



HAL
open science

Impacts du changement climatique sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne

Cédric Cuccia

► **To cite this version:**

Cédric Cuccia. Impacts du changement climatique sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne. Géographie. Université de Bourgogne, 2013. Français. NNT : 2013DIJOS094 . tel-01495511

HAL Id: tel-01495511

<https://theses.hal.science/tel-01495511>

Submitted on 25 Mar 2017

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.

Université de Bourgogne

Biogéosciences (CNRS/uB 6282)

Centre de Recherches de Climatologie

THESE DE DOCTORAT

Discipline : Géographie

Spécialité : Climatologie

Impacts du changement climatique sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne.

Par Cédric CUCCIA

Soutenue le 14 Mai 2013 devant le jury composé de :

<u>M. JOLY Daniel</u> , Université de Franche-Comté	Président du jury
<u>M. QUENOL Hervé</u> , Université Rennes 2	Rapporteur
<u>M. VAN LEEUWEN Cornelis</u> , Bordeaux Sciences Agro	Rapporteur
<u>M. GARCIA DE CORTAZAR-ATAURI Iñaki</u> , INRA Avignon	Examineur
<u>Mme. MADELIN Malika</u> , Université Paris 7	Examinatrice
<u>Mme. MONAMY Christine</u> , BIVB	Invitée
<u>M. THEVENIN Denis</u> , Météo-France	Invité
<u>M. RICHARD Yves</u> , Université de Bourgogne	Directeur de Thèse
<u>M. BOIS Benjamin</u> , Université de Bourgogne	Co-Directeur
<u>M. CASTEL Thierry</u> , AgroSup Dijon	Co-Directeur

Université de Bourgogne

Biogéosciences (CNRS/uB 6282)

Centre de Recherches de Climatologie

THESE DE DOCTORAT

Discipline : Géographie

Spécialité : Climatologie



Impacts du changement climatique sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne.

Par Cédric CUCCIA

Soutenue le 14 Mai 2013 devant le jury composé de :

M. JOLY Daniel, Université de Franche-Comté

Président du jury

M. QUENOL Hervé, Université Rennes 2

Rapporteur

M. VAN LEEUWEN Cornelis, Bordeaux Sciences Agro

Rapporteur

M. GARCIA DE CORTAZAR-ATAURI Iñaki, INRA Avignon

Examineur

Mme. MADELIN Malika, Université Paris 7

Examinatrice

Mme. MONAMY Christine, BIVB

Invitée

M. THEVENIN Denis, Météo-France

Invité

M. RICHARD Yves, Université de Bourgogne

Directeur de Thèse

M. BOIS Benjamin, Université de Bourgogne

Co-Directeur

M. CASTEL Thierry, AgroSup Dijon

Co-Directeur

Contact : cedric.cuccia@yahoo.fr

A mes Grands-Pères, Georges et Nicolas.

'Une pomme par jour éloigne le médecin. Pourvu que l'on vise bien'

Winston Churchill

Mise en bouche

Mais pourquoi ce paragraphe avant les remerciements et pourquoi un titre aussi particulier/singulier ? Eh bien, tout simplement, cette partie est justifiée par le fait que mon rapport à la nourriture durant cette thèse a plutôt tendu vers la quantité que vers la qualité. Je me joins donc à mon cholestérol pour remercier en premier lieu : Arabica et Robusta pour m'avoir tenu éveillé, ainsi que les quelques kilogrammes de sucres que j'ai pu y ajouter ; Ronald, pour m'avoir rassasié aussi souvent, l'espace d'une demi-après midi ; les pizzas surgelées, pour avoir su subir les retombées négatives de ma fainéantise culinaire ; toutes les boutiques de Kébab-frites, qui ont assouvi ma soif de gras ; les tonnes de féculents dévorées en l'espace de quelques secondes ; les gaufres du distributeur, qui ont pour seul avantage de coûter 50 centimes d'euros et tout ce qui a pu contribuer de près comme de loin à ma prise vertigineuse de poids pendant ces 4 ans et demi. Pour tout ça, merci.

Les remerciements

Plus sérieusement, il convient de remercier mon trio d'encadrant : **Yves Richard, Thierry Castel et Benjamin Bois**. Tantôt agissant telle une fourche à trois dents, piquant dans le vif pour faire avancer le mauvais cheval de trait que je suis, tantôt agissant tels les Trois Mousquetaires, me portant secours dans les moments de doute et de galères techniques ou de toutes autres natures. Et puis, bien entendu, il y a la fameuse règle de trois qui permet, à partir de trois nombre de déterminer un quatrième proportionnel, en l'occurrence ma thèse et moi. Il y a les nombreuses histoires pour enfants et autres légendes qui ont montré qu'un trio est souvent capable de venir à bout d'un méchant loup ou d'un oncle un peu trop pingre. Cette thèse, à défaut de faire rêver les enfants, pourrait aisément rejoindre cette liste d'histoires et c'est en grande partie grâce à vous trois. Merci.

Merci également à la **Région Bourgogne** et au **Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne (BIVB)** qui ont cofinancé cette thèse.

Merci au **BIVB**, au **SRAL** et au **Domaine Louis Latour** pour avoir fourni des données phénologiques importantes.

Je remercie également toute **l'équipe du CDM21** de m'avoir accueilli et plus précisément à **Denis Thévenin** qui s'est toujours rendu disponible lorsque j'ai eu besoin de données de températures ou de conseils. J'en profite pour remercier également **Ariane Wittevrongel** qui m'a fait une place dans son bureau et a subi mon humour pendant les quelques jours où j'ai squatté le CDM21. Elle a toujours

répondu présente lorsque j'avais besoin de renseignements complémentaires. Ariane, sache que je ne regarde plus les '*renards*' de la même façon maintenant.

Merci à tous ceux qui ont fait partie du comité de pilotage de la thèse : **Jocelyne Pérard, Vincent Dubreuil, Christine Monamy, Malika Madelin, Denis Thévenin** et **Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri**. Merci pour vos critiques constructives et vos conseils avisés lors des différentes réunions et des rencontres impromptues lors de colloques.

Merci à **Hervé Quénot** et **Cornelis Van Leeuwen** d'avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse. Merci à **Daniel Joly** d'avoir accepté de rejoindre le jury de thèse.

Ma thèse s'est déroulée au **Centre de Recherches de Climatologie**. Je remercie donc Bernard Fontaine, Pierre Camberlin, Benjamin Pohl, Nadège Martiny, Pascal Roucou, Simon Guichard et Corinne Quintar. Je n'oublie pas les multiples **post-docs** et **autres collègues** qui ont séjournés au CRC pendant ma thèse : Nicolas Vigaud, Samuel Louvet, pour les petits-déjeuners pris expérimentaux ensembles, Mouhamad Al-Sayed-Ali, pour sa rigueur en ce qui concerne l'horaire des repas, Pascal Oettli, critique littéraire à ses heures, mais aussi, Amelia Caffarra, Aurélien Rossi, Gemma Mollevi, Jacques-André Ndione, Ernest Amoussou et tous ceux à coté desquels je suis sans doute passé à coté dans ce paragraphe (sorry). Une mention spéciale à Michèle Dalby pour les discussions sur le froid, les chats, les gens stupides et toutes les choses qui nous agacent au quotidien. Et merci pour le (très gros !) travail de relecture, forcément.

Et puis il y a les compagnons de galères. Ceux que l'on appelle les **Doctorants**. Comme j'ai pris un peu mon temps, ils ont été nombreux : Adrien, Clémence, Etienne, Joseph, Julien, Luca, Paul-Arthur, Romain et Viviane. Et les **Masters** aussi, ne les oublions pas : Geoffrey, Quentin, Aurélie, Elody, Waltraud, Basile, Alice, Caroline et les sempiternels oubliés.

Un grand merci à **Agnès Chameroy**, toujours présente lorsque j'avais besoin d'elle pendant la période où je donnais des cours de Géosphère. A ce propos, j'ai également une pensée aux trois années de licences que j'ai pu (du !) martyriser.

Merci à **mes parents, Régine et Sauveur**, qui ont très vite compris que je n'étais pas fait pour les études et pourtant, que j'étais malgré tout capable d'aller jusqu'au bout, juste comme ça, pour voir. Merci d'avoir suivi (de loin) les avancées du travail et le Grand Huit de mon état psychologique, qui s'améliorait grandement dès que je passais la porte de chez vous, de chez moi, le temps d'un weekend, d'une

semaine, parfois plus. Merci pour ne jamais m'avoir poussé dans une voie qui n'était pas la mienne et d'avoir respecté mes choix, quels qu'ils soient. Merci de n'avoir jamais cru ceux qui disaient que j'étais voué à l'échec. Merci de m'avoir toujours fait confiance tout au long de ces (trop) longues années d'études. J'espère vous rendre aussi fier que ce que j'aime avoir des '*vieux*' comme vous.

