entre prédicteurs et prédicants ont été considérées linéaires. Néanmoins, certains types de relation sont souvent non-linéaires, en particulier dans les cas d'inversions thermiques entre l'altitude et la température minimale. Ces cas de non linéarité seront discutés dans ce chapitre.

X.1. Effets des facteurs locaux sur la variabilité spatiale de la température

Nous avons pu voir dans le chapitre IX que la température peut varier assez considérablement selon les différentes parcelles du site expérimental des Coteaux du Layon. Ce site de 600 ha connaît pourtant une topographie relativement peu accidentée (environ 80 m), en comparaison avec d'autres vignobles français. Cependant, l'influence est réelle, en particulier lors d'épisodes extrêmes, comme présenté dans le chapitre précédent. Avant la présentation des résultats du modèle multicritères, les relations linéaires simples entre les différents éléments descriptifs de la topographie du terrain et la température sont testées dans cette première partie de chapitre.

X.1.1. L'altitude

Les altitudes du site des Coteaux du Layon sont relativement peu contrastées entre le fond de la vallée et les plateaux. En effet, l'altitude varie d'environ une vingtaine de mètres près de la rivière du Layon à plus de 100 m sur les plateaux. Néanmoins, ce faible dénivelé des

coteaux viticoles n'empêche pas l'observation d'importantes inversions thermiques, parfois supérieures à 7°C d'où un fort gradient altitudinal. L'effet de l'altitude semble plus marqué sur les températures minimales que sur les maximales. Les températures minimales et maximales moyennes de la période mai-octobre 2009 pour les 20 capteurs ont été confrontées à l'altitude des capteurs afin de mesurer la relation entre ces deux paramètres.

X.1.1.1. Températures minimales

La Figure X.1a présente le graphique cartésien croisant la température minimale moyenne de la période mai-octobre 2009 avec l'altitude pour les 20 capteurs. Une relation linéaire significative (valeur-p < 0,00001) existe ainsi entre l'altitude et la température minimale moyenne calculée sur cette période de la saison végétative 2009. Le coefficient de détermination nous précise que 69% de la variabilité spatiale de la température est expliquée par l'altitude. Le paramètre altitudinal est donc un des facteurs explicatifs essentiels de la variabilité spatiale de la température minimale du site d'étude des Coteaux du Layon. De plus, la pente de la droite de régression est de signe positif, ce qui indique que plus l'altitude augmente, plus les températures minimales ont tendance à être élevées. Ce résultat confirme donc la prédominance des situations à inversion thermique sur ce site viticole. La température moyenne varie ainsi d'environ 2°C entre les bas-fonds et les plateaux. Cependant, quelques capteurs s'écartent un peu plus que d'autres de la droite de régression traduisant des situations particulières. En bas de coteaux, nous trouvons les capteurs Sla_tt2, Roc_tt6 et Roc_tt7 qui enregistrent des températures sensiblement plus basses, du fait de leur situation. En effet, Roc_tt6 et Roc_tt7 sont situés en bas de coteaux à des altitudes faibles où l'air froid stagne très facilement durant les nuits à inversion thermique. Sla_tt2 est également situé en bas de coteau, près de la rivière et sur un versant nord, d'où des températures également plus basses. Deuxièmement, sur les plateaux, nous trouvons Bea_tt1, Roc_tt1 et Roc_tt2, qui ont des températures minimales observées inférieures à ce que le modèle linéaire prédit. Ces trois capteurs ont les altitudes les plus élevées de l'ensemble du réseau et sont situés sur des plateaux à faible pente où l'air frais peut également stagner facilement lors de nuits radiatives. Il apparaît que la relation entre l'altitude et la température minimale moyenne n'est pas purement linéaire. Il existerait un plafond de l'inversion thermique qui est situé environ vers 80 m (Figure X.1a), plafond au-delà duquel la température décroîtrait de nouveau pour finalement stagner sur les plateaux.

X.1.1.2. Températures maximales

La Figure X.1.b présente la relation entre les températures maximales moyennes, calculées sur la même période et l'altitude. La relation est nettement moins bonne avec un R^2 de seulement 0,24 (valeur-p < 0,02). Ainsi, seulement 24% de la variabilité de la température maximale est expliquée par l'altitude. De nombreux autres facteurs doivent ainsi expliquer cette variabilité. Si on étudie cette relation, la pente de la droite de régression est négative, ce qui indique une décroissance de la température avec l'altitude. Il fait donc en général plus chaud sur les bas et mi-coteaux que sur les plateaux plus ventilés. Le capteur Roc_tt6 qui ressort très clairement du graphique, a la température maximale moyenne la plus haute et

s'écarte nettement de la droite de régression. Ce capteur est très bien situé, d'un point de vue viticole, puisque sur un coteau pentu et exposé au sud-est, bien abrité du vent par les haies et zones boisées environnantes. C'est ainsi, plus sa situation sur le coteau et son environnement que l'altitude en elle-même qui semblent expliquer cette température très élevée. Enfin, le capteur Bea_tt5, capteur de bas de coteau mais à altitude moyenne, connaît également une température supérieure à ce que prévoit le modèle linéaire. De même, que pour Roc_tt6, ce dernier est situé sur la pente la plus marquée du site, est exposé plein sud et bien abrité du vent par des haies en fond de parcelle. Ainsi, la température maximale a tendance à être supérieure que dans les autres parcelles à altitude comparable.

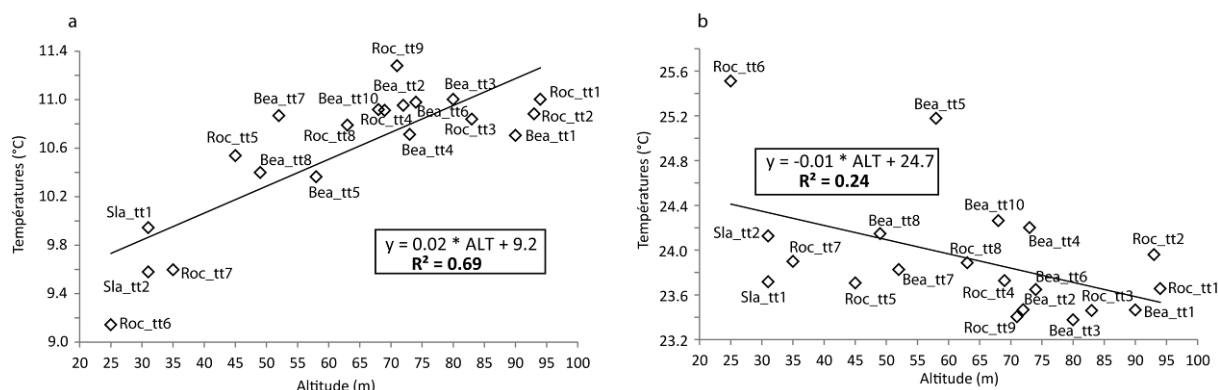


Figure X.1. Graphiques cartésiens représentant la température minimale (a) et maximale (b) moyenne de la saison végétative 2009 de tous les capteurs en fonction de l'altitude (Tn : valeur-p <0,00001 ; Tx : valeur-p =0,02).

Données : [TERVICLIM/INRA-CTV]

X.1.2. La pente

Si l'altitude est peu contrastée sur notre site d'étude, la pente l'est beaucoup plus avec des pentes très faibles dans les fonds de vallée et sur les plateaux mais des pentes beaucoup plus marquées à mi-coteau. La pente est un élément essentiel (cf. Chapitre 1) en viticulture puisqu'elle explique, avec l'orientation, l'implantation de nombreux vignobles. Elle doit donc jouer sur la variabilité spatiale de la température entre les différentes parcelles. Les températures minimales et maximales moyennes enregistrées par les 20 capteurs ont ainsi été confrontés aux valeurs des pentes sur une fenêtre de 80 m autour des capteurs (résolution du MNT).

X.1.2.1. Températures minimales

Comme le montre la Figure X.2a, la relation linéaire entre la pente et la température minimale moyenne est relativement faible avec un R² de 0,19 (valeur-p <0,05) et négative : plus la pente augmente, plus la température minimale a tendance à diminuer. Cependant 3 capteurs avec une pente moyenne connaissent les températures minimales les plus basses. Ces 3 capteurs sont Sla_tt2, Roc_tt6 et Roc_tt7, les mêmes capteurs qui ressortaient lors de la confrontation des températures minimales avec l'altitude.

X.1.2.2. Températures maximales

La relation est bien meilleure avec les températures maximales (Figure X.2b) puisque le R^2 est de 0,42 (valeur-p < 0,001). La pente est cette fois-ci positive traduisant une augmentation de la température en même temps que la pente. Ce résultat n'est pas surprenant, puisque une pente importante avec une bonne orientation permettra de concentrer plus d'énergie solaire au sol en journée et donc d'enregistrer des températures maximales plus élevées (cf. Chapitre 1). Le capteur Roc_tt6 se démarque toutefois de la tendance générale mais comme dit précédemment, ce dernier est dans une situation d'abri qui amplifie le réchauffement local de la parcelle malgré la pente relativement modeste.

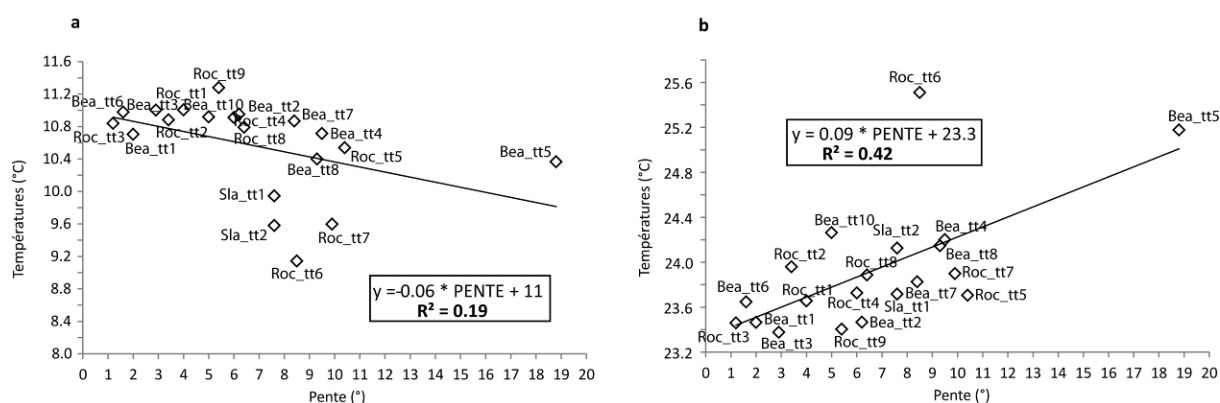


Figure X.2. Graphiques cartésiens représentant la température minimale (a) et maximale (b) moyenne de la saison végétative 2009 de tous les capteurs en fonction de la pente (Tn : valeur-p = 0,05 ; Tx : valeur-p = 0,001).

Données : [TERVICLIM/INRA-CTV]

X.1.3. L'orientation

L'orientation est l'une des composantes topographique à prendre en compte lors de l'implantation d'un vignoble. En effet, l'orientation favorable d'une parcelle entrainera des températures plus clémentes pour la vigne. Dans notre étude, afin de pouvoir intégrer numériquement ce paramètre dans le modèle multicritères, l'orientation a été décomposée en deux composantes classiques, U pour l'orientation nord-sud et V pour l'orientation est-ouest. Si la majorité des capteurs a été placée sur des versants exposés au sud, les orientations est-ouest sont plus variées. Les températures minimales et maximales moyennes enregistrées par les 20 capteurs ont ainsi été confrontés aux valeurs des deux composantes U et V de l'orientation.

X.1.3.1. Températures minimales

Une relation linéaire relativement faible existe entre l'orientation nord-sud et la température minimale moyenne (Figure X.3a) avec un R^2 de 0,21 (valeur-p < 0,05). La pente de la droite de régression étant négative, la température minimale diminue avec des orientations plus septentrionales. Une nouvelle fois, Roc_tt6 et Roc_tt7 (orientations sud) se démarquent avec des températures minimales fraîches, ceci étant dû à leur situation en bas

de coteau. Bea_tt2 connaît une température minimale moyenne relativement élevée malgré l'orientation ouest de la parcelle, mais il semble que son orientation a peu d'influence étant donné que ce capteur est en haut de parcelle à une altitude relativement élevée et donc est très souvent dans la couche d'air plus doux lors d'inversions thermiques.

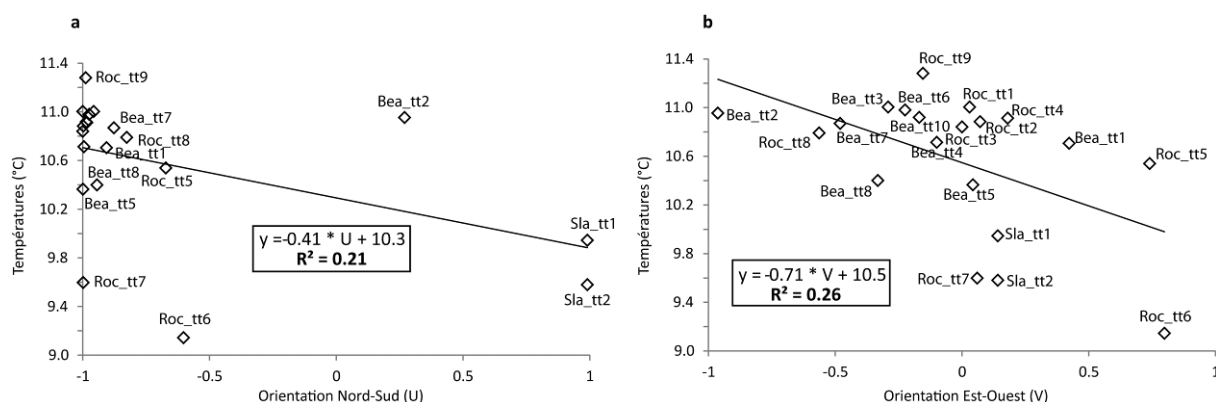


Figure X.3. Graphiques cartésiens représentant la température minimale moyenne de la saison végétative 2009 de tous les capteurs en fonction de l'orientation Nord-Sud (a/valeur-p = 0,05) et Est-Ouest (b/valeur-p = 0,02).

Données : [TERVICLIM/INRA-CTV]

La relation linéaire est légèrement meilleure entre la température minimale moyenne et l'orientation Est-Ouest (Figure X.3.b) avec un R^2 de 0,26 (valeur-p < 0,02). La pente est également négative, indiquant une décroissance de la température maximale en allant vers des orientations est, ce qui pourrait s'expliquer par les advections d'air continental plus fraîches qui se font préférentiellement par l'est de la région.

X.1.3.2. Températures maximales

Aucune relation significative n'existe entre les températures maximales moyennes et l'orientation nord-sud (Figure X.4a). En revanche, une faible relation a été trouvée avec l'orientation Est-Ouest (Figure X.4b) avec un R^2 de 0,13 (valeur-p < 0,1). La pente de la droite de régression est positive, indiquant une augmentation de la température en allant vers des orientations est qui sont en général privilégiées en viticulture en Europe de l'ouest. La vigne bénéficie alors du soleil dès le matin et est protégée des flux d'ouest dominants dans ces régions. Bea_tt5 et Roc_tt6 s'écarte une fois de plus de la tendance générale du modèle avec des températures nettement plus douces. Les raisons ont été expliquées précédemment dans ce chapitre.

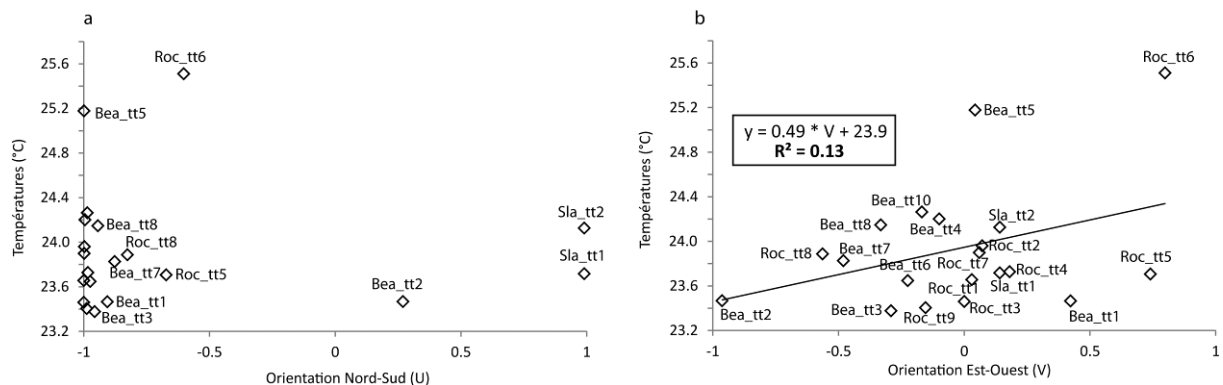


Figure X.4. Graphiques cartésiens représentant la température maximale moyenne de la saison végétative 2009 de tous les capteurs en fonction de l'orientation Nord-Sud (a/non-significatif) et Est-Ouest (b/valeur-p = 0,1).

Données : [TERVICLIM/INRA-CTV]

L'ensemble des éléments descriptifs de la topographie du terrain retenus semble avoir une part explicative dans la variabilité spatiale des températures moyennes minimales et maximales du site des Coteaux du Layon. Nous choisissons donc de conserver tous ces éléments descripteurs comme facteurs explicatifs dans les futurs modèles multicritères que nous allons construire. Nous ne pouvons pas exclure que certains facteurs puissent résumer des processus similaires jouant dans la variabilité spatiale de la température. La Figure X.5 présente donc la matrice de corrélation entre les différents éléments retenus. Les relations sont non significatives entre la pente et l'orientation nord-sud (U) et entre les deux composantes de l'orientation (U et V). Des relations faiblement significatives existent entre les autres paramètres. Des redondances majeures entre les descripteurs seront ainsi évitées même si tous les descripteurs retenus ne sont pas totalement indépendants. D'autres descripteurs auraient pu être intégrés, comme l'occupation du sol, l'ouverture du paysage, la nature du sol, la concavité du relief... Cependant, certains tests réalisés n'ont pas été concluants et la base de données de l'INRA sur le sol des UTB, après réflexion, n'était pas adaptée dans le cadre d'un modèle explicatif de la variabilité spatiale de la température de surface.

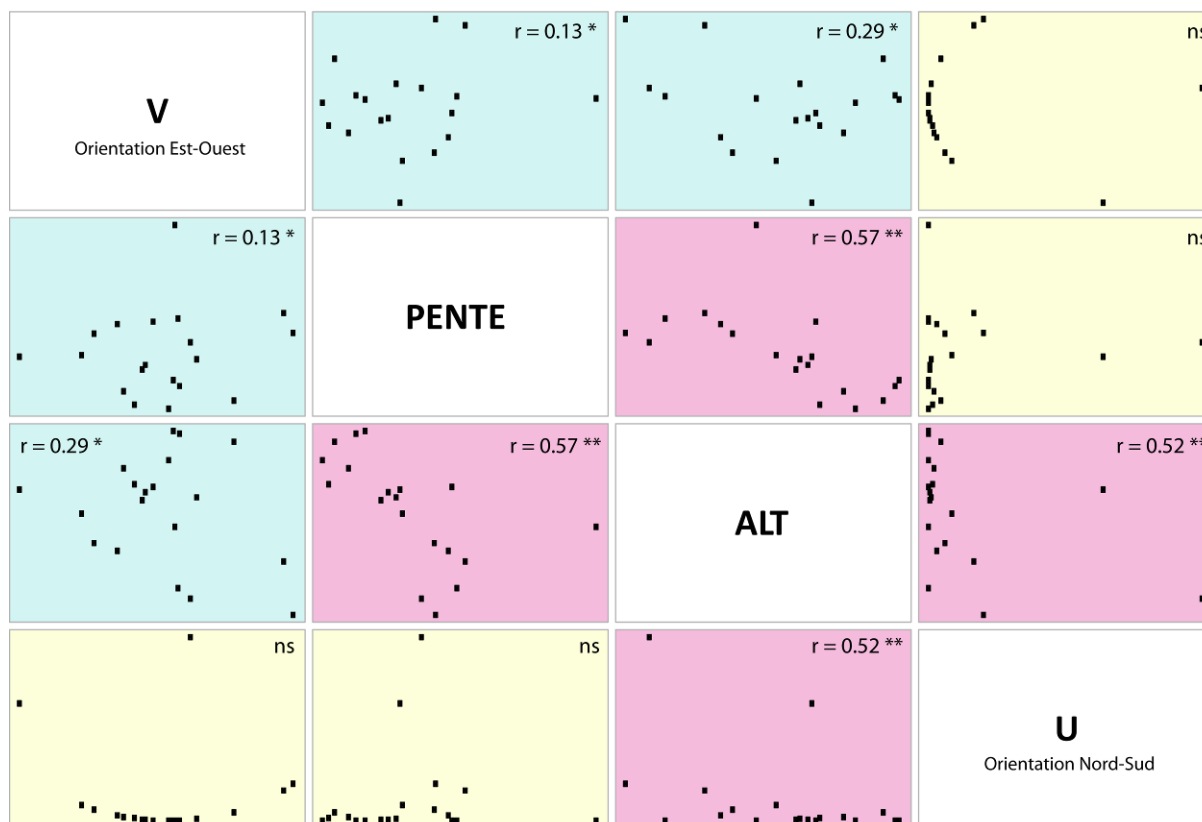


Figure X.5. Matrice des corrélations entre les prédicteurs retenus pour la construction du modèle (* : valeur- $p = 0,02$; ** : valeur- $p = 0,2$ et ns : non significatif)

Données : [INRA-CTV]

X.2. Modélisation des températures minimales

La spatialisation des températures minimales au sein des parcelles viticoles peut être un outil très utile en viticulture. En effet, la modélisation spatiale des températures minimales peut permettre notamment de localiser les zones à risque de gel, ou les conditions thermiques nocturnes en période de maturation, de manière continue dans l'espace. Les inversions thermiques fréquentes dans la vallée de Layon entraînent des contrastes thermiques relativement importants entre les parcelles en fond de vallée et celles sur les plateaux. Cette variabilité des températures, enregistrées par les capteurs, a été montrée précédemment. Nous essayons, dans la suite de ce chapitre, de construire des modèles multicritères, dans un premier temps, au pas de temps mensuel, et dans un second temps, au pas de temps journalier, afin de spatialiser la température minimale.

X.2.1. Modélisation des moyennes mensuelles des températures minimales

Dans un premier temps, les moyennes mensuelles des températures minimales ont été modélisées afin notamment de comparer les modèles entre les différents mois de la saison végétative 2009. Cette modélisation doit également montrer quels sont les facteurs explicatifs qui prévalent dans la variabilité spatiale de la moyenne mensuelle des températures minimales.

X.2.1.1. Présentation des différents modèles obtenus

Les moyennes mensuelles des températures minimales de la saison végétative 2009 ont été calculées du mois de mai au mois d'octobre. La régression multiple pas à pas a donc été lancée afin d'expliquer la variabilité de ces moyennes, en fonction des différents paramètres topographiques retenus précédemment. Le Tableau X.1 présente les résultats mois par mois avec les différents modèles retenus par la régression multiple.

Tableau X.1. Résultats (constante, coefficients de régression standardisés et qualité du modèle) des régressions multiples réalisées pour chaque mois, de mai à octobre 2009 sur les moyennes mensuelles des températures minimales enregistrées par les 20 capteurs de température.

| | | MAI 2009 | JUIN 2009 | JUILLET 2009 | AOUT 2009 | SEPTEMBRE 2009 | OCTOBRE 2009 |
|----------------------------|---------------------------------|----------|-----------|--------------|-----------|----------------|--------------|
| Coefficients de régression | ALT | 0.72 | 0.68 | 0.69 | 0.70 | 0.72 | 0.70 |
| | PENTE | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| | ORIENTATION N/S | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | -0.19 |
| | ORIENTATION E/O | -0.26 | -0.30 | -0.35 | -0.33 | -0.26 | -0.27 |
| | CONSTANTE | 8.62 | 10.65 | 11.48 | 11.56 | 9.86 | 5.83 |
| | QUALITE (R ² ajusté) | 0.66 | 0.64 | 0.71 | 0.70 | 0.66 | 0.81 |

Données : [TERVICLIM/INRA-CTV]

L'altitude et l'orientation est-ouest sont les deux facteurs intervenant systématiquement pour chacun des modèles mensuels. La pente, qui n'était que faiblement corrélée avec la température minimale (Cf X.1.2.2) ne ressort donc pas dans les différents modèles mensuels. Ce paramètre est peut-être déjà pris en compte, en partie, par l'altitude. Enfin l'orientation nord-sud ne ressort que dans le modèle du mois d'octobre 2009. La qualité générale des modèles mensuels est plus que correcte puisque ils arrivent à expliquer, entre 64% et 81% de la variabilité des températures minimales moyennes mensuelles. Enfin, les différentes constantes des équations des modèles se rapprochent des moyennes mensuelles calculées sur l'ensemble des capteurs. Les équations des 6 modèles sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Mai 2009 :} & \quad T_n = 0,02 * \text{ALT} - 0,29 * V + 8,62 \\ \text{Juin 2009 :} & \quad T_n = 0,02 * \text{ALT} - 0,42 * V + 10,65 \\ \text{Juillet 2009 :} & \quad T_n = 0,02 * \text{ALT} - 0,45 * V + 11,48 \\ \text{Août 2009 :} & \quad T_n = 0,02 * \text{ALT} - 0,49 * V + 11,56 \\ \text{Septembre 2009 :} & \quad T_n = 0,02 * \text{ALT} - 0,36 * V + 9,86 \\ \text{Octobre 2009 :} & \quad T_n = 0,03 * \text{ALT} - 0,26 * U - 0,57 * V + 5,83 \end{aligned}$$

Les paramètres interviennent avec des ordres de grandeur différents. En effet, les coefficients de régression standardisés associés à l'altitude sont proche de 0,7 alors que ceux associés aux composantes de l'orientation sont nettement inférieurs, compris entre -0,19 et -0,35. Cette observation montre que l'altitude est le premier facteur, selon les modèles, expliquant la variabilité de la température. Le signe de ces coefficients est positif pour l'altitude, démontrant les nombreuses nuits avec inversions thermiques. Celui, étant associé à l'orientation est-ouest (V) est négatif, montrant une tendance à des températures plus fraîches sur les parcelles exposées à l'est. Enfin, le modèle avec la meilleure qualité est celui d'octobre 2009 avec notamment un poids plus important de l'altitude (0,7) et de

l'orientation est-ouest (-0,27) par rapport à l'orientation nord-sud (-0,19). Le signe du coefficient de régression de ce dernier paramètre étant négatif, les températures minimales de ce mois, ont eu tendance à être inférieures sur les coteaux exposés au nord. La Figure X.6 présente la carte de la moyenne des températures minimales spatialisée pour le mois d'octobre 2009, mois pour lequel le modèle explique le mieux la variabilité spatiale de la température minimale. Cette carte confirme surtout l'effet des inversions thermiques à répétition ce mois-ci avec des bas de coteau plus frais et des hauts de coteau et plateaux avec des températures plus élevées. L'amplitude maximale de la moyenne des températures minimales modélisée est de 3,5°C entre la vallée et les plateaux. Cette valeur est relativement importante pour une valeur moyenne, notamment en raison du faible dénivelé et de la surface limitée du site viticole.

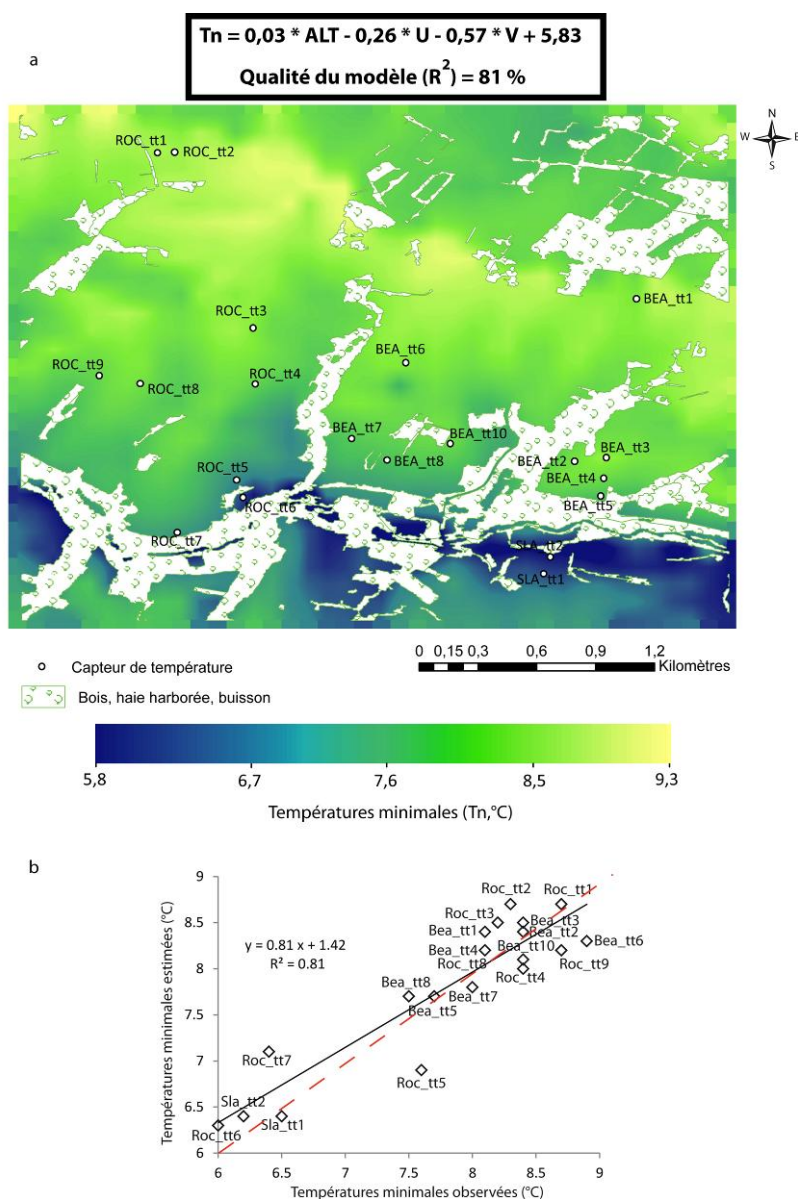


Figure X.6. Spatialisation de la température minimale pour le mois d'octobre 2009 (a) et graphique cartésien des températures minimales enregistrées par les capteurs et des températures minimales estimées par le modèle multicritères (b).

Données : [TERVICLIM/INRA-CTV]

Le bulletin climatologique mensuel de Météo-France qualifie ce mois de relativement sec avec des précipitations insuffisantes. Cependant, différents régimes de temps se sont succédés avec notamment un flux de nord-ouest en tout début de mois, tournant au sud-ouest en cours de première décade, ce qui a facilité les entrées d'air maritime humide et doux. Cette observation peut expliquer le fait que l'orientation est-ouest puisse ressortir dans le modèle retenu par la régression multiple pour ce mois. Un refroidissement, lié à une orientation du flux au nord-est, a ensuite eu lieu en deuxième décade, entraînant une baisse des températures minimales. Cette deuxième observation peut sans doute être reliée à la retenue du facteur explicatif « orientation Nord-Sud » par le modèle qui a pu influencer au moins temporairement les champs thermiques des minimales dans les Coteaux du Layon. Enfin, le mois s'est terminé avec le rétablissement à un flux de sud-ouest. Les flux n'étant pas exclusivement méridiens ou exclusivement zonaux durant ce mois, les deux composantes de l'orientation ressortent assez logiquement dans le modèle retenu. Enfin, si le début de mois a été plus humide, la masse d'air s'est rapidement asséchée par la suite et Angers a cumulé 141 h d'ensoleillement soit 30 h de plus que la normale avec un cumul de deuxième décade qui avoisine le record de celle d'octobre 2007. Les nuits claires ont donc été nombreuses et la station de Chaume (réseau TERVICLIM) nous indique des vents faibles durant tout le mois avec une rafale maximale de 3,4 m/s, cette station étant toutefois en bas de coteau et relativement abritée. La rose des vents de la station d'Angers confirme cette observation avec une fréquence très faible des vents supérieurs à 4 m/s. Les inversions thermiques ont donc pu être fréquentes dans les Coteaux du Layon.

X.2.1.2. Etude des résidus de l'ensemble des modèles multicritères mensuels

Les résidus moyens des capteurs ont été calculés (Figure X.7) et restent relativement faibles, aussi bien dans les valeurs positives que négatives et sont compris dans l'intervalle [-1 ; 1]. Les résidus positifs correspondent à une sous-estimation du modèle et les résidus négatifs à une surestimation. Les ordres de grandeur des résidus restent faibles et proches de la résolution (0,4°C) des capteurs utilisés. Les résidus moyens les plus importants sont observés pour les capteurs Roc_tt5, Roc_tt6, Roc_tt7 et Roc_tt9. Une surestimation de la moyenne des températures minimales est constaté pour les capteurs Roc_tt6 et Roc_tt7. Ces deux capteurs sont situés en bas de coteaux, parmi les capteurs aux altitudes les plus faibles. Les modèles semblent ainsi sous-estimer le refroidissement nocturne lié aux inversions thermiques. Enfin, les capteurs Roc_tt5 et Roc_tt9 ont des résidus moyens positifs, indiquant une sous-estimation des modèles. La couche d'air froid est donc un peu plus épaisse sur ces coteaux, selon les modèles que dans la réalité. Il est néanmoins difficile de dégager la raison de cette observation car ces deux capteurs n'ont pas véritablement de caractéristiques communes quant à leur position. Encore une fois, ceci est probablement dû au fait que l'on essaie d'expliquer des résidus de modèle très faibles qui sont comparables à la résolution des capteurs de température (0,4°C).

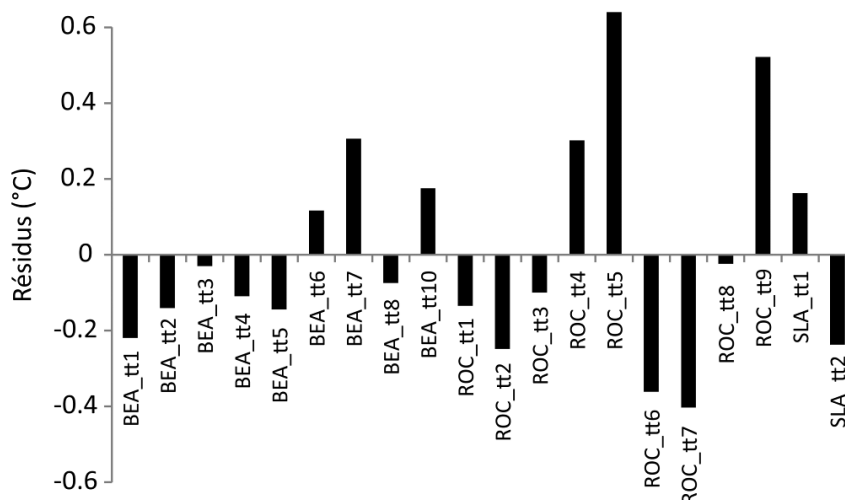


Figure X.7. Résidus moyens (observé-simulé), issus de la modélisation multicritères des moyennes des températures minimales journalières, pour chaque capteur dans le site des Coteaux du Layon. Données : [TERVICLIM]

X.2.2. Modélisation des températures minimales journalières

Dans un second temps, les températures minimales journalières ont été modélisées pour la saison végétative 2009. Une sélection de journées avec une importante variabilité spatiale de la température minimale a été effectuée (Cf. Chapitre VI) en travail préalable à la modélisation, afin d'éliminer les journées aux champs thermiques homogènes et où l'explication de la variabilité par les facteurs topographiques devenait plus délicate. Le nombre de journées modélisables est ainsi de 47.

X.2.2.1. Résultats des modélisations

Les résultats des régressions journalières des 47 journées sont présentés dans le Tableau X.2. Sur ces 47 journées présélectionnées, seulement 3 n'arrivent pas à être reproduites par un modèle car aucune relation significative n'existe entre les descripteurs et la température minimale : les 12 juillet, 28 août et 1^{er} septembre. Pour ces 3 journées, les stations de Chaume et Beaulieu indiquent des précipitations. L'analyse des bulletins climatiques journaliers de Météo-France montre que ces 3 journées sont toutes marquées par l'arrivée d'un front froid par le nord-ouest du pays qui a engendré une certaine couverture nuageuse sur les Pays-de-la-Loire et des précipitations à la station d'Angers. Ce temps plus perturbé peut expliquer que les facteurs locaux ne prévalaient pas sur ces journées. Pour les autres dates, les différents modèles arrivent à expliquer plus de 70% de la variabilité de la température minimale pour près de 2 nuits sur trois (soit 31 jours). Le mois d'octobre 2009 était le mieux modélisé parmi les modèles mensuels et on retrouve 15 journées de ce mois qui sont reproduites avec un R^2 supérieur à 0,5. La vérification des conditions synoptiques pour l'ensemble des journées, montre des conditions anticycloniques bien présentes sur les journées les mieux reproduites par les modèles ($R^2 > 0,5$), alors que les journées les moins bien reproduites correspondent à des situations globalement anticycloniques sur plusieurs jours mais avec des faiblesses des hautes pressions engendrant le passage de fronts plus ou moins actifs par le nord-ouest du pays.

Tableau X.2. Résultats (constante, coefficients de régression standardisés et qualité du modèle) des régressions multiples réalisées pour les 47 journées avec variabilité spatiale des températures marquées, sur les températures minimales enregistrées par les 20 capteurs de température.

| DATE | ALTITUDE | PENTE | ORIENTATION N/S | ORIENTATION E/O | CONSTANTE | QUALITE (R ² ajusté) |
|------------|----------|-------|-----------------|-----------------|-----------|---------------------------------|
| 29/10/2009 | 0.89 | -0.12 | ---- | ---- | 0.89 | 0.93 |
| 14/06/2009 | 0.91 | ---- | ---- | -0.15 | 12.21 | 0.92 |
| 21/05/2009 | 0.92 | ---- | ---- | -0.13 | 7.31 | 0.92 |
| 23/09/2009 | 0.90 | ---- | ---- | -0.17 | 6.84 | 0.91 |
| 06/09/2009 | 0.98 | ---- | 0.12 | ---- | 4.14 | 0.91 |
| 30/10/2009 | 0.76 | ---- | -0.15 | -0.27 | 2.15 | 0.89 |
| 12/08/2009 | 0.86 | ---- | ---- | -0.22 | 8.24 | 0.88 |
| 20/05/2009 | 0.94 | ---- | ---- | ---- | 3.80 | 0.87 |
| 02/05/2009 | 0.87 | ---- | ---- | -0.19 | 2.38 | 0.87 |
| 17/06/2009 | 0.90 | ---- | ---- | -0.17 | 6.72 | 0.87 |
| 13/10/2009 | 0.88 | ---- | ---- | -0.17 | 2.40 | 0.87 |
| 27/06/2009 | 0.89 | ---- | ---- | -0.17 | 9.23 | 0.86 |
| 23/10/2009 | 0.89 | ---- | ---- | -0.14 | 2.00 | 0.86 |
| 24/08/2009 | 0.87 | ---- | ---- | -0.17 | 11.76 | 0.86 |
| 18/04/2009 | 0.88 | ---- | ---- | -0.14 | 1.74 | 0.86 |
| 19/10/2009 | 0.94 | 0.14 | ---- | -0.23 | -3.04 | 0.85 |
| 16/06/2009 | 0.71 | -0.17 | ---- | -0.27 | 7.96 | 0.82 |
| 23/04/2009 | 0.91 | ---- | ---- | ---- | 2.77 | 0.82 |
| 08/07/2009 | 0.77 | ---- | ---- | -0.32 | 7.87 | 0.81 |
| 08/09/2009 | 0.81 | ---- | ---- | -0.25 | 7.23 | 0.81 |
| 07/09/2009 | 0.79 | ---- | ---- | -0.27 | 4.48 | 0.81 |
| 29/09/2009 | 0.90 | ---- | ---- | ---- | 6.34 | 0.80 |
| 15/08/2009 | 0.90 | ---- | ---- | ---- | 10.50 | 0.80 |
| 27/10/2009 | 0.67 | ---- | -0.19 | -0.30 | 2.47 | 0.79 |
| 18/10/2009 | 0.89 | ---- | ---- | ---- | -0.92 | 0.78 |
| 30/08/2009 | 0.74 | ---- | ---- | -0.31 | 5.03 | 0.76 |
| 21/08/2009 | 0.88 | ---- | ---- | ---- | 8.69 | 0.76 |
| 03/10/2009 | 0.70 | ---- | ---- | -0.36 | 1.48 | 0.74 |
| 05/09/2009 | 0.88 | 0.25 | ---- | -0.27 | 3.59 | 0.74 |
| 28/09/2009 | 0.81 | ---- | ---- | -0.17 | 5.61 | 0.74 |
| 28/10/2009 | 0.86 | ---- | ---- | ---- | 3.07 | 0.72 |
| 11/10/2009 | 0.74 | ---- | ---- | -0.24 | 8.33 | 0.68 |
| 16/10/2009 | 0.42 | ---- | -0.29 | -0.47 | -0.93 | 0.66 |
| 29/06/2009 | 0.61 | ---- | ---- | -0.41 | 13.97 | 0.64 |
| 26/05/2009 | 0.63 | ---- | ---- | -0.34 | 6.73 | 0.59 |
| 25/06/2009 | 0.79 | ---- | ---- | ---- | 11.69 | 0.57 |
| 02/10/2009 | 0.76 | ---- | ---- | ---- | 5.79 | 0.56 |
| 17/10/2009 | 0.42 | ---- | -0.27 | -0.40 | 1.72 | 0.55 |
| 12/10/2009 | 0.27 | ---- | -0.37 | -0.46 | 7.02 | 0.52 |
| 25/10/2009 | 0.45 | ---- | -0.28 | -0.31 | 5.99 | 0.51 |
| 04/09/2009 | 0.67 | ---- | ---- | ---- | 7.54 | 0.42 |
| 15/06/2009 | ---- | -0.56 | ---- | -0.32 | 14.94 | 0.40 |
| 10/10/2009 | 0.60 | ---- | ---- | ---- | 9.41 | 0.33 |
| 11/08/2009 | ---- | -0.45 | ---- | ---- | 17.06 | 0.16 |
| 12/07/2009 | ---- | ---- | ---- | ---- | 15.83 | 0.00 |
| 28/08/2009 | ---- | ---- | ---- | ---- | 14.72 | 0.00 |
| 01/09/2009 | ---- | ---- | ---- | ---- | 14.22 | 0.00 |

Données : [TERVICLIM/INRA-CTV]

Dans le détail, l'altitude intervient pratiquement pour chaque journée et le coefficient de régression est positif, indiquant des cas d'inversions thermiques systématiques. La valeur des coefficients de régression standardisés, associés à l'altitude, sont pratiquement dans tous les cas très nettement supérieurs aux coefficients de régression des autres variables. L'altitude est donc la première variable explicative de la variabilité de la température minimale. La pente n'intervient que dans 6 cas avec un coefficient de régression négatif. L'orientation nord-sud (U) intervient pour 7 journées avec des coefficients négatifs sauf le 6 septembre. Enfin, l'orientation est-ouest (V) ressort pour la plupart des journées modélisées avec des coefficients de régression systématiquement négatifs, indiquant une baisse de la température pour les capteurs avec une orientation est.

La Figure X.8 présente les résultats de la spatialisation de la température minimale du 29 octobre 2009, date pour laquelle le modèle explique la plus grande part de variabilité de la température minimale. L'altitude et la pente sont les deux facteurs explicatifs ressortant pour cette journée. Le bulletin climatique journalier de Météo-France reporte une puissante dorsale en altitude qui génère des conditions anticycloniques en surface. La station de Chaume a enregistré ce jour-là un vent moyen de 0,2 m/s et une rafale maximale de seulement 1.7 m/s. Les conditions étaient donc réunies pour avoir des conditions radiatives dans les coteaux du Layon et donc la mise en place d'une inversion thermique. Le 29 octobre 2009, les capteurs ont enregistrées des températures minimales comprises entre 2,2 et 7,8°C. Les températures modélisées sont comprises sur l'ensemble du site entre 1,9 et 8,7°C, soit une amplitude proche de 7°C. Le dénivelé étant proche de 80 m entre le Layon et les plateaux, le gradient thermique était cette nuit-là d'environ 0,8°C/100 m. Les bas-fonds n'étaient pas loin de la gelée alors que de l'air plus doux circulait sur les plateaux. La comparaison simulé/observé (Figure X.8.b) montre que la droite de régression est très proche de la première bissectrice, traduisant le fait qu'aucune dérive du modèle n'est constaté et que le modèle reproduit bien les valeurs extrêmes aussi bien dans les valeurs hautes que basses.