Merci à **ma 'petite' sœur, Marjorie**, qui, malgré le fait qu'elle se soit découverte une âme de voyageuse, traversant la France de long en large avec son homme Hakim, a toujours été là, l'espace d'un weekend chez les '*vieux*' ou pendant les vacances d'été, à flemmarder au bord de la piscine, à simplement se poser la question du '*pourquoi de l'existence de la cigale*'. Merci pour les moments de '*rigoulade*' et pour les séances d'abdominaux.

Un **grand merci à tout le reste de ma famille**. A ma Grand-Mère, Pauline, fière comme tout d'avoir un petit fils qui a fait de longues études. A ma Marraine, Séraphine, sans qui je n'aurais jamais pu me tenir au courant des dernières rumeurs lambescaines. A mon Parrain, Guy, pour sa mauvaise foi quand je le bats à la pétanque (même si c'est relativement rare). A mes autres oncles et tantes, Hélène, Roger, Jean-Noël, pour leurs attentions et leurs mots d'encouragement. Et bien entendu, à mes cousin(e)s, Adeline, la seule personne à qui je fais attention de ne pas hurler dans les oreilles, Bastien, qui a bravé le froid pour me rendre quelques visites à Dijon, Fabien, pour ses conseils d'ancien combattant, Nathalie et Sophie, mes (presque) grandes sœurs et à leurs pièces rapportées respectives, Greg, Aurélie, Sylvia, Yvan. Au plaisir que j'ai eu à tous les retrouver lors de repas de fêtes, de weekend ou encore de cousinades. Et puisqu'ils préfèrent sans aucun doute les bisous aux mercis j'écris de 'très gros bisous' à mes petits-cousins Maël et Loane.

Un grand merci à ma **Belle (Grande) Famille**. A ma marâtre Catherine et à Aldo, mon joli-beau-père : merci pour les weekends à Blaisy, les leçons de jardinage, les bons restos et les soirées bricolages. A Laurent, mon beau-père, et Nathalie, ma jolie-belle-mère : merci pour les weekends aux airs de colonie de vacances à Miserey et pour les fins de repas musicales. Merci à mes belles-sœurs, Maud (et son homme Vincent) et Héloïse, et à mon beau-frère Romain, et à sa petite famille, Virginie et Ines. Merci à vous tous pour votre soutien et pour vos encouragements.

A mon vieux pote **Ludo**, avec qui on a réussi à se voir régulièrement malgré la distance et nos coups de fil avec messages sur répondeur inclus. Merci pour tes nombreuses visites dans le grand nord. A tous les potes du sud que j'ai plus ou moins perdu de vue avec la distance et le manque de temps.

A tous **mes potes dijonnais** (en tout cas, rencontrés à Dijon) : Albin, qui a passé de longs midis et de longues soirées à m'écouter parler de tout et de rien sans (presque) jamais tomber dans un sommeil long et profond ; Marine, ma *Grande* ; Karine, ma *Frisée*, la seule personne au monde à avoir des cheveux plus beaux que les miens ; Pierre, *El Gringo* du 8-9 ; Dimitri, parce que pouvoir écrire le mot '*Rabastens*' dans ma thèse est un honneur ; Robert, '*Ba-ba-ouh*' ; David D., '*ducateur*' ; Aurélien, celui qui m'a fait connaître le tout Dijon et la télé ('*Mo-mo-motus* !') ; Guillaume, le '*bandit*' ; David P., le '*Porc-Garou*' et tous ceux que je zappe involontairement ! Je n'oublie pas les potes du côté de ma colocataire : Sophie et Nico, Fanny et Xavier, Lola et Stéphan, Sandrine et Aurélien, Elodie et Simon (et Lino !), Elsa, Alexia, Marie ... et tant d'autres !

Merci à mes compagnons de route footballistique de **l'Amicale Sportive des Poussots**, tous sans exception, pour les bons moments après une victoire et les moins bons après une défaite. Au moment où j'écris ceci, la montée est encore à notre portée. Merci à toute l'équipe de **Radio Campus**, en particulier à Antoine, pour qui j'ai usé des micros et déblatérisé sur le sport, entre autre.

Merci à **Jacques aussi et au personnel de la cafet' d'Agrosup'** pour m'avoir nourri et vous savez que c'est quelque chose de primordial pour moi (*cf.* partie 'mise en bouche'). Merci à **Florence et Maria** pour les discussions diverses et variées autour d'un café au 'Rendez-vous du Belvédère'.

Enfin, merci à toi, **Lucile**. A nos nuits. A nos jours. A l'éternel retour de la chance. J'avais vraiment te dire '*merci*' pour tout le mal qu'tu n'm'as pas dit pendant ma thèse. Que serais-je sans toi qui vins à ma rencontre. Souviens-toi. C'était un jeudi. C'était nous deux. Il était une fois. C'était sans doute un jour de chance, un cadeau de la Providence. Claude François n'avait peut être pas tort en chantant : '*dites-lui que j'ai peur pour elle, dans les sous-sols quand il fait noir*'. D'habitude, la nuit je mens. Pas cette fois. Alors, nous avons cherché au fond d'un verre, tout l'amour qui a quitté la Terre, le temps d'une chanson. A ton avis, qu'avons-nous vu de l'amour ? De toi à moi à cette époque, j'ai si souvent dormi avec ma solitude, glissant mon corps dans un jean usé, je caressais le temps et jouait de la vie comme on joue de l'amour. Je vivais la nuit. Faut dire que je m'étais crevé les yeux, en regardant trop près ton corsage alors, naturellement, je m'étais destiné à n'être qu'un garçon de l'aurore. Il paraît qu'à Dijon le vent d'hiver souffle en Avril pourtant, j'ai attrapé un coup de soleil, j'sais plus comment, faut qu'j'me rappelle. Ce soir, où le Soleil avait rendez-vous avec la Lune. A croire qu'on était tous les deux destinés à voir nos chemins se rencontrer, pour tracer un chemin et forcer le destin à chaque carrefour. A aucun moment nous ne nous sommes dit : '*vraiment de quoi avons-nous l'air ? J'entends déjà les*

commentaires’. Il était une fois toi et moi, n’oublie jamais ça, c’est la morale de mon paragraphe. Moi j’le trouve chouette, pas vous ?

Ah bon ...

Rassurez vous : à partir de la fin de cette phrase, plus aucune allusion à la nourriture, à Claude François ou à quoi que ce soit qui ait un rapport avec autre chose que le changement climatique et la vigne, ne sera faite. Car c’est à partir d’ici, que les choses sérieuses débutent.

Ce travail de thèse s'inscrit dans l'axe thématique « Impacts Climatiques » de l'équipe du Centre de Recherches de Climatologie (C.R.C., <http://climatologie.u-bourgogne.fr/>) UMR 6282 Biogéosciences [<http://biogeosciences.u-bourgogne.fr/>]. La thèse a été cofinancée par la Région Bourgogne et le Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne (BIVB).

'Tout le monde savait que c'était impossible. Il est venu un imbécile qui ne le savait pas et qui l'a fait.'

Marcel Pagnol



Liste des acronymes

AOC : Appellation d'Origine Contrôlée

ARPEGE : Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle

CHA : Classification Hiérarchique Ascendante

DD : Degré Jour (Degree Day)

DJF, MAM, JJA, SON : Décembre-Janvier-Février ; Mars-Avril-Mai ; Juin-Juillet-Août ; Septembre-Octobre-Novembre.

ECMRWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EI : Ecart-Interquartile

ERA : ECMRWF Re-Analysis

ETP : EvapoTranspiration Potentielle

GES : Gaz à Effet de Serre

GFV : Grapevine Flowering Veraison

IF : Indice de Fraîcheur des nuits

IH : Indice de Huglin

KR : Krigeage

LARS WG : Long-Ashton Research Station Weather Generator

MCG/GCM : Modèle Climatique Global

MCGAO : Modèles de Circulation Générale couplés Atmosphère-Océan (MCGAO)

MCR/RCM : Modèle Climatique Régional

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NAO : Northern Atlantic Oscillation

PPV : Plus Proche Voisin

RCP : Representative Concentration Pathways

RLM : Régression Linéaire Multiple

RMSE : Erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error)

SMWDA : Split Moving Window Dissimilarity Analysis (test statistique)

SRES : Special Report on Emissions Scenarios

Tn : Température minimale

Tm : Température moyenne

Tx : Température maximale

WE : Wang and Engel

WRF : Weather Research and Forecast

*'Placez votre main sur un poêle une minute et ça vous semble durer une heure.
Asseyez vous auprès d'une jolie fille une heure et ça vous semble durer une minute.
C'est ça la relativité.'*

Albert Einstein



Sommaire

INTRODUCTION.....	19
CHAPITRE A : État de l'art.....	33
A.I. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	37
A.II. LA VIGNE ET SA RELATION À LA TEMPÉRATURE.....	51
A.III. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : QUELS IMPACTS SUR LA VIGNE ?	63
Conclusion du Chapitre A.....	74
CHAPITRE B : Variabilité spatiotemporelle des températures en Bourgogne depuis 1961.....	75
B.I. BASE DE DONNÉES DE TEMPÉRATURES PONCTUELLES.....	83
B.II. ÉTUDE DES ÉVOLUTIONS DE TEMPÉRATURES EN BOURGOGNE	89
B.III. SPATIALISATION DES TEMPÉRATURES EN BOURGOGNE : DÉMARCHE ET MÉTHODOLOGIE .	103
B.IV. Résultats.....	111
Conclusions du chapitre B.....	142
CHAPITRE C : La relation entre la température et le Pinot noir : de l'observation, à la modélisation.....	145
C.I. DONNÉES/MODÈLES PHÉNOLOGIQUES ET MÉTHODOLOGIE.....	151
C.II. RELATION TEMPERATURE/PHÉNOLOGIE DU PINOT NOIR EN BOURGOGNE.....	163
C.III. Modélisation de la phénologie de la vigne.....	177
CHAPITRE D : Impact du changement climatique projeté sur le Pinot noir en Bourgogne.....	209
D.I. Introduction.....	215
D.II. Évaluation de la désagrégation dynamique du climat pour la Bourgogne.....	221
D.III. Régionalisation des températures par WRF sur la période 1970-1987, en désagrégeant les sorties du modèle ARPEGE/SRES A2	241
D.IV. Régionalisation du réchauffement et de ses impacts sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne.....	251
Conclusions sur le Chapitre D.....	263
CONCLUSIONS.....	267
CC.1. Principaux résultats des chapitres B, C et D.....	273
CC.2. Impact projeté du réchauffement climatique en Bourgogne à l'horizon 2031-2048.....	277
CC.3. Perspectives de recherches.....	278
Bibliographie.....	283

Listes Figures.....	297
Listes Tableaux	309
Annexes.....	313
Table des Matières	321

INTRODUCTION

'Un problème sans solution est un problème mal posé.'

Albert Einstein



INTRODUCTION

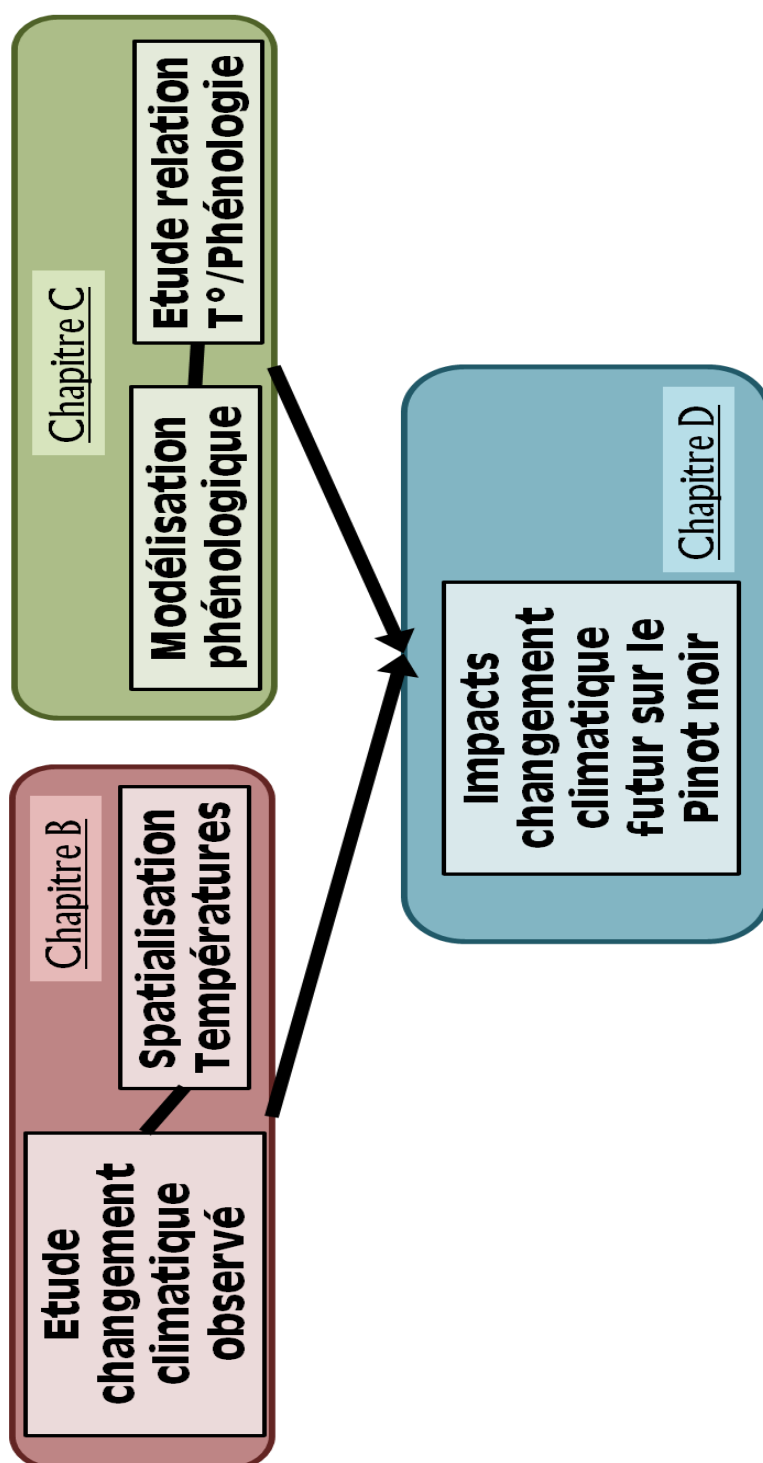


'Le commencement est beaucoup plus que la moitié de l'objectif.'

Aristote



Chapitres de la Thèse





Contexte de l'étude

La vigne en Bourgogne : un enjeu économique et culturel

En Bourgogne, la vigne occupait 27 966 ha en 2010 (12 500 ha en 1955), ce qui correspond à 3 % du vignoble français (6,6 % de la production en AOC). Malgré sa faible proportion dans le paysage agricole bourguignon (2 % des surfaces agricoles exploitées en Bourgogne en 2010), la vitiviniculture bénéficie d'une forte valeur ajoutée : son chiffre d'affaire atteignait 1 milliard d'euros en 2010, ce qui correspond à la vente de près de 200 millions de bouteilles. Plus de la moitié de ces bouteilles ont été exportées dans cent quarante pays, dont le Royaume-Uni, les États-Unis et le Japon qui sont parmi les plus gros importateurs. Enfin, ce secteur permet directement l'emploi de vingt mille personnes (cent mille indirectement, soit 6 % de la population bourguignonne) [www.vins-bourgogne.fr, janvier 2012].

Au-delà de l'économie touchant directement la production de vin, il existe d'autres activités liées à la vigne, notamment l'œnotourisme (Routes de Vins ...). La présence de la vigne en Bourgogne depuis au moins le III^e siècle après J.-C. et, en particulier, la culture du terroir et de sa préservation, a permis à la Bourgogne d'acquérir une forte notoriété mondiale et une image haut de gamme [Bonnardot, 1996 ; <http://www.vins-bourgogne.fr>, janvier 2012].

La Bourgogne : un climat de transition face au changement climatique

Les conditions météorologiques observées en Bourgogne présentent des influences très contrastées [Chabin, 1985] : une influence océanique provenant de l'ouest, une influence continentale provenant du nord-est et une influence méridionale provenant du sud. À l'échelle de l'Europe, le climat (intégration temporelle des conditions météorologiques) de la Bourgogne est historiquement considéré comme appartenant au domaine tempéré maritime [Koeppen, 1936]. L'évolution climatique récente ne remet pas en cause, pour l'instant, cette affectation [Gerstengarbe and Werner, 2008]. Au sein de l'espace français, la Bourgogne est depuis longtemps considérée comme étant une région de transition entre climat océanique et climat à nuances continentales [Angot, 1919].