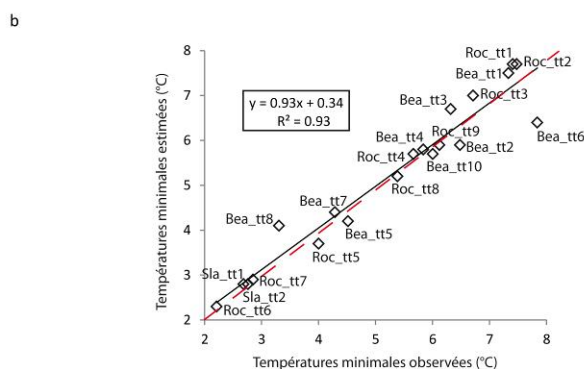
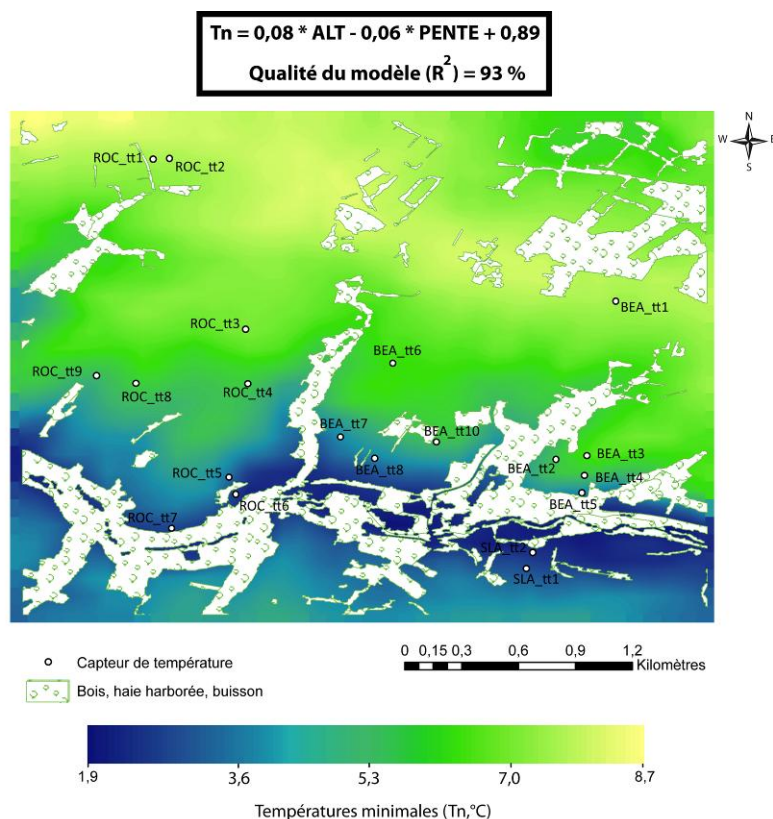


Figure X.8. Spatialisation de la température minimale pour la journée du 29 octobre 2009 (a) et graphique cartésien des températures minimales enregistrées par les capteurs et des températures minimales estimées par le modèle multicritères (b).

Données : [TERVICLIM/INRA-CTV]

X.2.2.2. Etude des résidus sur l'ensemble des modèles multicritères journaliers

L'analyse des résidus de l'ensemble des journées par capteurs (Figure X.9) montre que la plupart sont situés entre -1 et 1°C mais leur étendue n'est pas toujours la même entre les capteurs. Par exemple, le capteur Bea_tt1 a une amplitude des résidus beaucoup plus importante que le capteur Bea_tt4. Il est intéressant de noter également pour ces deux capteurs que la température minimale est surestimée pour le capteur Bea_tt1 dans environ 75% des cas alors que la médiane est proche de 0 pour Bea_tt4. Le capteur Bea_tt1 est situé sur un plateau à 90 m alors que Bea_tt4 est à mi-coteau à 73 m. Ce sont deux situations qui tendraient à montrer que le modèle surestime dans la plupart des cas les températures sur les plateaux. L'analyse des résidus des capteurs Roc_tt1 et Roc_tt2 confirme cette hypothèse avec des températures également surestimées dans 75% des cas. Nous avons vu dans la première partie du chapitre que, dans certains cas, l'inversion était limitée à des altitudes

inférieures à 80 m. Au-delà, la température décroissait de nouveau. Le modèle linéaire est donc dans certains cas limité pour reproduire les températures sur l'ensemble de l'échelle altitudinale. Un modèle non linéaire donnerait sans doute de meilleurs résultats. Des cas de surestimations fréquentes sont observées également pour des capteurs de bas coteaux tels que pour Roc_tt6, Roc_tt7 et Sla_tt2 même si la plupart des résidus sont compris entre 0 et -1°C donc faibles. Cependant pour certaines journées ces surestimations sont beaucoup plus marquées.

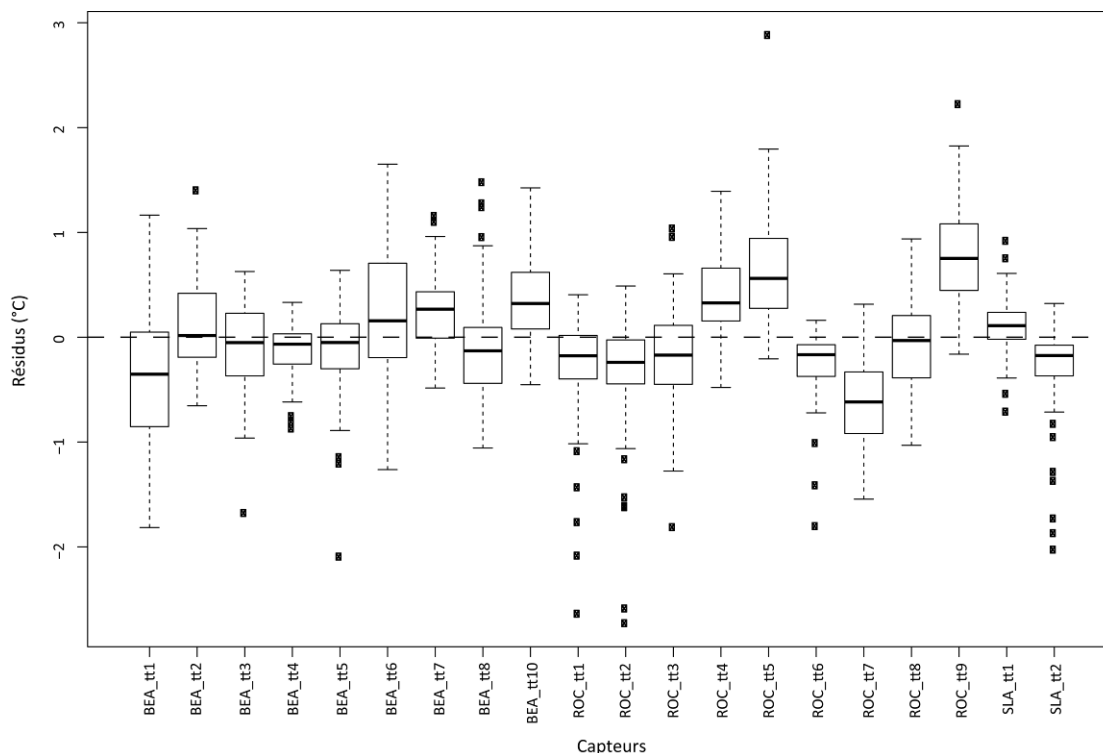


Figure X.9. Boîtes à moustache représentant la dispersion des résidus (observé-simulé), issus de la modélisation multicritères des températures minimales journalières, pour chaque capteur dans le site des Coteaux du Layon.

Données : [TERVICLIM-INRA-CTV]

X.3. Modélisation des températures maximales

La modélisation spatiale des températures maximales a également été réalisée au pas de temps mensuel et journalier. Cette modélisation peut être utile pour repérer les zones des coteaux où les températures sont les plus élevées ou les plus basses, notamment en période de maturation du raisin. Lors d'épisode caniculaire, il est également intéressant de spatialiser la température maximale pour repérer les champs thermiques supérieurs au seuil de 35°C. Cependant, nous le verrons, la modélisation de la température maximale grâce aux facteurs topographiques est plus complexe que pour la température minimale.

X.3.1. Modélisation des moyennes mensuelles des températures maximales

Comme pour les températures minimales, les moyennes mensuelles des températures maximales ont d'abord été modélisées à un pas de temps mensuel sur la saison végétative 2009.

X.3.1.1. Présentation des différents modèles obtenus

La température maximale moyenne des mois de la saison végétative 2009 a été modélisée et les différents modèles retenus par la régression multiple sont présentés dans le Tableau X.3. La qualité des différents modèles mensuels est inférieure à celle des modèles de la température minimale.

Tableau X.3. Résultats (constante, coefficients de régression standardisés et qualité du modèle) des régressions multiples réalisées pour chaque mois, de mai à octobre 2009 sur les moyennes mensuelles des températures maximales enregistrées par les 20 capteurs de température.

| | | MAI 2009 | JUIN 2009 | JUILLET 2009 | AOUT 2009 | SEPTEMBRE 2009 | OCTOBRE 2009 |
|---------------------------------|-----------------|----------|-----------|--------------|-----------|----------------|--------------|
| Coefficients de régression | ALT | -0.60 | ---- | ---- | ---- | ---- | -0.81 |
| | PENTE | 0.37 | 0.72 | 0.61 | 0.55 | 0.54 | ---- |
| | ORIENTATION N/S | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | -0.55 |
| | ORIENTATION E/O | ---- | ---- | 0.26 | ---- | ---- | ---- |
| | CONSTANTE | 21.70 | 24.65 | 26.33 | 28.49 | 23.90 | 20.62 |
| QUALITE (R ² ajusté) | | 0.72 | 0.49 | 0.42 | 0.26 | 0.25 | 0.43 |

Données : [TERVICLIM/INRA-CTV]

Le mois où le modèle arrive à expliquer la plus grande part de variance des températures maximales et le mois de mai puisque 72% de la variabilité des températures est expliqué ce mois-ci, mais l'étendue des températures moyennes entre le capteur le plus froid et le plus chaud n'était que de 1,7°C ce mois-ci. Une spatialisation de la température pour le mois de mai 2009 n'aurait donc que peu de sens, étant donné également l'incertitude que peut impliquer la précision du capteur (0,4°C). Les qualités de modèle les moins bonnes sont pour les mois d'août et septembre. La pente, comme on l'avait vu sur les relations linéaires simples, ressort dans tous les modèles sauf en octobre 2009. Elle est liée positivement à la température maximale avec des coefficients de régression tous positifs. Ceci indique que plus la pente est marquée, plus il fait chaud. Du fait du faible dénivelé du site, l'altitude ne ressort que pour les mois de mai et octobre avec des coefficients de régression négatifs et un poids supérieur aux autres variables. Enfin l'orientation nord-sud ressort dans le modèle du mois d'octobre 2009 avec un régresseur négatif et l'orientation est-ouest pour le mois de juillet avec un régresseur positif. Il est intéressant de noter que le facteur explicatif « orientation est-ouest » avait un coefficient de régression négatif pour les modèles relatifs à la température minimale mais pour la température maximale le signe est opposé. Ce constat montre que les orientations est bénéficient de températures plus élevées en journée contrairement à la nuit où la situation est inverse.

Les équations des 6 modèles sont les suivantes :

| | |
|------------------|---|
| Mai 2009 : | $T_n = -0,01 * ALT + 0,04 * PENTE + 21,7$ |
| Juin 2009 : | $T_n = 0,09 * PENTE + 24,65$ |
| Juillet 2009 : | $T_n = 0,11 * PENTE + 0,46 * V + 26,33$ |
| Août 2009 : | $T_n = 0,11 * PENTE + 28,49$ |
| Septembre 2009 : | $T_n = 0,09 * PENTE + 23,90$ |
| Octobre 2009 : | $T_n = -0,02 * ALT - 0,51 * U + 20,62$ |

La spatialisation de la température maximale à l'aide du meilleur modèle, celui du mois de mai 2009, n'est pas réalisé étant donné les raisons invoquées précédemment. Nous choisissons de présenter les résultats pour le mois de juillet (Figure X.10) qui est un mois clé pour la véraison des raisins. Seulement 42% de la variabilité spatiale de la température est expliquée par le modèle qui retient comme première variable explicative la pente puis l'orientation est-ouest. D'autres éléments, d'échelles d'influence peut-être plus larges (circulation atmosphérique, flux synoptiques...) ou d'autres facteurs locaux non inclus dans notre modèle ont pu jouer durant ce mois de juillet. Le graphique cartésien des données observées et simulées montre que le modèle dérive avec une sous-estimation des valeurs maximales observées, comme pour les capteurs Bea_tt5 et Roc_tt6. Ces deux capteurs, étant bien exposés et abrités du vent, les températures maximales ont tendance à être particulièrement élevées. La prise en compte des zones d'abri (ouverture du paysage) pourrait sans doute aider à améliorer le modèle. Ce modèle serait donc améliorable, d'autant plus que les valeurs des moyennes des températures maximales, enregistrées par les capteurs Bea_tt5 et Roc_tt6, augmentent nettement la valeur du R^2_{aj} .

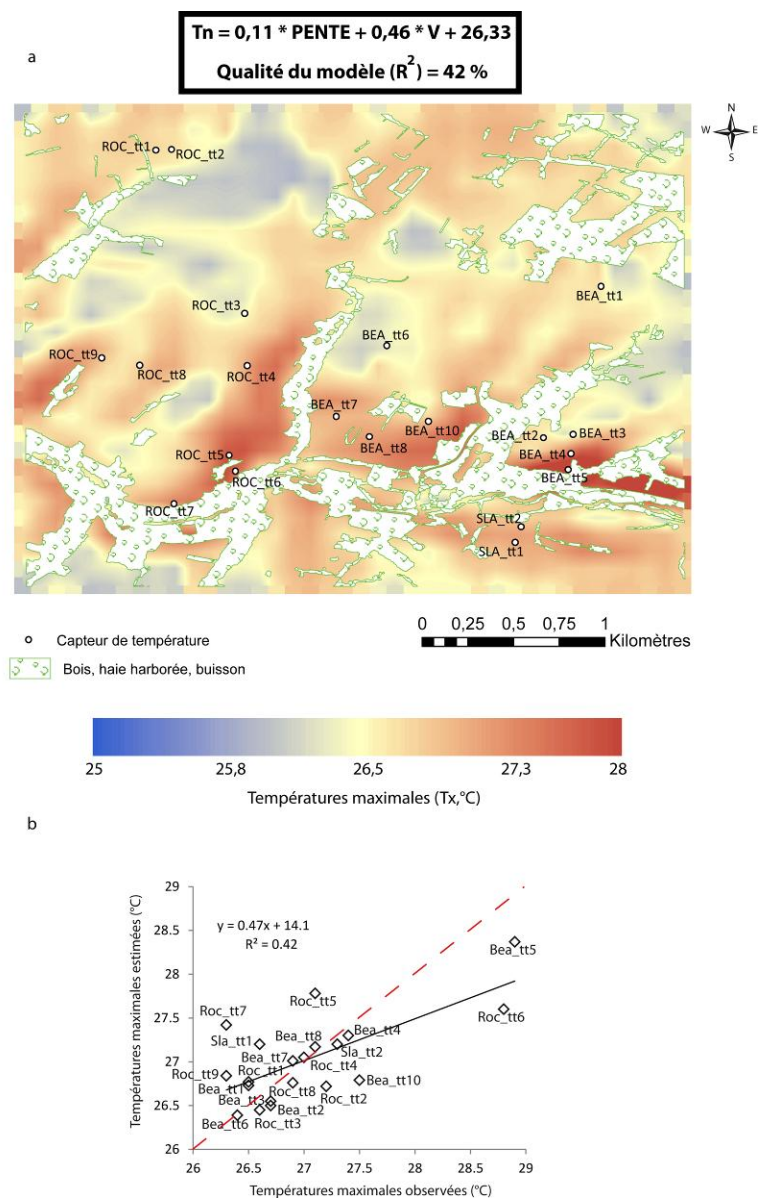


Figure X.10. Spatialisation de la moyenne des températures maximales du le mois de juillet 2009 (a) et graphique cartésien des températures maximales enregistrées par les capteurs et des températures maximales estimées par le modèle multicritères (b).

Données : [TERVICLIM/INRA-CTV]

X.3.1.2. Etude des résidus de l'ensemble des modèles multicritères journaliers

L'étude des résidus moyens (Figure X.11) montre que ces derniers sont majoritairement compris entre -1°C et 1°C . Cependant, comme pour les moyennes mensuelles des températures minimales, les moyennes mensuelles des températures maximales de certains capteurs ont tendance à être plus ou moins surestimées ou sous-estimées. Les capteurs Roc_tt5, Roc_tt7 et Roc_tt9 ont les résidus négatifs les plus importants donc les modèles surestiment la valeur de la moyenne des températures pour l'ensemble des 7 mois de la saison végétative 2009. Ces capteurs sont sur des parcelles assez pentues et bien exposées, ce qui peut expliquer que le modèle prévoit des températures élevées mais dans le même temps, ces parcelles sont assez bien ventilées et le modèle ne prend pas en compte l'ouverture du paysage. Une nouvelle fois, la prise en compte de ce paramètre aiderait peut-être à améliorer ces différents modèles. En revanche, le résidu positif moyen le plus élevé

est observé pour le capteur Roc_tt6, traduisant une sous-estimation moyenne des modèles. Comme discuté précédemment, la position d'abri de ce capteur peut expliquer que le modèle reproduit mal la température maximale.

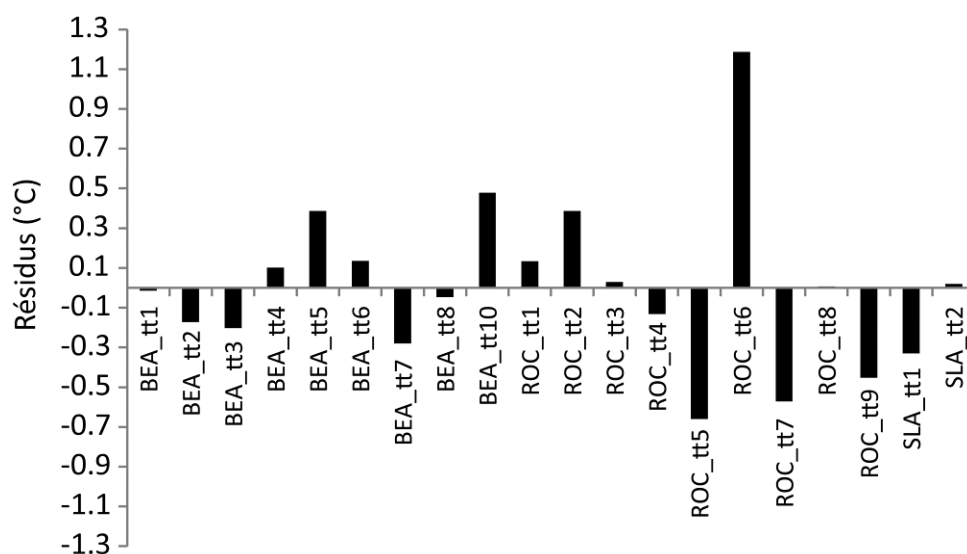


Figure X.11. Résidus moyens (observé-simulé), issus de la modélisation multicritères des moyennes mensuelles des températures maximales de la saison végétative 2009, pour chaque capteur dans le site des Coteaux du Layon.

Données : [TERVICLIM]

X.3.2. Modélisation des températures maximales journalières

Les températures maximales journalières ont été modélisées dans un second temps après une sélection des journées à la variabilité spatiale de la température maximale importante. Un total de 25 journées est ainsi modélisé.

X.3.2.1. Résultats des modélisations

Les résultats des régressions multiples appliquées sur les 25 journées de la saison végétative 2009 sont présentés dans le Tableau X.3. Les valeurs des coefficients de détermination des modèles journaliers sont très inférieures à celles des températures minimales. Les qualités sont parfois même inférieures à celles des modèles mensuels des températures maximales. La complexité des champs thermiques semble dépendre de très nombreux facteurs non pris en compte par nos modèles. Ces modèles journaliers font donc ressortir l'altitude pour 4 cas seulement mais de manière assez surprenante les régresseurs sont positifs pour 3 journées sur 4. La pente ressort pour l'ensemble des journées sauf 3 et ses régresseurs sont tous positifs, traduisant des températures plus élevées sur pentes fortes. L'orientation nord-sud est retenue par 7 modèles et les coefficients de régression sont tous négatifs, d'où des températures plus fraîches sur les versants nord. Enfin, l'orientation est-ouest ressort pour 10 modèles avec des régresseurs positifs qui expliquent des températures plus élevées sur les versants exposés à l'est.

Tableau X.4. Résultats [constante, coefficients de régression et qualité du modèle (R^2 ajusté)] des régressions multiples réalisées pour les 25 journées avec variabilité spatiale des températures marquées, sur les températures maximales enregistrées par les 20 capteurs de température.

| DATE | ALTITUDE | PENTE | ORIENTATION N/S | ORIENTATION E/O | CONSTANTE | QUALITE (R^2 ajusté) |
|------------|----------|-------|-----------------|-----------------|-----------|-------------------------|
| 08/07/2009 | ---- | 0.63 | ---- | ---- | 24.82 | 0.36 |
| 12/07/2009 | ---- | 0.61 | ---- | ---- | 26.49 | 0.34 |
| 09/08/2009 | ---- | 0.60 | -0.26 | ---- | 27.43 | 0.33 |
| 08/08/2009 | ---- | 0.39 | ---- | 0.44 | 26.53 | 0.32 |
| 14/08/2009 | 0.33 | 0.65 | ---- | 0.38 | 29.53 | 0.32 |
| 30/08/2009 | ---- | 0.59 | ---- | ---- | 28.26 | 0.31 |
| 24/09/2009 | ---- | 0.46 | ---- | 0.35 | 22.75 | 0.30 |
| 15/08/2009 | 0.49 | 0.69 | ---- | 0.33 | 34.27 | 0.30 |
| 18/08/2009 | 0.46 | 0.71 | ---- | 0.30 | 31.28 | 0.29 |
| 20/07/2009 | ---- | 0.57 | ---- | ---- | 28.30 | 0.29 |
| 28/07/2009 | ---- | 0.57 | ---- | ---- | 27.04 | 0.29 |
| 30/07/2009 | ---- | 0.44 | ---- | 0.33 | 25.49 | 0.27 |
| 16/08/2009 | ---- | 0.54 | -0.27 | ---- | 34.31 | 0.26 |
| 30/09/2009 | -0.53 | ---- | -0.63 | ---- | 26.03 | 0.26 |
| 12/08/2009 | ---- | 0.39 | -0.27 | 0.34 | 30.69 | 0.25 |
| 26/09/2009 | ---- | 0.44 | -0.40 | ---- | 23.34 | 0.24 |
| 03/08/2009 | ---- | 0.51 | ---- | ---- | 25.07 | 0.22 |
| 28/09/2009 | ---- | 0.32 | -0.32 | 0.33 | 25.10 | 0.21 |
| 17/08/2009 | ---- | 0.50 | ---- | ---- | 27.84 | 0.21 |
| 07/09/2009 | ---- | 0.48 | ---- | ---- | 31.21 | 0.18 |
| 23/09/2009 | ---- | 0.33 | -0.33 | 0.28 | 26.35 | 0.18 |
| 21/08/2009 | ---- | 0.46 | ---- | ---- | 26.48 | 0.17 |
| 05/08/2009 | ---- | 0.32 | ---- | ---- | 34.30 | 0.06 |
| 26/10/2009 | ---- | ---- | ---- | 0.31 | 19.29 | 0.05 |
| 22/09/2009 | ---- | ---- | ---- | ---- | 26.34 | 0.00 |

Données : [TERVICLIM/INRA-CTV]

X.3.2.2. Etude des résidus de l'ensemble des modèles multicritères

L'ensemble des résidus sont compris entre -2°C et 3°C , la majorité étant entre -1°C et 1°C (Figure X.12). Les capteurs avec la température maximale surestimée sont les mêmes que sur le pas de temps mensuel. Ce sont les capteurs situés sur les parcelles bien ventilés comme Bea_tt1 ou Bea_tt7. A l'inverse, les capteurs bien abrités comme Roc_tt5 et Bea_tt5 ont des résidus positifs et donc la température maximale de ces capteurs est souvent sous-estimée. L'étendue des résidus est également plus importante pour des capteurs comme Roc_tt1, Roc_tt2 ou encore Roc_tt7. Cette observation montre qu'en fonction de la succession des différents types de temps dans les Coteaux du Layon, ces capteurs réagissent différemment. Le niveau des valeurs de température enregistrées par ces capteurs dépend très certainement de la direction du vent et donc de la provenance du flux sur la région.

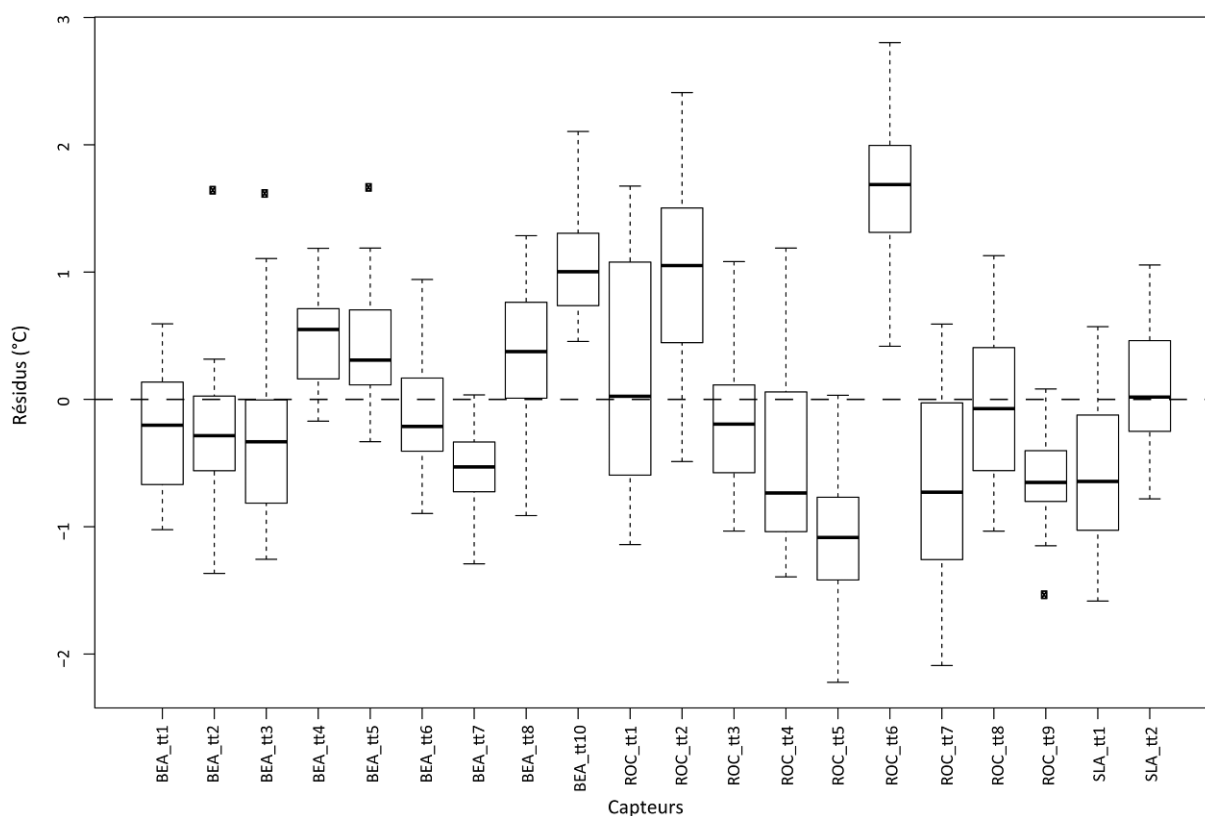


Figure X.12. Boîtes à moustache représentant la dispersion des résidus, issus de la modélisation multicritères des températures maximales journalières, pour chaque capteur dans le site des Coteaux du Layon.

Données : [TERVICLIM]

CONCLUSION DU CHAPITRE X

Ce chapitre a permis de quantifier les relations existantes entre les différents facteurs locaux liés à la topographie et la variabilité de la température dans le site expérimental des Coteaux du Layon. L'ensemble des modèles multicritères, réalisés ici, explique une part plus ou moins importante de la variabilité de la température, et suivant les mois ou les dates ces modèles sont perfectibles. La spatialisation de la température minimale est beaucoup moins complexe que celle de la température maximale. En effet, la part des facteurs locaux lors des nuits calmes, sans vent et avec ciel dégagé, est importante. Des inversions thermiques se mettent souvent en place et des contrastes thermiques marqués peuvent alors être observés entre la vallée et les plateaux. Cependant, nous avons vu que dans certains cas, les plateaux à une altitude supérieure à 70 m se retrouvaient au-dessus de la couche d'inversion et que la relation entre altitude et la température minimale n'était donc pas totalement linéaire sur l'ensemble de l'étendue altitudinale du site. Des modélisations non linéaires devraient être alors expérimentés afin d'améliorer la modélisation pour certaines journées ou mois. La spatialisation de la température maximale est beaucoup plus complexe. En journée, la turbulence de l'air se met en place, en lien avec l'énergie solaire et les inversions thermiques disparaissent. La relation avec l'altitude s'inverse donc mais pour le site des Coteaux du Layon, le dénivelé étant très faible, cette relation ne ressort pas comme évidente. Des facteurs comme l'inclinaison de la pente et son orientation vont expliquer en partie, la variabilité spatiale de la

température maximale. Dans les modèles mensuels et journaliers développés dans ce chapitre, nous avons vu que certainement d'autres éléments locaux devaient permettre de mieux modéliser les champs thermiques. Ces facteurs environnementaux seraient à relier avec les positions d'abri de certaines parcelles et la ventilation plus importante de certains coteaux. Des indices tels que l'ouverture du paysage, l'exposition aux vents pourraient être calculés et intégrés aux modèles. Enfin, le nombre de capteurs utilisé dans le cadre de cette expérimentation pourrait être augmenté afin d'améliorer la couverture spatiale et donc la représentativité du site viticole.

Quatrième partie

Apport de la modélisation numérique avec le modèle RAMS

Dans cette quatrième et dernière partie, nous présentons les différents résultats des modélisations effectuées par le modèle méso-échelle RAMS.

Le premier chapitre développe les résultats concernant les simulations de contrôle de RAMS à 5 km de résolution sur la période de référence 1991-2000. Ces simulations sont comparées aux données d'observations de trois stations météorologiques, ainsi qu'à celles du modèle ARPEGE-Climat à 50 km de résolution.

Le deuxième chapitre expose les résultats de quatre simulations d'événements extrêmes froids (un épisode gélif en 2003) et chauds (3 épisodes caniculaires en 2003, 2009 et 2010). Les simulations sont comparées aux données d'observations des différents réseaux de stations météorologiques.

Le troisième chapitre de cette dernière partie de thèse détaille les résultats des simulations futures de la période 2041-2050 du modèle RAMS à 5 km de résolution, selon le scénario A2 du GIEC. Ces données simulées par RAMS sont alors comparées aux simulations du modèle ARPEGE-Climat à 50 km de résolution. Enfin, une vague de chaleur de cette décennie a été simulée et les résultats sont analysés.

Chapitre XI : SIMULATIONS DE CONTRÔLE DES MODÈLES ARPEGE-CLIMAT ET RAMS SUR LA PÉRIODE 1991-2000

La validation et la confrontation des sorties du modèle numérique régional RAMS (5 km) avec celles du modèle de circulation générale ARPEGE-Climat (50 km) sont présentées dans ce chapitre. Une période de contrôle de dix années (1991-2000) a été étudiée afin de tester les capacités du modèle à reproduire des données thermiques moyennes dans la région de l'Anjou et du Saumurois. Ce chapitre présente les résultats d'une étape préliminaire à l'étude des projections futures de RAMS et ARPEGE-Climat, selon le scénario A2, et développées dans le chapitre XIII. Au-delà du contrôle (analyse critique) des simulations, ce chapitre présente l'intérêt de l'utilisation d'un modèle régional pour l'évaluation des conséquences du changement climatique en termes de température en viticulture. L'étude est plus particulièrement focalisée sur trois mois clés pour le développement de la vigne : les mois d'avril, juillet et août. Les températures minimales et/ou maximales moyennes mensuelles simulées ont été confrontées aux observations de trois stations de moyenne vallée de la Loire. Enfin, certains seuils de température importants pour la vigne, notamment lors d'épisodes de gel ou de vagues de chaleur, ont été retenus et comparés aux observations, ainsi que les indices bioclimatiques simulés tels que les degrés-jours et l'indice de fraîcheur des nuits. Une analyse toute particulière sera consacrée à la comparaison des biais d'ARPEGE-Climat avec ceux de RAMS, afin de discuter de l'utilité de la désagrégation dynamique dans l'amélioration des valeurs simulées à l'échelle régionale.

XI.1. Simulations pour le mois d'avril

Le mois d'avril, premier mois de la saison végétative dans l'hémisphère nord est l'un des mois clés dans le développement de la vigne. Le risque climatique essentiel pour un vignoble septentrional est lié aux épisodes de gel dit tardif qui peut endommager les bourgeons de la vigne et donc compromettre la qualité de la récolte. Les simulations des températures minimales moyennes et de la fréquence de l'aléa gélif ont été étudiées. Enfin, les résultats des simulations du cumul des degrés jours ont été analysés, afin d'évaluer la capacité des deux modèles à prévoir le démarrage de la saison végétative de la vigne.

XI.1.1. La température minimale moyenne

La simulation par ARPEGE-Climat et RAMS des températures minimales moyennes a été analysée. Les statistiques descriptives des sorties des deux modèles pour les mailles correspondant aux stations de Montreuil-Bellay, Angers et Saumur sont présentées dans le Tableau XI.1. Les biais représentent ici la différence entre les valeurs modélisées et les

valeurs observées. Les résultats montrent alors une diminution des biais par le modèle RAMS par rapport aux biais du modèle ARPEGE-Climat. En effet, le biais moyen de RAMS sur la période se rapproche de 0°C et est inférieur de 1,7°C à 2,3°C à celui d'ARPEGE-Climat. Les biais sont, en revanche, négatifs pour les deux modèles, c'est-à-dire qu'aussi bien ARPEGE-Climat que RAMS sous-estime les températures minimales du mois d'avril.

Tableau XI.1. Résultats statistiques sur les différences (biais) des températures minimales d'avril (Root Mean Square Error et test t de Student) entre les températures simulées par ARPEGE-Climat (50 km), RAMS (5 km) et les températures observées de 3 stations météorologiques de moyenne vallée de la Loire. N = 10 années (1991-2000) ; |t| valeur critique = 2,101 ; les différences non significatives entre simulations et observations sont indiquées en gras (valeur-p > 0,05).

| Station | Modèle | Différence entre température simulée et observée (°C) | t valeur observée | valeur-p | RMSE |
|-------------------|-------------|---|-------------------|----------|------|
| Montreuil- Bellay | ARPEGE | -2.6 | -7.29 | <0.0001 | 10.5 |
| | RAMS | -0.3 | -0.82 | 0.422 | 2.9 |
| Angers | ARPEGE | -2.7 | -7.47 | <0.0001 | 10.4 |
| | RAMS | -1.0 | -2.39 | 0.028 | 4.7 |
| Saumur | ARPEGE | -2.8 | -8.20 | <0.0001 | 10.8 |
| | RAMS | -0.6 | -1,53 | 0.144 | 3.2 |

Données : [Météo-France, CERFACS et RAMS]

La Figure XI.1 présente la confrontation des biais après simulation par RAMS et ARPEGE-Climat en valeur absolue, pour chaque mois d'avril de la décennie 1991-2000 et la première bissectrice correspond à une modélisation où les biais des deux modèles seraient identiques. Cette Figure montre un nuage de points situé quasiment dans son intégralité au-dessus de la première bissectrice, ce qui signifie que les biais d'ARPEGE-Climat sont systématiquement supérieurs à ceux de RAMS. L'erreur type (RMSE) a été calculée sur les 10 mois d'avril simulés de la décennie et confirme ce résultat (Tableau XI.1) puisque l'indice est diminué pour le modèle RAMS pour les mailles correspondant aux 3 stations météorologiques. Enfin, le test *t* de Student a été appliqué pour différencier les modélisations significativement différentes ou non de l'observation. Les résultats pour la température minimale du mois d'avril indiquent une modélisation non-significativement différente de l'observation pour les sorties de RAMS et pour les mailles correspondant aux deux stations de Montreuil-Bellay et Saumur. Ces simulations sont donc, d'un point de vue statistique, très proches des valeurs observées durant les 10 mois d'avril simulés.

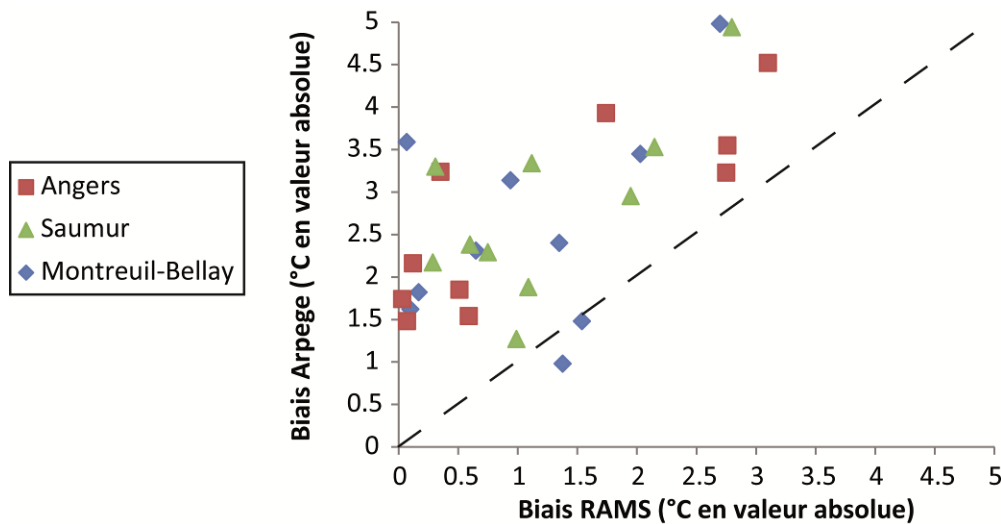


Figure XI.1. Graphique cartésien des biais (en valeur absolue) de ARPEGE-Climat et RAMS pour les minimales moyennes du mois d'avril issues de la modélisation sur de la période de contrôle 1991-2000 (la droite en pointillé représente la 1^{ère} bissectrice).

Source : [Météo-France et RAMS]

XI.1.2. Le risque gélif printanier

Le seuil conventionnel de la gelée météorologique est fixé le plus souvent à 0°C alors que le réel risque pour la plante concerne le risque de gel agronomique qui entrainera la mort des jeunes bourgeons. Le seuil du gel agronomique dépend de l'état d'avancement de la vigne et des conditions atmosphériques (humidité, vent ...). Dans ce travail de thèse, nous avons traité uniquement du gel météorologique. Cependant, Il faut savoir qu'une température minimale de 0°C, enregistrée sous abri à 2 m du sol, n'exclut pas des gelées beaucoup plus sévères près du sol, en particulier en cas de nuit fortement radiative.

Le nombre de jours moyen avec franchissement du seuil de la gelée (<0°C) à 2 m du sol dans les trois stations météorologiques est inférieur à 1,5 jours sur la période 1991-2000 (Figure XI.2). Le risque gélif est donc assez limité en moyenne vallée de la Loire, si on se réfère à ces observations. Les résultats des simulations montrent que ARPEGE-Climat surestime le risque de gelées avec un nombre de jours supérieur à 7 pour les mailles correspondant aux trois stations alors que RAMS est très proche de l'observation avec environ 1 journée avec gel simulée. Le modèle RAMS semble ainsi mieux appréhender le risque gélif printanier pour la vigne contrairement à ARPEGE-Climat qui amplifie ce risque de manière très nette.

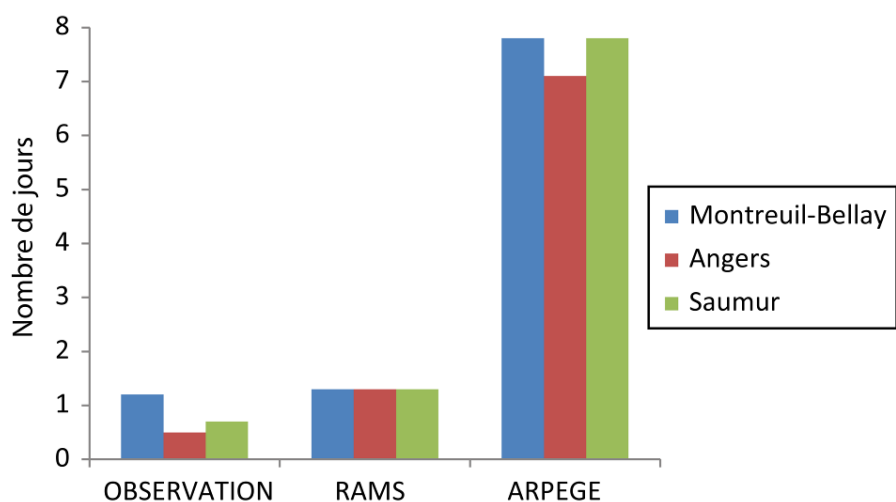


Figure XI.2. Nombre de jours moyen d'occurrence du gel ($T_n < 0^\circ\text{C}$) observé et simulé par RAMS et ARPEGE-Climat à 2 m du sol.

Données : [Météo-France et RAMS]

XI.1.3. Le cumul des degrés-jours du début de saison

Le cumul de degrés-jours a été calculé pour le mois d'avril à partir des simulations des températures moyennes journalières d'ARPEGE-Climat et RAMS (Tableau XI.2). Les résultats montrent que RAMS reproduit de manière plus précise le cumul de cet indice. En moyenne, le biais moyen de RAMS sur l'ensemble de la période est de 0,1 à $-5,6^\circ\text{C}$ alors qu'ARPEGE-Climat sous-estime le cumul de 24,6 à $31,2^\circ\text{C}$. Le RMSE est également inférieur pour RAMS sur l'ensemble des simulations, ce qui confirme des erreurs moins importantes pour ce modèle, et les 3 séries de températures simulées par RAMS sont les seules non-significativement différentes des séries observées (test t de Student). RAMS semble donc être un outil particulièrement utile pour la prévision d'un indice tel que celui des degrés-jours. Il est également un indicateur intéressant sur la prévision du démarrage plus ou moins précoce du cycle phénologique de la vigne. Chaque cépage nécessite un certain nombre de journées consécutives avec une température moyenne supérieure à 10°C . Nous pouvons ainsi imaginer que RAMS puisse être utilisé pour la prévision du stade du débourrement pour certains cépages spécifiques.