Concrètement, ces essais de classifications induisent des conséquences sur le vignoble. Par exemple : contrairement au vignoble chablisien qui subit des perturbations d'ouest, les vignobles de la Côte bénéficient d'une situation d'abri les protégeant de ces perturbations ; ils sont situés dans ce que Bonnardot [1996] appelle l'axe chaud. De même, le risque de gelées tardives est très différent entre le chablisien et la Côte viticole (Côte de Nuits, Côte de Beaune, Mâconnais).

Le changement climatique observé en France est contrasté spatialement [Laget *et al.*, 2008] et temporellement [Spagnoli *et al.*, 2002]. D'après Lebourgeois *et al.* [2001], le réchauffement associé serait de l'ordre de 1,2°C sur les derniers cinquante ans du XXe siècle. D'après Moisselin *et al.* [2002], la Bourgogne a subi un réchauffement de sa température moyenne d'environ un degré depuis le début des années 1900. Les gradients sud-est/nord-ouest du réchauffement des températures minimales et nord/sud des températures maximales qu'il observe placent la Bourgogne dans une position de carrefour, ici en termes de caractéristiques revêtues par le changement climatique. Enfin, Chabin *et al.* [2007] montrent qu'il existe un réchauffement des températures sur la Côte viticole d'environ 2°C sur la période 1980-2005.

Pour le siècle à venir, le changement climatique prévu pour l'Europe [GIEC, 2007 ; Trenberth, 2007] distingue un réchauffement modéré au nord et plus fort au sud. Notons que le distinguo nord/sud concerne également les précipitations qui pourraient augmenter au nord et diminuer au sud. Pour ces deux variables (températures et précipitations), la Bourgogne (comme l'ensemble des régions situées entre les 45° et 50° nord) se situe dans l'espace de transition entre le nord et le sud de l'Europe.

L'un des enjeux de cette thèse est d'étudier le changement climatique en Bourgogne à échelle fine (résolution de quelques dizaines de kilomètres carrés) à partir d'observations et de faire le lien entre les données ponctuelles à cette échelle et les données de large échelle issues des modèles climatiques globaux (MCG) dont la résolution est de l'ordre de quelques dizaines de milliers de kilomètres carrés. Ce saut d'échelle se fera en deux temps grâce à : 1/ une spatialisation des données ponctuelles (*bottom-up*) de températures observées et 2/ une désagrégation (*top-down*) des données climatiques de large échelle par un modèle climatique régional (MCR) [Giorgi, 2006 ; Mearns *et al.*, 2012 ; Xu *et al.*, 2012].

Les impacts du changement climatique sur la vigne

Vitis vinifera est une plante très sensible à la température. Les différentes variétés de cette plante, appelées cépages, sont autant de conditions thermiques idéales nécessaire à la production de baies de qualité. De Amerine et Winkler [1944] à Jones [2006], de nombreuses études ont permis d'établir les limites de ces conditions pour chacun des cépages. Tout au long de sa période de croissance, la vigne est influencée par la température et ce, de façons différentes en fonction des stades phénologiques [Galet, 2000 ; Buttrose et Hale, 1973 ; Daux *et al.*, 2007 ; voir chapitre A.II.2.B.].

Cette forte dépendance devient problématique dans un contexte de réchauffement climatique puisque la modification des conditions environnementales, et en particulier des températures, va automatiquement induire une modification de la croissance de la plante et, à terme, de sa faculté à produire des baies de qualité [Keller *et al.* 2010].

Étudier et modéliser la relation température/Pinot noir en Bourgogne est donc un enjeu clé afin, après transposition de cette relation pour des climats futurs, de dessiner les futures conditions thermiques pour la viticulture sur ce territoire.

Problématique de la thèse

Il est fondamental, étant donné l'importance de ce secteur d'activités en Bourgogne, de caractériser le plus précisément possible les impacts du changement climatique sur la vigne afin de développer des stratégies d'adaptation permettant de continuer à valoriser au mieux les particularités du vignoble bourguignon et la typicité de ses vins. Cette thèse vise à documenter les impacts du changement climatique futur (2031-2048), et plus particulièrement de l'augmentation des températures qui se profile, sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne. Une des particularités est d'appuyer ce travail sur des données climatiques futures qui sont issues de la désagrégation de sorties de modèles climatiques globaux par un MCR.

Cette thèse combine donc 1/ la mise en place et l'analyse de données climatiques observées spatialisées, 2/ la validation a/des modèles phénologiques simulant la relation température-Pinot noir et b/ des sorties du MCR à l'aide des données spatialisées et 3/ la transposition de la relation température-Pinot noir sur le climat futur simulé pour répondre au double questionnement suivant : **quels seront les impacts possibles des changements de températures selon le scénario SRES-A2 sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne à l'horizon 2031-2048 ? Quel est l'apport d'un modèle climatique régional pour désagréger le signal de large échelle des modèles climatiques globaux ?**

Enfin, corrélativement aux finalités poursuivies qui ont nécessité la manipulation de multiples types de données et modèles, ce travail a abouti au développement d'une démarche générique de spatialisation.

Plan de la thèse

Le manuscrit est composé de quatre chapitres (A, B, C et D). Les chapitres B, C et D comportent leur propre partie 'méthodes et données', suivie d'une ou plusieurs parties 'résultats'.

Le chapitre A revient plus en détail sur les points présentés dans le ‘Contexte’ en présentant un état de l’art. Le changement climatique aux échelles mondiale, française et de la Bourgogne sont présentées en partie A.I. La vigne et sa relation avec le climat sont présentées en partie A.II. Enfin, la partie A.III. propose un tour d’horizon des observations des impacts du changement climatique sur la vigne.

Le chapitre B traite, pour la Bourgogne, de la question des évolutions des températures actuelles (observées). L’évolution des températures est étudiée à l’échelle de la Bourgogne en utilisant le jeu de données stationnelles issu du réseau de stations de Météo-France. Ce chapitre présente les résultats issus de la recherche de l’existence de ruptures climatiques dans les séries de température. Différents outils et indices permettant de quantifier l’évolution des températures ont été utilisés.

À partir de la base de données stationnelles, le chapitre B propose une méthode de spatialisation employant successivement la régression linéaire multiple et le krigeage des résidus. Cette spatialisation, effectuée sur la période 1989-2009, a entre autres servi à évaluer les performances du modèle climatique régional WRF dans le chapitre D.

Le chapitre C pose la question de la relation température-Pinot noir et de sa modélisation. Pour y répondre, il présente tout d’abord la variabilité temporelle de la phénologie du Pinot noir à Savigny-lès-Beaune. Nous disposons d’une multitude d’indices et de modèles phénologiques décrivant la relation entre la température et la vigne. Nous avons choisi de nous focaliser en détail sur trois modèles qui reflètent les principales tendances en termes de modélisation phénologique. Ces modèles ont été testés, évalués et inter-comparés dans leur capacité à reproduire les dates d’occurrences observées des principaux stades phénologiques (floraison et véraison) pour le Pinot noir. Ceci s’est effectué en appliquant les données observées de températures, mais également des données utilisant divers scénarios de températures plus élevées afin d’estimer les dérives de chaque modèle en conditions plus chaudes.

Le chapitre D utilise les résultats des deux chapitres précédents pour, dans un premier temps, évaluer la capacité du modèle climatique régional Weather Research and Forecast [WRF – Skamarock *et al.*, 2008], dans la configuration de désagrégation retenue, à reproduire les températures de surface pour le climat bourguignon dans un passé récent (période 1989-2009). En effet, nous avons voulu nous assurer que le MCR reproduisait correctement l’amplitude et la variabilité des températures observées et quels biais et incertitudes étaient associés à ces champs spatiotemporels des températures simulées. Dans un second temps, il s’est agi de quantifier la hausse des températures et les variations des dates phénologiques associées au réchauffement simulé. Pour cela, les modèles phénologiques ont été

appliqués sur les températures produites par le modèle WRF (périodes 1970-1987 et 2031-2048) pour nous permettre, au final, de répondre à la problématique de la thèse.



CHAPITRE A

État de l'art

'L'imagination est plus importante que le savoir, car si le savoir concerne tout ce qui existe, l'imagination concerne tout ce qui existera.'