Tableau XI.2. Résultats statistiques sur les différences (biais) des cumuls de degrés jours d'avril (Root Mean Square Error et test t de Student) entre la simulation par ARPEGE (50 km), RAMS (5 km) et les observations de 3 stations météorologiques de moyenne vallée de la Loire. N = 10 années (1991-2000) ; |t| valeur critique = 2,101 ; les différences non significatives entre simulations et observations sont indiquées en gras (valeur-p > 0,05).

| Station | Modèle | Différence entre cumul de degrés jours simulé et observé (°C) | t valeur observée | valeur-p | RMSE |
|-------------------|-------------|---|-------------------|----------|------|
| Montreuil- Bellay | ARPEGE | -24.6 | -4.26 | <0.001 | 28.5 |
| | RAMS | 0.1 | 0.01 | 0.994 | 17.5 |
| Angers | ARPEGE | -26.2 | -5.61 | <0.0001 | 27.4 |
| | RAMS | -5.6 | -0.83 | 0.419 | 15.7 |
| Saumur | ARPEGE | -31.2 | -6.41 | <0.0001 | 32.7 |
| | RAMS | -5.6 | -0.75 | 0.462 | 17.4 |

Données : [Météo-France, CERFACS et RAMS]

XI.2. Simulations pour le mois de juillet

Le mois de juillet est également une phase importante de la période végétative de la vigne, puisque dans l'hémisphère nord, c'est le mois succédant au stade de la floraison et où les grains de raisin vont se former durant la nouaison jusqu'à la véraison au mois d'août. Les températures maximales moyennes simulées ont été comparées avec les observations sur la période de contrôle. Les températures maximales sont en effet un paramètre climatique important en phase de nouaison et de pré-véraison car de trop fortes chaleurs pourraient nuire au développement des futures baies de raisins et au contraire, des maximales trop basses retarderaient le développement des grains de raisins. Le nombre de journées chaudes (définies par une Tx entre 30 et 35°C) simulées a ainsi été confronté au nombre de journées chaudes observées, tout comme le nombre de journées avec des températures maximales supérieures au seuil de 35°C, qui peuvent entraîner le grillage et l'échaudage des baies.

XI.2.1. La température maximale moyenne

Les températures maximales simulées par RAMS sont nettement plus proches de l'observation que celles simulées par ARPEGE-Climat (Tableau XI.3) : les biais sont vers 0°C concernant RAMS mais entre 2,2 et 3,8°C pour ARPEGE-Climat. La Figure XI.3 confirme que, pour la plupart des années, les biais d'ARPEGE-Climat sont supérieurs à ceux de RAMS tout comme les valeurs du RMSE qui sont comprises entre 3,2 et 4,5°C pour ARPEGE-Climat mais entre 1,7 et 1,9°C pour RAMS. Les températures maximales du mois de juillet sont donc assez largement surestimées par ARPEGE-Climat. Enfin, les simulations de RAMS sont les seules à être, une nouvelle fois, toutes non significativement différentes des données observées. Le modèle RAMS reproduit donc de manière plus précise les températures maximales du mois de juillet.

Tableau XI.3. Résultats statistiques sur les différences (biais) des températures maximales de juillet (Root Mean Square Error et test t de Student) entre les températures simulées par ARPEGE (50 km), RAMS (5 km) et les températures observées de 3 stations météorologiques de moyenne vallée de la Loire. N = 10 années (1991-2000) ; |t| valeur critique = 2,101 ; les différences non-significatives entre simulations et observations sont indiquées en gras (valeur-p > 0,05).

| Station | Modèle | Différence entre température simulée et observée (°C) | t valeur observée | valeur-p | RMSE |
|-------------------|-------------|---|-------------------|----------|------|
| Montreuil- Bellay | ARPEGE | 2.5 | 2.57 | 0.019 | 3.4 |
| | RAMS | 0.1 | 0.09 | 0.933 | 1.7 |
| Angers | ARPEGE | 3.8 | 3.47 | 0.003 | 4.5 |
| | RAMS | 0.3 | 0.53 | 0.605 | 1.7 |
| Saumur | ARPEGE | 2.2 | 2.20 | 0.041 | 3.2 |
| | RAMS | -0.8 | -1.28 | 0.218 | 1.9 |

Données : [Météo-France, CERFACS et RAMS]

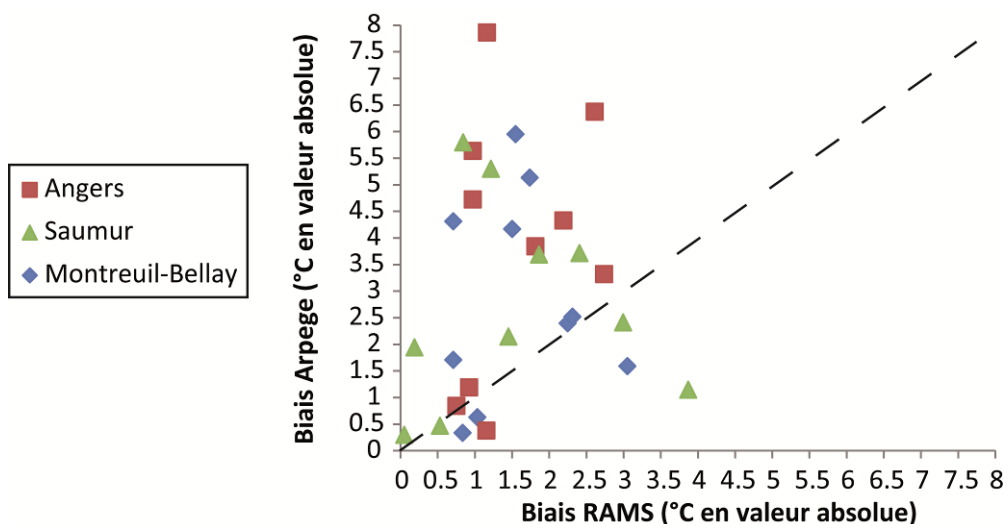


Figure XI.3. Graphique cartésien des biais en valeur absolue de ARPEGE-Climat et RAMS pour les maximales moyennes du mois d'août issues de la modélisation de la période de contrôle 1991-2000 (la droite en pointillé représente la 1^{ère} bissectrice).

Données : [Météo-France et RAMS]

XI.2.2. Les températures maximales extrêmes

La Figure XI.4 présente le nombre moyen de journées chaudes et très chaudes avec, respectivement, des températures maximales comprises entre 30 et 35°C et supérieures à 35°C. RAMS simule de manière plus réaliste ce nombre de jours pour les deux types de journées alors qu'ARPEGE-Climat surestime assez largement ces occurrences. Notons que les journées avec température maximale supérieure à 35°C sont plutôt rares en moyenne vallée de la Loire, tout comme l'était le gel pour le mois d'avril. Le nombre moyen de journées très chaudes observé est d'environ une demi-journée sur cette période de contrôle. Cependant,

la période de contrôle ne concerne qu'une décennie et la fréquence de retour de certaines vagues de chaleur intenses est parfois supérieure à 10 ans.

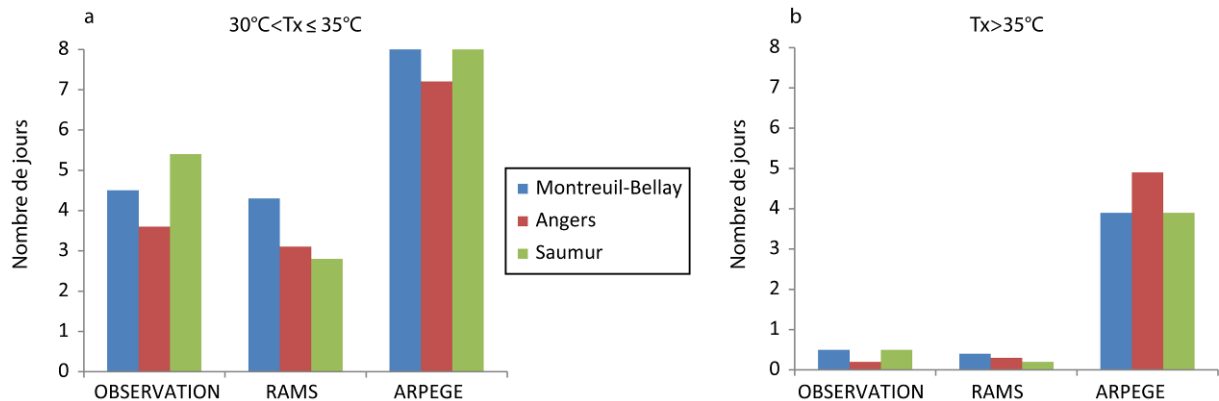


Figure XI.4. Nombre de jours moyen avec des températures comprises entre 30 et 35°C observées et simulées par ARPEGE-Climat et RAMS à 2 mètres du sol (a) et avec des températures supérieures au seuil de 35°C (b) pour le mois de juillet sur la période 1991-2000.

Données : [Météo-France et RAMS]

XI.3. Simulations pour le mois d'août

Le mois d'août est le mois correspondant au début de la véraison puis de la maturation des baies. Les conditions thermiques durant ce mois sont donc un des éléments qui révélera, au moment de la vendange et de la vinification, la qualité de la récolte. Les températures maximales moyennes ont été comparées avec les observations sur la période de contrôle. Les simulations des fréquences des intervalles de températures propres à l'indice de fraîcheur des nuits ont été confrontées aux observations. Enfin, les observations du nombre de journées chaudes ($30 < T_x \leq 35^\circ\text{C}$) et très chaudes ($T_x > 35^\circ\text{C}$) aux trois stations de référence ont été comparées avec les simulations correspondant aux mailles de chaque station.

XI.3.1. La température minimale moyenne

Des températures nocturnes fraîches durant la phase de maturation des raisins sont un facteur essentiel à la synthèse d'éléments comme les anthocyanes qui donneront en partie par la suite la typicité du vin. Avec le réchauffement climatique en cours et les projections futures pour le XXI^{ème} siècle, l'indice de fraîcheur des nuits pourrait être désormais calculé sur le mois d'août, étant donné l'avancée de la date de maturité des raisins. Les conditions thermiques nocturnes du mois d'août ont donc été analysées. Les résultats des simulations de la température minimale moyenne du mois d'août ne suivent pas le même schéma que les précédentes simulations des mois d'avril et juillet (Tableau XI.4). En effet le modèle ARPEGE-Climat semble être meilleur que le modèle RAMS, dans la reproduction des séries observées des 3 stations. Les biais d'ARPEGE-Climat sont légèrement inférieurs à ceux de RAMS et les RMSE d'ARPEGE sont également inférieurs à ceux de RAMS pour Montreuil-Bellay et Saumur. La Figure XI.6a montre très clairement que les biais sont en grande majorité supérieurs pour le modèle RAMS hormis quelques années isolées. ARPEGE-Climat

sous-estime légèrement la température minimale alors que RAMS la surestime. Enfin, le test *t* de Student indique que les simulations ne sont pas significativement différentes des observations pour celles d'ARPEGE-Climat et de RAMS pour la station d'Angers et pour celles d'ARPEGE-Climat seul pour la station de Montreuil-Bellay. Les simulations pour la station de Saumur sont significativement différentes des observations.

Tableau XI.4. Résultats statistiques sur les différences (biais) des températures minimales d'août (Root Mean Square Error et test *t* de Student) entre les températures simulées par ARPEGE (50 km), RAMS (5 km) et SAFRAN (8 km) et les températures observées de 3 stations météorologiques de moyenne vallée de la Loire. N = 10 années (1991-2000) ; |*t*| valeur critique = 2,101 ; les différences non-significatives entre simulations et observations sont indiquées en gras (valeur-*p* > 0,05).

| Station | Modèle | Différence entre température simulée et observée (°C) | t valeur observée | valeur-p | RMSE |
|-------------------|---------------|---|-------------------|----------|------|
| Montreuil- Bellay | ARPEGE | -0.6 | -1.14 | 0.268 | 1.7 |
| | RAMS | 2.3 | 2.96 | 0.008 | 2.4 |
| Angers | ARPEGE | -0.7 | -1.42 | 0.172 | 1.7 |
| | RAMS | 1.6 | 1.52 | 0.145 | 1.7 |
| Saumur | ARPEGE | -1.0 | -2.16 | 0.045 | 1.7 |
| | RAMS | 2.3 | 2.56 | 0.02 | 2.4 |

Données : [Météo-France, CERFACS et RAMS]

La Figure XI.5 présente les comparaisons entre les valeurs observées et simulées des fréquences de chaque intervalle (cf Chapitre I/Tableau I.4) de température de l'indice de fraîcheur des nuits (température minimale moyenne du mois d'août) pour les stations d'Angers et Saumur. Les résultats de Montreuil-Bellay ne sont pas présentés ici, ces derniers étant très proches de la simulation d'Angers.

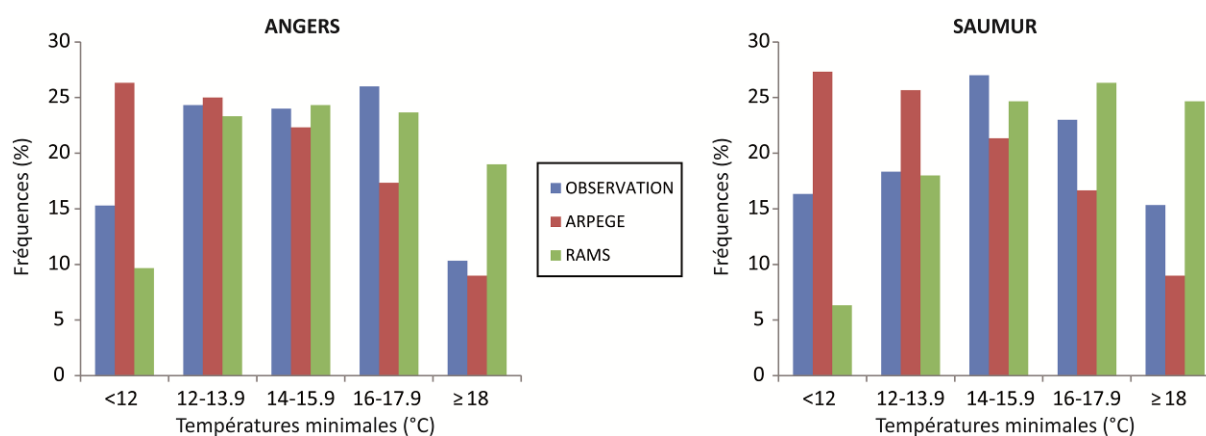


Figure XI.5. Fréquences des températures minimales journalières du mois d'août observées et simulées par ARPEGE-Climat et RAMS sur la période de contrôle 1991-2000 et pour deux stations de la moyenne vallée de la Loire.

Données : [Météo-France et RAMS]

Le modèle RAMS sous-estime la fréquence des nuits classées « très fraîches » ($T_n < 12^\circ\text{C}$) alors qu'ARPEGE-Climat les surestime. La fréquence des nuits classées très chaudes ($T_n > 18^\circ\text{C}$) est au contraire surestimée par RAMS et sous-estimée par ARPEGE-Climat. La fréquence des nuits classées « chaudes » ($16^\circ\text{C} \leq T_n < 18^\circ\text{C}$) est sous-estimée par ARPEGE-Climat et surestimée par RAMS à Saumur alors qu'elle est également sous-estimée à Angers. Les fréquences des nuits fraîches ($12^\circ\text{C} \leq T_n < 14^\circ\text{C}$) et des nuits tempérées ($14^\circ\text{C} \leq T_n < 16^\circ\text{C}$) sont plutôt bien reproduites à Angers par les deux modèles alors qu'à Saumur, RAMS est meilleur dans cette simulation. Ainsi, l'analyse de ces résultats montre que les types de nuits avec conditions « extrêmes » pour la vigne, aussi bien dans le frais que dans le chaud, semblent être les moins bien modélisés par ARPEGE-Climat et RAMS. Les différents travaux de modélisations climatiques disponibles montrent, en effet, que les modèles appréhendent souvent mal les valeurs trop extrêmes.

XI.3.2. La température maximale moyenne

La température maximale moyenne du mois d'août est simulée plus proche de l'observation par RAMS que par ARPEGE-Climat avec des biais moyens de RAMS entre $-0,8^\circ\text{C}$ et $-1,7^\circ\text{C}$ alors que ceux d'ARPEGE-Climat sont supérieurs à 3°C . Il est intéressant de voir qu'ARPEGE-Climat surestime la température maximale observée alors que RAMS la sous-estime. La Figure XI.6.b montre les biais plus importants d'ARPEGE-Climat, hormis pour deux années à Saumur et une à Montreuil-Bellay. Les RMSE sont également inférieurs pour le modèle RAMS et le test *t* de Student indique que les simulations de RAMS pour les stations de Montreuil-Bellay et Angers sont les deux seules à être non significativement différentes de l'observation donc les mieux modélisées. Enfin, notons que les biais sur les températures maximales sont très nettement supérieurs à ceux sur les températures minimales. Les simulations des deux modèles s'écartent ainsi moins des températures minimales observées que des températures maximales observées.

Tableau XI.5. Résultats statistiques sur les différences (biais) des températures maximales d'août (Root Mean Square Error et test *t* de Student) entre les températures simulées par ARPEGE (50 km), RAMS (5 km) et SAFRAN (8 km) et les températures observées de 3 stations météorologiques de moyenne vallée de la Loire. N = 10 années (1991-2000) ; |*t*| valeur critique = 2,101 ; les différences non-significatives entre simulations et observations sont indiquées en gras (valeur-*p* > 0,05).

| Station | Modèle | Différence entre température simulée et observée ($^\circ\text{C}$) | t valeur observée | valeur-p | RMSE |
|-------------------|-------------|---|-------------------|----------|------|
| Montreuil- Bellay | ARPEGE | 3.9 | 3.06 | 0.007 | 5.6 |
| | RAMS | -1.0 | -1.70 | 0.107 | 1.9 |
| Angers | ARPEGE | 4.9 | 4.02 | 0.001 | 6.3 |
| | RAMS | -0.8 | -1.53 | 0.142 | 1.7 |
| Saumur | ARPEGE | 3.7 | 2.83 | 0.011 | 5.5 |
| | RAMS | -1.7 | -2.90 | 0.010 | 2.4 |

Données : [Météo-France, CERFACS et RAMS]

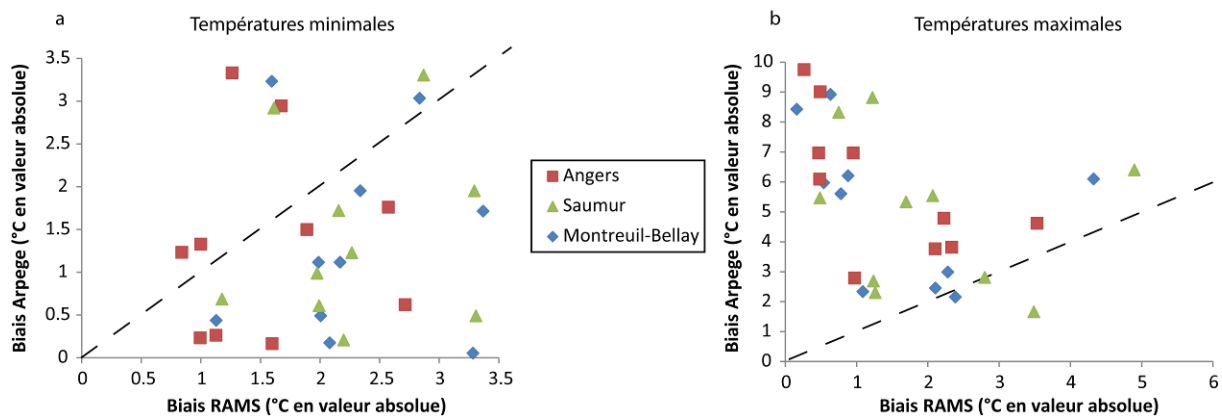


Figure XI.6. Graphique cartésien des biais (en valeur absolue) de ARPEGE-Climat et RAMS pour les températures minimales (a) et maximales (b) moyennes du mois d'août issues de la modélisation de la période de contrôle 1991-2000 (la droite en pointillé représente la 1^{ère} bissectrice).

Données : [Météo-France et RAMS]

XI.3.3. Les températures maximales extrêmes

Les épisodes caniculaires en période de maturation des raisins peuvent être particulièrement dommageables pour la vigne. En effet, des températures trop chaudes bloquent la photosynthèse et peuvent provoquer l'échaudage des baies. Les températures maximales journalières extrêmes d'août ont donc été analysées. La Figure XI.7 montre que le nombre de journées chaudes, avec une température maximale comprise entre 30°C et 35°C, est assez nettement sous-estimé par RAMS et surestimé par ARPEGE-Climat. Le nombre de journées « très chaudes » avec une température supérieure au seuil de 35°C, est quant à lui bien estimé par RAMS mais très largement surestimée par ARPEGE-Climat. Il faut noter cependant que le nombre de journées avec une température maximale supérieure à 35°C en moyenne vallée de la Loire reste assez faible avec en moyenne moins d'une journée par an selon les observations 1991-2000, nombre de jours comparable à celui du mois de juillet.

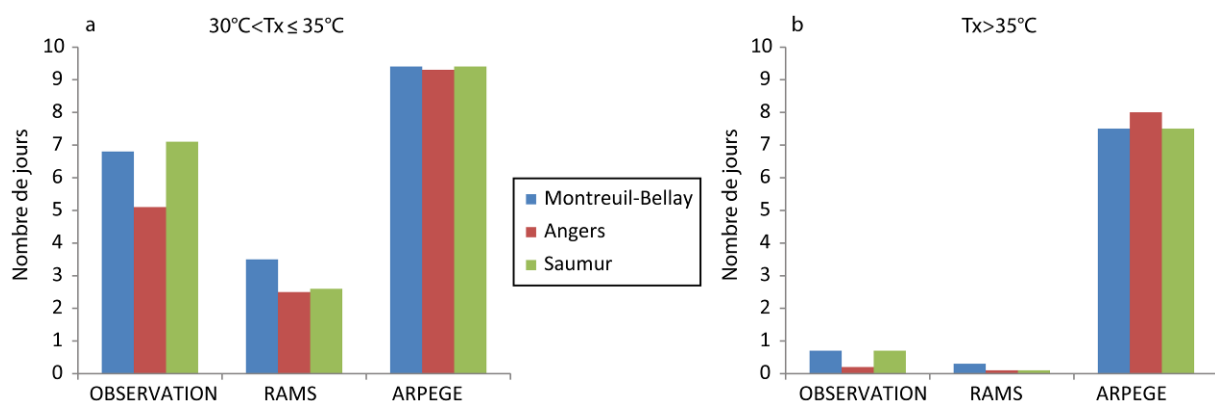


Figure XI.7. Nombre de jours moyen avec températures observées et simulées par ARPEGE-Climat et RAMS à 2 mètres du sol, comprises entre 30 et 35°C (a) et avec températures supérieures au seuil de 35°C (b) pour le mois d'août sur la période 1991-2000.

Données : [Météo-France et RAMS]

CONCLUSION DU CHAPITRE XI

Les résultats des simulations issues des modèles ARPEGE-Climat (50 km) et RAMS (5 km) sur la période de contrôle 1991-2000 ont été analysées. Ainsi, la désagrégation d'échelle dans la reproduction des moyennes thermiques semble être un outil très intéressant, puisque dans la plupart des cas les simulations de RAMS se retrouvent bien meilleures que celles d'ARPEGE-Climat. RAMS reproduit de manière plus fine la topographie, les aspérités du terrain donc les conditions plus locales des stations, ARPEGE-Climat ne fournissant que la moyenne de ces éléments sur une maille de 50 km de côté. Le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France sert donc à donner les grandes tendances à l'échelle de la France alors que RAMS apporte de la précision dans les résultats, ce qui devient nécessaire dans le cas d'étude régionale d'impact du climat sur la vigne. La simulation des températures dites « extrêmes » pour la vigne a également été contrôlée et il ressort que le modèle RAMS simule de manière assez proche le risque gélif en moyenne vallée de la Loire alors qu'ARPEGE-Climat le surestime très largement. Pour ce même mois, le cumul des degrés jours simulée par RAMS ressort très proche de l'observation, contrairement à celui simulé par ARPEGE-Climat. Les températures élevées extrêmes en période estivale, qui représentent un risque essentiellement de grillage et échaudage des baies, sont également mieux reproduites par RAMS mais les extrêmes de l'indice de fraîcheurs des nuits (température minimale du mois d'août) sont moins bien appréhendés par les deux modèles. Les biais existants entre les observations et les simulations des deux modèles sont notamment dû au fait que la comparaison concerne des données de températures issues de stations ponctuelles avec des moyennes sur maille de 50 km pour ARPEGE-Climat et 5 km pour RAMS. Cependant, les résultats de ces simulations de contrôle confirment l'intérêt de l'utilisation d'un modèle climatique comme RAMS pour la simulation des moyennes mensuelles et extrêmes thermiques pour la saison végétative de la vigne. Cette évaluation des sorties de contrôle du modèle permet de discuter avec plus de confiance les simulations de la période future 2041-2050, traitées dans le chapitre XIII. Le chapitre suivant traite de 4 épisodes extrêmes pour la vigne (gel et vague de chaleur), afin d'évaluer les capacités du modèle à reproduire sur des événements ponctuels et potentiellement dommageables pour la vigne, les séries horaires de températures et les valeurs minimales et maximales.

Chapitre XII : SIMULATIONS DU MODÈLE RAMS

POUR QUATRE ÉPISODES EXTRÊMES OBSERVÉS

Le modèle numérique RAMS a également été utilisé afin de tester sa capacité à reproduire des événements extrêmes pour la vigne. Plusieurs simulations, jusqu'à 200 m de résolution horizontale pour la grille 4 (cf Chapitre VII), ont ainsi été lancées. L'année 2003 pouvant être considérée comme un aperçu des conditions climatiques futures en France (GIEC, 2007), les températures horaires ont été modélisées à l'aide du modèle RAMS lors d'un épisode gélif de 3 jours en avril et durant les 4 jours les plus chauds de la canicule du mois d'août. Ce chapitre résume l'analyse comparée des données horaires simulées et observées pour 2 stations météorologiques, Beaulieu-sur-Layon et Montreuil-Bellay. Deux autres épisodes de fortes chaleurs, moins intenses, en 2009 et 2010, ont également été simulés. Les observations du réseau de stations TERVICLIM/INRA, installé en 2008, ont alors permis d'évaluer les sorties du modèle. Enfin, les champs thermiques simulés sont également présentés pour certaines dates, afin de visualiser les températures simulées et d'évaluer la reproduction de la variabilité spatiale de la température par le modèle RAMS.

XII.1. Validation des simulations pour l'année 2003

L'année 2003 est une année très particulière qui pourrait refléter les conditions thermiques des années à venir selon les différentes simulations des scénarios du GIEC (GIEC, 2007). Le début du printemps a été marqué par le retour de gelées tardives qui ont endommagé certains vignobles, essentiellement du nord et de l'est de la France. Le Val de Loire a cependant peu souffert de cet épisode gélif. Puis, la saison estivale a été très chaude, dès le mois de Juin avec un premier pic caniculaire mais la canicule la plus conséquente a eu lieu dans la première quinzaine du mois d'août avec des températures supérieures à 35°C dans l'ensemble des régions viticoles françaises et ce pendant une dizaine de jours. Ces deux épisodes thermiques extrêmes, froid en avril et très chaud en août, sont ainsi étudiés dans cette première partie de chapitre. Les simulations du modèle RAMS à 200 mètres de résolution horizontale sont confrontées aux données d'observations des stations météorologiques.

XII.1.1. L'épisode de gel du mois d'avril

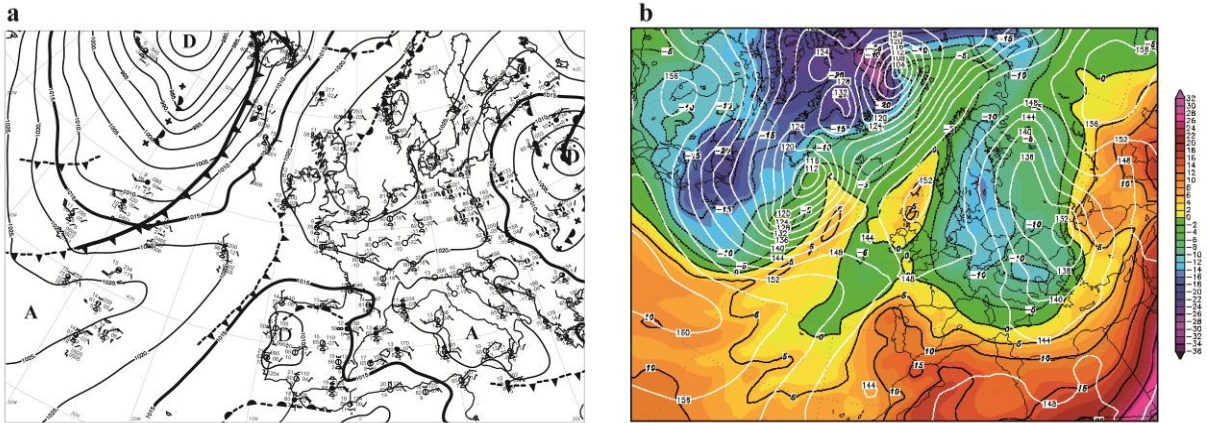
Le début du mois d'avril a vu une baisse de la température suite à une advection d'air plus froid par le nord-est, conjuguée à des conditions radiatives. Du gel a été observé dans la plupart des vignobles français avec de nombreux dégâts notamment en Champagne ou même en Provence pour certains cépages. Les valeurs des températures minimales en moyenne vallée de la Loire n'ont pas atteint partout le seuil critique pour la plante ($T_n < -2^\circ\text{C}$)

et les dégâts ont alors été plus limités. Les résultats des simulations du modèle RAMS sont ainsi présentées.

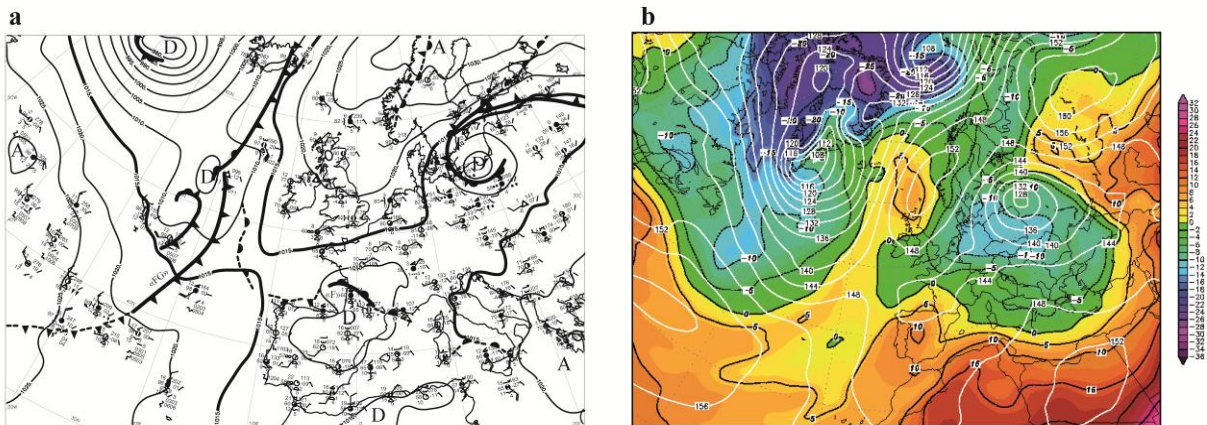
XII.1.1.1. Situation synoptique et conséquences

Le 8 avril à la mi-journée, une dépression est située sur la péninsule ibérique alors qu'une dorsale anticyclonique s'étend de la Scandinavie à l'Atlantique (Figure XII.1). Cette dorsale advecte de l'air froid sur toute la France et le bassin méditerranéen est soumis à des nuages bas et quelques bruines. On observe ainsi des gelées *quasi* généralisées sauf dans les régions les plus méridionales et près des côtes. Les températures s'échelonnent au petit matin de -10°C au Puy-en-Velay à 8°C à Perpignan sous les nuages. Dans le Val de Loire, la nuit a été claire et l'advection d'air frais conjugué à la mise en place de conditions radiatives a favorisé une diminution importante de la température. On observe cependant un gradient thermique de l'ouest à l'est de la région avec des températures minimales de 0°C à Nantes à -4°C à Orléans. Le 9 avril, la dépression en provenance de l'Espagne franchit la barrière pyrénéenne et provoque des pluies sur un large quart sud-ouest, ainsi que des orages sur le relief des Pyrénées. Le pourtour méditerranéen est toujours sujet à des remontées instables. Plus au nord, l'air froid véhiculé par la dorsale anticyclonique résiste. Un fort contraste de températures se met en place entre les régions du sud et celles du nord de la France. Les gelées se sont limitées plus au nord du fait de la persistance d'une nuit claire et radiative, alors qu'au sud, l'influence des nuages et de l'advection d'air plus doux a limité la baisse de la température. Ainsi, on observe des températures minimales comprises entre -7°C à Romorantin et 8°C à Bordeaux ou Biarritz. Dans le Val de Loire, la nuit a encore été très claire hormis sur l'extrême ouest de la région (région nantaise) où l'influence de la dépression espagnole a commencé à amener un peu plus de nébulosité et a limité ainsi la baisse de la température. Les minimales sont comprises de 2°C à Nantes à -3°C à Orléans. Enfin, le 10 avril, la perturbation présente la veille sur le sud-ouest a traversé le pays pour se retrouver en matinée sur l'est de la France et a apporté des précipitations, notamment sous forme de neige à la frontière entre l'air froid et l'air doux (Bourgogne, Rhône-Alpes, Alsace, Franche Comté et Champagne). Le nord de la France est toujours soumis à une advection d'air plus froid et sec. Du fait de la traversée de la perturbation du sud-ouest au nord-est, les gelées ont un peu plus régressé vers le nord en s'atténuant dans la plupart des régions. Le thermomètre au petit matin affiche de -5°C à Romorantin à 8°C dans le Pays Basque. En revanche, les gelées se sont accentuées dans le Val de Loire, cette journée étant la plus froide de la série pour la plupart des stations avec notamment -3°C à Angers et à Tours.

8 avril 2003



9 avril 2003



10 avril 2003

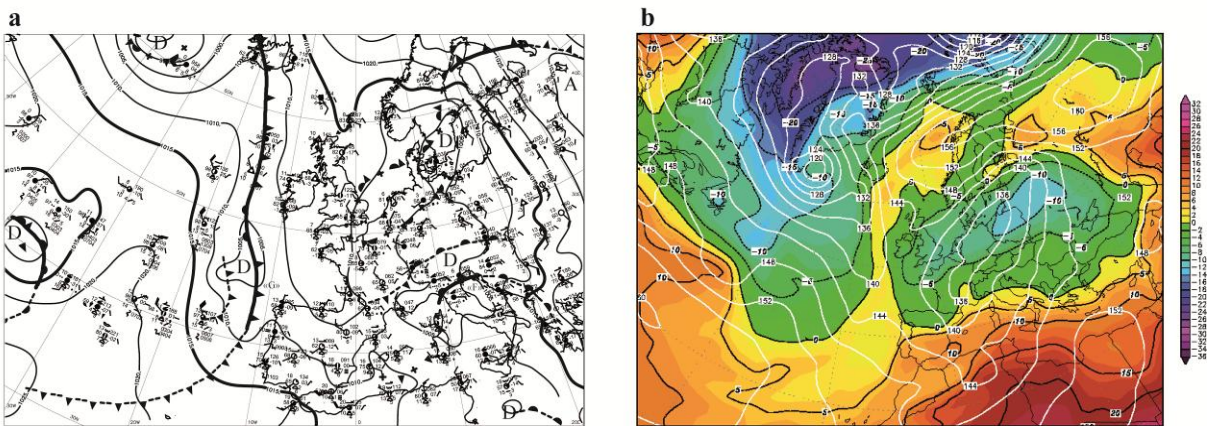


Figure XII.1. Analyses des champs de pression en surface à 12h TU (a) et des températures à 850 hp à 0h TU (b) sur l'Europe durant l'épisode gélif du 8 au 10 avril 2003.

Sources : [Météo-France et Wetterzentrale]

XII.1.1.2. Comparaison des simulations et des observations

La Figure XII.2 confronte les données horaires observées pour deux stations de moyenne vallée de la Loire, Beaulieu-sur-Layon et Montreuil-Bellay, avec la simulation de RAMS pour les mailles correspondantes. Le cycle journalier des températures semble être bien reproduit par le modèle, même si le 9 avril RAMS simule à Beaulieu-sur-Layon une baisse de la température plus précoce que la baisse réellement observée. Comme cela a été expliqué dans la description de la situation synoptique, des gelées ont été observées les 8 et 10 avril mais pas le 9 avril pour ces deux stations. En effet, une dépression sur le sud-ouest de la France a débordé le 9 avril sur la région, essentiellement sur l'ouest du Val de Loire. La couverture nuageuse nocturne était donc plus importante, limitant ainsi l'effet radiatif sur la chute des températures nocturnes et le Val de Loire se retrouvait ainsi à la limite entre l'advection froide venant du nord-est de la France et une advection d'air plus doux par le sud-ouest. Le 10 avril, en revanche, le ciel s'étant à nouveau découvert, les températures minimales les plus basses de l'épisode ont été enregistrées par les deux stations.

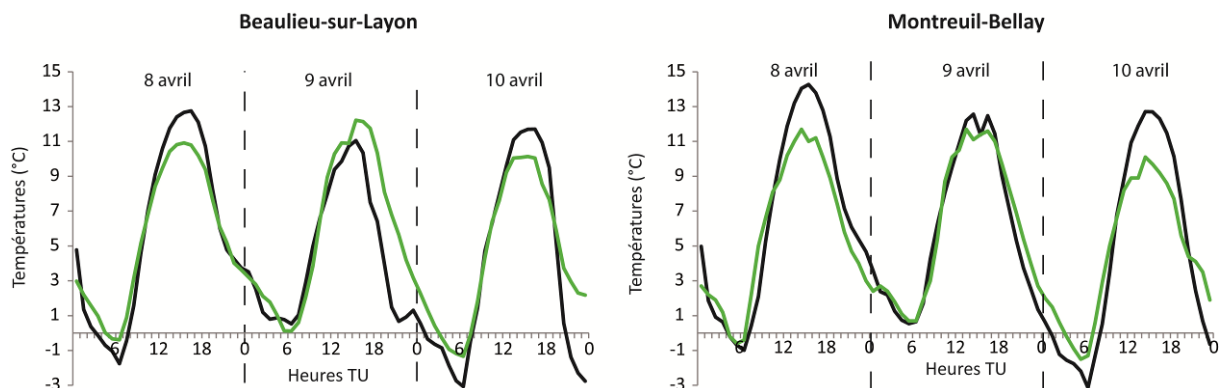


Figure XII.2. Températures horaires observées (en vert) par deux stations de l'INRA et de Météo-France et simulées (en noir) par le modèle RAMS pour la période gélive d'avril 2003 en moyenne vallée de la Loire.

Données : [Météo-France/INRA et RAMS]

Le 8 avril, la température minimale n'est descendue que légèrement en dessous de 0°C, alors que RAMS a simulé des minimales sensiblement plus basses (autour de -1/-2°C). Le 10 avril, la température minimale est descendue à -1,3°C à Beaulieu-sur-Layon et -1,5°C à Montreuil-Bellay. La Figure XII.3a montre les champs de vitesse et de direction du vent simulés à 50 m par le modèle RAMS pour la journée du 10 avril. Il apparaît clairement que le flux simulé est orienté au nord sur la plupart des régions du nord de la France. En Val de Loire les simulations montrent un flux établi au nord-nord-ouest. La vitesse du vent est également faible à 5h TU avec des vitesses simulées autour de 3-4 m/s à 50 m du sol. La grille 4 du modèle indique des valeurs de vent à 50 m inférieures à 4 m/s dans le fond de la vallée des Coteaux du Layon. Les données d'observation de la station de Beaulieu concernant la vitesse du vent durant l'ensemble de l'épisode (Figure XII.3b) montre que l'air froid qui soufflait du nord était beaucoup plus soutenu durant les deux premières journées qu'à partir de la nuit du 9 au 10 avril où la vitesse du vent est passée en dessous de 2 m/s. Des vents inférieurs à ce seuil, conjugués à un ciel nocturne clair et la présence d'air froid,

favorise la mise en place de gelées radiatives comme l'explique Madelin (2004). Ceci explique que les valeurs les plus basses de l'épisode ont été enregistrées ce jour-là. Le modèle RAMS a une nouvelle fois surestimé le risque de gelée avec des valeurs inférieures aux valeurs observées d'environ 1,5°C pour les deux stations. Les températures maximales ont été quant à elles assez nettement surestimées par le modèle durant les journées des 8 et 10 avril mais sous-estimées le 9 à Beaulieu-sur-Layon alors que la simulation est plutôt bonne à Montreuil-Bellay ce jour-là. Ainsi, le modèle semble accentuer les températures maximales lors des deux journées les plus ensoleillées de l'épisode.

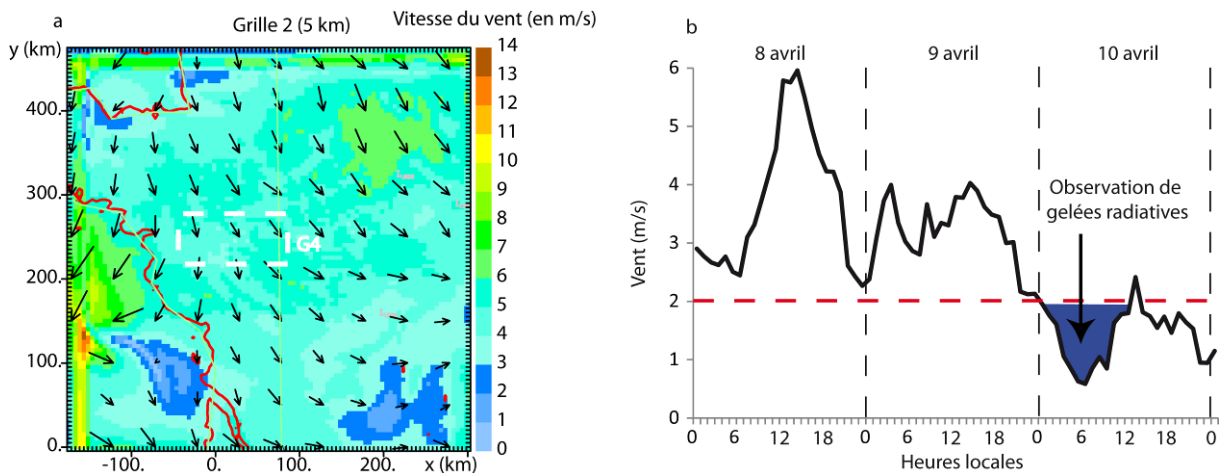


Figure XII.3. Champs de vitesse et de direction du vent à 50 m simulés par le modèle RAMS à 5h TU le 10 avril 2003 (a) et vitesse du vent (b) mesurée à la station de Beaulieu-sur-Layon du 8 au 10 avril 2003 (G4 : grille 4)
Données : [Météo-France /RAMS]

XII.1.1.3. Analyse statistique de la distribution des températures simulées par rapport aux observées.

L'analyse des graphiques cartésiens (Figure XII.4), qui représentent les températures observées en fonction des températures simulées, montrent des relations significatives (valeur- $p < 0,00001$) en accord avec la table de Bravais-Pearson, avec des coefficients de détermination (R^2) de 0,86 pour Beaulieu-sur-Layon et 0,92 pour Montreuil-Bellay. Ainsi, 86% des observations correspondent aux simulations à Beaulieu-sur-Layon et 92% à Montreuil-Bellay. Les pentes des deux droites de régression sont en revanche inférieures à 0,8 et donc les droites d'ajustements ne sont pas parallèles à la première bissectrice. En effet, le cycle est bien reproduit mais des biais existent entre la simulation et l'observation. Les températures basses sont sous-estimées par le modèle comme on peut le voir à gauche de chaque graphique avec le nuage de points se situant au-dessus de la bissectrice. A l'inverse la surestimation des températures maximales apparaît à droite des graphiques avec un nuage de points situé en-dessous de la bissectrice. Ces résultats expriment donc la difficulté du modèle à reproduire les extrêmes thermiques journaliers, avec une exagération systématique de ces valeurs.