Albert Einstein



CHAPITRE A

Sommaire

A.I. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	37
A.I.1. De l'observation... ..	37
A.I.1.a. À l'échelle mondiale	37
A.I.1.b. Les changements observés à l'échelle de la France.....	39
A.I.2. ... aux projections	45
A.II. LA VIGNE ET SA RELATION À LA TEMPÉRATURE.....	51
A.II.1. La vigne (<i>Vitis vinifera</i>)	51
A.II.1.a. Généralités et cycle végétatif.....	51
A.II.1.b. La vigne en Bourgogne	55
A.II.2. Influence de la température sur le développement de la vigne et la maturation du raisin57	
A.II.2.a. Généralités et échelle d'influence de la température	57
A.II.2.b. Influence stade par stade.....	60
A.III. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : QUELS IMPACTS SUR LA VIGNE ?	63
A.III.1. Les impacts observés sur la phénologie, la qualité du vin et l'économie vitivinicole mondiale.....	63
A.III.1.a. L'impact du point de vue phénologique	63
A.III.1.b. L'impact du point de vue de la qualité du vin.....	65
A.III.1.c. Impacts du point de vue économique : les nouveaux vignobles mondiaux	67
A.III.2. Les impacts probables dans le futur	71
Conclusion du Chapitre A	74



A.I. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le changement climatique, au sens large du terme, et dans la façon dont il est évoqué dans cet ouvrage, traduit l'ensemble des modifications des paramètres climatiques à l'échelle du dernier siècle ou dans un passé récent, jusqu'à futur proche ou du siècle à venir. Les thématiques de recherches associées couvrent un spectre très large : de l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, à l'adaptation des sociétés et des écosystèmes, en passant par la modification de la dynamique océano-atmosphérique. Cette thèse porte sur l'étude des impacts du changement climatique sur l'agriculture et plus particulièrement de celui des températures sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne.

Ce premier chapitre dresse un rapide portrait du « changement climatique » et de quelques-uns de ses impacts en se basant sur les observations aux échelles mondiale, nationale et régionale d'études antérieures, et en posant le problème de son appréhension à des échelles plus fines.

A.I.1. De l'observation...

A.I.1.A. À L'ÉCHELLE MONDIALE

Le changement climatique est souvent assimilé à la notion de réchauffement global. Ce postulat semble justifié lorsque l'on se base simplement sur les moyennes de températures à l'échelle planétaire. Si un réchauffement est clairement mis en évidence depuis le début des années 1900 (Figure A.1.), il n'a pas été constant dans le temps : le réchauffement est plus rapide lorsqu'il est calculé sur les décennies récentes. Ainsi, depuis le milieu du XIXe siècle, le réchauffement global est de l'ordre de 0,45°C par siècle, contre 1,77°C pour la période récente (1981-2005). Hansen *et al.* [2006] montrent que le réchauffement global sur les trois dernières décennies est d'environ 0,2°C par décennie.

En réalité, ce changement de température, s'il est positif lorsque l'on considère la planète dans son ensemble, ne l'est pas systématiquement en tout point du globe (Figure A.2.). La tendance du dernier siècle (Figure A.2, à gauche) montre des zones pour lesquelles le réchauffement a été très faible et non significatif (Égypte), et d'autres où il y a eu un refroidissement significatif (Atlantique Nord et Floride). De même, l'amplitude spatiale de la variation de température est très importante. Le réchauffement le plus fort est observé sur le continent nord asiatique, le nord du Canada et le sud du Brésil (>+1,5°C) et le plus faible sur le Pacifique notamment (<+0,8°C).

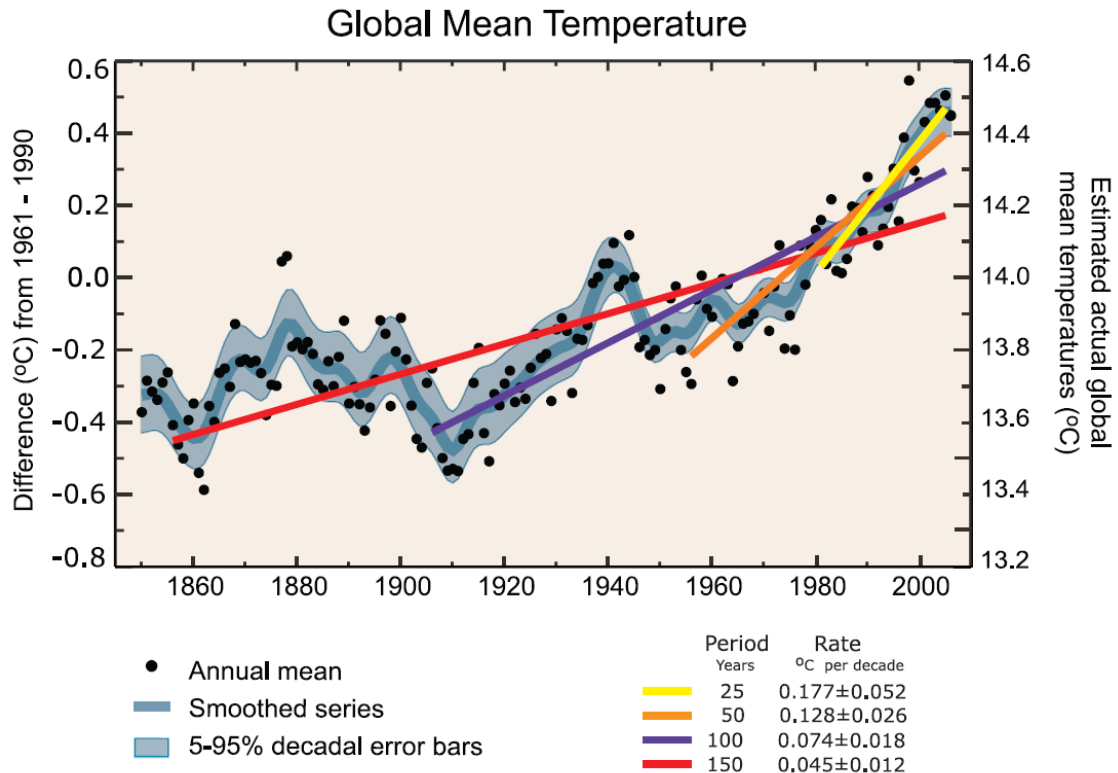


Figure A.1. Graphique de la variation de la température moyenne à l'échelle du globe [Trenberth *et al.*, 2007].

Sur la période récente (1979-2005), le réchauffement est maximal dans l'hémisphère nord (Figure A.2, à droite). Une stabilité est mise en évidence pour toute la ceinture antarctique [Richard *et al.*, 2012]. Le réchauffement maximal est mesuré sur les continents asiatique et nord-américain. Notons également un réchauffement récent de l'Atlantique Nord et de la Floride qui se sont pourtant refroidis à l'échelle du siècle.

Le changement climatique se décline à échelle fine. Il semble donc important de prendre le problème dans son ensemble, tout en tenant compte de ces interactions d'échelles. Les variations de températures sur la France sur la précédente figure (Figure A.2.) sont comprises entre 1,1° et 1,4°C sur le dernier siècle. Dans l'étude du GIEC [2007], la France est représentée par six mailles (pixels). Cette résolution n'est pas appropriée pour les études d'impacts autres que celles à l'échelle globale (voir tableau A.1, p.50). La réalité du changement, à une échelle plus fine, est tout autre.

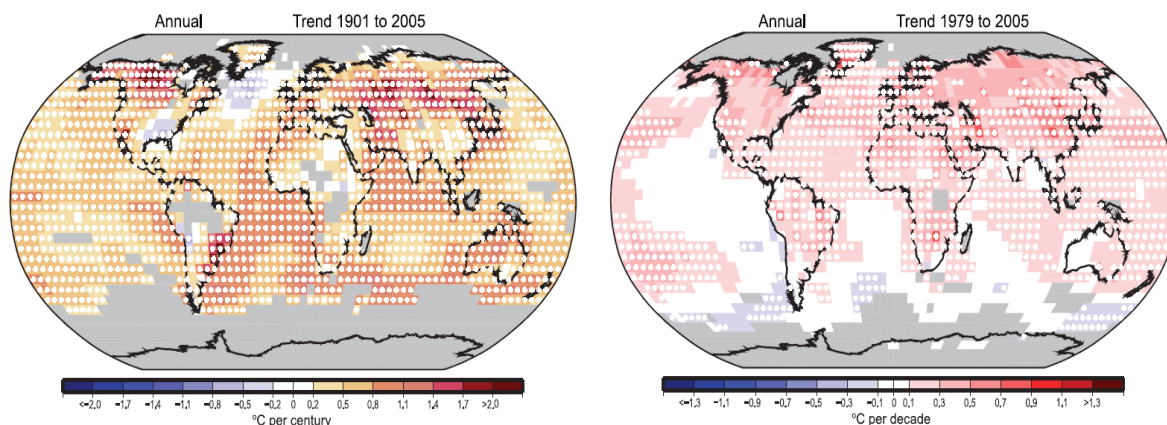


Figure A.2. Variations de températures à l'échelle du globe. A gauche : période 1901-2005 ; à droite : période 1979-2005 [Trenberth *et al.*, 2007].