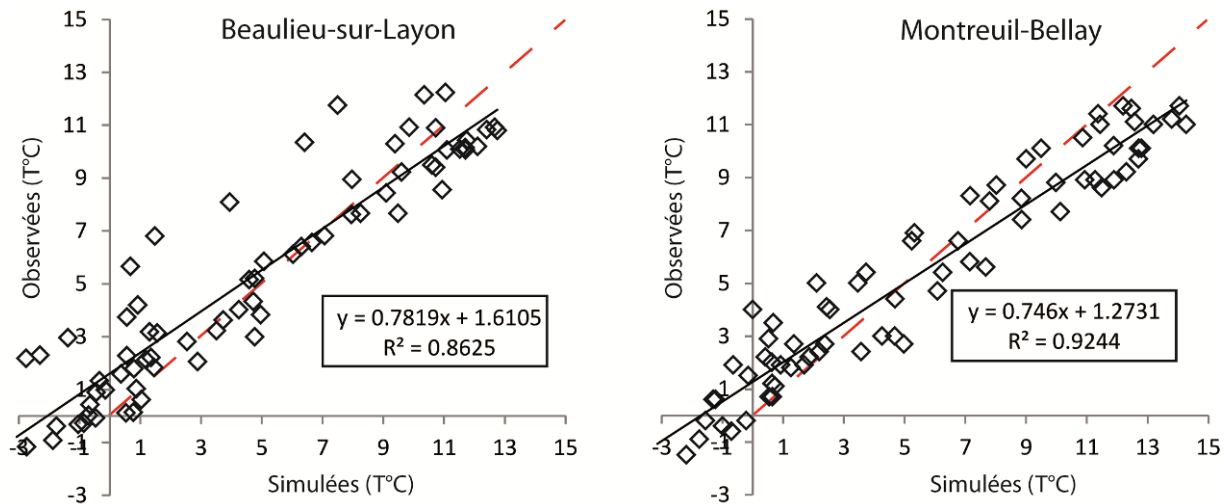


Figure XII.4. Graphique cartésien des températures observées en fonction des températures simulées par le modèle RAMS pour 2 stations durant l'épisode de gel tardif du 8 au 10 d'avril 2003 (la droite en pointillé rouge représente la première bissectrice).

Données : [Météo-France/INRA et RAMS]

La chronologie de l'épisode gélif du 8 au 10 avril a ainsi bien été reproduite par le modèle RAMS mais le risque gélif a souvent été surestimé pour les mailles correspondant aux stations notamment les 8 et 10 avril.

XII.1.2. L'épisode caniculaire du mois d'août

Après un début d'été déjà très chaud en France avec un premier épisode caniculaire en juin, la première quinzaine d'août a connu une vague de chaleur exceptionnelle pour un grand nombre de régions françaises. Les températures ont très fréquemment dépassées le seuil des 35°C en moyenne vallée de la Loire. Les simulations du modèle RAMS ont une nouvelle fois été comparées aux observations des stations météorologiques.

XII.1.2.1. Situation synoptique et conséquences

Le 7 août à 12h TU, la dorsale anticyclonique installée depuis le début du mois est encore bien en place et permet aux températures caniculaires de se maintenir (Figure XII.5). Une instabilité est à noter en Corse et sur les reliefs du sud du Massif-Central (Cévennes). L'air un peu plus frais présent sur les côtes de la Manche, les jours précédents, s'est éloigné et les températures remontent à nouveau dans le nord-ouest. Le nord de la Bourgogne, le Centre et l'arrière-pays Provençal restent les régions les plus chaudes ce jour-là. C'est donc encore une journée caniculaire pour le Val de Loire avec des températures supérieures à 35°C partout. Le 8 août, la dorsale anticyclonique subsiste alors qu'une dépression thermique déstabilise la masse d'air depuis le sud-ouest. La conséquence est une nouvelle journée sèche et caniculaire dans le nord-est et le Centre en particulier alors que des orages et de l'instabilité se déclenchent plus au sud et surtout sur les reliefs. Notons des températures minimales très élevées notamment à Paris puisque la température n'est pas descendue en dessous de 28°C. Les maximales étaient comprises entre 22°C à Lille et 41°C à Auxerre. En Val de Loire, la journée est tout aussi ensoleillée et caniculaire que la veille avec des

températures plus proches des 40°C que des 35°C dans l'est de la région. Le 9 août 2003, la situation est toujours bloquée avec la dorsale anticyclonique qui influence largement le temps sur l'Europe occidentale (Figure XII.5). En revanche l'air se déstabilise toujours un peu plus sur le sud du pays et dans le centre-ouest où des orages éclatent en journée. La canicule se poursuit sous le soleil dans la plupart des régions mais avec de l'instabilité orageuse, comme des Cévennes au Vivarais ou du Poitou jusqu'à la Haute Marne. Les températures maximales s'échelonnent de 26°C au Havre à 41°C à Romorantin. La canicule se poursuit également dans le Val de Loire avec des minima à nouveau très élevés et supérieurs à 20°C. Notons les 15°C à Romorantin, dus à son sol sableux. Les maximales sont toujours aussi élevées avec même jusqu'à 39°C à Nantes, jusque-là un peu plus préservée des températures extrêmes grâce à l'influence océanique. Le 10 août 2003, un front froid approche de la France mais la dorsale anticyclonique, tout en se décalant vers l'est, reste présente sur tout l'hexagone (Figure XII.5). La canicule se renforce à nouveau avec l'advection d'air tropical engendré par l'approche de la dépression. C'est ainsi une nouvelle journée caniculaire pour toute la France avec un temps sec et ensoleillé alors qu'un talweg thermique occasionne encore quelques averses orageuses des Pays de la Loire à la Normandie. Les températures restent caniculaires dans le Val de Loire pour cette journée avec, à nouveau, 39°C relevé à Nantes et jusqu'à 41°C à Romorantin soit 25°C d'amplitude thermique diurne pour cette ville.

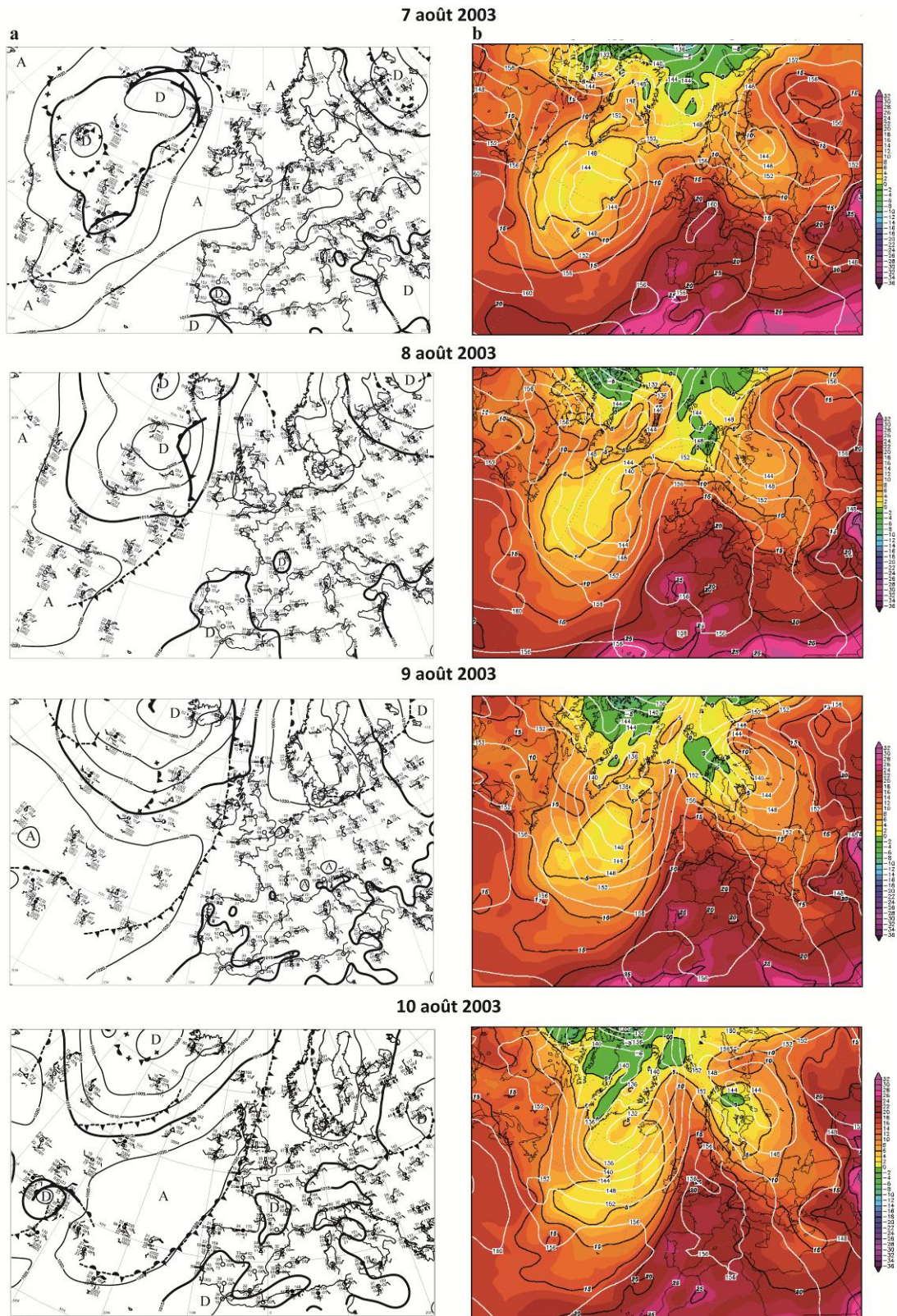


Figure XII.5. Analyses des champs de pression en surface à 12 h TU (a) et des températures à 850 hp à 0h TU (b) sur l'Europe durant l'épisode caniculaire du 7 au 10 août 2003.

Sources : [Météo-France et Wetterzentrale.de]

XII.1.2.2. Comparaison des simulations aux observations

Les observations du mois d'août 2003 sont comparées aux simulations des mailles correspondantes des stations de Beaulieu-sur-Layon et Montreuil-Bellay sur la Figure XII.6. Le cycle journalier apparaît plutôt bien reproduit par le modèle RAMS pour ces deux stations, si l'on excepte un léger décalage temporel de la température maximale. Ce décalage est récurrent aux deux stations et pour l'ensemble des journées. Une vérification a donc été faite avec d'autres stations situées dans d'autres parcelles de moyenne vallée de la Loire et toutes enregistrent, durant l'épisode, des températures maximales beaucoup plus tardives que d'habitude. Après, l'épisode caniculaire les stations ont de nouveau enregistré des températures maximales vers 15h TU. Les conditions particulières de cette canicule avec des valeurs enregistrées extrêmes (38,3°C à Beaulieu-sur-Layon et 39,3°C à Montreuil-Bellay le 10 Août) et non-habituelles pour la région, font que les maximales peuvent se produire 1 à 2 h plus tard que lors d'une après-midi classique, étant donné la chaleur accumulée durant tout l'après-midi. L'heure d'occurrence de la température minimale est en revanche bien simulée par le modèle, mais la valeur de cette température est souvent surestimée notamment durant les trois premières journées de l'épisode caniculaire. L'observation montre des températures nocturnes très élevées (>18°C) mais les valeurs simulées sont très supérieures avec plus de 26°C de température minimale. La valeur des températures maximales journalières est également surestimée par le modèle sur ces trois premiers jours. RAMS simule des valeurs de températures maximales 2 à 3°C plus élevées voire jusqu'à 5°C le 7 août à Montreuil-Bellay. Enfin, ces biais positifs de RAMS deviennent de moins en moins marqués au fil de l'épisode caniculaire. La dernière journée de l'épisode est la mieux reproduite par le modèle avec des biais *quasi* nul, aussi bien sur les températures minimales que maximales. Les biais plus importantes sur les premières journées de l'épisode peuvent être dus à un temps de latence dans l'étalonnage du modèle qui est peut être observé lors de certaines simulations.

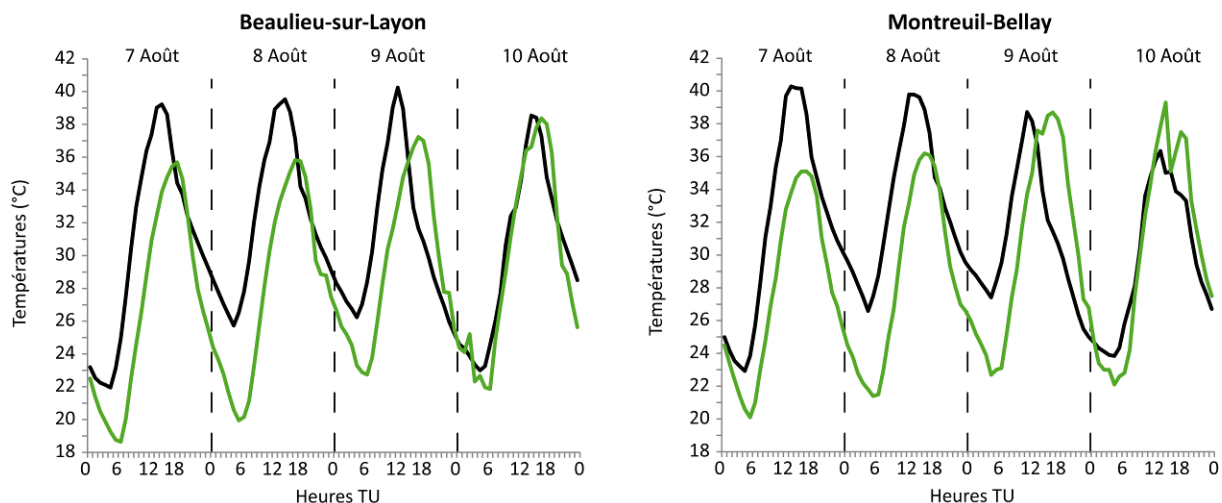


Figure XII.6. Températures horaires observées (en vert) par deux stations de l'INRA et de Météo-France et simulées (en noir) par le modèle RAMS pour la période caniculaire d'août 2003 en moyenne vallée de la Loire.

Données : [Météo-France/INRA et RAMS]

XII.1.2.3. Analyse statistique de la distribution des températures simulées par rapport aux observées.

Le graphique cartésien de confrontation des valeurs simulées et observées (Figure XII.7) aide également à visualiser les résultats de la simulation. La relation est significative (valeur- $p < 0,00001$) pour les deux stations et les R^2 de Beaulieu-sur-Layon et Montreuil-Bellay sont respectivement de 0,61 et 0,54. Ainsi, 61% des observations à Beaulieu-sur-Layon et 54% à Montreuil-Bellay correspondent aux simulations. Les pentes de la droite de régression sont proches de 0,8 pour les deux stations. Comme observé sur la Figure XII.6, les biais restent importants pour les deux stations avec des biais essentiellement positifs traduisant des températures observées nettement supérieures (jusqu'à 8°C) par rapport aux températures simulées. Ces biais négatifs correspondent aux heures les plus chaudes et les plus fraîches de la journée, où le modèle a du mal à reproduire les températures sur les mailles correspondant aux stations.

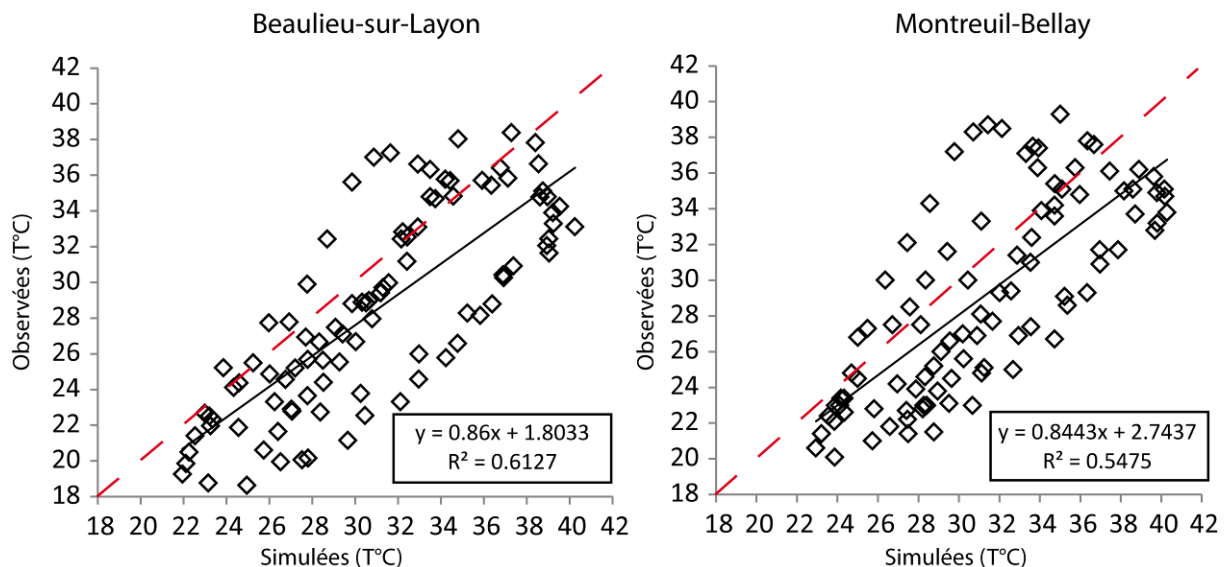


Figure XII.7. Graphique cartésien des températures observées en fonction des températures simulées par le modèle RAMS pour 2 stations durant l'épisode caniculaire d'août 2003 (la droite en pointillé rouge représente la première bissectrice).

Données : [Météo-France/INRA et RAMS]

XII.2. Validation des simulations pour deux épisodes de fortes chaleurs, en 2009 et 2010.

Deux épisodes de fortes chaleurs, en 2009 et 2010, ont été simulés par le modèle RAMS jusqu'à la résolution de 200 m (grille 4). Ces simulations doivent permettre d'évaluer les capacités du modèle à reproduire ce type d'évènements et les sorties ont pu être comparées avec les observations in situ des stations du réseau TERVICLIM/INRA, en place depuis 2008. Ainsi, une expertise plus fiable de ces simulations a pu être réalisée grâce à un réseau de stations disponible plus dense que durant l'année 2003.

XII.2.1. Août 2009

En août 2009, un épisode de fortes chaleurs s'est installé sur la France durant 4 jours, du 15 au 18 août. La situation synoptique a été décrite dans le chapitre IX. Les simulations horaires de RAMS à 200 m ont pu ainsi être comparées avec 8 stations météorologiques sans données manquantes sur l'épisode.

XII.2.1.1. Comparaison des simulations aux observations

La vague de chaleur d'août 2009 a été relativement bien reproduite par le modèle RAMS. En effet, la Figure XII.8 qui présente les confrontations des simulations avec les observations des 8 stations, montre que le cycle journalier des températures est bien reproduit par le modèle avec notamment une correspondance temporelle des minima et maxima observés et simulés. En revanche, des biais existent sur les valeurs simulées par rapport aux observations, plus ou moins marqués selon les stations et les journées. La première journée, qui est d'ailleurs la plus chaude de l'épisode, est également celle où les températures maximales ont été les mieux simulées avec un biais faible ($<1^{\circ}\text{C}$). La baisse des températures maximales jusqu'au 17 août a bien été simulée mais un peu précocement puisque le modèle montre des températures maximales nettement moins élevées que celles observées le 16, plus particulièrement pour les stations de Saint-Cyr-en-Bourg, Cléré et Chaume. Le 17, les températures maximales sont simulées quasiment sans biais, sauf à Cléré et Saint-Cyr-en-Bourg où la maximale a été un peu plus sous-estimée. Le 18, la nouvelle hausse de la température a été bien reproduite par RAMS avec des biais *quasi* nuls ou légèrement négatifs. Les températures minimales ont été dans l'ensemble surestimées, contrairement aux minimales simulées pour l'épisode caniculaire de 2003. Ces biais varient en général de 1 à 2°C et les températures minimales ont été le plus surestimées durant la journée du 18 août pour toutes les stations. Nous pouvons émettre l'hypothèse que l'advection chaude du 18 août a été surestimée par le modèle RAMS, d'où une nuit du 17 au 18 simulée très douce.

XII.2.1.2. Analyse statistique de la distribution des températures simulées par rapport aux observées.

La Figure XII.9 présente les graphiques cartésiens de la confrontation des données simulées avec celles observées. Ces graphiques confirment les très bons résultats obtenus de cette simulation avec des R^2 entre 0,7 et 0,93, d'où des relations toutes significatives (valeur- $p < 0,00001$). Les relations les moins fortes sont celles de Faye-d'Anjou et Haute-Perche alors qu'à l'inverse, les plus fortes sont celles de Beaulieu-sur-Layon et Saint-Cyr-en-Bourg. Cependant, les pentes des droites de régression sont très proches de 1 pour les stations de Haute-Perche et Faye-d'Anjou, confirmant une non dérive du modèle aussi bien dans les maximales que les minimales. Les équations des droites de régression des autres stations ont des pentes comprises entre 1,16 à Brissac à 1,35 à Chaume, témoignant d'une surestimation des valeurs minimales et d'une sous-estimation des valeurs maximales, plus ou moins importantes selon les stations.

Cet épisode de fortes chaleurs de 2009 est ainsi plutôt bien simulé par le modèle RAMS malgré la surestimation pratiquement systématique de la température minimale journalière observée dans les différentes stations. Les valeurs des températures maximales sont simulées correctement avec parfois quelques biais négatifs qui restent moins marqués que pour les minimales. Les valeurs extrêmes diurnes, ont donc été simulées de manière correcte par le modèle aussi bien d'un point de vue temporel qu'en valeur absolue.

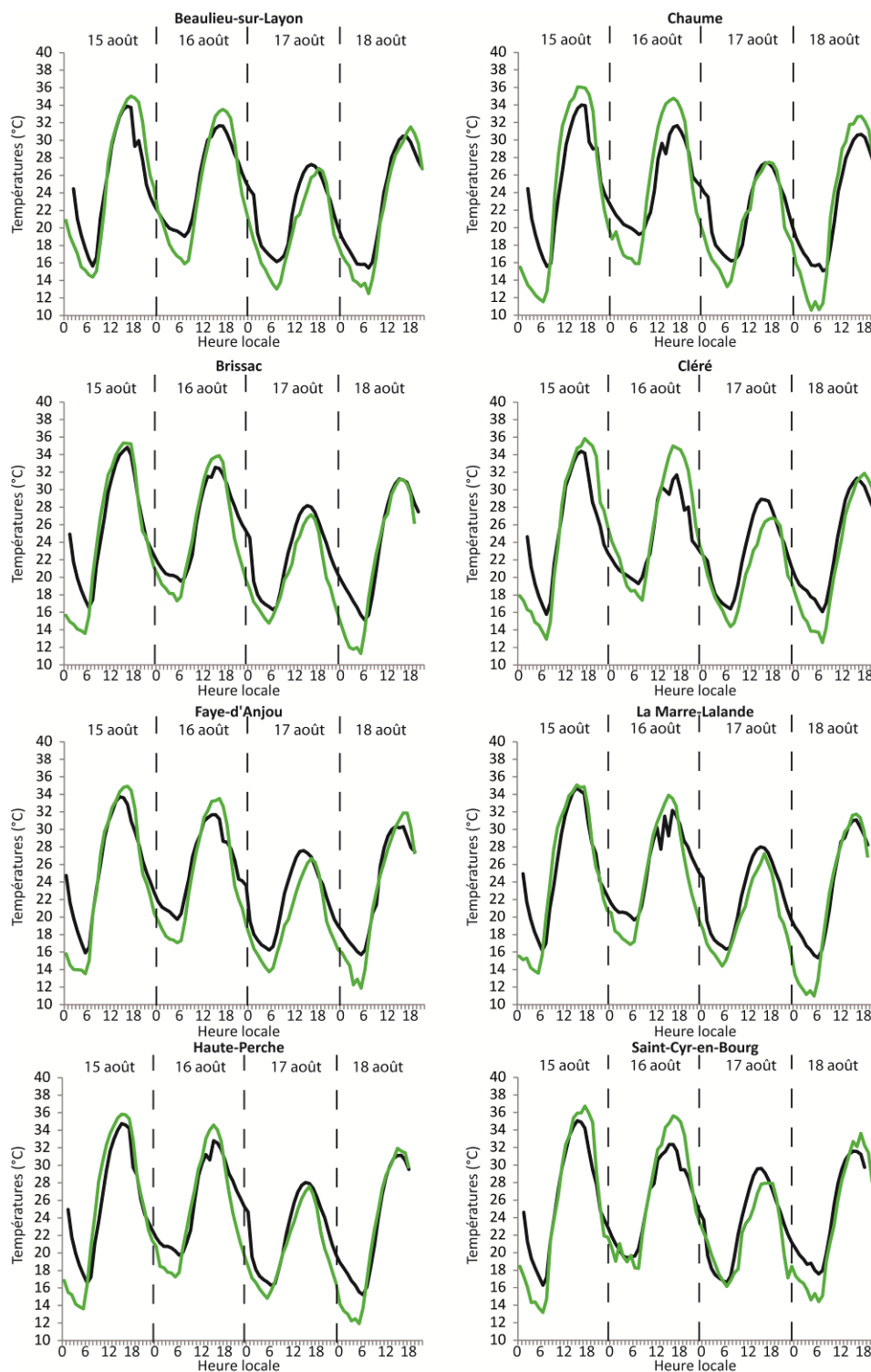
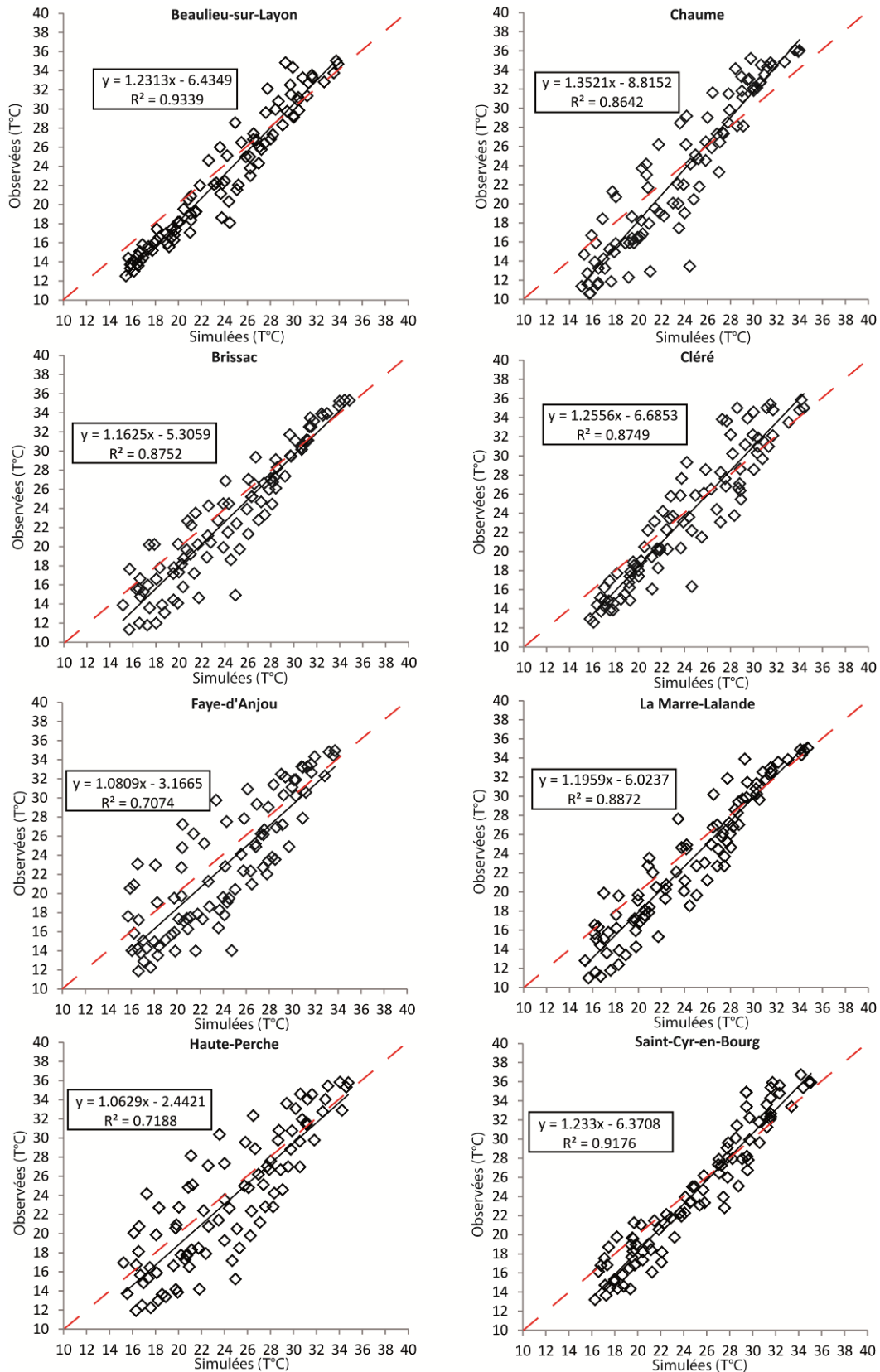


Figure XII.8. Températures horaires observées (en vert) par les différentes stations du réseau TERVICLIM/INRA et simulées par RAMS (en noir) pour la période de fortes chaleurs du 15 au 18 août 2009. Données : [TERVICLIM/INRA et RAMS]



**Figure XII.9. Graphique cartésien des températures observées par 8 stations du réseau TERVICLIM/INRA en fonction des températures simulées par le modèle RAMS pour les mailles correspondantes pendant l'épisode caniculaire du 15 au 18 août 2009 (la droite en pointillé rouge représente la première bissectrice).
Données : [TERVICLIM/INRA et RAMS]**

XII.2.2. Juillet 2010

Une autre vague de fortes chaleurs a concerné la France du 7 au 10 Juillet 2010. Cet épisode est étudié dans ce chapitre et les températures horaires simulées par le modèle pour les mailles correspondant à 9 stations de réseau TERVICLIM/INRA ont été comparées aux données enregistrées par ces mêmes stations.

XII.2.2.1. Situation synoptique et conséquences

Le 7 juillet, une dorsale anticyclonique est en place depuis plusieurs jours entre les Açores et l'Europe du nord. Cette dorsale advecte de l'air très chaud en provenance d'Afrique du nord. Le pic de chaleur en altitude est atteint en France, le 9 juillet 2010 (Figure XII.10). La masse d'air présente à 1500 m (niveau 850 hp) dépasse les 20°C sur les ¾ du pays avec des pointes au-dessus de 25°C dans le sud-ouest. Cette masse d'air est proche de 20°C au-dessus de la moyenne vallée de la Loire, le 9 juillet. Une faiblesse de l'anticyclone à partir du 8 juillet 2010 a cependant provoqué de l'instabilité sur la péninsule ibérique le 8 puis du centre-ouest au nord-est de la France dans la nuit du 8 au 9. Météo France dans son bulletin climatique journalier explique qu'« à la mi-journée, la Bretagne, la Basse-Normandie et les Pays de la Loire retrouvent un temps calme et bien ensoleillé qui s'étend au fil de l'après-midi au tiers nord de la France. » La température maximale sur la période a eu lieu le 8 juillet à Angers et Saumur avec respectivement 35,1°C et 35,5°C relevés par les stations de référence.

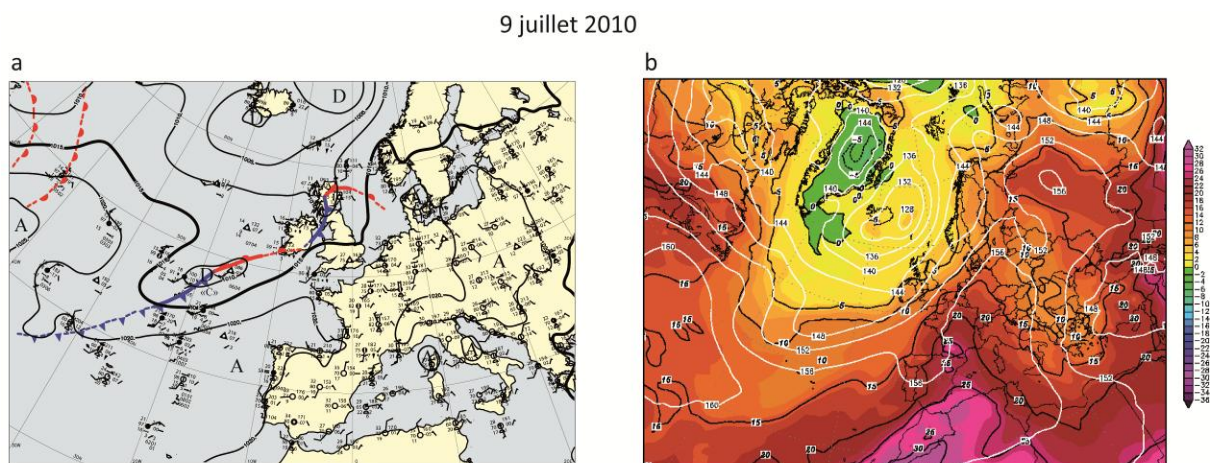


Figure XII.10. Analyses des champs de pression en surface (a) et des températures à 850 hp (b) sur l'Europe durant la journée la plus chaude de l'épisode caniculaire du 7 au 10 juillet 2010.

Sources : [Météo-France et Wetterzentrale]

XII.2.2.2. Confrontation des simulations horaires aux observations

Les graphiques de la Figure XII.11, qui confrontent les observations des 9 stations avec les simulations pour la maille du modèle correspondante (200 m de résolution), montrent des résultats assez semblables entre les différents sites. Les 7, 8 et 10 juillet, le cycle journalier des températures est plutôt bien reproduit alors que le 9 juillet la simulation diverge

considérablement de l'observation. Dans le détail des journées, celle du 7 juillet reste la journée la mieux reproduite par le modèle avec une bonne simulation du cycle mais également des valeurs de la température minimale et maximale. Le 8 juillet, le cycle est simulé correctement par le modèle, tout comme la valeur de la température maximale, mis-à-part pour Chaume où l'écart observation-simulation de la température maximale est un peu plus important (environ 2°C). Dans la nuit du 8 au 9 juillet, l'arrivée d'instabilité par le sud-ouest du pays provoque des précipitations qui ont bien été relevées par les stations du réseau. Les cumuls enregistrés cette nuit-là vont de 3,4 mm à Brissac jusqu'à 9,5 mm à Saint-Cyr-en-Bourg. Toutes les stations ont enregistré des précipitations qui se sont produites sous plusieurs averses, les premières ayant commencé le 8 au soir vers 21h et les dernières averses ayant quitté le val d'Anjou vers 10h30, le 9. La première simulation, sans convection explicite, a été retenue, puisqu'elle donne des températures maximales simulées moins biaisées que dans le cas d'une simulation avec convection explicite (cf. Annexe n°1). Cependant, le modèle a du mal à appréhender cet événement correctement et simule une chute de la température après une maximale simulée en début d'après-midi pour l'ensemble des stations. La température minimale du 9 est quant à elle largement surestimée avec des biais d'environ 2,5°C à Haute-Perche et Brissac mais jusqu'à plus de 6°C dans les autres stations. Enfin, le 10 juillet, la simulation recolle progressivement aux observations des stations avec un cycle journalier bien reproduit mais des résultats pour les valeurs maximales plus proches de l'observation que pour les minimales

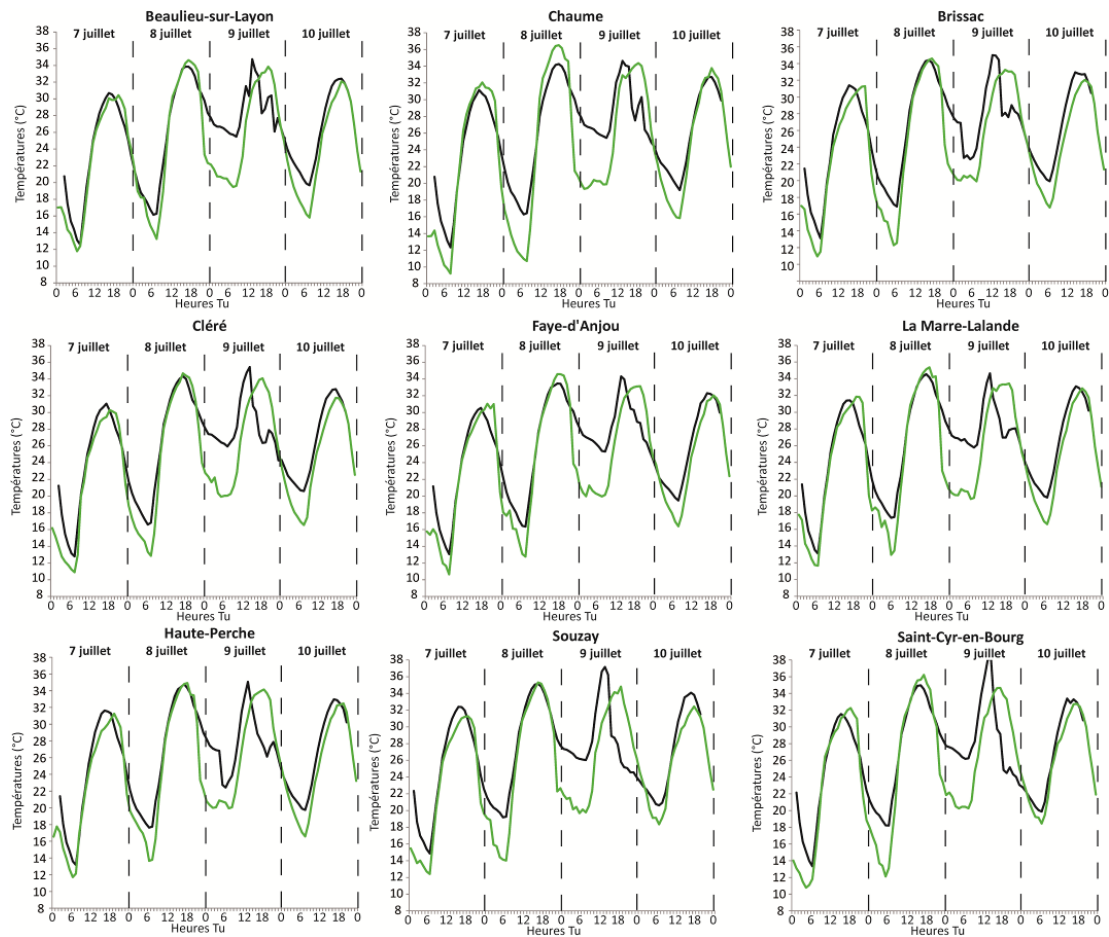


Figure XII.11. Températures horaires observées (en vert) par les différentes stations du réseau TERVICLIM/INRA et simulées par RAMS (en noir) pour la période de fortes chaleurs du 7 au 10 juillet 2010. Données : [TERVICLIM/INRA et RAMS]

XII.2.2.3. Analyse statistique de la distribution des températures simulées par rapport aux observées.

Les températures simulées par le modèle ont été directement confrontées aux températures observées dans les différentes stations (Figure XII.12). Les résultats montrent des relations significatives ($p < 0,00001$) pour toutes les stations avec des coefficients de détermination tous supérieurs à 0,74. Il est néanmoins intéressant de noter que les deux simulations les moins proches de l'observation sont celles des deux seules stations du Saumurois, c'est-à-dire Souzay et Saint-Cyr-en-Bourg. Le modèle RAMS aurait ainsi mal reproduit la temporalité du phénomène pluvieux du 9 juillet, avec une évacuation simulée des nuages plus précoce et donc la simulation d'une température maximale supérieure à celle réellement observée. En effet, la température maximale de la journée du 9 a été largement surestimée dans ces deux stations, par rapport aux autres sites (Figure XII.11). Globalement, cette journée du 9 juillet diminue la robustesse de la relation sur l'ensemble de la période et pour toutes les stations. Il est également intéressant de noter que la valeur des pentes, issues des équations de la droite d'ajustement linéaire de chaque nuage de points, est proche de 1 pour la plupart des stations, hormis à Chaume où les températures élevées de l'après-midi sont surestimées (pente de 1,3). Cette même station était également celle avec les valeurs de températures élevées les plus surestimées sur l'épisode d'août 2009. Chaume est la seule station (des 9

retenues) située en bas de coteau dans une vallée encaissée d'environ 70 m. Le modèle aurait ainsi du mal à reproduire le refroidissement nocturne liée aux inversions thermiques, tout comme le réchauffement diurne important, liée à la faible altitude de la station. En effet, les phénomènes de brise de pente et de formation de lac d'air froid en conditions radiatives, se produisent de manière très localisée, souvent sur de court laps de temps, d'où parfois la difficulté du modèle à les reproduire.

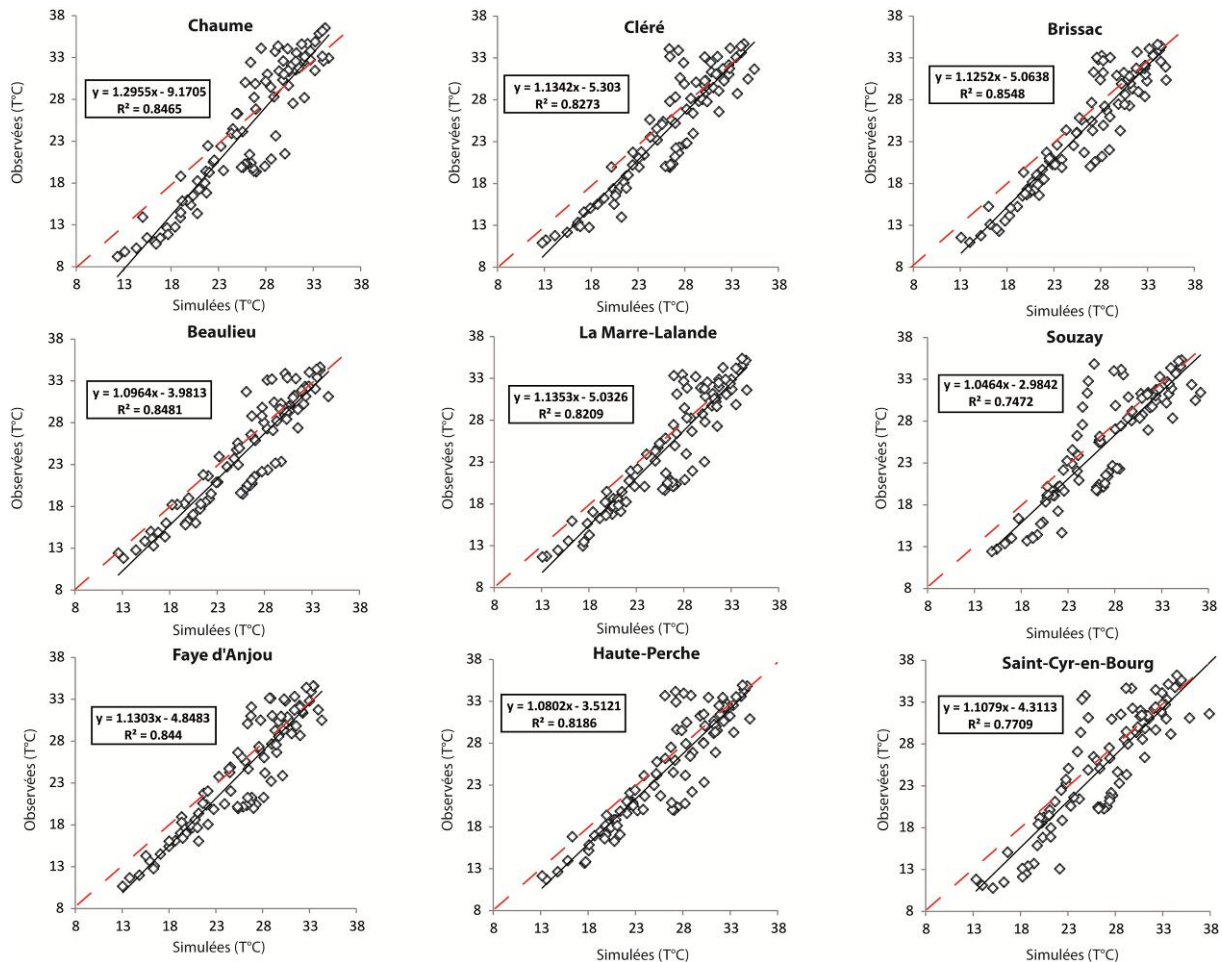


Figure XII.12. Graphique cartésien des températures observées par 9 stations du réseau TERVICLIM/INRA en fonction des températures simulées par le modèle RAMS pour ces 9 stations et pendant l'épisode caniculaire de juillet 2010 (la droite en pointillé rouge représente la première bissectrice).

Données : [TERVICLIM/INRA et RAMS]

XII.2.2.4. Simulation journalière pour la date du 8 juillet 2010 avec les marges de variabilité spatiale autour des stations (fournies par le modèle RAMS).