A.I.1.B. LES CHANGEMENTS OBSERVÉS À L'ÉCHELLE DE LA FRANCE

i) Une hétérogénéité spatiale du changement

À l'échelle de la France, le changement observé est hétérogène dans l'espace. Cette hétérogénéité est dépendante de la variable considérée : les températures minimales et maximales ont varié de façons différentes (Figure A.3.). D'après Lebourgeois *et al.* [2001], les températures minimales et maximales ont augmenté à raison de $0,29^{\circ}\text{C}$ par décennie sur la période 1956-1997, ce qui correspond à une augmentation d'environ $1,2^{\circ}\text{C}$. Sur le XXe siècle, Moisselin *et al.* [2002] montrent que l'augmentation des températures minimales s'organise selon un gradient est-ouest, allant de $0,7^{\circ}\text{C}$ à $1,7^{\circ}\text{C}$. Leur hypothèse serait une augmentation de la nébulosité sur les façades océaniques, ce qui aurait comme effet de limiter les pertes d'énergie par radiation pendant la nuit. Pour les températures maximales, ce gradient s'oriente nord-sud et s'échelonne entre 0°C et $1,3^{\circ}\text{C}$. Il n'est significatif que pour les deux tiers sud du territoire [Moisselin *et al.*, 2002].

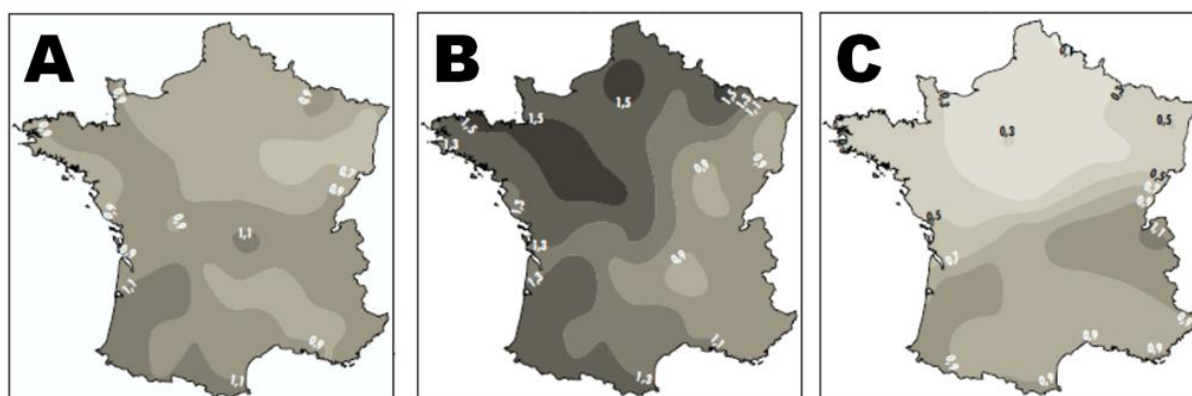


Figure A.3. Réchauffement en France métropolitaine (tendance sur 1901-2000). A : températures moyennes ; B : températures minimales ; C : températures maximales [Moisselin *et al.*, 2002].

Lorsque la température minimale s'accroît fortement et que la température maximale augmente modérément, l'amplitude diurne diminue (Figure A.4.). C'est le cas pour plus des deux tiers du territoire métropolitain. Cette diminution est maximale dans le nord de la France ($> 1^{\circ}\text{C}$), modérée au sud-ouest ($\sim 0,5^{\circ}\text{C}$) et très faible au sud-est. Elle augmente très faiblement sur les régions alpines et la vallée du Rhône au niveau de la ville de Lyon [Moisselin *et al.*, 2002].

Notons également que le nombre de jours où la température maximale excède 35°C augmente sur la période 1970-2006 [Laget *et al.*, 2008].

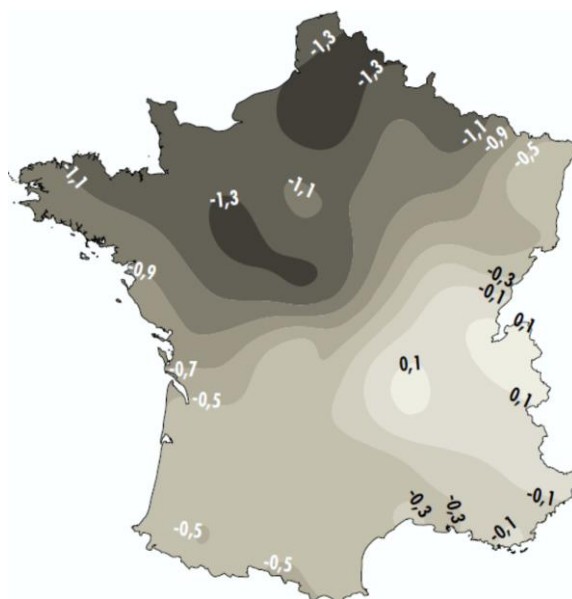


Figure A.4. Variabilité spatiale de l'amplitude thermique quotidienne (tendance sur 1901-2000) [Moisselin *et al.*, 2002].

ii) Une inhomogénéité temporelle du changement

Le changement climatique n'est pas non plus homogène dans le temps. De façon analogue à ce qui est observé à l'échelle mondiale, le réchauffement en France métropolitaine n'a pas été continu sur le dernier siècle. La tendance globale montre une augmentation nette sur les vingt-cinq dernières années. Entre les années 1960 et 1980, la température semble stable.

De même, l'intensité du réchauffement n'est pas la même selon la saison et la variable observée. Sur la période 1950-1980, la température a diminué en été, au printemps et en hiver ($0,1-0,3^{\circ}\text{C}$) [Laget *et al.*, 2008]. En termes de moyenne annuelle, la température moyenne est stable. Après 1980, Laget *et al.* notent une nette augmentation de la température moyenne au printemps ($+2^{\circ}\text{C}$), en été ($+1,6^{\circ}\text{C}$) et en hiver ($+1^{\circ}\text{C}$). Ce constat est partagé sur l'ensemble du territoire (Figure A.5.). Seule l'ampleur du réchauffement est variable d'un point à l'autre. De même, Lebourgeois *et al.* [2001] montrent que les températures minimales et maximales n'ont pas augmenté de la même façon. Ainsi, pour les mois d'été, les températures

maximales ont enregistré un gradient de $+0,44^{\circ}\text{C}$ par décennie contre $+0,38^{\circ}\text{C}$ par décennie pour les températures minimales. Ce constat est moins évident pendant les mois d'hiver. Ce résultat est en désaccord avec ceux obtenus par Moisselin *et al.* [2002], présentés précédemment. Les raisons en sont que la période utilisée par Moisselin *et al.* [2002] est l'ensemble du dernier siècle et que Lebourgeois *et al.* [2001] utilisent la période 1956-1997. De plus, Moisselin *et al.* [2002] étudient les variations thermiques sur l'ensemble de l'année, alors que Lebourgeois *et al.* [2001] résonnent sur les quatre saisons, considérées individuellement.

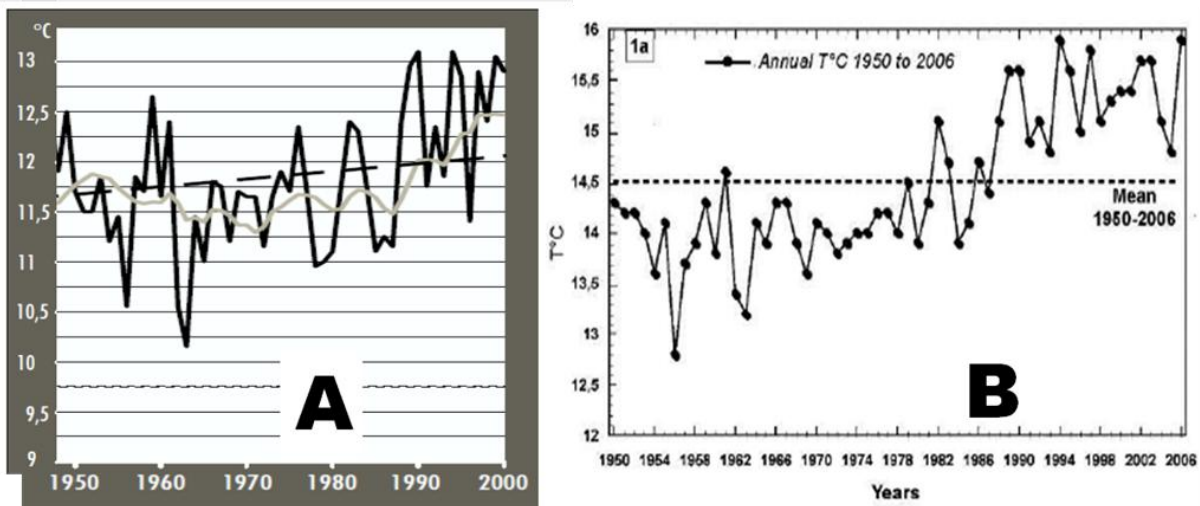


Figure A.5. A : Températures moyennes annuelles ($^{\circ}\text{C}$) à Paris-Montsouris (trait plein noir) entre 1950 et 2000. En pointillés, la tendance 1901-2000. En gris, la moyenne glissante sur quinze ans [adapté de Moisselin *et al.*, 2002]. B : Températures annuelles (en $^{\circ}\text{C}$) dans l'Hérault entre 1950 et 2006 [adapté de Laget *et al.*, 2008].

La comparaison entre les tendances sur trente ans depuis 1930 (moyennes mobiles) pour les saisons été et hiver (Figure A.6.) montre des différences claires. Les tendances sont opposées jusqu'aux années 1970-1980 : avant 1960, les températures estivales augmentent pendant que les températures hivernales diminuent. Entre 1960 et 1980, le phénomène inverse est observé. De plus, au cours des hivers 1960-1980, les minimales augmentent plus que les maximales. En été, les températures minimales diminuent moins que les maximales. Après 1980, les tendances pour les deux saisons sont positives, les estivales étant de plus en plus importantes au fil du temps. Enfin, les températures maximales augmentent plus rapidement que les minimales, et ce quelle que soit la saison.

Ce réchauffement observé est-il équivalent à celui observé en Bourgogne ? La prochaine partie apporte des éléments de réponse à cette question.

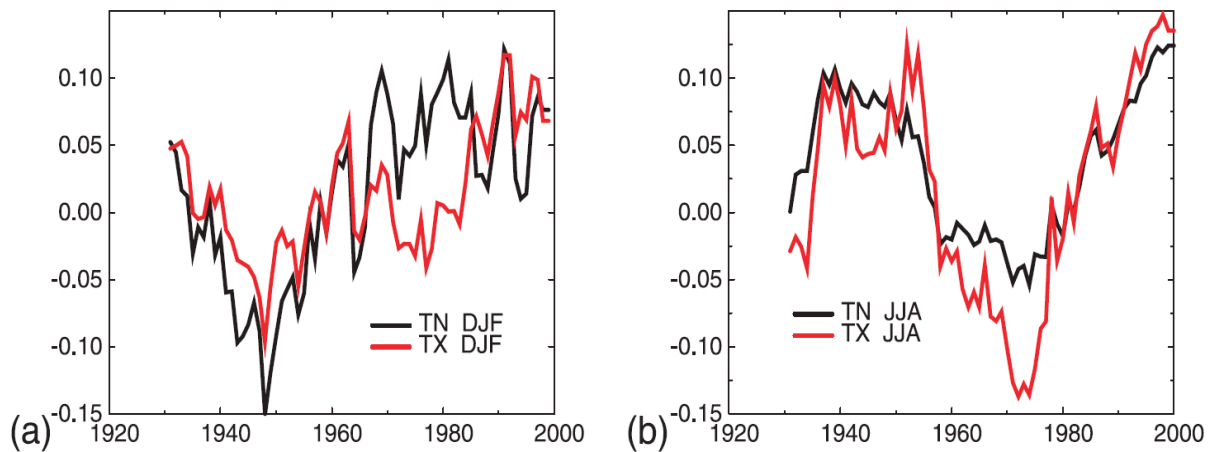


Figure A.6. Moyennes des tendances sur 30 ans sur le territoire français pour les Tn (températures minimales) et les Tx (températures maximales) pour l'hiver (a) et l'été (b). L'unité de l'axe des ordonnées est le degré par décade [Spagnoli *et al.*, 2002].

iii) Évolution thermique de la Bourgogne viticole

La Bourgogne est située dans une fenêtre latitudinale et longitudinale de 46-48,5°N et 2,5-6°E, à cheval sur le Bassin parisien (au nord-ouest), la vallée de la Loire (au sud-ouest), le Massif central (au sud) et le fossé bressan (au sud-est). D'une superficie de 31 582 km², elle présente une topographie variée avec notamment le massif du Morvan, point culminant de la Bourgogne (Haut Folin, 901 m). Des altitudes moyennes (400 à 500 m) se rencontrent au niveau du Seuil de Bourgogne, séparant le Bassin parisien du fossé bressan et intégrant le plateau de Langres, mais aussi dans « la Montagne dijonnaise », le Charolais, le Brionnais et le Mâconnais (Figure A.7.). L'altimétrie influençant de façon importante la répartition des températures et des précipitations, ce relief joue un rôle important. À l'échelle de la France, la Bourgogne est considérée comme un carrefour climatique. Son climat est de type océanique dégradé à l'ouest. Cela est vrai à l'ouest du Seuil de Bourgogne (bassins versants de la Seine et de la Loire). Dans le bassin versant Rhône-Saône, des caractères associés au climat continental se développent au nord-est et ceux associés au climat méditerranéen au sud-est (Figure A.7., C).

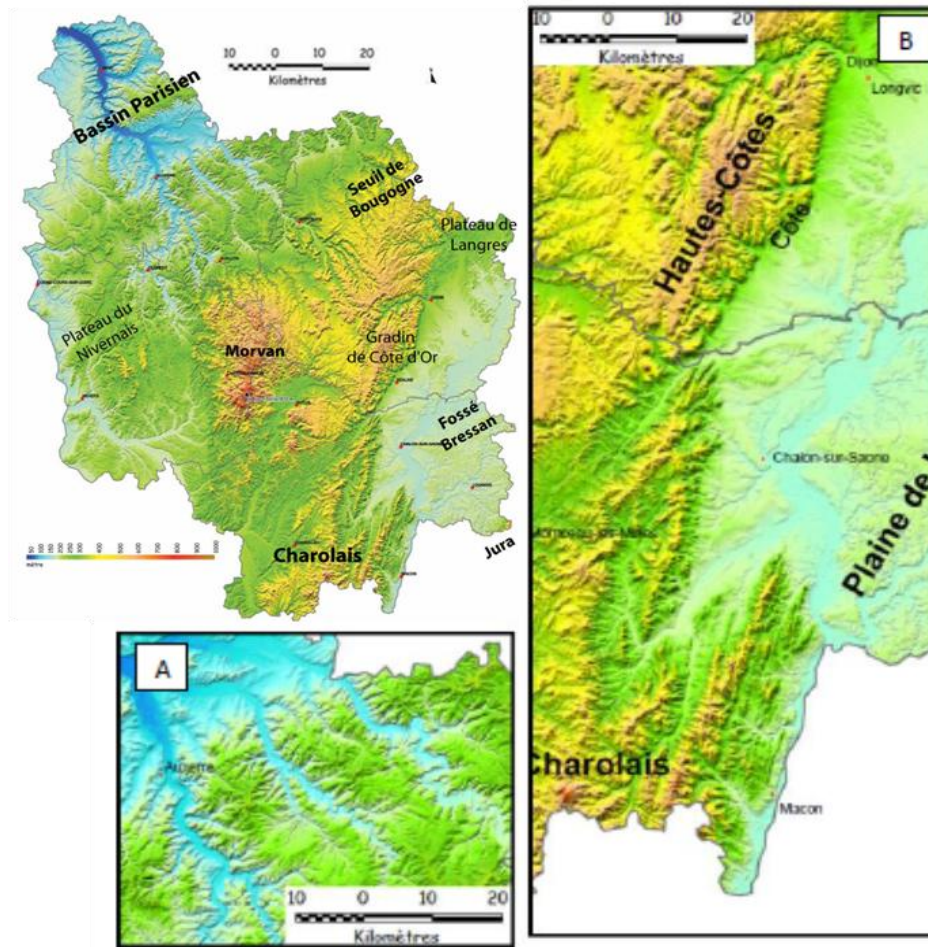


Figure A.7. Relief bourguignon ; A) relief du vignoble chablisien, B) relief du vignoble de la Côte, [d'après Houzé, 2006].