Le modèle RAMS simulant sur la grille 4 à 200 m de résolution horizontale, nous pouvons choisir de ne pas prendre uniquement la maille la plus proche de la station mais l'ensemble des n mailles dans un rayon prédéfini. Ainsi, ce travail a été fait pour la simulation du mois de juillet 2010 avec des marges de variabilité de 1,5 km autour des stations. L'extraction de ces graphiques nécessitant un certain temps de calcul, ce travail n'a pas été fait pour les autres épisodes de 2003 et 2009. Cependant, cet exemple doit permettre de se rendre compte de la variabilité importante de la température sur un secteur viticole et d'évaluer la prise en compte de cette variabilité par le modèle RAMS. En effet, cette marge de variabilité

peut permettre de couvrir suffisamment de diversité topographique pour évaluer la capacité du modèle à prendre en compte le relief (coteau, fond de vallée, plateau ...). Les résultats de la journée la plus chaude (le 8 juillet) sont présentés par la Figure XII.13.

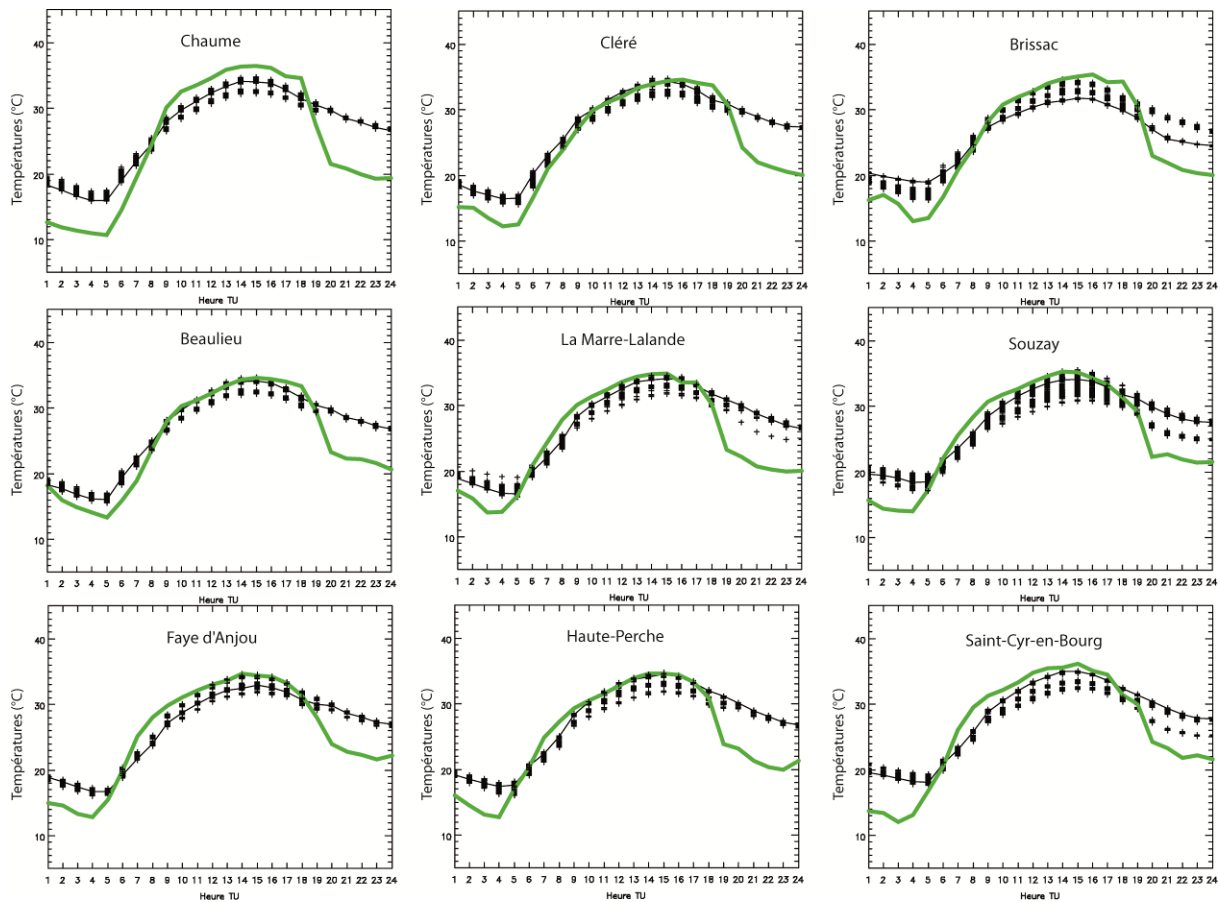


Figure XII.13. Températures horaires observées (en vert) par les différentes stations du réseau TERVICLIM/INRA et simulées par RAMS (en noir) pour le 8 juillet 2010. Les barres de part et d'autre de la courbe noire représentent la variabilité spatiale de la température dans un rayon de 1,5 km autour de la maille correspondant à la station.

Données : [TERVICLIM/INRA et RAMS]

La température maximale a souvent été mieux simulée en valeur absolue que la minimale. Cependant à Chaume, Brissac et Faye-d'Anjou, cette dernière a été un peu plus sous-estimée que pour les autres stations. Les températures maximales sont néanmoins assez variables dans un rayon de 1,5 km autour de ces trois stations, ce qui montre que le modèle présente une variabilité spatiale assez forte, même sur de courtes distances. Ce peut indiquer que la variabilité topographique du site est bien prise en compte par le modèle. Les températures minimales sont surestimées pour les mailles autour des 9 stations de 3°C à plus de 6°C. Le modèle a donc plus de mal à simuler la baisse nocturne de la température, due en grande partie cette nuit-là aux conditions radiatives.

XII.2.2.5. Cartographie des champs de températures issus du modèle RAMS pour la journée la plus chaude de l'épisode : le 8 juillet 2010.

Les champs de températures simulées à 15h TU par RAMS pour la journée du 8 juillet, journée la plus chaude de l'épisode, sont présentés pour les différentes grilles sur la Figure XII.14. La grille 1 permet de voir la situation synoptique simulée par le modèle. La remontée d'air chaud par l'Espagne apparaît ainsi très clairement avec des températures simulées entre 35 et 41°C sur une large partie du sud-ouest de la France. Sur la grille 2, on peut voir que la moyenne vallée de la Loire se retrouve ce jour-là en limite de l'air très chaud (plages violettes) présent sur le sud-ouest. La grille 3 puis la grille 4 permettent, grâce à la désagrégation, d'obtenir des résultats plus fins (jusqu'à 200 m de résolution) sur notre région d'étude. Les zones correspondant à l'AOC Anjou-Saumur apparaissent ainsi de manière évidente (en violet) sur la grille 4 avec des températures supérieures aux autres secteurs entourant les vignobles. Ceci montre que le modèle reproduit bien les différents topoclimats viticoles de la région et notamment les échanges entre la végétation et l'atmosphère. Les effets de coteaux viticoles bien appréhendés par le modèle, expliquent également ce résultat.

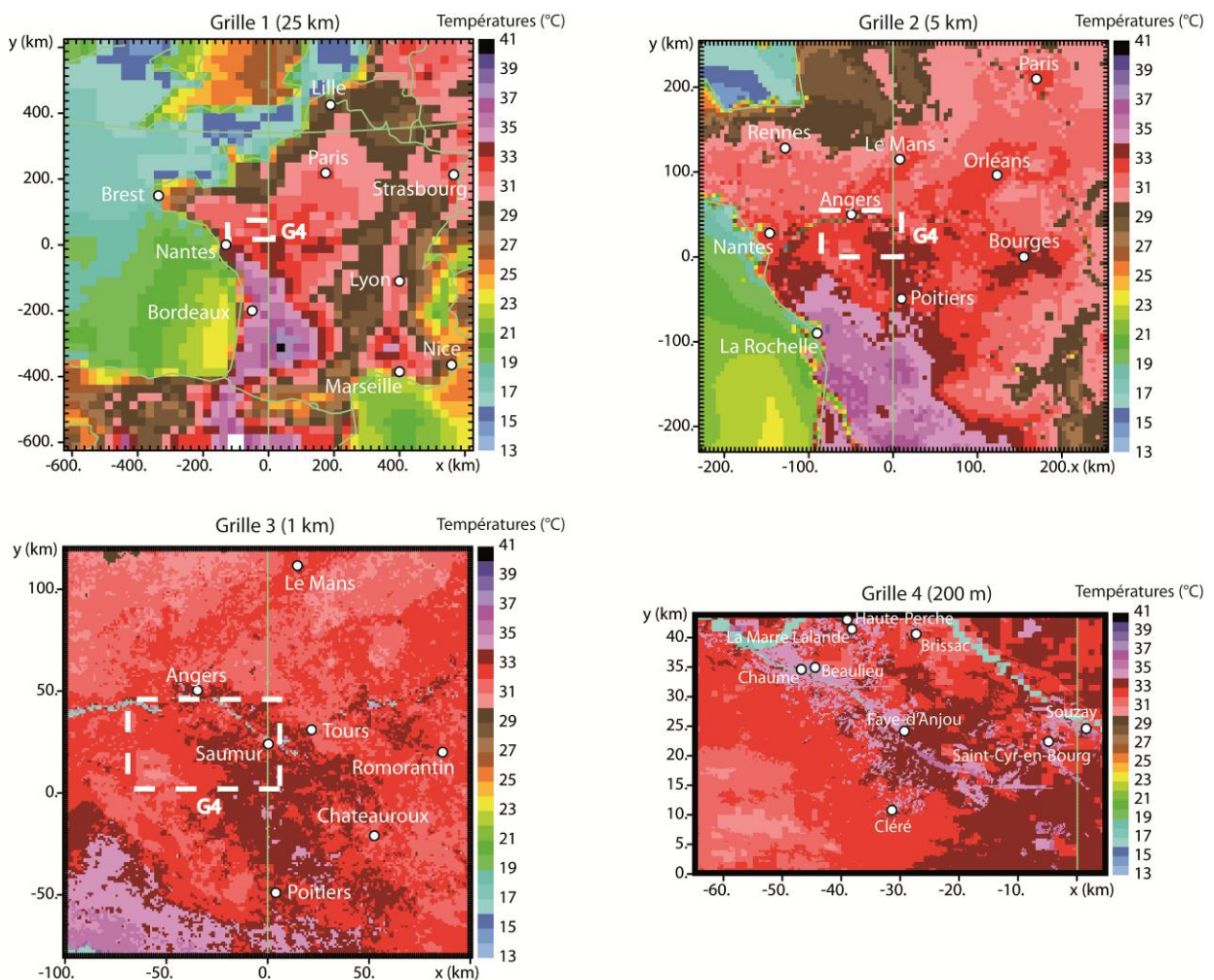


Figure XII.14. Températures simulées à 2 m par le modèle RAMS le 8 juillet 2010 à 15h TU pour les 4 grilles imbriquées.

Données : [RAMS]

CONCLUSION DU CHAPITRE XII

La simulation de quatre épisodes ponctuels de gel et de vague de chaleur pour la vigne a permis de contrôler la capacité de RAMS à reproduire les valeurs extrêmes journalières et la variabilité spatiale des températures liée notamment à la topographie. L'aléa gélif d'avril 2003 a été légèrement surestimé par le modèle avec des valeurs de températures minimales modélisées inférieures à celles observées. Les températures maximales lors des épisodes de chaleur ont, à l'inverse, été souvent sous-estimées, de parfois plusieurs degrés comme en 2003. La simulation de la canicule d'août 2003 est par ailleurs l'épisode qui a été le moins bien reproduit par le modèle. En effet, un décalage des températures maximales dans le temps est constaté entre la simulation et l'observation. Le caractère exceptionnel des conditions de cette canicule et notamment la mauvaise prise en compte des échanges entre la végétation et l'air peuvent expliquer ce décalage. Les vagues de chaleur plus classiques de 2009 et 2010 n'ont pas connu de températures maximales aussi tardives et le modèle a ainsi bien reproduit le cycle journalier et les valeurs de température. Une canicule comme celle de 2003 a une période de retour probablement supérieure à 150 ans. Les vagues de chaleur, déjà intenses, des étés 1976 et 1983 en France n'ont même pas atteint la même durée et intensité. Des vagues de chaleur comme celles de 2009 et 2010 sont beaucoup plus courantes et se produisent en moyenne 1 fois par an en moyenne vallée de la Loire. Le modèle RAMS arrive donc plus facilement à reproduire des épisodes plus classiques que ceux trop extrêmes comme 2003. Enfin, les valeurs des températures minimales lors de ces 3 vagues de chaleurs ont été plutôt bien reproduites par le modèle en août 2003 mais avec des biais positifs récurrents en août 2009 et juillet 2010 et donc une surestimation des températures minimales. Les conditions de maturation modélisée sont plus chaudes que les conditions réelles observées dans les parcelles.

Ainsi, la modélisation à échelle fine d'épisodes extrêmes par un modèle régional tel que RAMS peut s'avérer complexe même si l'ensemble des données locales, concernant le terrain et la végétation, ont été intégrés en entrée au modèle. Néanmoins, RAMS présente un réel intérêt pour la modélisation des champs thermiques au sein des vignobles, en particulier lors de ces épisodes de gel ou de chaleur intense, afin de déterminer les zones les plus exposées à des risques climatiques pour la vigne.

Chapitre XIII : SIMULATIONS FUTURES DES MODÈLES ARPEGE-CLIMAT ET RAMS SUR LA PÉRIODE 2041-2050 ET POUR UN ÉPISODE EXTRÊME

Les résultats des simulations d'ARPEGE-Climat (50 km) et de RAMS (5 km) sur la période 2041-2050, selon le scénario A2 du GIEC, sont présentés dans ce chapitre. Les mêmes paramètres thermiques et indices bioclimatiques qui ont été étudiés sur la période de référence, le sont également pour cette période future et pour les mêmes mois (avril-juillet et août). Ainsi, ces différents paramètres thermiques sont-ils comparés aux observations de 1991-2000 pour évaluer l'évolution prévue par les projections des deux modèles. Les résultats sont ensuite discutés, notamment en lien avec les résultats obtenus dans le chapitre XI sur la période de contrôle. Ces simulations de 2041-2050 doivent servir à évaluer l'évolution thermique future en moyenne vallée de la Loire et les impacts possibles en viticulture, en particulier sur les risques climatiques liés aux extrêmes thermiques. Les conclusions sur l'évolution des températures ne sont tirées que des résultats pour lesquelles la différence entre l'observation et la simulation n'était pas significative sur la période de contrôle. Dans la dernière partie de ce chapitre, un épisode extrême chaud de la décennie 2041-2050, simulé par le modèle RAMS à la résolution de 200 m est décrit. Les simulations horaires sur les 4 jours de l'épisode et pour les mailles correspondantes à 4 stations de moyenne vallée de la Loire sont analysées. Enfin, les champs thermiques modélisés sont étudiés sur les 4 grilles et plus particulièrement sur la grille 4 à 200 m de résolution pour évaluer la variabilité spatiale des températures minimales et maximales durant cet épisode caniculaire.

XIII.1. Simulations pour le mois d'avril

Sur la période de référence, les simulations d'ARPEGE-Climat et de RAMS sous-estimaient les températures minimales moyennes du mois d'avril. Le modèle RAMS donnaient cependant de meilleurs résultats. En effet, le risque gélif était bien estimé par le modèle, ainsi que le cumul des degrés jours. Les simulations 2041-2050 du mois d'avril, selon le scénario A2, sont alors comparées aux données d'observation de la période de référence pour évaluer l'évolution future de ces différents paramètres climatiques.

XIII.1.1. La température minimale moyenne

Le Tableau XIII.1 présente les comparaisons des observations 1991-2000 avec les simulations 2041-2050 pour les deux modèles ARPEGE-Climat et RAMS. Ainsi, le modèle ARPEGE-Climat simule une baisse d'environ 1°C de la température minimale moyenne du mois d'avril entre les deux périodes. Cependant, ARPEGE-Climat sous-estimait assez largement (en moyenne de 2,7°C) cette température sur la période de référence. RAMS, quant à lui, simule une hausse entre 1,9°C et 2,4°C sur la période 2041-2050 alors que ce même modèle sous-estimait, mais plus légèrement qu'ARPEGE-Climat (de 0,6°C en moyenne), cette température sur la période 1991-2000. Sur la période de référence, seules les différences entre les simulations de RAMS et les observations pour les stations de Montreuil-Bellay et Saumur, étaient non-significatives. En prenant en compte ces résultats, les températures minimales moyennes pourraient donc augmenter d'environ 2,1°C à Montreuil-Bellay et 1,8°C à Saumur, en accord avec les simulations de RAMS.

Tableau XIII.1. Comparaison des températures minimales du mois d'avril et du nombre de jours de gel observés sur la période 1991-2000 avec les simulations par les modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 2041-2050 et selon le scénario A2 du GIEC (les résultats en gras correspondent aux résultats dont la différence entre observation et simulation n'était pas significative sur la période 1991-2000).

| Station | Observation (1991-2000) | | Modèle | Simulation (2041-2050) | | Différences des moyennes entre simulation et observation | |
|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|
| | Températures minimales moyennes (°C) | Nombre de jours moyen avec gel (<0°C) | | Températures minimales moyennes (°C) | Nombre de jours moyen avec gel (<0°C) | Températures minimales moyennes (°C) | Nombre de jours moyen avec gel (<0°C) |
| Montreuil- Bellay | 5.8 | 1.2 | ARPEGE | 4.8 | 5.2 | -1.0 | +4.0 |
| | | | RAMS | 8.3 | 0 | +2.4 | -1.2 |
| Angers | 6.1 | 0.5 | ARPEGE | 5.0 | 5.2 | -1.2 | +4.7 |
| | | | RAMS | 8.1 | 0 | +1.9 | -0.5 |
| Saumur | 6.0 | 0.7 | ARPEGE | 4.8 | 5.2 | -1.2 | +4.5 |
| | | | RAMS | 8.4 | 0 | +2.4 | -0.7 |

Données : [Météo-France et RAMS]

XIII.1.2. Le risque gélif printanier

L'augmentation des températures minimales devrait assez logiquement faire baisser la fréquence du gel en moyenne vallée de la Loire. Le Tableau XIII.1 montre que le modèle RAMS ne simule aucune journée avec une température minimale gélive (<0°C) pour les mailles des trois stations sur la période 2041-2050. En revanche, ARPEGE-Climat augmente de 4 à 4,7 jours le nombre de jours avec gelée durant le mois d'avril. Néanmoins, sur la période 1991-2000, ARPEGE-Climat surestimait très largement le risque gélif, d'environ 6 à 7 jours. Les sorties 1991-2000 de RAMS pour les mailles des stations de Montreuil-Bellay et Saumur étant les seules qui étaient non-significativement différentes de l'observation, nous pouvons conclure avec plus de confiance sur ces mêmes simulations sur la période 2041-2050. Puisque RAMS surestimait très légèrement le risque de gel en avril sur la période de

contrôle, le nombre de journées avec risque de gelée sous-abri pourrait être nul durant cette décennie.

XIII.1.3. Le cumul des degrés jours du début de saison

Le modèle ARPEGE-Climat sous-estimait d'environ 25 à 30°C le cumul de degrés-jours d'avril sur la période de référence. Pour la période 2041-2050, ce même modèle prévoit une baisse du cumul de degrés-jours de 8 à 15°C alors que RAMS, qui estimait à plus ou moins 5°C le cumul observé sur la période 1991-2000, prévoit une hausse d'environ 16 à 25°C de cette somme. Les simulations de RAMS sur la période de contrôle étaient non-significativement différentes de l'observation. En prenant en compte ce dernier résultat, RAMS voit une hausse de l'indice des degrés-jours et donc très certainement un début de saison végétative plus précoce durant cette décennie. Les simulations de RAMS de l'occurrence des gelées du mois d'avril nous ont amenées à conclure à une absence de gel durant ce mois sur la période projetée. Cependant, si la saison végétative devient plus précoce et avance le stade du débourrement de la vigne à la fin mars, le gel en tant qu'évènement extrême resterait statistiquement possible et causerait alors de sérieux dommages à la vigne.

Tableau XIII.2. Comparaison des degrés jours cumulés du mois d'avril observés sur la période 1991-2000 avec les simulations par les modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 2041-2050 et selon le scénario A2 du GIEC (les résultats en gras correspondent aux résultats dont la différence entre observation et simulation n'était pas significative sur la période 1991-2000).

| Station | Observation (1991-2000) | | Simulation (2041-2050) | | Différences des moyennes entre simulation et observation |
|-------------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| | Cumul moyen de degrés jours (°C) | Modèle | Cumul moyen de degrés jours (°C) | Cumul moyen de degrés jours (°C) | |
| Montreuil- Bellay | 46 | ARPEGE | 38 | -8 | |
| | | RAMS | 71 | +25 | |
| Angers | 49 | ARPEGE | 39 | -10 | |
| | | RAMS | 65 | +16 | |
| Saumur | 53 | ARPEGE | 38 | -15 | |
| | | RAMS | 70 | +17 | |

Données : [Météo-France et RAMS]

XIII.2. Simulations pour le mois de juillet

Sur la période de référence, les estimations des températures moyennes du mois de juillet issues de RAMS et d'ARPEGE-Climat étaient relativement proches alors que celles des températures maximales étaient nettement plus proches de l'observation pour RAMS. Les températures moyennes et maximales simulées sur la période 2041-2050 sont alors confrontés aux données d'observation de la période de référence.

XIII.2.1. La température maximale moyenne

Le modèle RAMS simule avec peu de biais (-0,8 à 0,3°C) les températures maximales du mois de juillet de la période 1991-2000. Sur la période 2041-2050, ce même modèle prévoit une augmentation de 1 à 2°C environ de la température maximale moyenne du mois de juillet selon les mailles des stations. En revanche ARPEGE-Climat qui avait tendance à surestimer de manière importante (2,2 à 3,8°C) ces mêmes températures sur la période de contrôle, simule une hausse d'environ 4 à 5°C pour la décennie 2041-2050. Une nouvelle, fois seuls les résultats de RAMS étaient non-significativement différents de l'observation sur la période de contrôle. La température maximale moyenne du mois de juillet pourrait alors augmenter de 1,7°C à 2,3°C selon la modélisation de RAMS.

Tableau XIII.3. Comparaison des températures maximales du mois de juillet et du nombre de jours avec Tx>35°C observés sur la période 1991-2000 avec les simulations par les modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 2041-2050 et selon le scénario A2 du GIEC (les résultats en gras correspondent aux résultats dont la différence entre observation et simulation n'était pas significative sur la période 1991-2000).

| Station | Observation (1991-2000) | | Modèle | Simulation (2041-2050) | | Différences des moyennes entre simulation et observation | |
|-------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------|--------------------------------------|------------------------------------|--|------------------------------------|
| | Températures maximales moyennes (°C) | Nombre de jours moyen avec Tx>35°C | | Températures maximales moyennes (°C) | Nombre de jours moyen avec Tx>35°C | Températures maximales moyennes (°C) | Nombre de jours moyen avec Tx>35°C |
| Montreuil- Bellay | 26.1 | 0.5 | ARPEGE | 30.4 | 5.6 | +4.3 | +5.1 |
| | | | RAMS | 28.5 | 1.6 | +2.4 | +0.9 |
| Angers | 25.2 | 0.2 | ARPEGE | 30.5 | 6.6 | +5.3 | +6.4 |
| | | | RAMS | 27.2 | 0.5 | +2.0 | +1.8 |
| Saumur | 26.5 | 0.5 | ARPEGE | 30.4 | 5.6 | +3.9 | +5.1 |
| | | | RAMS | 27.5 | 0.4 | +1.0 | -0.1 |

Données : [Météo-France et RAMS]

XIII.2.2. Les températures maximales extrêmes

L'augmentation des températures maximales du mois de juillet va provoquer une multiplication des journées chaudes et très chaudes pour la vigne. Le nombre de journées chaudes (30-35°C) augmenterait légèrement en accord avec les simulations de RAMS, passant d'environ 4 à 6 jours (Figure XII.1a). Le modèle RAMS sous-estimait les observations sur la période de référence. Nous pouvons donc de manière assez confiante, penser que ces journées chaudes seront plus nombreuses dans l'avenir. Le modèle ARPEGE-Climat surestimait, au contraire, ces journées sur la période 1991-2000 et prévoit un nombre de jours chauds en nette hausse sur 2041-2050 : entre 7 et 8 jours chauds. Concernant, les journées dites « très chaudes » ou « caniculaires » (>35°C), leur nombre augmenterait aussi si on regarde les simulations des deux modèles sur la période future (Tableau XIII.1 et Figure XIII.1b). Le modèle ARPEGE-Climat simule une augmentation de 5 à 6 jours avec température maximale supérieure à 35°C, mais il surestime largement de 3 à 5 jours ces journées très chaudes sur la période 1991-2000. Le modèle RAMS prévoit une hausse de 0,9 jour pour Montreuil-Bellay et 1,8 jours pour Angers alors qu'il simulait plutôt correctement ce nombre

de jours sur la période de référence. Il prévoit cependant une baisse de seulement 0,1 jour à Saumur mais sous-estimait ce nombre de journées de 0,8 sur 1991-2000. Le nombre de journées avec des températures supérieures au seuil de 35°C pourrait augmenter légèrement sur la décennie 2041-2050 par rapport à la période de référence. Les journées à très fortes chaleurs resteraient toutefois encore des phénomènes assez rares en moyenne vallée de la Loire malgré le réchauffement climatique.

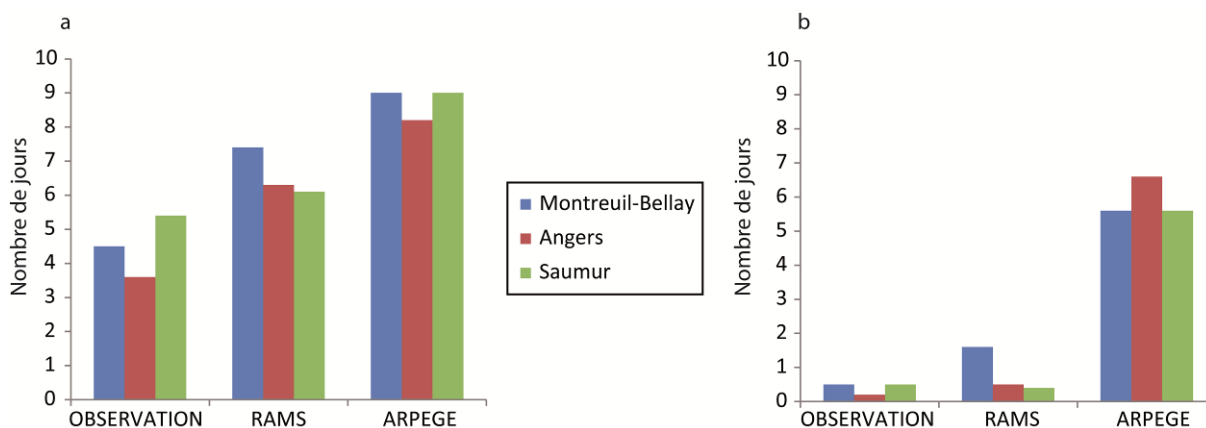


Figure XIII.1. a : Comparaison du nombre de jours moyen observé (1991-2000) en juillet avec température maximale comprise entre 30 et 35°C et simulé par ARPEGE-Climat et RAMS à 2 m du sol sur la période 2041-2050. b : Comparaison du nombre de jours moyen observé (1991-2000) du mois de juillet avec température maximale supérieure au seuil de 35°C et simulé par ARPEGE-Climat et RAMS à 2 m du sol sur la période 2041-2050.

Données : [Météo-France et RAMS]

XIII.3. Simulations pour le mois d'août

Les résultats des simulations de la période de contrôle montraient une sous-estimation des températures minimales d'ARPEGE-Climat alors que RAMS les surestimaient. C'est exactement l'inverse pour les températures maximales. Les sorties 2041-2050 de ces deux modèles pour les mêmes températures sont donc étudiées ci-après et comparées avec les observations de 1991-2000. Les simulations de l'indice de fraîcheur des nuits sont également analysées.

XIII.3.1. La température minimale moyenne

Une augmentation générale de la température minimale moyenne du mois d'août est simulée par les deux modèles et pour les trois mailles correspondant aux stations (Tableau XIII.4). ARPEGE-Climat simule une hausse de 0,6 à 1°C alors que ce dernier sous-estimait légèrement l'observation sur la période de référence. RAMS simule une hausse plus marquée, allant de 2,4 à 3,1°C mais ce même modèle a tendance à largement surestimer les observations 1991-2000. Sur la période de contrôle, les simulations étaient non significativement différentes de l'observation pour les sorties d'ARPEGE-Climat à Montreuil-Bellay et d'ARPEGE-Climat et RAMS à Angers. Les températures minimales pourraient augmenter d'environ 1,5°C pour les mailles correspondant à ces deux stations selon les

projections corrigées d'ARPEGE-Climat et d'environ 1°C à Angers selon les projections corrigées de RAMS.

Tableau XIII.4. Comparaison des températures minimales du mois d'août sur la période 1991-2000 avec les simulations par les modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 2041-2050 et selon le scénario A2 du GIEC (les résultats en gras correspondent aux résultats dont la différence entre observation et simulation n'était pas significative sur la période 1991-2000).

| Observation (1991-2000) | | Simulation (2041-2050) | | Différences des moyennes entre simulation et observation |
|-------------------------|-----------------------------------|------------------------|-----------------------------------|--|
| Station | Température minimale moyenne (°C) | Modèle | Température minimale moyenne (°C) | Température minimale moyenne (°C) |
| Montreuil- Bellay | 14.5 | ARPEGE | 15.5 | +1.0 |
| | | RAMS | 17.9 | +2.4 |
| Angers | 14.7 | ARPEGE | 15.4 | +0.7 |
| | | RAMS | 17.3 | +2.6 |
| Saumur | 14.9 | ARPEGE | 15.5 | +0.6 |
| | | RAMS | 18.0 | +3.1 |

Données : [Météo-France et RAMS]

XIII.3.2. L'indice de fraîcheur des nuits

La hausse de la température minimale moyenne du mois d'août va provoquer un réchauffement des conditions de maturation du raisin et donc une augmentation de l'indice de fraîcheur des nuits. La fréquence des nuits des différentes classes a été analysées sur la période 2041-2050 pour les stations d'Angers et de Saumur (Figure XIII.2). Avant de commenter ces résultats, rappelons que la classe « extrême » avec une température minimale inférieure à 12°C et celle avec une température minimale supérieure à 18°C, étaient mal reproduites par les deux modèles. Sur la période 2041-2050, la dérive chaude du modèle RAMS sur les températures minimales ressort très nettement sur les graphiques avec un gradient positif et plus ou moins régulier des nuits froides aux nuits très chaudes. Le modèle RAMS simule une baisse d'environ 10% de la fréquence des nuits froides (<12°C) mais il sous-estimait de 5 à 10% cette fréquence sur la période de contrôle. ARPEGE-Climat simule une stagnation de la fréquence de ces nuits alors qu'il les surestimait de 11% sur la décennie 1991-2000. L'augmentation simulée de la fréquence des nuits très chaudes varie d'environ 30 à 35% selon RAMS mais il les surestimait déjà largement sur la période de référence. ARPEGE-Climat voit également une hausse avec environ 10 à 15% de plus de nuits très chaudes alors qu'il en sous-estimait la fréquence sur la période de contrôle. Si nous retenons uniquement les simulations des températures minimales qui étaient non-significativement différentes des observations, ARPEGE-Climat prévoit une baisse d'environ 11% de la fréquence des nuits froides sur les mailles des stations de Montreuil-Bellay et Angers et une hausse d'environ 15% de la fréquence des nuits chaudes pour ces deux mêmes stations. Enfin, selon RAMS la fréquence des nuits froides sur la maille d'Angers pourrait diminuer d'environ 5% et la fréquence des nuits très chaudes augmenter d'environ

25%. L'indice de fraîcheur des nuits devrait donc augmenter en moyenne vallée de la Loire avec des conditions de maturation qui deviendront alors de plus en plus chaudes.

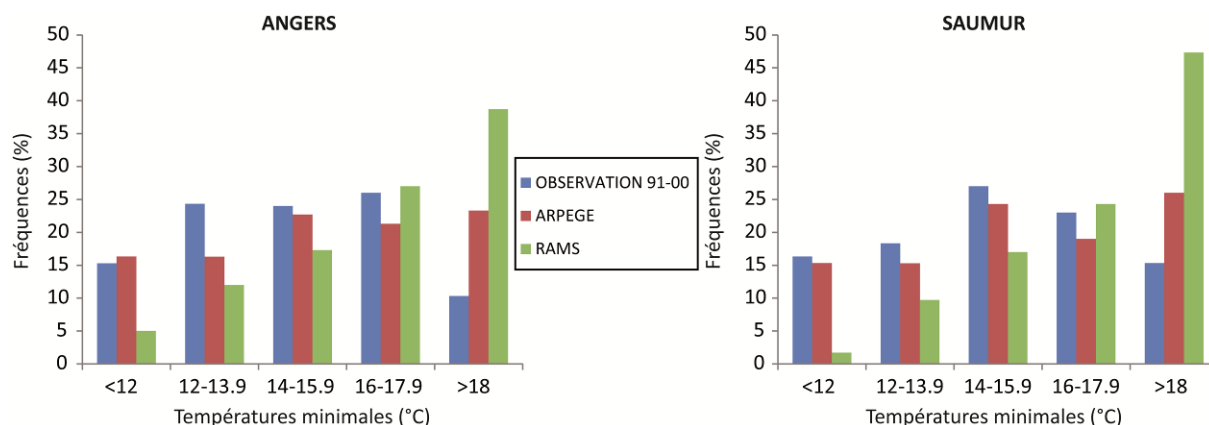


Figure XIII.2. Fréquences des températures minimales journalières, du mois d'août observées et simulées par ARPEGE-Climat et RAMS, selon les classes de l'indice de fraîcheur des nuits, sur la période 2041-2050, d'après le scénario A2 du GIEC, et comparaison avec les données d'observations de la période 1991-2000.

Données : [Météo-France et RAMS]

XIII.3.3. La température maximale

La température maximale moyenne du mois d'août était nettement surestimée de 3,7 à 4,9°C par ARPEGE-Climat sur la période de contrôle et sous-estimée par RAMS de 0,8 à 1,7°C. Les simulations étaient significativement différentes des observations pour les simulations de RAMS à Montreuil-Bellay et Angers. Le Tableau XIII.3 montre qu'une hausse de la température maximale moyenne est simulée par les deux modèles pour l'ensemble des stations sauf pour le modèle RAMS sur la maille de Saumur avec une très légère baisse de 0,1°C. Les simulations de RAMS après correction pour les mailles correspondant aux stations de Montreuil-Bellay et Angers donnent une hausse de 1,4°C à 1,9°C, hausse moins marquée que pour les maximales du mois de juillet.

Tableau XIII.5. Comparaison des températures maximales du mois d'août et du nombre de jours avec Tx>35°C observés sur la période 1991-2000 avec les simulations par les modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 2041-2050 et selon le scénario A2 du GIEC (les résultats en gras correspondent aux résultats dont la différence entre observation et simulation n'était pas significative sur la période 1991-2000).

| Station | Observation (1991-2000) | | Modèle | Simulation (2041-2050) | | Différences des moyennes entre simulation et observation | |
|-------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------|--------------------------------------|------------------------------------|--|------------------------------------|
| | Températures maximales moyennes (°C) | Nombre de jours moyen avec Tx>35°C | | Températures maximales moyennes (°C) | Nombre de jours moyen avec Tx>35°C | Températures maximales moyennes (°C) | Nombre de jours moyen avec Tx>35°C |
| Montreuil- Bellay | 27.2 | 0.7 | ARPEGE | 31.9 | 9.3 | +3.7 | +8.6 |
| | | | RAMS | 28.1 | 0.8 | +0.9 | +0.1 |
| Angers | 26.3 | 0.2 | ARPEGE | 31.5 | 9.4 | +5.2 | +9.2 |
| | | | RAMS | 26.9 | 0.5 | +0.6 | +0.3 |
| Saumur | 27.4 | 0.7 | ARPEGE | 31.9 | 9.3 | +4.5 | +8.6 |
| | | | RAMS | 27.3 | 0.3 | -0.1 | -0.4 |

Données : [Météo-France et RAMS]

XIII.3.4. Les températures maximales extrêmes

Comme pour le mois de juillet, la hausse des températures maximales pourrait entraîner une augmentation du nombre de journées chaudes et très chaudes. RAMS simule pour la période 2041-2050, une stagnation du nombre de journées chaudes (Figure XIII.3a) à Angers mais une augmentation à Montreuil-Bellay et une baisse à Saumur. ARPEGE-Climat simule une augmentation générale du nombre de journées chaudes. Ces résultats sont conformes aux simulations pour la température maximale puisque ARPEGE-Climat simulait une hausse beaucoup plus marquée de la température. Après correction des tendances simulées par RAMS pour Montreuil-Bellay et Angers, la hausse pourrait être respectivement de 2,5 à 4,1 jours chauds. Pour les journées très chaudes (Figure XIII.3b), RAMS simule une hausse pour Montreuil-Bellay et Angers mais une baisse pour Saumur. ARPEGE-Climat voit une nette hausse pour les trois mailles correspondant aux stations. Sur la période de référence RAMS simulait bien ce nombre de journées alors qu'ARPEGE-Climat le surestimait largement. Après correction des projections, la hausse selon le modèle RAMS sera d'environ 3,4 jours très chauds à Montreuil-Bellay et de 2,9 jours à Angers. La hausse du nombre de journées caniculaires en moyenne vallée de la Loire pourrait alors augmenter de manière plus conséquente que durant le mois de juillet. De très fortes chaleurs pendant la période de maturation des raisins pourront alors causer échaudage et grillage des baies.

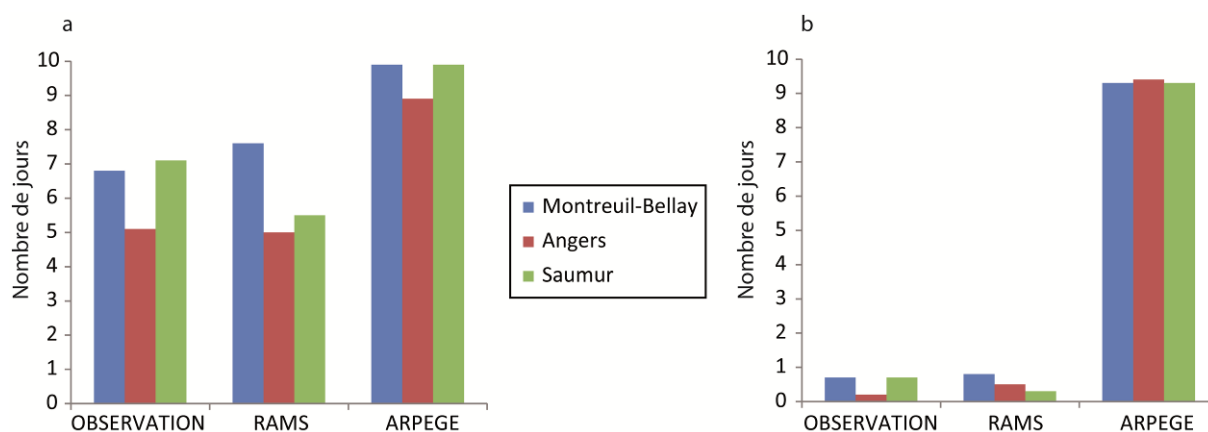


Figure XIII.3. Fréquences d'occurrence des températures comprises entre 30 et 35°C (a) et supérieures à 35°C (b), observées durant la période 1991-2000 et simulées par ARPEGE-Climat et RAMS à 2 m du sol pour le mois d'août sur la période 2041-2050 selon le scénario A2 du GIEC.

Données : [Météo-France et RAMS]

XIII.4. Simulation d'un épisode caniculaire sur la période 2041-2050

Un épisode caniculaire de la décennie 2041-2050, pour une fin juillet, a également été simulé jusqu'à la résolution de la grille 4, c'est-à-dire 200 m. Les températures horaires simulées pour les mailles correspondantes de quatre stations de moyenne vallée de la Loire sont analysées et les champs thermiques des différentes grilles sont présentés afin d'évaluer la variabilité spatiale des températures maximales durant cet épisode extrême.

XIII.4.1. Situation synoptique simulée par le modèle RAMS

La carte de pression de surface réduite au niveau de la mer a été sortie pour la première journée de l'épisode caniculaire futur simulé (Figure XIII.4a). Cette Figure montre la présence d'un anticyclone sur les îles britanniques qui provoque un flux de nord-est sec sur la France. En été ces flux sont connus pour advecter de l'air d'origine continentale et surchauffé. La carte d'humidité relative de surface (Figure XIII.4b) confirme que la masse d'air est relativement sèche sur le pays avec des valeurs autour de 30 à 40 % en moyenne vallée de la Loire. La masse d'air est plus humide au contact de l'océan atlantique et de la Manche. L'air est plus particulièrement sec (20-30%) sur le sud-ouest du pays, région où la canicule est la plus intense (Figure XIII.8).

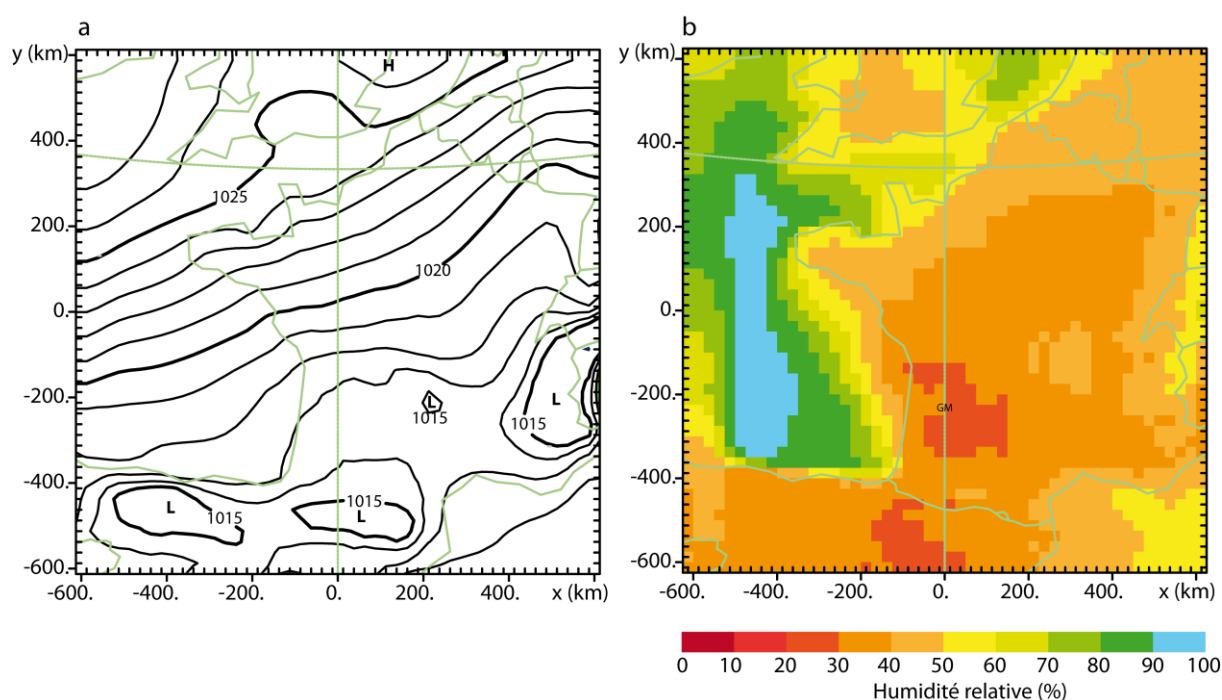


Figure XIII.4. Pression de surface (hpa) réduite au niveau de la mer simulée par RAMS (a) et humidité relative de surface simulée par RAMS (b), sur la grille 1 (25 km de résolution) lors de la première journée de l'épisode caniculaire futur.

Données : [RAMS]

XIII.4.2. Simulation pour les mailles correspondant à 4 stations de moyenne vallée de la Loire

Les données modélisées pour les mailles correspondant à 4 stations du réseau Terviclim/INRA sont présentées par la Figure XIII.5. La première journée simulée est la plus chaude de l'épisode caniculaire avec des valeurs entre 36 et plus de 38°C. Ces valeurs sont légèrement supérieures à celles observées durant les vagues de chaleur d'août 2009 et juillet 2010 mais plutôt inférieures à celles d'août 2003. Ces résultats montrent que la canicule de 2003 en France a été particulièrement exceptionnelle, d'autant plus que les températures sont restées supérieures à 35°C pendant plusieurs jours. Durant l'épisode futur de la décennie 2041-2050, les températures baissent de manière assez régulière à

partir du deuxième jour de l'évènement pour finalement passer au-dessous du seuil des 35°C dès le deuxième jour. Les différences de température entre les stations sont bien observées et montrent la variabilité topoclimatique sur cette grille 4. La température maximale simulée pour la maille correspondant à la station de Beaulieu, qui est située sur un plateau, est par exemple de 36°C pour le premier jour alors que la valeur simulée pour la maille de la station de Chaume, située en bas de coteau à quelques centaines de mètres, est de 37°C. De même, la valeur maximale simulée pour cette journée à Saint-Cyr-en-Bourg dans le Saumurois, qui est une région en générale plus chaude (cf. Chapitre VIII), est supérieure à 38°C. La variabilité spatiale de la température semble donc être assez bien reproduite comme pour les épisodes passés de 2003, 2009 et 2010.

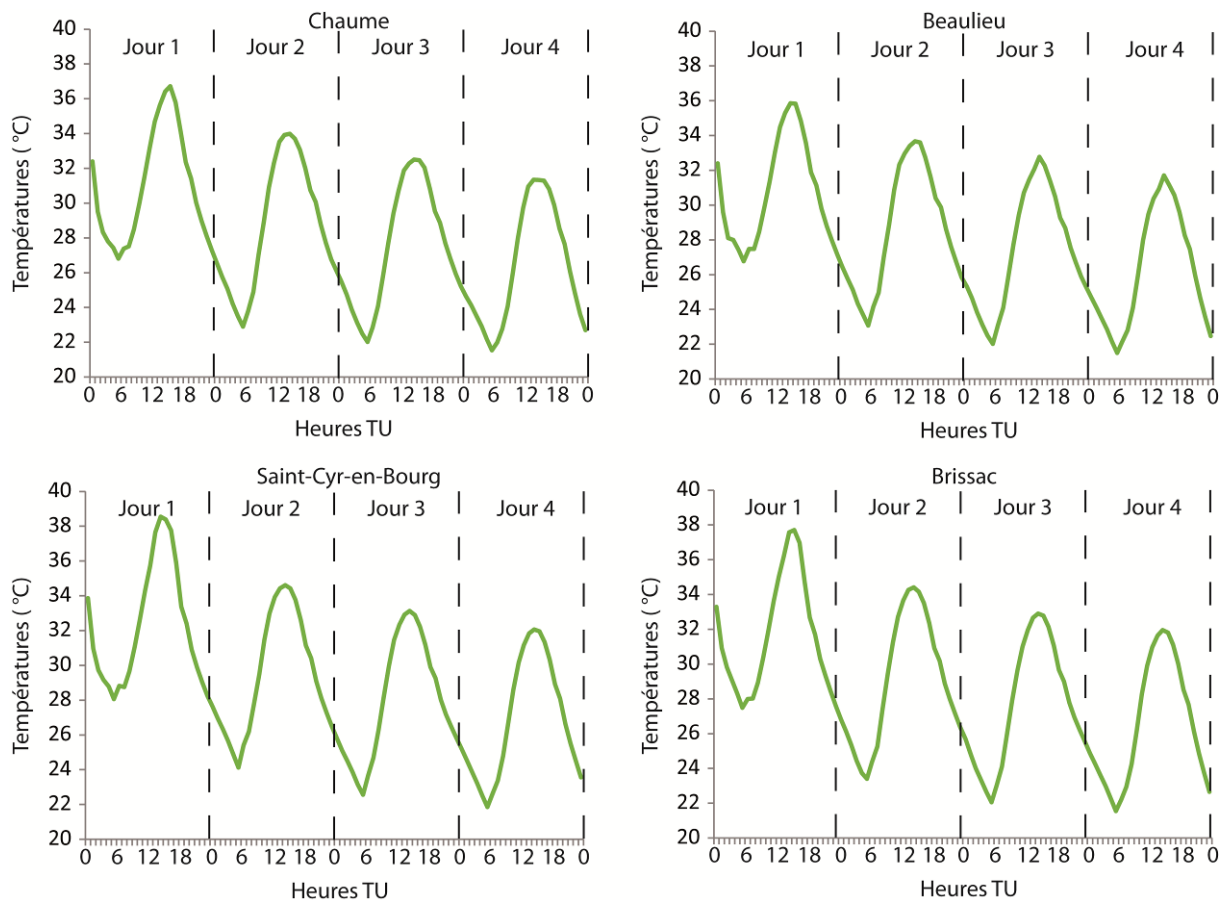


Figure XIII.5. Evolution des températures horaires simulées (scénario A2) pour les mailles correspondant à 4 stations de moyenne vallée de la Loire, durant un épisode caniculaire de la décennie 2041-2050.

Données : [RAMS]

XIII.4.3. Champs thermiques simulés par RAMS durant l'épisode caniculaire

Les sorties des différentes grilles de la simulation à 15h TU lors de la journée la plus chaude de l'épisode caniculaire sont présentées sur la Figure XIII.6. Une nouvelle fois, l'intérêt de la désagrégation des données de larges échelles ressort de cette Figure. Sur la grille 1, nous observons une masse d'air très chaude présente sur le sud-ouest de la France et le nord de l'Espagne avec des valeurs simulées entre 40 et 44°C. Pour rappel, les valeurs maximales simulées lors de l'épisode caniculaire de juillet 2010 ne dépassaient pas les 41°C sur le sud-ouest du pays. La grille 2 nous montre que les très fortes températures présentes sur le sud-

ouest s'étendent, avec des valeurs cependant inférieures mais supérieures à 35°C (plages violettes), sur l'ensemble du Val de Loire. La grille 3, grâce à la résolution de 1 km, fait apparaître plus de détails et notamment que les valeurs supérieures à 35°C ont tendance à être observées au sud de la Loire. Enfin, la grille 4, qui concerne uniquement la simulation pour notre région d'étude à 200 m de résolution, montre une assez forte variabilité de la température avec des valeurs comprises entre 33°C sur les sommets du massif des Mauges et 41°C pour certaines mailles du Saumurois. Les valeurs comprises entre 19 et 23°C correspondent aux températures de la Loire et la rivière du Layon. Enfin, les valeurs des températures simulées dans le vignoble sont en général toutes supérieures à 35°C, comme le montraient les graphiques de la Figure XIII.5 pour cette journée.

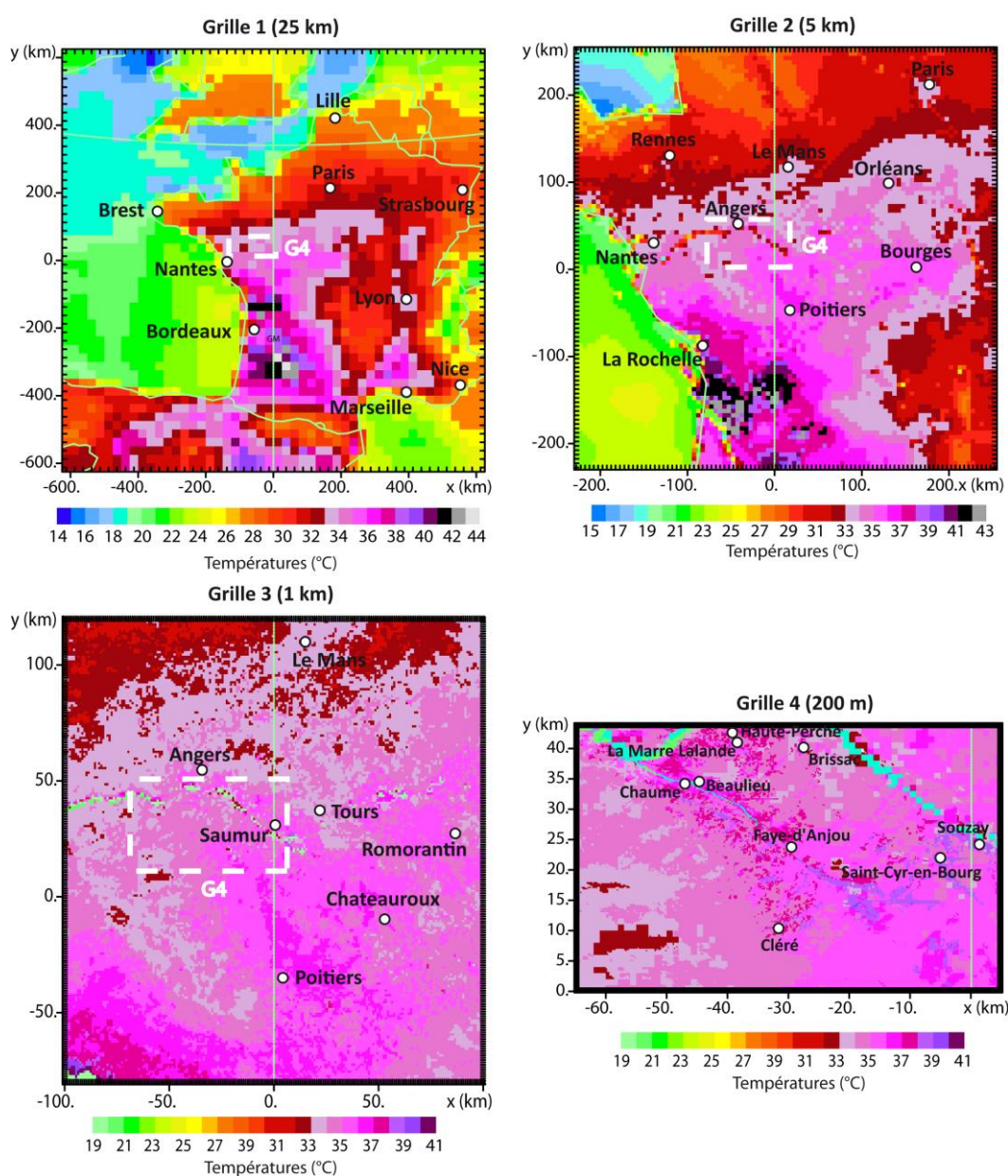


Figure XIII.6. Températures simulées à 2 m par le modèle RAMS lors de la journée la plus chaude de l'épisode de juillet 2048 à 15h TU pour les 4 grilles imbriquées.

Données : [RAMS]

CONCLUSION DU CHAPITRE XIII

Ce chapitre a permis de présenter les sorties des modèles RAMS et ARPEGE-Climat, sur la décennie 2041-2050, selon le scénario A2 du GIEC. Les projections ont été analysées et discutées en fonction des résultats obtenus à partir des modélisations de la période de contrôle 1991-2000. Ces simulations futures montrent une augmentation des températures minimales du mois d'avril en moyenne vallée de la Loire de 1,8 à 2,1°C pour la décennie 2041-2050 par rapport à celle de 1991-2000. Les journées à risque de gel pour ce mois devraient considérablement diminuer, voire l'aléa gélif pourrait disparaître selon certaines modélisations de RAMS. Cependant, le début de la saison végétative est prévu d'être plus précoce avec un cumul de degrés-jours plus importants et donc probablement un décalage du débourrement au mois de mars. Si tel était le cas, le risque gélif serait accru puisque la probabilité de gelées au mois de mars restera de toute manière plus importante. En considérant ce décalage en amont de la saison végétative de la vigne, la période de maturation pourrait intervenir au mois d'août. Les données simulées des températures minimales de ce mois ont été analysées et montrent une augmentation des valeurs pour l'ensemble des mailles des stations avec une hausse de 1 à 1,5°C. Les conditions nocturnes de la période de maturation des baies pourraient donc devenir plus chaudes. Enfin, les valeurs extrêmes des températures maximales simulées ont également été étudiées. Les résultats montrent une augmentation généralisée des valeurs et du nombre de jours avec une température maximale supérieure à 35°C. Cependant, ces épisodes extrêmes devraient rester relativement rares pour la région de la moyenne vallée de la Loire. Ces projections ne concernent qu'une décennie et il serait intéressant de regarder sur une période de 30 ans les résultats de telles simulations. En effet certains phénomènes ont des périodes de retour plus importantes que 10 ans, ce qui pourrait expliquer en partie les faibles fréquences simulées de ces épisodes extrêmes.

Conclusion générale

L'objectif principal de la thèse était d'améliorer la connaissance de la variabilité spatio-temporelle de la température dans la moyenne vallée de la Loire, afin de mieux anticiper les effets futurs de l'évolution du climat dans la région. Différents niveaux d'échelles spatiales et temporelles ont alors été adoptés pour l'analyse des données thermiques mobilisées.

Le contexte climatique de la région du Val de Loire depuis le milieu du XX^{ème} siècle *via* l'étude des données de température a été dressé. Le diagnostic sur l'évolution de la température dans le centre-ouest français a ainsi montré une augmentation de la température généralisée sur l'ensemble du territoire. Cette hausse s'est accélérée depuis la fin des années 1980, notamment pour les températures maximales avec une rupture climatique récurrente en 1987. L'année de la rupture est plus variable pour les températures minimales. De plus, le réchauffement est plus important sur la période végétative (avril-septembre) de la vigne que sur l'année complète impliquant alors une hausse de l'ensemble des indices bioclimatiques étudiés. Les conditions thermiques de culture de la vigne ont donc considérablement évolué, classant désormais la moyenne vallée de la Loire en climat viticole tempéré voire tempéré chaud dans le Saumurois. L'augmentation moins forte des températures minimales fait que la fraîcheur des nuits reste présente durant la phase de maturation, assurant notamment une bonne synthèse des anthocyanes. Ces conditions climatiques expliquent le regain de qualité observé (Barbeau, 2007) ces dernières années en Anjou et Saumurois avec des cépages ayant atteints leur optimum climatique de culture.

Le deuxième objectif reposait sur l'évaluation précise de la variabilité spatiale de la température en Anjou et Saumurois afin de pouvoir anticiper les évolutions futures que pourraient engendrer le changement climatique dans les décennies à venir. L'étude des données thermiques aux échelles topoclimatiques et locales en moyenne vallée de la Loire a ainsi montré une forte variabilité spatiale de la température et des indices bioclimatiques. Malgré un relief peu accidenté (dénivelés de quelques dizaines de mètres entre les stations), les conditions thermiques sont assez variables suivant la localisation des stations. Les résultats montrent notamment les caractéristiques particulières du Saumurois, classé en climat « tempéré chaud » sur l'année 2010, alors que les autres stations sont classées en « climat tempéré ». A l'échelle fine, celle des Coteaux du Layon, la variabilité spatiale est également importante avec de fréquentes inversions thermiques, pouvant entraîner des risques gélifs en fond de vallée, et implique des conditions de maturation différentes entre haut et bas de coteaux. Les indices basés sur le calcul des indices bioclimatiques confirment la variabilité spatiale des conditions thermiques. Les écarts en termes d'indices sont aussi marqués aux échelles topo- et microclimatique qu'à l'échelle régionale et l'ensemble de ces écarts sont comparables à la hausse de la température moyenne enregistrée au courant des 60 dernières années. Ces observations montrent la marge de manœuvre des viticulteurs de la région pour adapter à l'échelle locale leurs pratiques culturales, dans le cas d'une hausse future de la température. La modélisation de la température à partir des modèles multicritères a confirmé la part importante des paramètres topographiques dans la variabilité observée. La modélisation de la température minimale s'est avérée plus facile que

celle de la température maximale, étant donné les fréquentes inversions de températures observées dans le vignoble. L'altitude (malgré le faible dénivelé) est le facteur qui explique la plus grande part de la variabilité de la température minimale. Les températures maximales sont essentiellement expliquées par la pente puis les orientations est-ouest. Des cartes de la température spatialisée ont pu être présentées pour les mois et jours avec les meilleurs résultats. Ces nouvelles cartes à échelle fine des températures minimales et maximales permettent d'avoir une image climatique du site viticole étudié, d'un point de vue thermique.

Le troisième et dernier objectif de nos analyses consistait à tester l'apport du modèle méso-échelle RAMS dans le cadre de ce travail de thèse. Les comparaisons entre les sorties de ARPEGE-Climat (50 km de résolution) et de RAMS (5 km), sur la période de référence, 1991-2000, ont montré tout l'intérêt de la désagrégation par le modèle RAMS. En effet, ce type d'outil permet une meilleure prise en compte des aspérités du terrain grâce au maillage plus fin et donc une meilleure résolution. Les phénomènes complexes intervenant à ces échelles spatiales sont ainsi mieux pris en compte. Le contrôle des simulations de cette période de référence ont montré que le modèle RAMS reproduit bien les nombres de journées avec risque de gel au mois d'avril et températures supérieures à 35°C en période estivale. Le modèle ARPEGE-Climat surestime très nettement ces deux risques pour la vigne. Le modèle RAMS semble donc très utile dans la prévision des extrêmes thermiques dommageables pour la vigne. Après cette analyse prospective des simulations de contrôle, les simulations de la période 2041-2050 (scénario A2) ont pu être analysées et les différences avec les moyennes calculées sur les observations 1991-2000 commentées :

- La température minimale du mois d'avril pourrait augmenter en moyenne de 2°C et le risque gélif pour les bourgeons de la vigne disparaître. En revanche, si la précocité de la vigne avance le stade du débourrement au mois de mars, il est possible que le risque subsiste.
- Les conditions de maturation des raisins de moyenne vallée de la Loire devraient se réchauffer avec une hausse de la température minimale autour de 1,5°C au mois d'août.
- Le nombre de journées avec des températures maximales supérieures à 35°C devraient augmenter, en particulier sur la période véraison-maturation, entraînant un risque d'échaudage et de grillage des baies. Même si la fréquence de ce type de journées très chaudes (>35°C) devrait progresser, leur occurrence resterait faible, comparée à d'autres régions viticoles françaises.

Enfin, quatre épisodes extrêmes ont été simulés à la résolution horizontale de 200 m. L'ensemble des résultats montre une bonne reproduction du cycle journalier des températures observées par le réseau de stations TERVICLIM/INRA. Cependant, certains épisodes ont été mieux reproduits que d'autres, montrant toute l'importance de la

paramétrisation de RAMS (position de la grille 1, intégration des données fines de la grille 4, des images NDVI et SST MODIS...) en fonction des types d'événements :

- Le risque gélif d'avril 2003 a été surestimé par rapport aux données observées. Cette surestimation peut être due à un positionnement trop à l'est de la grille 1 et donc à une moins bonne prise en compte de l'influence adoucissante de l'océan Atlantique.
- Les températures minimales et maximales ont été surestimées de plusieurs degrés durant la canicule d'août 2003. Cet épisode a été particulièrement intense et le modèle RAMS semble avoir eu des difficultés à reproduire les valeurs observées.
- Les épisodes caniculaires de 2009 et 2010 ont été bien reproduits avec des valeurs de températures maximales simulées proches de l'observation. Le biais sur les valeurs minimales est plus important. Le modèle, malgré la prise en compte de l'encaissement de la vallée du Layon, a du mal à reproduire l'intensité des phénomènes d'inversions.

Le modèle RAMS semble ainsi être un outil intéressant dans l'appréhension de ce type de phénomènes extrêmes et constitue un autre outil de spatialisation de la température à haute résolution (200 m).

Ce travail de thèse fait ressortir l'importance de notre démarche avec une réflexion basée sur l'imbrication des échelles spatio-temporelles, aussi bien au niveau des mesures que de la modélisation. La plupart des études menées en viticulture sont réalisées à des échelles régionales ou alors du microclimat mais indépendamment les unes des autres. C'est ainsi toute la spécificité du géographe-climatologue qui permet de faire le lien entre les différents niveaux d'échelles.

L'analyse multiscalaire a permis de mettre en évidence l'importante variabilité spatio-temporelle de la température au sein du Val de Loire. Divers outils de modélisation ont été mobilisés pour caractériser et évaluer cette variabilité spatiale de la température. Les résultats ont montré une variabilité parfois plus marquée aux échelles locales qu'à l'échelle régionale. On voit ainsi tout l'intérêt d'une évaluation préalable du climat aux échelles locales afin de mieux anticiper l'effet de la hausse future de la température sur les topoclimats viticoles de moyenne vallée de la Loire.

La méthodologie de mesures adaptées à l'échelle des terroirs viticoles a permis notamment la validation des sorties des simulations du modèle RAMS. La plupart des études utilisent des données climatiques issues des réseaux synoptiques qui ne permettent pas une comparaison aussi fine. Les comparaisons avec les observations, réalisées à échelles topo- et microclimatiques, permettent, en effet, une meilleure évaluation des capacités des modèles régionaux du climat, à prendre en compte toute la complexité des phénomènes observés à ces échelles locales. Ces résultats aident ainsi à limiter les incertitudes des simulations.

De nombreuses perspectives de travail s'ouvrent à la suite de cette étude. En voici trois principales qui semblent, aujourd'hui, entrer dans la suite logique de la thèse :

- L'analyse à échelle fine, dans les Coteaux du Layon a montré la forte variabilité de la température. L'utilisation des classes existantes pour les indices bioclimatiques n'est ainsi pas forcément adaptée à cette échelle. Les modèles multicritères développés ont mis en évidence les effets du relief sur la température. Il faudrait alors intégrer dans ces indices d'autres facteurs en relation avec la topographie qui permettraient peut-être d'affiner la résolution des classes. De même, l'indice de fraîcheur des nuits ne se basant que sur la moyenne de températures instantanées (températures minimales), une prise en compte des fréquences de températures serait sans doute plus adaptée. En effet, la fréquence nous indiquerait le pourcentage de temps auquel la vigne a été soumise à telles ou telles niveaux de températures.
- Il serait également intéressant de travailler sur l'amélioration des modèles multicritères construits pour le site des Coteaux du Layon. L'intégration de la non-linéarité dans la modélisation des phénomènes pourrait aider à l'amélioration des modèles sur certaines journées. Il faudrait auparavant augmenter le nombre de capteurs pour intégrer plus de données observées et surtout mieux couvrir l'ensemble de la superficie du site viticole. Enfin, l'intégration d'autres variables explicatives aux modèles pourrait en améliorer la qualité. La position d'abri des capteurs semble particulièrement jouer sur les valeurs des températures maximales. Il pourrait alors être intéressant d'intégrer une variable relative à l'ouverture du paysage ou bien un indice d'exposition au vent. L'application de ce type de modélisation à d'autres sites viticoles serait également une expérimentation intéressante. Un stage doctoral a été effectué durant les étés 2010 et 2011 au département de viticulture et d'œnologie de l'Université de Californie Davis (UCD). Des capteurs ont été installés dans deux sites, dont l'un en zone montagneuse à plus de 500 m d'altitude et avec des dénivelés de près de 300 m. Ce site connaît une variabilité de la température parfois très marquée notamment en lien avec les conditions radiatives qui restent dominantes du mois de Juin à Septembre. La carte de l'Annexe n°2 illustre la variabilité spatiale de l'indice de fraîcheur des nuits en Septembre 2011. Toutes les classes de l'indice sont représentées avec une différence maximale de température entre le haut et le bas des coteaux de près de 11°C. Les conditions de maturation sont donc très différentes d'une parcelle à l'autre. L'installation de capteurs supplémentaires permettrait une spatialisation de la température et ainsi d'évaluer les conditions thermiques sur l'ensemble de la propriété.
- Une deuxième mise en perspective viserait à une comparaison des deux méthodes de spatialisation utilisée dans le cadre de la thèse. Avec l'amélioration de la modélisation multicritères, un plus grand nombre de dates pourrait très certainement être modélisé et des simulations de RAMS sur ces mêmes journées pourraient être lancées. Une rééchantillonnage des données du modèle multicritères à 200 m de résolution permettrait alors une comparaison directe des sorties avec les valeurs simulées par RAMS. Un biais certain devrait exister puisque RAMS simule des

températures à 2 m du sol et les capteurs enregistrent la température à 1 m au niveau de la canopée de la vigne. Cependant, il serait intéressant de voir si les structures spatiales des champs thermiques sont les mêmes. A terme, les deux méthodes pourraient être combinées afin, par exemple, de mieux anticiper la variabilité spatiale de la température lors d'évènements extrêmes futurs.

- Enfin, le modèle RAMS a permis d'améliorer les sorties d'ARPEGE-Climat en prenant en compte les données à échelle fine mais il subsiste de nombreuses incertitudes à améliorer dans le futur notamment en poursuivant cette démarche pluridisciplinaire. Une comparaison des données de RAMS à 5 km avec celles de SAFRAN (8 km), issues de la désagrégation statistique sur la période de référence 1991-2000 permettrait notamment de comparer les deux méthodes de descente d'échelle et voir l'apport de chacune d'elle.

Bibliographie

Agnew MD, Palutikof JP. 2000. GIS - based construction of baseline climatologies for the Mediterranean using terrain variables, *Climate Research*. **14** : 115-127.

Amphoux M, Jaouen G, l'Hopital A, Pelletier V. 2003. "Les impacts du changement climatique sur l'agriculture en Europe et aux Etats-Unis". *Atelier 'Changement Climatique ENPC-Département VET'*. [En ligne] : 24p. <http://www.enpc.fr/de/trav/-elev/cc/agri/rapport2.html>

Asselin C, Pagès J, Morlat R. 1992. Typologie sensorielle du Cabernet Franc et influence du terroir. Utilisation de méthodes statistiques multidimensionnelles. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* **26**(3) : 129-154.

AVC (Association Viticole Champenoise). 1991. Les gelées de printemps, *Le vigneron Champenois*, Hors-série, 63p.

Avila F. 1986. *Janvier 1985 et les grands hivers du passé dans les Landes et le Sud-Ouest*. Projet d'Action Educative, Lycée G. Crampe, Aire-sur-l'Adour, 155 p.

Baggiolini M, 1952 : Les stades repères dans le développement de la vigne et leur utilisation pratique. *Revue romande d'agriculture, de viticulture et d'arboriculture* **8**, 1 :4-6.

Bailly A, Beguin H. 1995. *Introduction à la géographie humaine*. Masson, Paris : 192p.

Barbeau G. 2007. Climat et vigne en moyenne vallée de la Loire, France. *Congrès sur le climat et la viticulture*. Saragosse, Espagne, 10-14 avril, seconde session "climat et terroir": 96-101.

Barbeau G, Asselin C, Bouvet MH, Mège A. 1999. La botrytisation en Coteaux du Layon: Mise en évidence de son influence sur les caractéristiques des vendanges de Chenin issues de divers terroirs de 1996 à 1998. *39^{ème} Congrès des œnologues*. 19-22 mai, Colmar.

Barbeau G, Coulon C, Neetling E, Bonnefoy C, Quénot H. 2011. Le changement climatique et les interactions sol-climat. *Revue des Œnologues* **168** : 26-29.

Barry LG. 2001. *Mountain weather and climate*. Second Edition, Routledge, Taylor and Francis Group, New York, USA.

Beltrando G. 2004. *Les climats - Processus, variabilité et risques*. Armand Colin, Paris : 266p.

Bibliographie

Beltrando G, Briche E. 2010. Changement climatique et viticulture, du constat actuel aux prévisions des modèles pour le XXI^e siècle : l'exemple champenois. *Echogéo* **14** : 15p. <http://echogeo.revues.org/12216>.

Beniston M. 2004. The 2003 Heat Wave in Europe: a shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters* **31**, DOI: [L02022](https://doi.org/10.1029/2003GL018778).

Blouin J, 2007. *Le dictionnaire de la vigne et du vin*. Dunod, Paris : 351p.

Boé J. 2007. « *Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France* ». Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier – Toulouse III.

Boé J, Terray L. 2008. « *Régimes de temps et désagrégation d'échelle* ». *La Houille Blanche*, **2**. doi :10.1051/lhb :2008016L05702.

Bois B, Van Leeuwen C. 2008. Variabilité climatique dans la zone de production des vins de Bordeaux. *Terroirs viticoles*, ENITA Bordeaux: 45-50.

Bonnardot V. 1996. Le climat et la vigne en Bourgogne orientale. Climatologie appliquée et recherches d'indices climatiques pour la vigne en Côte de Beaune. *Thèse de Doctorat*, Université de Bourgogne.

Bonnardot V, Carey VA. 2008. Observed climatic trends in South African wine regions and potential implications for viticulture. In *Proceedings VIIth International Viticultural Terroir Congress*, 19-23 May, Nyon, Switzerland. **1**: 216-221. Agroscope Changins-Wädenswil.

Bonnardot V, Cautenet S. 2009. Mesoscale Atmospheric Modeling Using a High Horizontal Grid Resolution over a Complex Coastal Terrain and a Wine Region of South Africa. *Journal of Applied Meteorology*. **48**(2) : 330-348.

Bonnardot V, Carey VA, Rowswell DI. 2011. Observed climatic trends in Stellenbosch: update and brief overview. *Wynboer*, **263**: 95-99.

Bonnardot V, Cautenet S, Cautenet G, Quénot H. 2012. Apport de la modélisation climatique méso-échelle pour évaluer le changement climatique à l'échelle régionale : application viticole (2041-2050). *Actes du XXV^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Grenoble : 147-152.

Bonnefoy C, Madelin M, Castel T. 2009. Régionalisation d'un indice agroclimatique viticole en Bourgogne, 9^{ème} rencontres TheoQuant : 8p.

Bonnefoy C, Quenol 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**: 13p. <http://echogeo.revues.org/12146>

Brázdil R, Pfister C, Wanner H, Von Storch H, Luterbacher J. 2005. Historical Climatology in Europe - The State of the Art. *Climatic Change* **70**: 363-430.

Branas J, Bernon G, Levadoux L. 1946. *Eléments de viticulture générale*. Ecole Nationale d'Agriculture de Montpellier. Montpellier : 400p.

Branas J. 1974. *Viticulture*. Impr. Déhan, Montpellier : 990p.

Bréjoux P. 1956. *Les vins de Loire*. Compagnie parisienne d'éditions techniques et commerciales. Paris : 238p.

Briche E. 2011. *Changement climatique dans le vignoble de Champagne : Modélisation thermique à plusieurs échelles spatio-temporelles (1950-2100)*. Thèse de Doctorat, Université Paris Diderot, 307p.

Bridier S, Quénol H. 2010. Analyse climatologique des vignobles de l'AOC Sainte-Victoire dans la perspective de l'élévation des températures. *Actes du 23^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes: 89-94.

Buttrose MS. 1969. Vegetative growth of grapevine varieties under controlled temperature and light intensity. *Vitis* **8** : 280-285.

Buttrose MS, Hale CR. 1973. Effect of Temperature on Development of the Grapevine Inflorescence after Bud Burst. *American Journal of Enology and Viticulture* **24**(1): 14-16.

Calame F, Rochaix M, Simon JL. 1977. Observations phénologiques et mesures bioclimatiques dans plusieurs sites viticoles valaisans à différentes altitudes en vue de la délimitation de l'aire viticole. *Bulletin de l'Office International de la Vigne et du Vin* **50**-559 : 601-616.

Caldwell JL. 1925. Some effects of seasonal conditions upon to chemical composition of American grapes juices. *Journal of Agriculture Research* **30** (12) : 1133-1176.

Carbonneau A. 1992. *Météorologie et viticulture*. Rapport pour le WMO/TD 484, 72p.

Carbonneau A. 2000. Climat et sol : critères d'évaluation et effets sur le comportement de la vigne. *3er Simposio Internacional Zonificacion Vitivinicola, Tenerife, 9-12 mai*, tome 1 : 1-16.

Bibliographie

Carrega P. 1994. Topoclimatologie et habitat. Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée. *Revue de Géographie du laboratoire d'analyse spatiale Raoul Blanchard*, UFR Espace et Culture, Université de Nice Sophia Antipolis.

Cassou C. 2004. Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation nord-atlantique. *La Météorologie* **45** : 21-32.

Chabin JP, Madelin M, Bonnefoy C. 2007. Les vignobles beaunois face au réchauffement climatique. *Actes du colloque "Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles?"*, Dijon, 28-30 Mars : 13p.

Chahine MT. 1992. The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature* **359**: 373-380.

Champagnol F. 1984. *Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale*. Montpellier : 351p.

Choisnel E. 1996. Les échelles de temps et d'espace en climatologie. *La Météorologie*. **8** (13) : 29-38.

Christensen JH, Christensen OB. 2007. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change* **81** (Supplement 1) : 7-30, doi:1007/s10584-006-9210-7

Chuine I, Yiou P, Viovy N, Seguin B, Daux V, Le Roy Ladurie E. 2004. Grape Ripening as a Past Climate Indicator. *Nature* **432**: 289-290.

Clément JM. 1981. *Larousse Agricole*, Larousse, Paris : 1207p.

Coombe BG, Dry PR. 1988. *Viticulture*. Practices. Ed. Winetitles, Adelaide.

Cornillon PA, Guyader A, Husson F, Jégou N, Josse J, Maela Kloareg, Matzner-Lober E, Rouvière L. 2010. *Statistiques avec R*, 2^{ème} édition augmentée. PUR Rennes: 274p.

Costa AC, Soares A. 2009. Homogenization of climate data: review and new perspectives using geostatistics. *Mathematical Geosciences* **41**(3): 291–305.

Cotton WR, Pielke Sr. RA, Walko RL, Liston GE, Tremback CJ, Jiang H, McAnelly RL, Harrington JY, Nicholls ME, Carrio GG et McFadden JP. 2003. RAMS 2001 : Current status and future directions. *Meteorology and Atmospheric Physics*. **82** : 5-29.

Crespy A. 1992. *Viticulture d'aujourd'hui*. 2^{ème} édition, Lavoisier : 240p.

Dai A, Fung IY, Del Genio AD. 1997. Surface observed global land precipitation variations during 1900-1988. *Journal of Climate* **10**: 2943-2962.

De Parcevaux S, Huber L. 2007. *Bioclimatologie, concepts et applications*. Ed. Quae, Versailles 324p.

Déqué M, Li L. 2007. La prévision climatique : régionalisation et extrêmes. *La Météorologie*. **57** : 28-31.

De Serres O. 2001. *Le Théâtre d'Agriculture et mesnage des champs, 1600*. Thesaurus Actes Sud, Arles.

Délécolle R, Soussana JF, Legros JP. 1999. Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. *Comptes-rendus de l'Académie d'agriculture de France* **85**: 45-51.

Demarée GR. 1991. Evidence of abrupt climate change from the rainfall data of a mauritanian station. *IRM. Série A* **124**: 68-74

Déqué M. 2001. Seasonal predictability of tropical rainfall: probabilistic formulation and validation. *Tellus* **53**: 500-512.

Dikbas F, Firat M, Cem Koc A, Güngör M. 2010. Homogeneity Test for Turkish Temperature Series. *BALWOIS 2010*, Ohrid, Republic of Macedonia, 25-29 May, 5p.

Dokoolzian NK, Bergqvist JA. 2001. Influence of sunlight exposure on the berry growth and composition of two reds cultivars. *In Proceedings of the 12th GESCO Conference (Montpellier)*, **1**: 77-84.

Dubreuil V. 1994. *La sécheresse dans la France de l'Ouest : Etude d'après les bilans hydriques et les données des satellites NOAA AVHRR*. Thèse de l'Université Rennes 2 : 381p.

Duchêne E, Huard F, Dumas V, Schneider C, Merdinoglu D. 2010. The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate Research*. **41**: 193-204.

Duchêne E, Schneider C. 2004. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development* **25**: 93-99.

EEA (European Environment Agency). 2004. Impacts of Europe's changing climate, an indicator-based assessment. *Office for Official Publications of the European Communities* **2**: 107p.

Eichhorn KW, Lorenz HK. 1977. Phaenologische Entwicklungsstadien der Rebe. *Deutsche Weinbau*, **1**, Sonderdruck.

Escourrou G. 1981. *Climat et Environnement. Les facteurs locaux du climat*. Masson, Paris, 184 p.

Escourrou G. 1982. *Le climat de la France*. Presses Universitaires Françaises. Paris : 128p.

Faraway JJ. 2002. *Practical Regression and ANOVA using R*. Chapter 10 Variable Selection : 124-133.

Feyt G, Mailloux H, Saintignon MF. 1995. SIG et information climatique. *Revue Internationale de Géomatique* **5** (3-4) : 361-376.

Flexas J, Bota J, Cifre J, Escalona JM, Galmes J, Gulias J, Lefi E-K, Martinez-Canellas SF, Moreno MT, Ribas-Carbo M, Riera D, Sampol B, Medrano H. 2004. Understanding down-regulation of photosynthesis under water stress: future prospects and searching for physiological tools for irrigation management. *Annals of Applied Biology* **144**: 273-283.

Fregoni C, Pezzuto S. 2000. Principes et premières approches de l'indice bioclimatique de qualité de Fregoni. *Progr. Agric. Vitic.* **18**: 390-396.

Galet P. 2000. *Précis de viticulture : à l'usage des ingénieurs agronomes, des étudiants en agronomie et en oenologie, des techniciens des lycées agricoles et des professionnels de la viticulture*. Dehan, Montpellier, 602p.

Ganichot B. 2002. Évolution de la date des vendanges dans les Côtes du Rhône méridionales. *in Actes des 6e Rencontres rhodaniennes*, Institut Rhodanien, Orange, 38- 41.

García de Cortázar Aauri I, Brisson N, Jacquet O, Payan JC, Claverie M, Salançon E, Fournioux JC, Monamy C, le Sueur D, Barbeau G, Bottois N, Dumot V, Gaudillere JP, Goutouly JP, Agut C, Rodriguez-Lovelle B, Ramel JP, Huard F, Ripoche D, Launay M, Seguin B. 2007. Evaluation des impacts du changement climatique dans les différents vignobles de France à l'aide du modèle STICS-vigne. *Congrès Climat et Vigne*. 10-14 Avril, Zaragoza, Espagne : 1-8.

Geaghan JP. 2007. *EXST7015 Statistical techniques II. Course notes*. USA: 403p.

Geiger R. 1965. *The climate near the ground*. Harvard University Press, Cambridge: 611p.

Georgin JP, Gouet M. 2005. *Statistiques avec Excel. Descriptives, tests paramétriques et non paramétriques à partir de la version Excel 2000*. PUR, Rennes: 343p.

GIEC (Groupe Intergouvernemental des Experts sur le Climat). 2001. *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the third assessment report of IPCC*, Cambridge Univ. Press., Cambridge, UK.

GIEC. 2007. *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge Univ. Press., Cambridge, U.K.

GIEC. 2012. *Rapport Spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique. Rapport des groupes de travail 1 et 2 du GIEC* : 22p.

Giorgi F. 2006. Regional climate modeling: status and perspectives. *J. Phys.* **139** : 101-118.

Gordon C, Cooper C, Senior CA, Banks H, Gregory JM, Johns TC, Mitchell JFB, Wood RA. 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transport in a version of the Hadley Center coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics* **16**: 147-168.

Guillon JM. 1905. *Etude générale de la vigne*. Masson : 452 p.

Guyot E, Godet C. 1933. *Influence du climat sur le rendement de la vigne*. Impr. Centrale : 4p.
Hall A, Jones G. 2010. Spatial Analysis of Climate in Winegrape-Growing Regions in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **16**: 389–404.

Hall A, Jones GV. 2010. Spatial analysis of climate in winegrape growing regions in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **16**: 389-404.

Harrison PA, Butterfield RE, Orr JL. 2000. Modelling Climate Change Impacts on Wheat, Potato and Grapevine in Europe. In: Downing TE, Harrison PA, Butterfield RE, Lonsdale KG. (Eds.) *Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe: An Integrated Assessment*. Environmental Change Institute, University of Oxford: 367-390.

Hewiston BC, Crane RG. 1996. Climate downscaling : Techniques and Application. *Climate Research*. **7** : 85-95.

Huglin P, Schneider C. 1998. *Biologie et écologie de la vigne*. Ed. Lavoisier Tec et Doc, Paris.
Hunter JJ, Volschenk CG, Bonnardot V. 2010. Linking grapevine row orientation to a changing climate in South Africa. In *Proc Intervitis Interfructa Conf*, 24-28 March 2010, Stuttgart, Germany : 60-70.

INAO. 1984. Une réussite française : l'appellation d'origine contrôlée, vins et eaux de vie. Institut national des appellations d'origine, *Euro-impressions*, Paris.

Interloire 2011 : <http://www.vinsdeloire.fr/SiteGP/FR/>

Jackson D, Schuster D. 1987. The production of grapes and wine in cool climates. *Wellington: Butterworths Horticultural Books*: 192p.

Bibliographie

Joly D, Brossard T, Cardot H, Cavailhes J, Hilal M, Wavresky P. 2010. Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo : European Journal of Geography* : 21p.

Jones GV. 2006. Climate change and wine: observations, impacts and future implications. *Wine Industry Journal* **21**(4): 21-26.

Jones GV. 2007. Climate Change: Observations, Projections, and General Implications for Viticulture and Wine Production. *Practical Winery and Vineyard*, July/August : 44-64.

Jones GV, Davis RE. 2000. Using a synoptic climatological approach to understand climate-viticulture relationships. *International Journal of Climatology* **20**: 813-837.

Jones GV, Duff AA, Hall A, Myers J. 2010. Spatial Analysis of Climate in Wine Grape Growing Regions in the Western United States. *American Journal of Enology and Viticulture* **61**(3): 313-326.

Jones GV, Moriondo M, Bois B, Hall A, Duff A. 2009. Analysis of the spatial climate structure in viticulture regions worldwide. *Le Bulletin de l'OIV* **82**(944,945,946): 507-518.

Jones GV, White MA, Cooper OR, Storchmann K. 2004. Climate and wine: quality issues in a warmer world, *Colloque Oenométrie XI*, Dijon, mai 2004 : 27p.

Jones GV, White MA, Cooper OR, Storchmann K. 2005. Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change* **73**(3): 319-343.

Jones PD, New M, Parker DE, Martin S, Rigor I. 1999. Surface air temperature and its change over the past 150 years. *Reviews of Geophysics*. **2** : 173-199.

Jouzel J. 2011. *Scénarios climatiques : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ARPEGE-Climat et LMDz et quelques projections pour les DOM-COM*. Rapport de Mission, ONERC : 140 p.

Karl TR, Jones PD, Knight RW, Kukla G, Plummer N, Razuvayev V, Gallo KP, Lindsey J, Charlson RJ, Peterson TC. 1993. A New Perspective on Recent Global Warming: Asymmetric Trends of Daily Maximum and Minimum Temperature. *Bulletin of American Meteorological Society*. **74**: 1007-1023.

Kenny GJ, Shao J. 1992. An assessment of a latitude-temperature index for predicting climate suitability for grapes in Europe. *Journal of Horticultural Science* **67**: 239-246.

Kergomard C, Bigot S, Charabi Y, Leriche P. 2002. Climat urbain et qualité de l'air : approches géographiques et collaborations pluridisciplinaires. *Bulletin Association de Géographes Français*, **4** : 462-473.

Koshita Y, Asakura T, Fukura H, Tsuchida Y. 2007. Nighttime temperature treatment of fruit clusters of "Aki Queen" grapes during maturation and its effect on the skin color and abscisic acid content. *Vitis* **46**(4): 208-209.

Kriedemann PE, Smart RE. 1969. Effects of irradiance, temperature and leaf water potential on photosynthesis of vine leaves. *Photosynthetica* **5**: 15-19.

Labeyrie J. 1985. *L'homme et le climat*. Ed. Denoël, Paris : 281p.

Lancashire PD, Bleiholder H, Van Den Boom T, Langelüddeke P, Stauss R, Weber E, Witzemberger A. 1991. A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Annals of applied Biology* **119** : 561-601.

Langellier F. 2003. Meteo. Mars 2003 : *Le Vigneron Champenois*, **4** : 15-18.

Lauffenburger M. 2007. *Estimation du réchauffement climatique dans le sud-est de la France (à l'est du Rhône) à la fin du XXI^{ème} siècle (2071-2100)*. Aix-en-Provence, Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille 1.

Lebeau R. 1969. *Les grands types de structure agraire dans le monde*. Masson : 120p.

Lebon E, Dumas V, Morlat R. 1996. Réponses de la vigne à différentes situations pédoclimatiques du vignoble d'Alsace. *Revue française d'œnologie* **156** : 22-25.

Lebon E. 2002. Changements climatiques : quelles conséquences prévisibles sur la viticulture. *Actes des 6e Rencontres rhodaniennes*, Institut rhodanien, Orange, 31-36.

Le Roy Ladurie E. 1971. *Times of feast, times of famine: A history of climate since the year 1000*. Farrar Straus and Giroux: 426p.

Le Treut H. 2010. Modèles climatiques : certitudes, incertitudes et impacts locaux. Actes du 23ième colloque de l'AIC, In *Risques et changement climatique*, Ed Dubreuil et al., 2010 ; Rennes : 7-10. ISBN : 978-2-907696-16-6

Lhothellier R. 2005. *Spatialisation des températures en zone de montagne alpine. Thèse de doctorat*. Université Joseph Fourier, Grenoble : 350p.

Lhothellier R. 2006. Spatialisation de la température minimale de l'air à échelle quotidienne sur quatre départements alpins français. *Climatologie*. **3** : 55-69.

Bibliographie

Lindner M, Bugmann H, Lasch P, Flechsig M, Cramer W. 1997. Regional impacts of climatic change on forests in the state of Brandenburg, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*. **84**: 123-135.

Lobell DL, Field CB, Cahill KN, Bonfils C. 2006. Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology* **141**: 208-218.

Lubès-Niel H, Masson JM, Paturel JE, Servat E. 1998. Variabilité climatique et statistique. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des sciences de l'eau* **11**(3): 383-408.

Lubès H, Masson JM, Servat E, Paturel JE, Kouame B, Boyer JF. 1994. Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques - Etude bibliographique. *Rapport n° 3 Programme ICCARE*, ORSTOM Montpellier: 21p.

Madelin 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 de Paris VII.

Madelin M, Beltrando G. 2005. Spatial interpolation based mapping of spring frosts hazard in the Champagne vineyard. *Meteorological Applications-Special GIS* **12**(1): 51-56.

Madelin M, Chabin JP, Bonnefoy C. 2008. Global warming and its consequences on the Beaune vineyards. *Enometrica* **1**(2): 9-19.

Madelin M, Bois B, Chabin JP. 2010. Modification des conditions de maturation du raisin en Bourgogne viticole liée au réchauffement climatique. *EchoGéo* **14**: 11p. URL : <http://echogeo.revues.org/12176>

Matus JT, Loyola R, Vega A, Pena-Neira A, Bordeu E, Arcejohnson P, Alcade JA. 2006. Post-veraison sunlight exposure induces MYBmediated transcriptional regulation of anthocyanin and flavonol synthesis in berry skins of *Vitis vinifera*. *Journal of Experimental Botany* **60**(3) : 853-867.

May P, Antcliff AJ. 1964. Fruit bud initiation. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*. **30** (2): 106-112.

McIntyre GN, Lider LA, Ferrari NL. 1982. The chronological classification of grapevine phenology. *American Journal of Enology and Viticulture*. **33**: 80-85.

Meehl GA, Tebaldi C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science* **305**(5686): 994-997.

Meier N, Rutishauser T, Pfister C, Wanner H, Luterbacher J. 2007. Grape harvest dates as a proxy for Swiss April to August temperature reconstructions back to AD 1480. *Geophysical Research Letter*. **34**, L20705, doi:10.1029/2007GL031381

Menzel A. 2002. Phenology: Its importance to the global change community. An editorial comment. *Climatic Change* **54**: 379-385.

Menzel A. 2005. A 500 year pheno-climatological view on the 2003 heatwave in Europe assessed by grape harvest dates. *Meteorologische Zeitschrift*. **14**: 75–77.

Menzel A, Fabian P. 1999. Growing season extended in Europe. *Nature* **397**: p.659.

Mérot P, Dubreuil V, Delahaye D, Desnos P. 2012. *Changement climatique dans l'Ouest : Evaluations, impacts, perceptions*. Collection « Espace et Territoires », Presses Universitaires de Rennes : 458p.

Merlier C. 2001. *Interpolation des données spatiales en Climatologie, et conception optimale des réseaux climatologiques*. Annexe du rapport de Météo-France concernant ses activités en rapport avec la Commission for Climatology (CCI) de l'OMM : 21p.

Mestre O. 2000. *Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques*. Thèse de doctorat de Mathématiques appliquées et statistiques, Université de Toulouse 3.

Moisselin JM, Schneider M, Canellas C, Mestre O. 2002. Les changements climatiques en France au XX^{ème} siècle. Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie* **38** : 45-56.

Moreau L, Vinet E. 1932. Rôle des matières de réserves de la vigne dans la mise à fruit des cépages et la véraison des raisins. *Annals of Agronomy*. **43** : 363-374.

Morlat R, Bodin F. 2006. Characterization of viticultural terroirs using a simple field model based on soil depth –II. Validation of the grape yield and berry quality in the Anjou vineyard (France). *Plant and Soil* **281**: 55-69.

Morlat R. 1989. *Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins. Applications aux vignobles rouges de Moyenne Vallée de la Loire*. Thèse Doctorat d'Etat. Université de Bordeaux.

Morlat R. 2001. *Terroirs viticoles: étude et valorisation*. Ed. Oneoplurimedia, Coll. Avenir Oenologie : 118p.

Motorina MV. 1958. Photosynthesis and grapevine breathing under the conditions of Moscow region. *Izvestija Tinerjazevske poljoprivredne akademije*, **1**: 20 p.

Mottet G. 1993. *Géographie Physique de la France*. Presses Universitaires Françaises : 655p.

Nemani RR, White MA, Cayan DR, Jones GV, Running SW, Coughlan JC. 2001. Asymmetric climatic warming improves California vintages. *Climate Research* **19**(1): 25-34.

Neethling E, Barbeau G, Bonnefoy C, Quénot H. 2012. Change in climate and berry composition for grapevine varieties cultivated in the Loire Valley. *Climate Research*. **53**: 89-101

Nicholls N. 1997. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends. *Nature* **387**: 484-485.

Ninyerola M, Pons X, Roure JM. 2000. A methodological approach of climatological modeling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*. **20** : 1823-1841.

Oke TR. 1987. *Boundary layer climates*. Routledge, London, New York : 435p.

Olesen JO, Bindi M. 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*. **16**: 239-262.

Oram PA. 1989. Sensitivity of agricultural production to climatic change, an update. Pages 25–44 in *Climate and Food Security: Papers Presented at the International Symposium on Climate Variability and Food Security*. Manila (Phillipines): International Symposium on Climate Variability and Food Security in Developing Countries.

Orlanski I. 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society* **56** (5): 527-530.

Pachauri RK, Reisinger A. 2007. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland : 104p.

Pagé C, Terray L, Boé J. 2008. Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21^{ème} siècle : les scénarii SCRATCH08. *Technical Report TR/CMGC/08/64*, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS, (1875), Toulouse, France : 21 p.

Pagé C, Terray L. 2010. Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21^{ème} siècle : les scénarii SCRATCH2010. *Technical Report TR/CMGC/10/58*, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS, (1875), Toulouse, France : 23 p.

- Pagney P. 1988. *Climats et cours d'eau de France*. Masson, Paris : 248p.
- Palutikof J. 2000. Information Sheets-4: indicators of climate change in the UK. *Climate Research Unit*. URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/iccuk/>
- Pédélaborde P. 1957. *Le climat du Bassin Parisien*. Génin, Paris : 539p.
- Pettitt AN. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics* **28**(2): 126-135.
- Pfister C. 1999. *Wetternachhersage, 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen 1496–1995*. Verlag Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- Pielke SR RA, Stholgren T, Schell L, Parton W, Doesken N, Redmond K, Money J, Mckee T, Kittel TGF. 2002. Problems in evaluating regional and local trends in temperature: an example from the Eastern Colorado, USA. *International Journal of Climatology* (22): 421-434.
- Pinty JP, Mascart P, Richard E, Rosset R. 1989. An investigation of mesoscale flows induced by vegetation inhomogeneities using an evapotranspiration model calibrated against HAPEX-MOBILHY data. *Journal of Applied Meteorology*, **28** : 976-992.
- Pitte JR. 1983. *Histoire du paysage français*. Talandier, Paris : 238p.
- Planchon O. 1994. À propos de la notion de climat maritime. *Études Méditerranéennes* **16** : 119-130.
- Planchon O. 1997. *Les Climats Maritimes dans le Monde*. Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq : 233p.
- Pope VD, Gallani ML, Rowntree PR, Stratton RA. 2000. The impact of new physical parametrizations in the Hadley Center climate model-HadAM3. *Climate Dynamics*. **16**: 123-146.
- Pouget R. 1968. Nouvelle conception du seuil de croissance chez la vigne. *Vitis* **7**: 201-205.
- Quénol H. 2002. *Climatologie appliquée aux échelles spatiales fines : influence des haies brise-vent et d'un remblai ferroviaire sur le gel printanier et l'écoulement du mistral*. Edition ANRT, ISBN 2-284-04081-0 : 283 p.
- Quénol H, Beltrando G. 2006. Impact des haies brise-vent sur le gel printanier en arboriculture, *Climatologie* **3** : 9-23.

Bibliographie

Quénol H, Planchon O, Wahal L. 2008. Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*. **51** : 127-137.

Quénol H. 2011. *Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique*. Habilitation à Dirigée des Recherches. Université Rennes 2 : 103p.

Raible CC, Bischof G, Fraedrich K, Kirk E. 1999. Statistical single-station short-term forecasting of temperature and probability of precipitation : Area interpolation and NWP combination. *Weather Forecasting*. **14** : 203-214.

Ramos MC, Jones GV, Martínez-Casasnovas JA. 2008. Structure and trends in climate parameters affecting winegrape production in northeast Spain. *Climate Research* **38**: 1-15.

Raval A, Ramanathan V. 1989. Observational determination of the greenhouse effect. *Nature* **342** (6251): 758-761.

Ravaz L. 1907. Sur quelques facteurs de la qualité du vin. *Congrès International de Viticulture*, Angers : 184-190.

Reddy KR, Hodges HF. 2000. Climate Change and Global Crop Productivity. *Biologia Plantarum* **43**(4): 570-570(1).

Reilly J, Baethgen W, Chege FE, van de Geijn SC, Erda L, Iglesias A, Kenny G, Patterson D, Rogasik J, Rötter R, Rosenzweig C, Sombroek W, Westbrook J. 1996. Agriculture in a changing climate: impacts and adaptation. In: Watson RT, Zinyowera MC, Moss RH (eds) *Climate change 1995. Impacts, adaptation and mitigation of climate change: scientific-technical analyses. Contribution of Working Group II to the second assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press: Cambridge: 427-467.

Res C, Unger J. 2004. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island : review and new approach. *Clim. Res.* **27** : 253-264.

Ribéreau-Gayon J, Peynaud E. 1971. *Sciences et techniques de la vigne : traité d'ampélogie. Tome 1 : Biologie de la vigne ; sols de vignobles*, Dunod, Paris : 725p.

Rosenzweig C, Hillel D. 1998. Climate Change and the Global Harvest: Potential Impacts of the Greenhouse, *Journal of Agricultural and Environmental Ethics* **11**(1): 71-74.

Salinger MJ. 1987. Impact of climatic warming on the New Zealand growing season. *Journal of the Royal Society of New Zealand* **17**: 363-371.

Santos JA, Malheiro AC, Pinto JG, Jones G. 2012. Macroclimate and viticultural zoning in Europe : Observed trends and atmospheric forcing. *Climate Research* **51**: 89-103.

Seguin B. 2002. Relation entre climat et terroir à différentes échelles spatiales : apport de nouveaux outils méthodologiques, in *IV^e Symposium sur le zonage vitivinicole*, Avignon, Juin 2002, éd. OIV.

Seguin B, Stengel P. 2002. *Changement climatique et effet de serre*. INRA Mensuel, dossier. **113**, 20 p.

Seguin B. 2007. Le réchauffement climatique et ses conséquences pour la viticulture. Colloque *Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ?* Dijon et Beaune, 28-30 mars : 9p.

Seguin B. 2010. *Coup de chaud sur l'agriculture*. Édition Delachaux et Niestlé, Paris, 206 p.

Sirotenko OD, Abashina HV, Pavlova VN. 1997. Sensitivity of the Russian agriculture to changes in climate, CO₂ and tropospheric ozone concentrations and soil fertility. *Climatic Change* **36**: 217-32.

Soussana JF. 2001. Changement climatique. Impacts possibles sur l'agriculture et adaptations possibles, Demeter, Armand Colin, Paris: 195-222.

Střelcová K, Škvarenina J, Blaženec M. 2007. Bioclimatology and natural hazards. *International Scientific Conference*. Poľana nad Detvou, Slovakia. ISBN 978-80-228-17-60-8

Sutherland R A, Bryan R B, Oostwoud Wijendes D. 1991. Analysis of the monthly and annual rainfall climate in a semi-arid environment, Kenya. *Journal of Arid Environments*, **20**: 257-275

Svensson MK. 2004. Sky view factor analysis – implications for urban air temperature differences. *Meteorological Applications*. **11**(3) : 201-211. doi:10.1017/S1350482704001288

Szymanowski M, Kryza M. 2006. Evaluation of selected spatialisation techniques in urban heat island estimation. *Proc. 6th Int. Conf. Urb. Climate*, Goeteborg : 435-438.

Szymanowski M, Kryza M. 2011. Application of geographically weighted regression for modelling the spatial structure of urban heat island in the city of Wroclaw (SW Poland). *Procedia Environmental Sciences*. **3** : 87-92.

Terray L, Pagé C, Déqué M, Flécher C. 2010. L'évolution du climat en France au travers de quelques indicateurs agroclimatiques. In Brisson N, Levraut F (Eds) : *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*, Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 19-32

Tondut JL, Laget F, Deloire A. 2006. Climat et viticulture : évolution des températures sur le département de l'Hérault : un exemple de réchauffement climatique. *Revue Française d'œnologie* **219**: 14p.

Tonietto J. 1999. *Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mesoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France : méthodologie de caractérisation*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique : Montpellier.

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

Trenberth KE, Jones PD, Ambenje P. 2007. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In : *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the AR4 of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon et al. (ed.). Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA

Tveito OE, Schöner W. 2002. *Application of spatial interpolation in climatological and meteorological elements by the use of geographical information systems (GIS)*. KLIMA, Report no. 28/02 : 45p.

Ustrnul Z, Czekierda D. 2003. *Zrónicowanie przestrzenne warunków termicznych powietrza Polskiz wykorzystaniem GIS*. Ser. Atlasy i Monografie. IMGW, Warszawa. **81** : 83p.

Van Leeuwen C, Roby JP, Parker A, Goutouly JP, Vivin Ph, Destrac A, Bornedave L, Dufour MC, Forget D, Marguerite E. 2008. Heat requirements for grapevine varieties is essential information to adapt plant material in a changing climate, VIIth International Terroir Congress, June 23rd-24th, Villenave d'Ornon.

Van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque JF, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith SJ, Rose SK, Jouzel J. 2011. *Scénarios climatiques : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ARPEGE-Climat et LMDz et quelques projections pour les DOM-COM, Rapport de Mission, ONERC : 140 p.*

Vannitsen S, Demarée G. 1991. Détection et modélisation des sécheresses au Sahel. *Hydrologie Continentale* **2**(6): 155-171

Vaudour E. 2003. *Les terroirs viticoles. Définitions, caractérisation, protection*. Editions Dunod, Paris: 293p.

Vigneau JP. 1994. *La spatialisation des données ponctuelles*. Etudes Méditerranéennes. (16): 31-32.

Wagner R. 1966. Effet d'un éclairage d'appoint sur la fertilité des bourgeons de la vigne. *Comptes-Rendus de l'Académie Africaine de France.*: 670-673.

Walko RL, Band LE, Baron J, Kittel TGF, Lammers R, Lee TJ, Ojima D, Pielke RA, Taylor C, Tague C, Tremback CJ, Vidale PL. 2000. Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. *Journal of Applied Meteorology*. **39**: 931-944.

Webb L, Watt A, Hill T, Whiting J, Wigg F, Dunn G, Needs S, Barlow EWR. 2009. Extreme heat: Managing grapevine response. Documenting regional and inter-regional variation of viticultural impact and management input relating to the 2009 heatwave in SE Australia. *Report to GWRDC*: 54p.

Webb LB, Whetton PH, Barlow EWR. 2007. Future Climate Change Impacts on Australian Viticulture. *Actes du colloque "Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles?"*, Dijon, 28-30 Mars : 9p.

White MA, Diffenbaugh NS, Jones GV, Pal JS, Giorgi F. 2006. Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century. *Environmental Sciences* **103**(30).

Winkler AJ. 1962. *General Viticulture*. University of California Press, Berkeley, Los Angeles : 633p.

Winkler AJ, Cook JA, Kliewer WM, Lider LA. 1974. *General Viticulture*, 2nd ed. University of California Press, California.

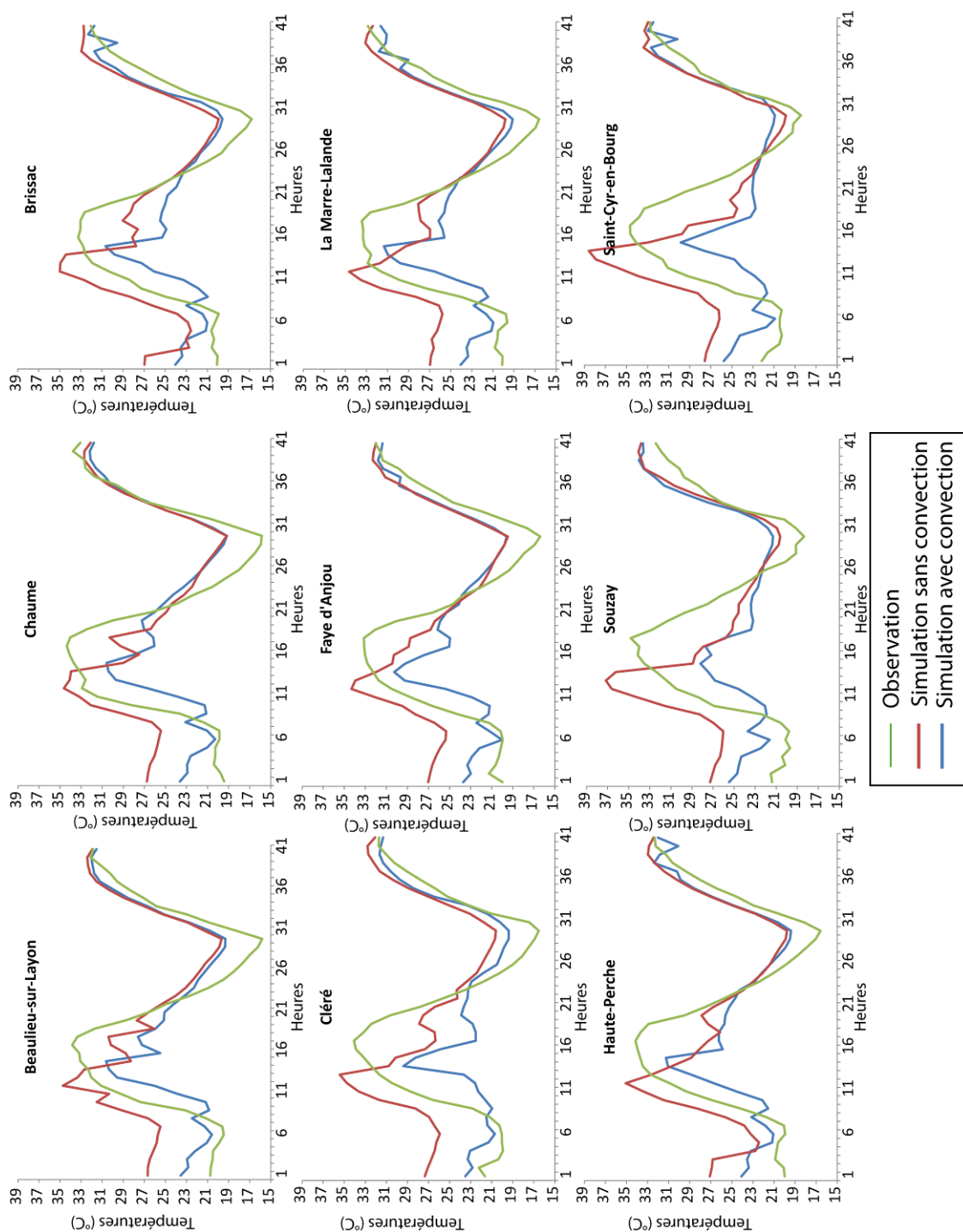
Xu Y, Castel T, Richard Y, Cuccia C, Bois B. 2012. Burgundy Regional Climate Change and its Potential Impact on Grapevines. *Climate Dynamics*. DOI : 10.1007/s00382-011-1284-x

Yamane T, Jeong ST, Goto-Yamamoto N, Koshita Y, Kobayashi S. 2006. Effects of Temperature on Anthocyanin Biosynthesis in Grape Berry Skins. *American Journal of Enology and Viticulture* **57**(1): 54-59.

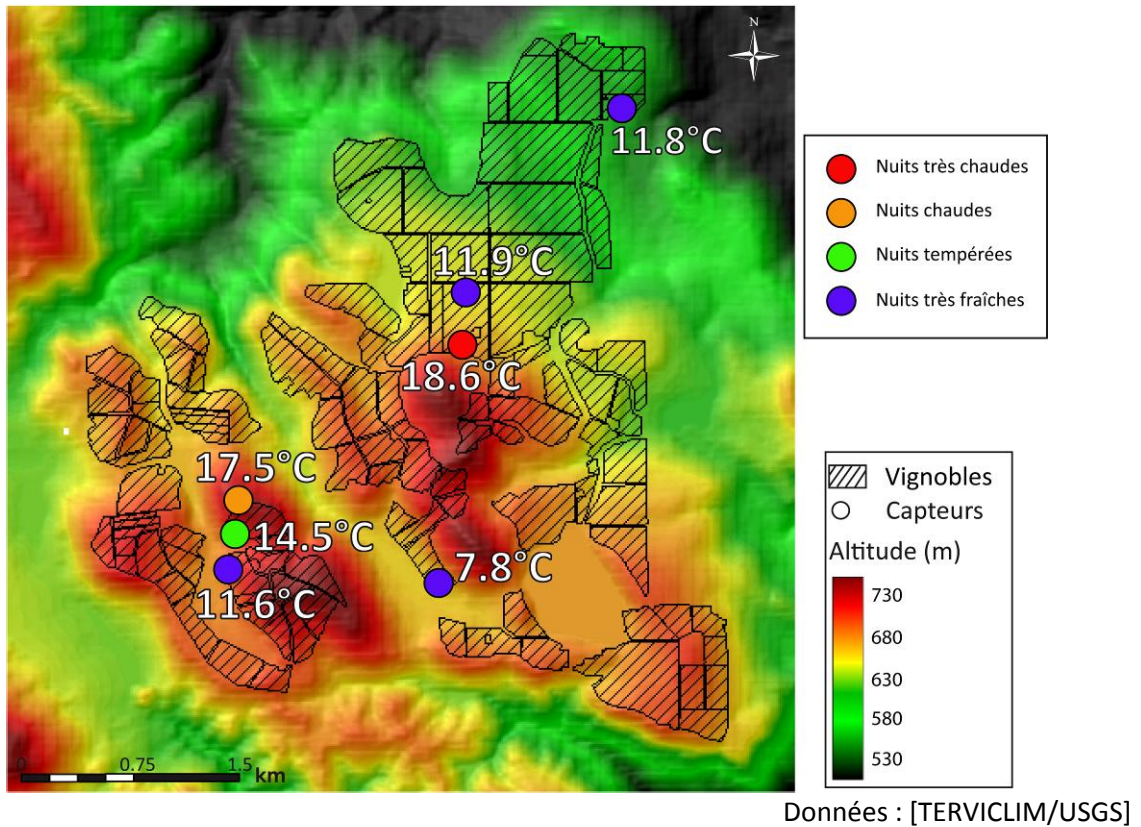
Yoshino M. 1975. *Climate in small area*. Tokyo University Press, Tokyo: 549p.

Annexes

ANNEXE 1 : Comparaison de l'observation avec deux simulations avec et sans convection explicite pour les journées des 9 et 10 Juillet 2010 en moyenne vallée de la Loire.



ANNEXE 2 : Indice de fraîcheur des nuits dans le site de Snows Lake en Californie pour le mois de Septembre 2011.



Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1. Un cep de vigne et ses différents éléments | 20 |
| Figure I.2. Cycle végétatif de la vigne (d'après Galet, 2000) | 20 |
| Figure I.3. Les stades repères de la vigne | 22 |
| Figure I.4. Evolution du poids des baies, des sucres et de l'acidité au cours de la maturation en Anjou (d'après Moreau et Vinet, 1932) | 26 |
| Figure I.5. Répartition de <i>Vitis vinifera</i> , <i>Vitis sp.</i> et Vitacées..... | 29 |
| Figure I.6. Limites de la culture de la vigne en Europe | 30 |
| Figure I.7. Variation de la vitesse de croissance d'un végétal avec la température | 32 |
| Figure I.8. Zones thermiques des vignobles de Californie d'après Winkler (1974) à gauche (cf. Tableau I.1. pour la définition des classes) et Jones (2010) à droite. | 36 |
| Figure I.9. Différentes échelles spatio-temporelles pour l'étude des climats viticoles | 38 |
| Figure I.10. Effet de l'inclinaison du relief sur la quantité de chaleur reçue par le sol et la végétation..... | 41 |
| Figure I.11. Gelée blanche observée au petit matin du 18 février dans des vignobles suisse proche du Léman (©Planchon Olivier) | 44 |
| Figure I.12. Profils thermiques dans l'air et le sol au cours d'une nuit de rayonnement (d'après De Parceveau et Huber, 2007)..... | 45 |
| Figure I.13. Ecoulement de l'air le long d'une pente et formation d'un lac d'air froid (d'après De Parcevaux et Huber, 2007) | 45 |
| Figure I.14. Gourmands repoussant à la base des pieds de vigne gelés par la vague de froid de Février 2012 dans l'AOC Côte de Provence Sainte-Victoire (©Balikian) | 47 |
| Figure I.15. Cas d'un vieux cep moins résistant, tué par le gel hivernal en février 2012..... | 47 |
| Figure I.16. Feuilles de vigne desséchées (A) et grappes de raisins brûlées (B-C-D) suite à la vague de chaleur de l'été 2009 dans le sud-est de l'Australie | 50 |
| Figure II.1. Schéma récapitulatif du bilan radiatif (en Watt/m ²) à la surface terrestre. | 54 |
| Figure II.2. Concentrations atmosphériques de trois GES à vie longue depuis les 2000 dernières années. Les unités de concentration sont en particules par million (ppm) ou milliard (ppb). | 55 |
| Figure II.3. Températures moyennes annuelles relevées à la surface du globe de 1850 à 2004 (anomalies par rapport à la normale 1961-1990 sur l'axe de gauche et valeurs absolues sur l'axe de droite)..... | 57 |
| Figure II.4. Comparaison des changements observés au niveau continental et global de température de surface à partir des résultats des simulations des modèles utilisant les forçages naturels et anthropogéniques. La courbe noire montre les anomalies décennales des observations par rapport à | |

| | |
|---|----|
| la normale de la période 1901-1950. La courbe est en pointillés lorsque la couverture spatiale est inférieure à 50%. Les bandes bleu correspondent aux simulations issues des forçages naturels et les courbes roses correspondent aux simulations issues des forçages à la fois naturels et anthropogéniques. | 58 |
| Figure II.5. Évolution de 1901 à 2005 des anomalies par rapport à la période 1961-1990 de la température moyenne annuelle (en °C) en France..... | 59 |
| Figure II.6. Cartographie des tendances 1901-2000 (en °C/siècle) de la température minimale à gauche et maximale à droite (à partir de 70 séries homogénéisées de températures). | 59 |
| Figure II.7. Anomalies de la température moyenne saisonnière (1950-1999) pour la Champagne (a), la région bordelaise (b), le nord de la Californie (c) et la « Hunter Valley » en Australie (d). <i>Tavg</i> correspond à la température moyenne de la saison végétative de la vigne (Avril-Octobre dans l’Hémiphère nord et Octobre-Avril dans l’Hémiphère Sud) et <i>Trend</i> est la tendance sur 50 ans. | 60 |
| Figure II.8. Evolution des températures minimales et maximales à Napa et Sonoma Valley (à gauche) et du nombre annuel de jours de gel de 1950 à 2000 (à droite). | 61 |
| Figure II.9. Indice de Winkler calculé en Europe sur la période 1950-2009 (a) et différence entre les deux médianes de l’indice des périodes 1980-2009 et 1950-1979 (b). Indice de Huglin calculé en Europe sur la période 1950-2009 (c) et différence entre les deux médianes de l’indice des périodes 1980-2009 et 1950-1979 (d)..... | 62 |
| Figure II.10. Changements entre les périodes d’intégration (1961-1989) et future (2071-2099 ; scénario A2) simulées par le modèle RegCM3 du SRES. (a) Degrés-jours ; (b) Température moyenne saisonnière ; (c) Journée chaudes ($T_x > 35^\circ\text{C}$) durant la saison végétative ; (d) Jours chauds ($T_x > 35^\circ\text{C}$) durant la période de maturation ; (e) Jours froids hivernaux ($T_n < -12,2^\circ\text{C}$) ; (f) Jours froids en automne et au printemps ($T_n < -6,7^\circ\text{C}$) ; (g) amplitude thermique diurne moyenne sur la saison végétative ; (h) amplitude thermique diurne moyenne sur la période de maturation. | 63 |
| Figure II.11. Evolution de la température moyenne sur la période d’avril à septembre et pour trois stations régionales de Bourgogne..... | 63 |
| Figure II.12. Différents scénarios du SRES (d’après GIEC, 2001) | 65 |
| Figure II.13. Evolution de l’anomalie de la température moyenne annuelle globale au 20 ^{ème} siècle par rapport à la normale 1980-99 et pour le 21 ^{ème} siècle à partir des projections des différents scénarios SRES. | 67 |
| Figure II.14. Effets sur les valeurs extrêmes de l’évolution de la distribution des températures. | 68 |
| Figure II.15. Variation annuelle prévue de la sécheresse selon deux indices et les projections du scénario A2 du GIEC. | 69 |
| Figure II.16. Evolution de la température moyenne de la saison végétative modélisée (scénario A2) par le modèle HadCM3 pour la vallée du Rhin (a), la région bordelaise (b), le nord la Californie (c) et la vallée de Barossa en Australie (d). Les anomalies ont été calculées à partir de la normale de référence de la période 1950-1999 du modèle. | 70 |

| | |
|--|----|
| Figure II.17. Moyenne mobile pondérée sur cinq ans des fréquences de températures inférieures à -2 °C en mars pour le point de grille de Reims (Champagne) sur trois scénarios futurs (à gauche) et fréquences des extrêmes chauds (supérieurs à 35 °C) en été (juin, juillet et août) pour les trois scénarios de simulations futures de 2001 à 2100 avec le même point de grille (à droite). | 71 |
| Figure II.18. Evolution des rendements de blé dans quatre pays européens de 1970 à 2005 à gauche, Source : [Olesen et Bindi, 2002], et allongement de la durée de la saison végétative entre 1960 et 1995 à droite (données : Jardins Botaniques Internationaux d'Europe, sauf France, péninsule Ibérique, moyenne et basse Italie et Grèce), Source : [Menzel, 2002 ; Menzel et Fabian, 1999]. | 72 |
| Figure II.19. Pourcentage d'espèces végétales stables en 2100 par rapport au nombre d'espèces en 1990. Le scénario choisit ici est un scénario de réchauffement modéré (+3°C à l'échelle globale et +3,3°C en Europe)..... | 73 |
| Figure II.20. Evolution des dates des stades de débourrement (a), floraison (b) et véraison (c) du cépage Riesling à Bergheim (Alsace) | 74 |
| Figure II.21. Relation entre les dates de maturité du raisin et la température moyenne de la saison végétative de la vigne..... | 75 |
| Figure II.22. Nombre d'années (sur des périodes de 24 ans) avec conditions thermiques appropriées pour la culture de cépages tolérants à la chaleur et au froid aux Etats-Unis à la fin du XX ^{ème} (a) et du XXI ^{ème} siècle. | 76 |
| Figure II.23. Relation entre la température moyenne saisonnière et la cote des millésimes pour les vins blancs d'Alsace (a), les vins liquoreux du Val de Loire (b), les vins rouges de Bordeaux et les vins rouges de l'appellation Barolo. | 77 |
| Figure II.24. Evolution de l'acidité totale, du taux de sucre et du poids des baies pour 2 cépages du vignoble bordelais en France. | 78 |
| Figure III.1. Localisation des principales villes et vignobles du Val de Loire | 81 |
| Figure III.2. Le Val d'Anjou et le contact socle armoricain, transgression crétacéo-éocène | 82 |
| Figure III.3. Affleurement de la faille rectiligne orienté nord-ouest-sud-est dans les coteaux du Layon, au niveau de la commune de Beaulieu-sur-Layon (©Cyril Bonnefoy) | 83 |
| Figure III.4. Relief et vignobles de la moyenne vallée de la Loire (données : INRA-CTV et BD TOPO-49). | 84 |
| Figure III.5. Typologie climatique du territoire français et du Val de Loire en 8 classes (adapté de Joly <i>et al.</i> , 2010)..... | 85 |
| Figure III.6. Deux indices d'aridité dans le nord-ouest de la France sur la période 1961-1990..... | 86 |
| Figure III.7. Carte des AOC du Val de Loire..... | 87 |
| Figure III.8. Typologie des notions de terroir (adapté de Vaudour, 2003)..... | 88 |
| Figure III.9. Représentation en chaîne du système « terroir/vigne/vin » (adapté de Lebon, 1993)..... | 90 |

Liste des Figures

| | |
|---|-----|
| Figure III.10. Toposéquence décrivant le système « roche, altération, altérite » | 92 |
| Figure III.11. Augmentation de la température du 1 ^{er} avril au 30 septembre en Val de Loire, de 1950 à 2008..... | 94 |
| Figure III.12. Evolution des dates de vendanges à Montreuil Bellay (Moyenne vallée de la Loire) de 1978 à 2006. | 95 |
| Figure III.13. Evolution de l'indice de maturité de quatre cépages de la moyenne vallée de la Loire à Montreuil Bellay entre 1978 et 2006. | 96 |
| Figure III.14. Photo illustrant l'enherbement d'un rang sur deux en moyenne vallée de la Loire (photo prise sur une parcelle à Epiré à 10 km au sud-ouest d'Angers (@Cyril Bonnefoy). | 97 |
| Figure IV.1. Différents niveaux d'échelles spatiales imbriquées dans l'étude climatologique de la thèse (réalisation : Cyril Bonnefoy) | 105 |
| Figure IV.2. Structure verticale de l'atmosphère. | 106 |
| Figure IV.3. Echelles spatio-temporelles des phénomènes atmosphériques. La zone en gris représente le domaine caractéristique de la couche limite. | 107 |
| Figure IV.4. Approche systémique de la variabilité spatiale du climat aux échelles locales (adapté de Quénol, 2011)..... | 108 |
| Figure IV.5. Maillage tridimensionnel (longitude, latitude, altitude) d'un modèle global de simulation du climat. Les couleurs représentent la température..... | 113 |
| Figure IV.6. Schéma du passage des sorties des MCGA vers les sorties des MCRA (d'après Viner, 2000) | 116 |
| Figure IV.7. Températures minimales d'avril simulées par a) ARPEGE (résolution 50 km) et b) RAMS (résolution 5 km), pour la période 2041-2050 (SRES scénario A2) et pour le domaine de la grille 2. | 118 |
| Figure IV.8. Anomalies de degrés-jours cumulés par rapport à la normale de Savigny-Lès-Beaune en date de maturité (19/08/2003) en Bourgogne. | 118 |
| Figure IV.9. Nombre de journées chaudes ($T_x > 30^\circ\text{C}$) durant la saison végétative de la vigne sur la décennie des années 1970 (a) et évolution de ce nombre de jours (b) entre les années 1970 et les années 2030 ; (c) évolution du nombre de jours en pourcentage..... | 119 |
| Figure IV.10. Simulation du vent et des températures par le modèle méso-NH à 1 km de résolution sur le transect d'Avize (Champagne) en fin nuit du 16 au 17 Mars 2003. | 119 |
| Figure V.1. Stations d'observations Météo-France originellement disponibles dans le centre-ouest Français (d'après Météo-France/IGN)..... | 122 |
| Figure V.2. Stations d'observations Météo-France disponibles dans le Centre ouest Français après sélection pour l'étude dans le cadre de la thèse (d'après Météo-France/IGN)..... | 123 |

| | |
|---|-----|
| Figure V.3. Déplacement de la station Météo-France de référence pour la ville de Laval en 1988 (a) et effet sur la température (b) vis-à-vis de deux stations de la région n'ayant pas subi de déplacement. | 124 |
| Figure V.4. Déplacement de la station Météo-France de référence de la ville de Blois en 1986 (a) et effet sur la température (b) vis-à-vis de deux stations de la région n'ayant pas subi de déplacement. | 124 |
| Figure V.5. Déplacement de la station Météo-France de référence pour la ville de Tours en 1964 (a) et effet sur la température (b) vis-à-vis de deux stations de la région n'ayant pas subi de déplacement. | 125 |
| Figure V.6. Zone d'étude : carte du Val de Loire montrant la localisation des vignobles et des stations météorologiques utilisées dans la thèse. (d'après Météo-France/IGN) | 126 |
| Figure V.7. Zoom sur le réseau de stations météorologiques TERVICLIM/INRA installé dans les terroirs viticoles d'Anjou et du Saumurois. | 129 |
| Figure V.8. Schéma d'une station météorologique Campbell du réseau TERVICLIM/INRA (adapté de Campbell Scientific®) | 130 |
| Figure V.9. Zoom sur le réseau de capteurs de température installé dans les Coteaux du Layon. | 134 |
| Figure V.10. Schéma du dispositif de mesure de la température dans les rangs de vigne du vignoble des Coteaux du Layon (d'après Gemini®)..... | 135 |
| Figure V.11. Exemple de cartes ayant aidé aux choix de position des capteurs (a : Textures des sols par UTB ; b : Profondeur des sols par UTB ; c : Pentés en pourcentage ; d : Expositions)..... | 135 |
| Figure VI.1. Décomposition de l'orientation de la pente en deux composantes : orientation nord-sud et orientation est-ouest (réalisation : Cyril Bonnefoy)..... | 143 |
| Figure VI.2. Données altitudinales (a), d'inclinaison des pentes (b), d'orientation nord-sud (c) et d'orientation est-ouest (d) extraites du MNT à 80 m de résolution et utilisées dans la construction du modèle multicritères. | 144 |
| Figure VI.3. Schéma récapitulatif du modèle multicritères permettant de spatialiser la température dans le site des Coteaux du Layon. | 146 |
| Figure VI.4. Schéma récapitulatif des étapes de la procédure d'automatisation des modèles multicritères issues des régressions multiples pas à pas (exemple pour le calcul des modèles journaliers). | 149 |
| Figure VII.1. Système de grilles imbriquées du modèle RAMS avec les différents forçages aux limites de la grille 1 | 156 |
| Figure VII.2. Données altitudinales (a) et d'occupation du sol (b) de la grille 4 du modèle RAMS..... | 157 |
| Figure VII.3. Triangle des textures de Jamagne et pourcentages d'argile, sable et limon par type de sols dans le Val de Loire. | 158 |

| | |
|--|-----|
| Figure VIII.1. Evolution des températures moyennes annuelles (a) et sur la saison végétative d'avril à septembre (b) (selon une moyenne mobile calculée sur une fenêtre de 5 ans) dans le Val de Loire de 1948 à 2010 | 170 |
| Figure VIII.2. Evolution moyenne des degrés jours, au cours de la saison végétative (1 ^{er} avril-31 octobre), dans le Val de Loire avant et après la rupture d'homogénéité des séries climatiques observée à Nantes (a), Angers (b), Saumur (c) et Tours (d). | 173 |
| Figure VIII.3. Evolution temporelle de l'indice héliothermique de Huglin dans le Val de Loire pour quatre stations météorologiques (a : Nantes, b : Angers, c : Saumur et d : Tours) sur la période 1950-60/2010. | 174 |
| Figure VIII.4. Evolution de l'indice de fraîcheur des nuits pour quatre stations météorologiques dans le Val de Loire sur trois périodes de calcul des normales climatologiques..... | 175 |
| Figure IX.1. Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique appliquée sur les séries de données de températures de la saison végétative 2010 (a : températures minimales, b : températures maximales) du réseau TERVICLIM/INRA en Anjou et Saumurois..... | 180 |
| Figure IX.2. Localisation des stations météorologiques utilisées pour la classification ascendante hiérarchique et indication de leur appartenance aux différentes classes. | 180 |
| Figure IX.3. Cartes des indices bioclimatiques en Anjou et Saumurois pour la saison végétative 2010. | 183 |
| Figure IX.4. Dendrogrammes des classifications ascendantes hiérarchiques appliquées sur les séries de données journalières de températures de la saison végétative 2009 (a : température minimale, b : température maximale) du réseau de capteurs implanté dans le site des Coteaux du Layon..... | 185 |
| Figure IX.5. Localisation des capteurs de températures utilisées pour les classifications ascendantes hiérarchiques et indication de leur appartenance aux différentes classes..... | 185 |
| Figure IX.6. Evolution des températures minimales (a) et maximales (b) pour 5 capteurs représentatifs dans les vignobles des Coteaux du Layon durant la saison végétative de 2009. | 187 |
| Figure IX.7. Analyses des champs de pression en surface à 12h TU (a) et des températures à 850 hpa à 0h TU (b) sur l'Europe durant un épisode de gel (15 Mars 2010). | 188 |
| Figure IX.8. Températures relevées, par des stations synoptiques et amateurs, à 5h UTC (6h heure française) lors de la journée du 15 Mars 2010..... | 188 |
| Figure IX.9. Températures minimales relevées lors de l'épisode de gel du 15 mars 2010 sur le site des Coteaux du Layon. | 189 |
| Figure IX.10. Analyses des champs de pression en surface à 12h TU (a) et des températures à 850 hp à 0h TU (b) sur l'Europe durant un épisode caniculaire (15 Août 2009)..... | 190 |
| Figure IX.11. Températures relevées, par des stations synoptiques et amateurs, à 15h UTC (17h heure française) lors de la journée du 15 Août 2009 | 190 |
| Figure IX.12. Températures maximales relevées lors de l'épisode caniculaire du 15 août 2009 sur le site des Coteaux du Layon..... | 191 |

| | |
|---|-----|
| Figure IX.13. Indices des degrés jours (a) dans le site des Coteaux du Layon pour la saison végétative 2009 et classification du climat viticole selon l'indice de Winkler (b) | 192 |
| Figure IX.14. Indices calculés selon la formule de Huglin (a) dans le site des Coteaux du Layon pour la saison végétative 2009 et classification du climat viticole selon Huglin (b) | 193 |
| Figure IX.15. Indice de fraîcheur des nuits pour 21 capteurs de température dans les vignobles des Coteaux du Layon en 2009 (calculé sur la période de mi-Août à mi-Septembre). $R^2=0,72$ /Equation de la courbe : $y=0,19 * \exp(0,48x)$ | 194 |
| Figure IX.16. Indice de fraîcheur des nuits calculé sur la période 15 août-15 septembre 2009 dans le site des Coteaux du Layon..... | 194 |
| Figure X.1. Graphiques cartésiens représentant la température minimale (a) et maximale (b) moyenne de la saison végétative 2009 de tous les capteurs en fonction de l'altitude (Tn : valeur-p <0,00001 ; Tx : valeur-p =0,02)..... | 199 |
| Figure X.2. Graphiques cartésiens représentant la température minimale (a) et maximale (b) moyenne de la saison végétative 2009 de tous les capteurs en fonction de la pente (Tn : valeur-p = 0,05 ; Tx : valeur-p = 0,001)..... | 200 |
| Figure X.3. Graphiques cartésiens représentant la température minimale moyenne de la saison végétative 2009 de tous les capteurs en fonction de l'orientation Nord-Sud (a/valeur-p = 0,05) et Est-Ouest (b/valeur-p = 0,02). | 201 |
| Figure X.4. Graphiques cartésiens représentant la température maximale moyenne de la saison végétative 2009 de tous les capteurs en fonction de l'orientation Nord-Sud (a/non-significatif) et Est-Ouest (b/valeur-p = 0,1). | 202 |
| Figure X.5. Matrice des corrélations entre les prédicteurs retenus pour la construction du modèle (* : valeur-p = 0,02 ; ** : valeur-p = 0,2 et ns : non significatif) | 203 |
| Figure X.6. Spatialisation de la température minimale pour le mois d'octobre 2009 (a) et graphique cartésien des températures minimales enregistrées par les capteurs et des températures minimales estimées par le modèle multicritères (b). | 205 |
| Figure X.7. Résidus moyens (observé-simulé), issus de la modélisation multicritères des moyennes des températures minimales journalières, pour chaque capteur dans le site des Coteaux du Layon. | 207 |
| Figure X.8. Spatialisation de la température minimale pour la journée du 29 octobre 2009 (a) et graphique cartésien des températures minimales enregistrées par les capteurs et des températures minimales estimées par le modèle multicritères (b). | 210 |
| Figure X.9. Boîtes à moustache représentant la dispersion des résidus (observé-simulé), issus de la modélisation multicritères des températures minimales journalières, pour chaque capteur dans le site des Coteaux du Layon..... | 211 |
| Figure X.10. Spatialisation de la moyenne des températures maximales du le mois de juillet 2009 (a) et graphique cartésien des températures maximales enregistrées par les capteurs et des températures maximales estimées par le modèle multicritères (b)..... | 214 |

Liste des Figures

| | |
|---|-----|
| Figure X.11. Résidus moyens (observé-simulé), issus de la modélisation multicritères des moyennes mensuelles des températures maximales de la saison végétative 2009, pour chaque capteur dans le site des Coteaux du Layon..... | 215 |
| Figure X.12. Boîtes à moustache représentant la dispersion des résidus, issus de la modélisation multicritères des températures maximales journalières, pour chaque capteur dans le site des Coteaux du Layon. | 217 |
| Figure XI.1. Graphique cartésien des biais (en valeur absolue) de ARPEGE-Climat et RAMS pour les minimales moyennes du mois d'avril issues de la modélisation sur de la période de contrôle 1991-2000 (la droite en pointillé représente la 1 ^{ère} bissectrice)..... | 223 |
| Figure XI.2. Nombre de jours moyen d'occurrence du gel ($T_n < 0^\circ\text{C}$) observé et simulé par RAMS et ARPEGE-Climat à 2 m du sol..... | 224 |
| Figure XI.3. Graphique cartésien des biais en valeur absolue de ARPEGE-Climat et RAMS pour les maximales moyennes du mois d'août issues de la modélisation de la période de contrôle 1991-2000 (la droite en pointillé représente la 1 ^{ère} bissectrice)..... | 226 |
| Figure XI.4. Nombre de jours moyen avec des températures comprises entre 30 et 35°C observées et simulées par ARPEGE-Climat et RAMS à 2 mètres du sol (a) et avec des températures supérieures au seuil de 35°C (b) pour le mois de juillet sur la période 1991-2000. | 227 |
| Figure XI.5. Fréquences des températures minimales journalières du mois d'août observées et simulées par ARPEGE-Climat et RAMS sur la période de contrôle 1991-2000 et pour deux stations de la moyenne vallée de la Loire..... | 228 |
| Figure XI.6. Graphique cartésien des biais (en valeur absolue) de ARPEGE-Climat et RAMS pour les températures minimales (a) et maximales (b) moyennes du mois d'août issues de la modélisation de la période de contrôle 1991-2000 (la droite en pointillé représente la 1 ^{ère} bissectrice)..... | 230 |
| Figure XI.7. Nombre de jours moyen avec températures observées et simulées par ARPEGE-Climat et RAMS à 2 mètres du sol, comprises entre 30 et 35°C (a) et avec températures supérieures au seuil de 35°C (b) pour le mois d'août sur la période 1991-2000. | 230 |
| Figure XII.1. Analyses des champs de pression en surface à 12h TU (a) et des températures à 850 hp à 0h TU (b) sur l'Europe durant l'épisode gélif du 8 au 10 avril 2003..... | 235 |
| Figure XII.2. Températures horaires observées (en vert) par deux stations de l'INRA et de Météo-France et simulées (en noir) par le modèle RAMS pour la période gélive d'avril 2003 en moyenne vallée de la Loire..... | 236 |
| Figure XII.3. Champs de vitesse et de direction du vent à 50 m simulés par le modèle RAMS à 5h TU le 10 avril 2003 (a) et vitesse du vent (b) mesurée à la station de Beaulieu-sur-Layon du 8 au 10 avril 2003 (G4 : grille 4) | 237 |
| Figure XII.4. Graphique cartésien des températures observées en fonction des températures simulées par le modèle RAMS pour 2 stations durant l'épisode de gel tardif du 8 au 10 d'avril 2003 (la droite en pointillé rouge représente la première bissectrice)..... | 238 |

| | |
|---|-----|
| Figure XII.5. Analyses des champs de pression en surface à 12 h TU (a) et des températures à 850 hp à 0h TU (b) sur l'Europe durant l'épisode caniculaire du 7 au 10 août 2003..... | 240 |
| Figure XII.6. Températures horaires observées (en vert) par deux stations de l'INRA et de Météo-France et simulées (en noir) par le modèle RAMS pour la période caniculaire d'août 2003 en moyenne vallée de la Loire..... | 241 |
| Figure XII.7. Graphique cartésien des températures observées en fonction des températures simulées par le modèle RAMS pour 2 stations durant l'épisode caniculaire d'août 2003 (la droite en pointillé rouge représente la première bissectrice). | 242 |
| Figure XII.8. Températures horaires observées (en vert) par les différentes stations du réseau TERVICLIM/INRA et simulées par RAMS (en noir) pour la période de fortes chaleurs du 15 au 18 août 2009..... | 244 |
| Figure XII.9. Graphique cartésien des températures observées par 8 stations du réseau TERVICLIM/INRA en fonction des températures simulées par le modèle RAMS pour les mailles correspondantes pendant l'épisode caniculaire du 15 au 18 août 2009 (la droite en pointillé rouge représente la première bissectrice). | 245 |
| Figure XII.10. Analyses des champs de pression en surface (a) et des températures à 850 hp (b) sur l'Europe durant la journée la plus chaude de l'épisode caniculaire du 7 au 10 juillet 2010. | 246 |
| Figure XII.11. Températures horaires observées (en vert) par les différentes stations du réseau TERVICLIM/INRA et simulées par RAMS (en noir) pour la période de fortes chaleurs du 7 au 10 juillet 2010..... | 248 |
| Figure XII.12. Graphique cartésien des températures observées par 9 stations du réseau TERVICLIM/INRA en fonction des températures simulées par le modèle RAMS pour ces 9 stations et pendant l'épisode caniculaire de juillet 2010 (la droite en pointillé rouge représente la première bissectrice). | 249 |
| Figure XII.13. Températures horaires observées (en vert) par les différentes stations du réseau TERVICLIM/INRA et simulées par RAMS (en noir) pour le 8 juillet 2010. Les barres de part et d'autre de la courbe noire représentent la variabilité spatiale de la température dans un rayon de 1,5 km autour de la maille correspondant à la station. | 250 |
| Figure XII.14. Températures simulées à 2 m par le modèle RAMS le 8 juillet 2010 à 15h TU pour les 4 grilles imbriquées. | 251 |
| Figure XIII.1. a : Comparaison du nombre de jours moyen observé (1991-2000) en juillet avec température maximale comprise entre 30 et 35°C et simulé par ARPEGE-Climat et RAMS à 2 m du sol sur la période 2041-2050. b : Comparaison du nombre de jours moyen observé (1991-2000) du mois de juillet avec température maximale supérieure au seuil de 35°C et simulé par ARPEGE-Climat et RAMS à 2 m du sol sur la période 2041-2050. | 257 |
| Figure XIII.2. Fréquences des températures minimales journalières, du mois d'août observées et simulées par ARPEGE-Climat et RAMS, selon les classes de l'indice de fraîcheur des nuits, sur la période 2041-2050, d'après le scénario A2 du GIEC, et comparaison avec les données d'observations de la période 1991-2000. | 259 |

Liste des Figures

- Figure XIII.3. Fréquences d'occurrence des températures comprises entre 30 et 35°C (a) et supérieures à 35°C (b), observées durant la période 1991-2000 et simulées par ARPEGE-Climat et RAMS à 2 m du sol pour le mois d'août sur la période 2041-2050 selon le scénario A2 du GIEC. 260
- Figure XIII.4. Pression de surface (hpa) réduite au niveau de la mer simulée par RAMS (a) et humidité relative de surface simulée par RAMS (b), sur la grille 1 (25 km de résolution) lors de la première journée de l'épisode caniculaire futur. 261
- Figure XIII.5. Evolution des températures horaires simulées (scénario A2) pour les mailles correspondant à 4 stations de moyenne vallée de la Loire, durant un épisode caniculaire de la décennie 2041-2050. 262
- Figure XIII.6. Températures simulées à 2 m par le modèle RAMS lors de la journée la plus chaude de l'épisode de juillet 2048 à 15h TU pour les 4 grilles imbriquées. 263

Liste des Tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau I.1. Classes de l'indice thermique des « degrés-jours » de Winkler (d'après Winkler, 1962 ; Winkler et al., 1974)..... | 33 |
| Tableau I.2. Valeur du coefficient k de longueur du jour en fonction de la latitude | 33 |
| Tableau I.3. Classes de l'indice héliothermique de Huglin (d'après Tonietto, 1999)..... | 34 |
| Tableau I.4. Classes de l'indice de fraîcheur des nuits (d'après Tonietto, 1999) | 35 |
| Tableau I.5. Somme de chaleur, exprimée en joules/cm ² /an (d'après Galet, 2000) | 42 |
| Tableau I.6. Gélivité (D'après De Parcevaux et Huber, 2007) | 46 |
| Tableau II.1. Les effets et impacts des changements climatiques sur l'agriculture (d'après Amphoux et al., 2003)..... | 72 |
| Tableau V.1. Caractéristiques des stations Météo-France (noms usuels) retenues pour l'étude et périodes disponibles concernant les températures minimales et maximales..... | 127 |
| Tableau V.2. Localisation et caractéristiques des stations du réseau TERVICLIM/INRA..... | 129 |
| Tableau V.3. Informations constructeur sur les différents capteurs météorologiques des stations Campbell (d'après Campbell Scientific®)..... | 131 |
| Tableau V.4. Disponibilité des données journalières sur les trois saisons végétatives de la vigne de 2009 à 2011 pour chaque station météorologique du réseau TERVICLIM/INRA en Anjou et Saumurois. | 132 |
| Tableau V.5. Informations constructeur sur les capteurs de température type « Tinytag Talk 2 » | 134 |
| Tableau V.6. Caractéristiques des 21 capteurs de températures installés sur le site des Coteaux du Layon | 136 |
| Tableau V.7. Disponibilité des données journalières sur les trois saisons végétatives de la vigne de 2009 à 2011 pour chaque capteur de température dans les coteaux du Layon | 137 |
| Tableau VIII.1. Températures moyennes mensuelles et saisonnières dans le Centre-Ouest français pour dix stations climatiques représentatives (normales 1961-1990). | 167 |
| Tableau VIII.2. Les ruptures climatiques dans les séries de données annuelles (statistiquement significatives au seuil de 99%) dans le Centre-Ouest français (selon le test statistique de Pettitt) et les tendances associées (T _m post-rupture – T _m pré-rupture). En rouge les hausses les plus fortes et en bleu les plus faibles. | 171 |
| Tableau VIII.3. Tendances de l'évolution des températures moyennes calculées sur la saison végétative de la vigne (avril-septembre)..... | 172 |
| Tableau IX.1. Températures minimales (a) et maximales (b) moyennes mensuelles pour 9 stations météorologiques du réseau TERVICLIM/INRA durant la saison végétative 2010 (avril-octobre)..... | 178 |

| | |
|--|-----|
| Tableau IX.2. Caractéristiques des différentes classes issues des classifications ascendantes hiérarchiques réalisées pour les séries de températures de la saison végétative 2010 pour le réseau de stations de l’Anjou et du Saumurois. | 181 |
| Tableau IX.3.Indices bioclimatiques dans l’Anjou et le Saumurois pour la saison végétative 2010 ... | 182 |
| Tableau IX.4.Caractéristiques des différentes classes issues des classifications ascendantes hiérarchiques réalisées pour les séries de températures journalières de la saison végétative 2009 dans le site des coteaux du Layon. | 186 |
| Tableau X.1.Résultats (constante, coefficients de régression standardisés et qualité du modèle) des régressions multiples réalisées pour chaque mois, de mai à octobre 2009 sur les moyennes mensuelles des températures minimales enregistrées par les 20 capteurs de température. | 204 |
| Tableau X.2.Résultats (constante, coefficients de régression standardisés et qualité du modèle) des régressions multiples réalisées pour les 47 journées avec variabilité spatiale des températures marquées, sur les températures minimales enregistrées par les 20 capteurs de température..... | 208 |
| Tableau X.3.Résultats (constante, coefficients de régression standardisés et qualité du modèle) des régressions multiples réalisées pour chaque mois, de mai à octobre 2009 sur les moyennes mensuelles des températures maximales enregistrées par les 20 capteurs de température..... | 212 |
| Tableau X.4.Résultats [constante, coefficients de régression et qualité du modèle (R^2 ajusté)] des régressions multiples réalisées pour les 25 journées avec variabilité spatiale des températures marquées, sur les températures maximales enregistrées par les 20 capteurs de température. | 216 |
| Tableau XI.1.Résultats statistiques sur les différences (biais) des températures minimales d’avril (Root Mean Square Error et test t de Student) entre les températures simulées par ARPEGE-Climat (50 km), RAMS (5 km) et les températures observées de 3 stations météorologiques de moyenne vallée de la Loire. N = 10 années (1991-2000) ; t valeur critique = 2,101 ; les différences non significatives entre simulations et observations sont indiquées en gras (valeur-p > 0,05). | 222 |
| Tableau XI.2.Résultats statistiques sur les différences (biais) des cumuls de degrés jours d’avril (Root Mean Square Error et test t de Student) entre la simulation par ARPEGE (50 km), RAMS (5 km) et les observations de 3 stations météorologiques de moyenne vallée de la Loire. N = 10 années (1991-2000) ; t valeur critique = 2,101 ; les différences non significatives entre simulations et observations sont indiquées en gras (valeur-p > 0,05). | 225 |
| Tableau XI.3.Résultats statistiques sur les différences (biais) des températures maximales de juillet (Root Mean Square Error et test t de Student) entre les températures simulées par ARPEGE (50 km), RAMS (5 km) et les températures observées de 3 stations météorologiques de moyenne vallée de la Loire. N = 10 années (1991-2000) ; t valeur critique = 2,101 ; les différences non-significatives entre simulations et observations sont indiquées en gras (valeur-p > 0,05). | 226 |
| Tableau XI.4.Résultats statistiques sur les différences (biais) des températures minimales d’août (Root Mean Square Error et test t de Student) entre les températures simulées par ARPEGE (50 km), RAMS (5 km) et SAFRAN (8 km) et les températures observées de 3 stations météorologiques de moyenne vallée de la Loire. N = 10 années (1991-2000) ; t valeur critique = 2,101 ; les différences non-significatives entre simulations et observations sont indiquées en gras (valeur-p > 0,05)..... | 228 |

| | |
|---|-----|
| Tableau XI.5. Résultats statistiques sur les différences (biais) des températures maximales d'août (Root Mean Square Error et test t de Student) entre les températures simulées par ARPEGE (50 km), RAMS (5 km) et SAFRAN (8 km) et les températures observées de 3 stations météorologiques de moyenne vallée de la Loire. N = 10 années (1991-2000) ; t valeur critique = 2,101 ; les différences non-significatives entre simulations et observations sont indiquées en gras (valeur-p > 0,05)..... | 229 |
| Tableau XIII.1. Comparaison des températures minimales du mois d'avril et du nombre de jours de gel observés sur la période 1991-2000 avec les simulations par les modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 2041-2050 et selon le scénario A2 du GIEC (les résultats en gras correspondent aux résultats dont la différence entre observation et simulation n'était pas significative sur la période 1991-2000). | 254 |
| Tableau XIII.2. Comparaison des degrés jours cumulés du mois d'avril observés sur la période 1991-2000 avec les simulations par les modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 2041-2050 et selon le scénario A2 du GIEC (les résultats en gras correspondent aux résultats dont la différence entre observation et simulation n'était pas significative sur la période 1991-2000)..... | 255 |
| Tableau XIII.3. Comparaison des températures maximales du mois de juillet et du nombre de jours avec Tx>35°C observés sur la période 1991-2000 avec les simulations par les modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 2041-2050 et selon le scénario A2 du GIEC (les résultats en gras correspondent aux résultats dont la différence entre observation et simulation n'était pas significative sur la période 1991-2000). | 256 |
| Tableau XIII.4. Comparaison des températures minimales du mois d'août sur la période 1991-2000 avec les simulations par les modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 2041-2050 et selon le scénario A2 du GIEC (les résultats en gras correspondent aux résultats dont la différence entre observation et simulation n'était pas significative sur la période 1991-2000)..... | 258 |
| Tableau XIII.5. Comparaison des températures maximales du mois d'août et du nombre de jours avec Tx>35°C observés sur la période 1991-2000 avec les simulations par les modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 2041-2050 et selon le scénario A2 du GIEC (les résultats en gras correspondent aux résultats dont la différence entre observation et simulation n'était pas significative sur la période 1991-2000). | 259 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| Remerciements | 3 |
| Liste des sigles et acronymes | 5 |
| Sommaire | 7 |
| Introduction générale..... | 9 |
| Première partie Cadre de l'étude..... | 17 |
| Chapitre I : climat et viticulture..... | 19 |
| I.1. Le déroulement du cycle végétatif de la vigne en lien avec le climat..... | 19 |
| I.1.1. Les rythmes de végétation | 20 |
| I.1.2. Les différents stades phénologiques | 21 |
| I.1.2.1. Le débourrement..... | 22 |
| I.1.2.2. La floraison | 23 |
| I.1.2.3. La véraison..... | 24 |
| I.1.2.4. La phase de maturation du raisin | 25 |
| I.1.3. La vigne, excellent marqueur du climat | 27 |
| I.2. Vers une délimitation des climats viticoles | 27 |
| I.2.1. Limites mondiales de la culture de la vigne | 27 |
| I.2.1.1. Les facteurs climatiques limitant la culture de la vigne | 27 |
| I.2.1.2. La géographie mondiale des vignobles | 29 |
| I.2.2. Les indices bioclimatiques | 31 |
| I.2.2.1. Les degrés-jours (DJ) ou l'indice de Winkler (IW)..... | 31 |
| I.2.2.2. L'indice héliothermique de Huglin (IH) | 33 |
| I.2.2.3. L'indice de fraîcheur des nuits (IF) | 34 |
| I.2.2.4. Les limites de l'application des indices bioclimatiques | 35 |
| I.3. Du macroclimat régional au microclimat de la vigne..... | 37 |
| I.3.1. Les différents niveaux d'échelles spatio-temporelles en climatologie viticole..... | 37 |
| I.3.2. Le rôle des facteurs topographiques et environnementaux sur les climats viticoles | 39 |
| I.4. La vigne et les extrêmes climatiques..... | 43 |

Table des matières

| | |
|---|----|
| I.4.1. Le gel..... | 43 |
| I.4.1.1. Gelées de printemps | 44 |
| I.4.1.2. Gelées d'hiver | 46 |
| I.4.1.3. Méthodes de lutte anti-gel..... | 48 |
| I.4.2. Les fortes chaleurs..... | 49 |
| I.4.2.1. Conséquences des épisodes de fortes chaleurs sur la vigne..... | 49 |
| I.4.2.2. Les pratiques culturales pour lutter contre les effets des fortes chaleurs | 50 |
| Chapitre II Le changement climatique et les impacts sur la viticulture | 53 |
| II.1. Changements climatiques observés dans le monde et en zones viticoles..... | 53 |
| II.1.1. Les mécanismes à l'origine des changements climatiques | 53 |
| II.1.1.1. Les mécanismes à l'origine de l'effet de serre | 53 |
| II.1.1.2. L'augmentation des rejets de Gaz à Effets de Serre (GES)..... | 54 |
| II.1.2. Les observations des changements climatiques en cours | 56 |
| II.1.2.1. Evolution de la température à l'échelle global et en France | 56 |
| II.1.3. Les évolutions du climat en régions viticoles | 60 |
| II.2. Les simulations futures du climat à partir des modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA) | 64 |
| II.2.1. Les simulations futures du climat mondial..... | 64 |
| II.2.1.1. Les différents scénarios du GIEC | 64 |
| II.2.1.2. Vers de nouveaux scénarios..... | 66 |
| II.2.2. Les évolutions attendues du climat..... | 67 |
| II.2.2.1. Les évolutions du climat futur à l'échelle mondiale..... | 67 |
| II.2.2.2. Les évolutions des conditions thermiques futures en zones viticoles | 69 |
| II.3. Impacts observés et attendus dans les domaines agricoles et viticoles | 71 |
| II.3.1. L'agriculture face à ces changements climatiques..... | 71 |
| II.3.1.1. Des effets plutôt bénéfiques | 71 |
| II.3.1.2. ... mais un grand nombre d'effets plutôt néfastes | 72 |
| II.3.2. La viticulture face aux changements climatiques | 73 |
| II.3.2.1. Une précocité des stades phénologiques | 73 |

| | |
|--|----|
| II.3.2.2. Des migrations des conditions de culture | 74 |
| II.3.2.3. Des changements dans la qualité des raisins | 76 |
| Chapitre III : Les vignobles de la moyenne vallée de la Loire dans un contexte de changement climatique..... | 81 |
| III.1. Une approche géographique des vignobles de la moyenne vallée de la Loire | 81 |
| III.1.1. Aspects géomorphologiques et topographiques | 82 |
| III.1.1.1. Une région à la rencontre du bassin parisien et du massif armoricain..... | 82 |
| III.1.1.2. Contexte topographique d’implantation des vignobles..... | 83 |
| III.1.2. Les influences climatiques en moyenne vallée de la Loire..... | 84 |
| III.1.2.1. Contexte climatique régional | 84 |
| III.1.2.2. Un zoom sur la moyenne vallée de la Loire | 85 |
| III.2. Approche de la culture terroir en moyenne vallée de la Loire | 86 |
| III.2.1. La viticulture en Val de Loire | 86 |
| III.2.1.1. Les appellations et sous-ensembles régionaux | 86 |
| III.2.1.2. Les cépages cultivés | 87 |
| III.2.2. Caractérisation des Unités Terroir de Base (UTB) en moyenne vallée de la Loire | 87 |
| III.2.2.1. La notion de terroir | 88 |
| III.2.2.2. La notion d’UTB en Val de Loire | 90 |
| III.2.2.3. L’importance de la géopédologie dans l’UTB..... | 91 |
| III.2.2.4. La prise en compte de l’environnement paysager dans l’UTB..... | 92 |
| III.3. Les vignobles de moyenne vallée de la Loire face aux changements climatiques..... | 92 |
| III.3.1. Evolutions climatiques récentes en moyenne vallée de la Loire | 93 |
| III.3.1.1. Evolution des températures et de l’ensoleillement..... | 93 |
| III.3.1.2. Evolution des précipitations et de l’évapotranspiration | 94 |
| III.3.2. Les évolutions du comportement de la vigne et de la qualité des raisins | 95 |
| III.3.2.1. Une avancée des stades phénologiques | 95 |
| III.3.2.2. Evolution de la composition des raisins | 96 |
| III.3.2.3. Le rôle de l’Homme dans l’évolution de la qualité des vins produits | 96 |

| | |
|--|-----|
| III.3.3. Les vignobles de la moyenne vallée de la Loire menacés par les futurs changements climatiques ?..... | 97 |
| III.3.3.1. Evolutions phénologiques futures..... | 98 |
| III.3.3.2. Evolution future de la qualité du vin..... | 98 |
| III.3.3.3. Vers des modifications des pratiques viti-vinicoles?..... | 98 |
| III.3.3.4. Vers une gestion des sols contrôlée ? | 99 |
| Deuxième partie Collecte des données et approches méthodologiques | 101 |
| Chapitre IV : Observation et modélisation des températures a échelle fine : Une démarche multiscalaire | 103 |
| IV.1. Intérêts de la démarche multiscalaire dans l’observation et la spatialisation des températures en région viticole | 103 |
| IV.1.1. Observation et étude de la variabilité des températures : une étude à différents niveaux d’échelles spatio-temporelles | 104 |
| IV.1.1.1. Prise en compte de l’emboîtement des échelles spatio-temporelles | 104 |
| IV.1.1.2. Approche méthodologique des mesures climatiques adaptées à l’échelle des terroirs viticoles..... | 109 |
| IV.1.2. Spatialisation des températures à l’échelle des terroirs viticoles | 110 |
| IV.1.2.1. De la donnée discrète à la donnée continue | 111 |
| IV.1.2.2. La modélisation multicritères : un outil de spatialisation aux échelles fines | 111 |
| IV.2. Modélisation climatique dans le cadre d’étude d’impacts sur le vignoble : intérêts des modèles de circulation régionale de l’atmosphère (MCRA) | 112 |
| IV.2.1. Les sorties régionalisées : des simulations adaptées aux études d’impact. | 112 |
| IV.2.1.1. Les MCGA et leurs limites | 112 |
| IV.2.1.2. Les apports de la désagrégation dynamique | 113 |
| IV.2.1.3. Le développement de projets internationaux autour de la régionalisation des sorties de modèles | 114 |
| IV.2.1.4. Les méthodes de désagrégation d’échelles | 114 |
| IV.2.2. Changement climatique et viticulture : apport des modèles de circulation régionale de l’atmosphère | 116 |
| IV.2.2.1. Validation des sorties des modèles..... | 117 |
| IV.2.2.2. Exemples d’applications en viticulture | 117 |

| | |
|---|-----|
| Chapitre V Acquisition des données d'observation et approche méthodologique du traitement des données | 121 |
| V.1. Acquisition et traitement des données du réseau régional en Val de Loire | 121 |
| V.1.1.1. Sélection des stations Météo-France..... | 121 |
| V.1.1.2. Recherche de stations disponibles dans le centre-ouest français | 122 |
| V.1.2. Analyse de l'évolution des températures et des indices bioclimatiques | 125 |
| V.1.2.1. Les données mobilisées pour l'analyse climatique régionale | 125 |
| V.1.2.2. Calcul de ruptures statistiques dans les séries de températures et pour les indices bioclimatiques | 127 |
| V.1.2.3. Calcul des tendances des températures et des indices bioclimatiques..... | 128 |
| V.2. Mise en place du protocole de mesures topo-climatique en Anjou et Saumurois et traitement des données | 128 |
| V.2.1. Installation du réseau de stations météorologiques en Anjou et Saumurois..... | 128 |
| V.2.1.1. Choix des sites viticoles pour l'installation des stations | 128 |
| V.2.1.2. Présentation du matériel et du protocole de mesures..... | 130 |
| V.2.1.3. Disponibilité des données pour l'étude | 131 |
| V.2.2. Méthodologie pour la caractérisation des topo-climats..... | 132 |
| V.2.2.1. Etude des températures moyennes saisonnières | 132 |
| V.2.2.2. Etudes des indices bioclimatiques | 133 |
| V.3. Mise en place d'un protocole de mesure de la température dans les Coteaux du Layon et traitement des données | 133 |
| V.3.1. Protocole de mise en place du réseau et données disponibles..... | 133 |
| V.3.1.1. Installation du réseau de mesures à échelle fine..... | 133 |
| V.3.1.2. Description des capteurs et données disponibles pour l'étude | 136 |
| V.3.2. Méthodes de caractérisation du climat à échelle fine | 137 |
| V.3.2.1. Caractérisation des capteurs de températures | 138 |
| V.3.2.2. Etude de la variabilité spatiale de la température..... | 138 |
| V.3.2.3. Etude de la variabilité des indices bioclimatiques | 138 |
| Chapitre VI : Approche méthodologique de la modélisation spatiale de la température dans les Coteaux du Layon | 141 |

| | |
|--|-----|
| VI.1. Sélection et préparation des données utiles à la construction des modèles multicritères.... | 141 |
| VI.1.1. Les données de températures issues des capteurs thermiques..... | 141 |
| VI.1.1.1. Objectifs et sélection des données de températures..... | 141 |
| VI.1.1.2. Les températures minimales..... | 142 |
| VI.1.1.3. Les températures maximales..... | 142 |
| VI.1.2. Les données topographiques issues du modèle numérique de terrain..... | 143 |
| VI.1.2.1. L'altitude et la pente..... | 143 |
| VI.1.2.2. L'orientation..... | 143 |
| VI.1.3. Etudes des relations linéaires simples entre les descripteurs retenus et la température..... | 144 |
| VI.2. Construction du modèle et automatisation de la procédure..... | 145 |
| VI.2.1. Choix de la méthode de régression linéaire multiple..... | 145 |
| VI.2.1.1. La régression multiple : définition..... | 145 |
| VI.2.1.2. Choix de la méthode de régression multiple pas à pas..... | 147 |
| VI.2.2. Automatisation de la procédure de modélisation..... | 148 |
| VI.2.2.1. Réalisation de l'algorithme pour la réalisation de la régression multiple..... | 148 |
| VI.2.2.2. Automatisation de la procédure pour la réalisation des cartes de températures spatialisées..... | 149 |
| VI.3. Approche méthodologique de l'interprétation des résultats..... | 150 |
| VI.3.1. Etude de la qualité des modèles..... | 150 |
| VI.3.2. Etude des coefficients de régression..... | 150 |
| VI.3.3. Etude des résidus des modèles..... | 150 |
| Chapitre VII : Outil de modélisation numérique du climat : Le modèle régional RAMS données et approche méthodologique..... | 153 |
| VII.1. Présentation du modèle régional RAMS, des périodes étudiées et des paramètres climatiques retenus pour la modélisation..... | 153 |
| VII.1.1. Le choix des périodes et des paramètres climatiques modélisés..... | 154 |
| VII.1.1.1. Période de référence et période future..... | 154 |
| VII.1.1.2. Choix de quatre épisodes extrêmes passés et d'un épisode extrême futur..... | 154 |
| VII.1.2. Le modèle RAMS et les données d'entrée..... | 155 |

| | |
|--|-----|
| VII.1.2.1. Présentation générale du modèle RAMS | 155 |
| VII.1.2.2. Le forçage du modèle RAMS et le système d'imbrication des grilles | 155 |
| VII.1.2.3. La base de données environnementales du modèle | 157 |
| VII.1.2.4. La base de données environnementales supplémentaire pour la grille 4 | 157 |
| VII.2. Approche méthodologique du traitement des sorties du modèle RAMS..... | 158 |
| VII.2.1. Méthodologie de contrôle des sorties de la période de référence 1991-2000 | 158 |
| VII.2.1.1. Les données d'observations retenues pour le contrôle des modélisations | 159 |
| VII.2.1.2. Etudes des biais et calcul du RMSE | 159 |
| VII.2.1.3. Calcul de la significativité de la différence entre observation et simulation | 159 |
| VII.2.2. Approche méthodologique de l'analyse et de l'interprétation des sorties de la période future 2041-2050 | 159 |
| VII.2.3. Approche méthodologique de l'analyse des sorties pour quatre épisodes extrêmes passés et futurs | 160 |
| VII.2.3.1. Description des situations synoptiques de chaque épisode | 160 |
| VII.2.3.2. Approche méthodologique de l'analyse statistique de la distribution des températures observées par rapport aux températures simulées pour les 4 épisodes passés | 160 |
| VII.2.3.3. Approche méthodologique de l'analyse des sorties pour un épisode caniculaire « type » de la décennie 2041-2050 | 161 |
| Troisième partie Analyse multiscalaire des températures dans le Val de Loire | 163 |
| Chapitre VIII : Analyse spatio-temporelle des températures dans le Centre-Ouest français depuis le milieu du XX ^{ème} siècle | 165 |
| VIII.1. Les principaux caractères climatiques régionaux | 165 |
| VIII.1.1. Les influences climatiques dominantes | 165 |
| VIII.1.1.1. La dégradation de l'influence océanique vers l'est..... | 165 |
| VIII.1.1.2. Les effets locaux liés à la topographie et l'environnement des stations | 166 |
| VIII.1.1.3. Les effets de la position latitudinale | 166 |
| VIII.1.2. Le Saumurois : un climat plus doux..... | 167 |
| VIII.1.2.1. Une saison végétative très douce. | 167 |
| VIII.1.2.2. Une douceur due à la situation particulière du bassin du Saumurois. | 168 |
| VIII.2. Evolution des températures depuis le milieu du XX ^{ème} siècle..... | 168 |

Table des matières

| | |
|---|-----|
| VIII.2.1. Les principales variations thermiques depuis 1948 | 168 |
| VIII.2.1.1. Vers une augmentation des températures dès la fin des années 80..... | 169 |
| VIII.2.1.2. ... mais des variations thermiques déjà marquées de 1948 à 1980..... | 169 |
| VIII.2.2. Une rupture climatique dans la fin des années 1980 : analyse des tendances de températures..... | 170 |
| VIII.2.3. L'évolution des températures sur la saison végétative | 171 |
| VIII.3. L'impact du réchauffement climatique sur les indices bioclimatiques..... | 172 |
| VIII.3.1. Les degrés jours de Winkler | 172 |
| VIII.3.2. L'indice de Huglin | 173 |
| VIII.3.3. L'indice de fraîcheur des nuits | 175 |
| Chapitre IX : Variabilité spatiale des températures dans le vignoble d'Anjou et du Saumurois..... | 177 |
| IX.1. Analyse des températures en Anjou et Saumurois | 177 |
| IX.1.1. Analyse des moyennes mensuelles de la saison végétative | 177 |
| IX.1.2. Classifications et caractérisation des stations météorologiques | 179 |
| IX.2. Analyse des indices bioclimatiques en Anjou et Saumurois | 181 |
| IX.2.1. Les degrés jours | 181 |
| IX.2.2. L'indice de Huglin | 181 |
| IX.2.3. L'indice de fraîcheur des nuits | 182 |
| IX.3. Analyse climatique dans les Coteaux du Layon..... | 184 |
| IX.3.1. Analyse des températures minimales et maximales journalières | 184 |
| IX.3.1.1. Classifications et caractérisation des capteurs | 184 |
| IX.3.1.2. Variabilité spatiale des températures durant la saison végétative 2009..... | 186 |
| IX.3.2. Analyse de deux événements climatiques « extrêmes » | 187 |
| IX.3.2.1. L'épisode de gel printanier du 15 mars 2010..... | 187 |
| IX.3.2.2. L'épisode de fortes chaleurs du 15 Août 2009..... | 189 |
| IX.3.3. Analyse des indices bioclimatiques | 192 |
| IX.3.3.1. L'indice des degrés jours..... | 192 |
| IX.3.3.2. L'indice d'Huglin..... | 192 |
| IX.3.3.3. L'indice de fraîcheur des nuits..... | 193 |

| | |
|--|-----|
| Chapitre X : Modélisation spatiale des températures dans le vignoble des Coteaux du Layon | 197 |
| X.1. Effets des facteurs locaux sur la variabilité spatiale de la température | 197 |
| X.1.1. L'altitude..... | 197 |
| X.1.1.1. Températures minimales | 198 |
| X.1.1.2. Températures maximales..... | 198 |
| X.1.2. La pente..... | 199 |
| X.1.2.1. Températures minimales | 199 |
| X.1.2.2. Températures maximales..... | 200 |
| X.1.3. L'orientation..... | 200 |
| X.1.3.1. Températures minimales | 200 |
| X.1.3.2. Températures maximales..... | 201 |
| X.2. Modélisation des températures minimales | 203 |
| X.2.1. Modélisation des moyennes mensuelles des températures minimales..... | 203 |
| X.2.1.1. Présentation des différents modèles obtenus..... | 204 |
| X.2.1.2. Etude des résidus de l'ensemble des modèles multicritères mensuels..... | 206 |
| X.2.2. Modélisation des températures minimales journalières | 207 |
| X.2.2.1. Résultats des modélisations..... | 207 |
| X.2.2.2. Etude des résidus sur l'ensemble des modèles multicritères journaliers..... | 210 |
| X.3. Modélisation des températures maximales..... | 211 |
| X.3.1. Modélisation des moyennes mensuelles des températures maximales | 212 |
| X.3.1.1. Présentation des différents modèles obtenus..... | 212 |
| X.3.1.2. Etude des résidus de l'ensemble des modèles multicritères journaliers..... | 214 |
| X.3.2. Modélisation des températures maximales journalières | 215 |
| X.3.2.1. Résultats des modélisations..... | 215 |
| X.3.2.2. Etude des résidus de l'ensemble des modèles multicritères | 216 |
| Quatrième partie Apport de la modélisation numérique avec le modèle RAMS | 219 |
| Chapitre XI : Simulations de contrôle des modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 1991-2000 | 221 |
| XI.1. Simulations pour le mois d'avril | 221 |

Table des matières

| | |
|---|-----|
| XI.1.1. La température minimale moyenne..... | 221 |
| XI.1.2. Le risque gélif printanier | 223 |
| XI.1.3. Le cumul des degrés jours du début de saison | 224 |
| XI.2. Simulations pour le mois de juillet..... | 225 |
| XI.2.1. La température maximale moyenne..... | 225 |
| XI.2.2. Les températures maximales extrêmes | 226 |
| XI.3. Simulations pour le mois d'août..... | 227 |
| XI.3.1. La température minimale moyenne..... | 227 |
| XI.3.2. La température maximale moyenne | 229 |
| XI.3.3. Les températures maximales extrêmes | 230 |
| Chapitre XII : Simulations du modèle RAMS pour quatre épisodes extrêmes observés..... | 233 |
| XII.1. Validation des simulations pour l'année 2003 | 233 |
| XII.1.1. L'épisode de gel du mois d'avril | 233 |
| XII.1.1.1. Situation synoptique et conséquences | 234 |
| XII.1.1.2. Comparaison des simulations et des observations..... | 236 |
| XII.1.1.3. Analyse statistique de la distribution des températures simulées par rapport aux observées. | 237 |
| XII.1.2. L'épisode caniculaire du mois d'août..... | 238 |
| XII.1.2.1. Situation synoptique et conséquences | 238 |
| XII.1.2.2. Comparaison des simulations aux observations..... | 241 |
| XII.1.2.3. Analyse statistique de la distribution des températures simulées par rapport aux observées. | 242 |
| XII.2. Validation des simulations pour deux épisodes de fortes chaleurs, en 2009 et 2010..... | 242 |
| XII.2.1. Août 2009 | 243 |
| XII.2.1.1. Comparaison des simulations aux observations | 243 |
| XII.2.1.2. Analyse statistique de la distribution des températures simulées par rapport aux observées. | 243 |
| XII.2.2. Juillet 2010 | 246 |
| XII.2.2.1. Situation synoptique et conséquences | 246 |
| XII.2.2.2. Confrontation des simulations horaires aux observations | 246 |

| | |
|---|-----|
| XII.2.2.3. Analyse statistique de la distribution des températures simulées par rapport aux observées. | 248 |
| XII.2.2.4. Simulation journalière pour la date du 8 juillet 2010 avec les marges de variabilité spatiale autour des stations (fournies par le modèle RAMS)..... | 249 |
| XII.2.2.5. Cartographie des champs de températures issus du modèle RAMS pour la journée la plus chaude de l'épisode : le 8 juillet 2010. | 251 |
| Chapitre XIII : Simulations futures des modèles ARPEGE-Climat et RAMS sur la période 2041-2050 et pour un épisode extrême | 253 |
| XIII.1. Simulations pour le mois d'avril | 253 |
| XIII.1.1. La température minimale moyenne | 254 |
| XIII.1.2. Le risque gélif printanier | 254 |
| XIII.1.3. Le cumul des degrés jours du début de saison | 255 |
| XIII.2. Simulations pour le mois de juillet | 255 |
| XIII.2.1. La température maximale moyenne | 256 |
| XIII.2.2. Les températures maximales extrêmes | 256 |
| XIII.3. Simulations pour le mois d'août | 257 |
| XIII.3.1. La température minimale moyenne | 257 |
| XIII.3.2. L'indice de fraîcheur des nuits | 258 |
| XIII.3.3. La température maximale | 259 |
| XIII.3.4. Les températures maximales extrêmes | 260 |
| XIII.4. Simulation d'un épisode caniculaire sur la période 2041-2050 | 260 |
| XIII.4.1. Situation synoptique simulée par le modèle RAMS | 261 |
| XIII.4.2. Simulation pour les mailles correspondant à 4 stations de moyenne vallée de la Loire | 261 |
| XIII.4.3. Champs thermiques simulés par RAMS durant l'épisode caniculaire..... | 262 |
| Conclusion générale | 265 |
| Bibliographie | 273 |
| Annexes | 291 |
| Liste des Figures | 295 |
| Liste des Tableaux | 305 |

RESUME

Dans un contexte de changement climatique, les impacts attendus sur les terroirs viticoles posent un certain nombre de questions, notamment sur les risques encourus (variation des caractéristiques et de la qualité du vin) et les enjeux. Ce travail de thèse vise à mettre en place une méthodologie de mesures et de modélisation spatiale de la température, dans les terroirs viticoles du Val de Loire, afin de définir le climat actuel et d'apporter des réponses aux conséquences futures du changement climatique à l'aide de simulations adaptées. Une étude diagnostic des données de températures régionales a préalablement été effectuée et montre une augmentation généralisée de la température et des indices bioclimatiques de la vigne depuis 1950. Des expérimentations à échelles locales ont été réalisées dans les terroirs viticoles de la moyenne vallée de la Loire grâce à un important dispositif de mesures climatiques. La variabilité spatiale de la température est notamment mise en évidence par l'étude d'indices bioclimatiques comme les degrés-jours qui montrent des différences parfois comparables à celles observées à l'échelle régionale. Une modélisation multicritères a été appliquée sur un site expérimental des Coteaux du Layon et montre l'importance des facteurs topographiques dans la variabilité de la température. Une dernière étape a permis d'obtenir des simulations du modèle méso-échelle RAMS. Les simulations à 5 km de résolution sur la période de référence 1991-2000 ont été contrôlées sur certains mois clés de la croissance de la vigne puis confrontées aux sorties du modèle ARPEGE-Climat (50 km). Les résultats montrent l'intérêt de la désagrégation d'échelle par le modèle RAMS avec des biais réduits sur les températures, et notamment une meilleure appréhension des extrêmes thermiques. Les simulations de la période future 2041-2050 (Scénario A2) montrent un recul de l'aléa gélif pour le mois d'avril mais une augmentation de la fréquence des journées chaudes (>30°) et très chaudes (>35°C) pendant la période véraison-maturation. Enfin, les simulations de quelques épisodes extrêmes à 200 mètres de résolution ont soulevé toute la complexité de ce type de modélisation, avec des températures plus ou moins bien reproduites selon les journées.

Mots clés : changement climatique, terroirs viticoles, Val de Loire, modélisation multicritères, RAMS.

ABSTRACT

In the context of Climate Change, the potential impacts for viticultural terroirs pose a number of questions, especially the likely risks (variability in wine characteristics and quality) and implied challenges. This thesis aims to develop a methodology for measuring and modeling the spatial variability in temperature in viticultural terroirs of the Loire Valley, in order to define the current climate and to provide some answers about the future consequences of Climate Change. The temperature trends in the Loire Valley have therefore been analysed since the middle of the 20th century, using the regional weather stations network. The results indicate an increase of temperatures and bioclimatic indices for all the regional stations. Experimentations at local scales have been realized in the viticultural terroirs of the middle-Loire Valley thanks to an important network of weather stations and data loggers. Bioclimatic indices, as the growing-degree days, underline the spatial variability in temperature and show that this variability can sometimes be as significant at fine scale as at larger scales. A multicriteria modeling has been applied on an experimental site in the *Coteaux du Layon* vineyards and highlights which local factors prevail in the temperature variability. Climatic modeling has been carried out at fine scales in the last stage of this study with the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). Downscaled simulations delivered at high resolution (5 km resolution) for the control period (1991-2000) were compared with ARPEGE-Climat simulations (50 km) for a few important months during vine growth. Results showed that RAMS contributed to reducing the large-scale induced bias and gave better simulations of extremes temperatures. The RAMS assimilation of the SRES A2 scenario for the 2041-2050 period projected frost risk to decrease in April but an increase in the frequency of hot days (>30°C) and very hot days (>35°C) during veraison and berry ripening. Finally, extreme weather simulations revealed all the complexity of this kind of modeling, with contrasted results according to the different simulated days.

Key words : Climate Change, viticultural terroirs, Loire Valley, multicriteria modeling, RAMS