Le vignoble chablisien, vallonné, subit majoritairement des influences climatiques océaniques (Figure A.7., A). Le vignoble de la Côte-d'Or et du nord de la Saône-et-Loire se développe le long d'un talus d'orientation nord-sud dont les pentes sont globalement exposées à l'est (Figure A.7., B). En hiver, les influences continentales maintiennent des températures basses. L'hiver se prolongeant, le débourrement y est relativement tardif (comparativement au Chablisien), ce qui limite le risque gélif. Le vignoble de la Côte bénéficie également d'un effet d'abri (voir d'un effet de foehn) vis-à-vis des perturbations d'ouest [Bonnardot, 1996]. L'orientation des pentes favorisant l'intensité et parfois la durée de l'insolation, ainsi que les influences méridionales, marquées en plaine de Saône, placent la Côte viticole sur un axe chaud, considéré par la profession viticole comme bénéfique en période de maturation.

La Côte viticole est caractérisée par son orientation nord-sud (de la Côte-d'Or à la Saône-et-Loire), suivant le relief à l'ouest. Elle est ainsi sous le vent d'ouest et est abritée des pluies associées. De plus, sa position (longitude semi-continentale, ouverte aux influences méditerranéennes) la place dans ce que Bonnardot [1996] appelle l'axe chaud de la vallée de la Saône et du versant viticole. Bonnardot [1996] a

également remarqué que la différence de températures entre la Côte viticole et le plateau à l'ouest est positive (entre $+0.7^{\circ}\text{C}$ et $+2.6^{\circ}\text{C}$) en faveur de la Côte, et ce plus fortement en été qu'en hiver, ce qui profite à la végétation.

Chabin *et al.* [2007] montrent que l'évolution de la température moyenne en période végétative à Dijon, Savigny-lès-Beaune et La Rochepot (trois stations situées le long de la Côte) correspond aux variations observées à l'échelle de la France, c'est-à-dire une quasi-stabilité des températures avant les années 1980, suivie d'une augmentation d'environ 2°C (pour la période de mars à octobre) dans les années 1980 à 2005 (Figure A.8.).

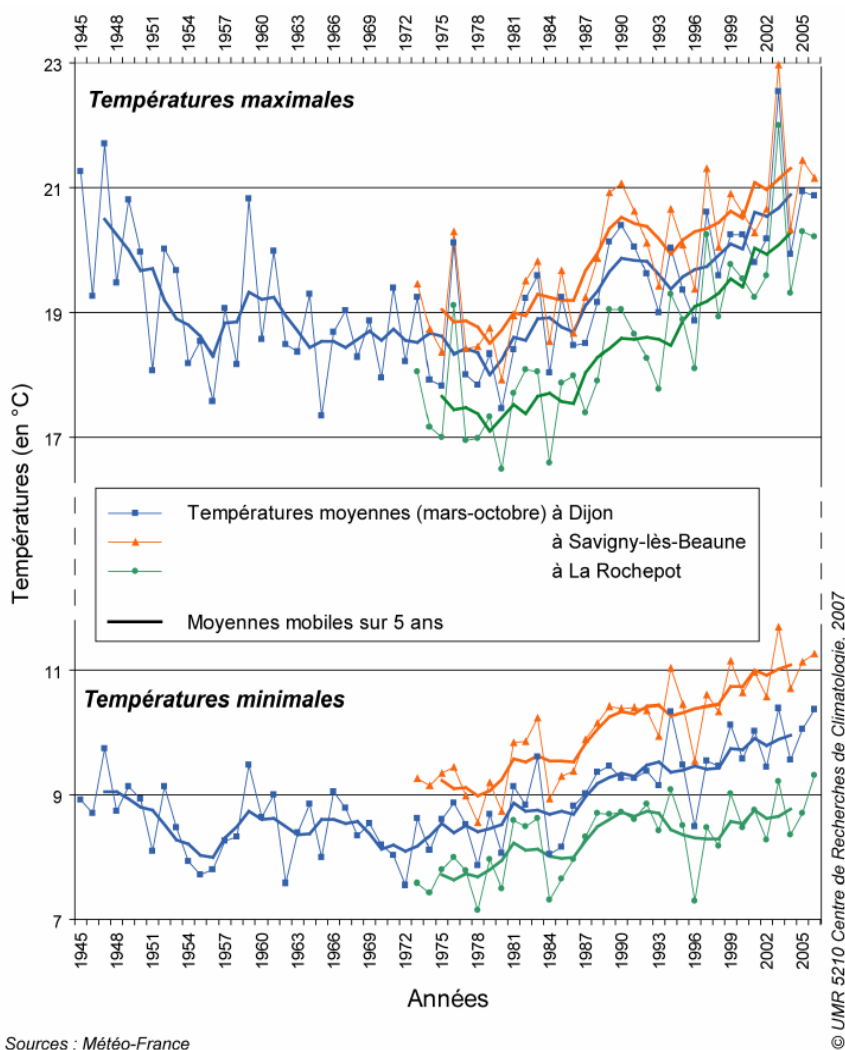


Figure A.8. Évolution des températures moyennes pendant la période phénologique pour trois sites côte-d'oriens [Chabin *et al.*, 2007].

Chabin *et al.* [2007] comparent également l'évolution des températures d'avril à septembre (période végétative de la vigne) des stations de Savigny-lès-Beaune (230 m d'altitude) et de La Rochepot (410 m d'altitude) situées à une quinzaine de kilomètres l'une de l'autre. Ils divisent les deux séries en sous-séries : 1973-1987 et 1988-2006.

Le réchauffement place La Rochepot (série 1988-2006) dans la même zone thermique que Beaune pour la série 1973-1987. Ce résultat implique une migration altitudinale des conditions thermiques (200 m d'altitude en une vingtaine d'années). La station de Beaune présente également des températures plus méridionales, ce qui traduit ici un gradient latitudinal de la température. Ainsi, il y a eu une double translation des conditions climatiques, à la fois latitudinale et altitudinale. Ces résultats sont cohérents avec ceux présentés par le GIEC [2007].

A.I.2. ... aux projections

Depuis la période préindustrielle (1750), l'impact humain sur le réchauffement planétaire est estimé à + 1,6 W/m² (+0,6 à +2,4). En comparaison, l'impact naturel (variations du rayonnement solaire) est de + 0,12 W/m² (+0,06 à +0,3) [GIEC, 2007]. Pour étudier les mécanismes de l'évolution climatique récente et évaluer le(s) probable(s) climat(s) futur(s), on simule le climat au sein du système Terre (continents et océans) – Atmosphère en intégrant la contribution de forçages radiatifs, c'est-à-dire de facteurs de modification du bilan radiatif terrestre de nature exogène (le rayonnement solaire arrivant au sommet de l'atmosphère) ou endogène (poussières ou gaz atmosphériques, albédo terrestre...). Parmi ces derniers, les forçages anthropiques correspondent aux variations de la concentration des gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols dans l'atmosphère, et également aux changements d'occupation du sol. En équivalents CO₂, la quantité de gaz à effet de serre a augmenté de 70 % entre 1970 et 2004, conduisant à un forçage radiatif de l'ordre de +2,3 W/m² entre 1750 et 2005 [GIEC, 2007]. La modélisation du climat tient compte de ces augmentations de gaz à effet de serre. Le quatrième rapport du GIEC [GIEC, 2007] rapporte que « *seuls les modèles [climatiques] qui tiennent compte des forçages anthropiques parviennent à simuler les configurations du réchauffement observées et leurs variations* » (Figure A.9.). Ainsi, il est *a priori* naturel d'attendre un maintien ou une amplification du réchauffement récent à l'avenir, compte tenu de l'accroissement probable des concentrations de GES dans l'atmosphère.

La principale difficulté est de prévoir comment vont évoluer les concentrations en GES. Pour cela, en étudiant les différentes voies que peuvent prendre les facteurs démographiques, économiques et technologiques, et les émissions de GES qui en résultent, le rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions [SRES, 2000] a défini quatre familles de scénarios. La famille A1 qui se caractérise par une croissance économique très rapide et l'adoption immédiate de nouvelles technologies plus efficaces. Elle est divisée en trois groupes correspondant aux orientations de l'évolution technologique du point de vue des sources d'énergie : A1FI (forte composante fossile), A1T (non fossile) et A1B (équilibrant les sources). La famille B1

est semblable à A1 en ce qui concerne les caractéristiques démographiques, mais avec une évolution plus rapide vers des structures économiques de services et d'informations.

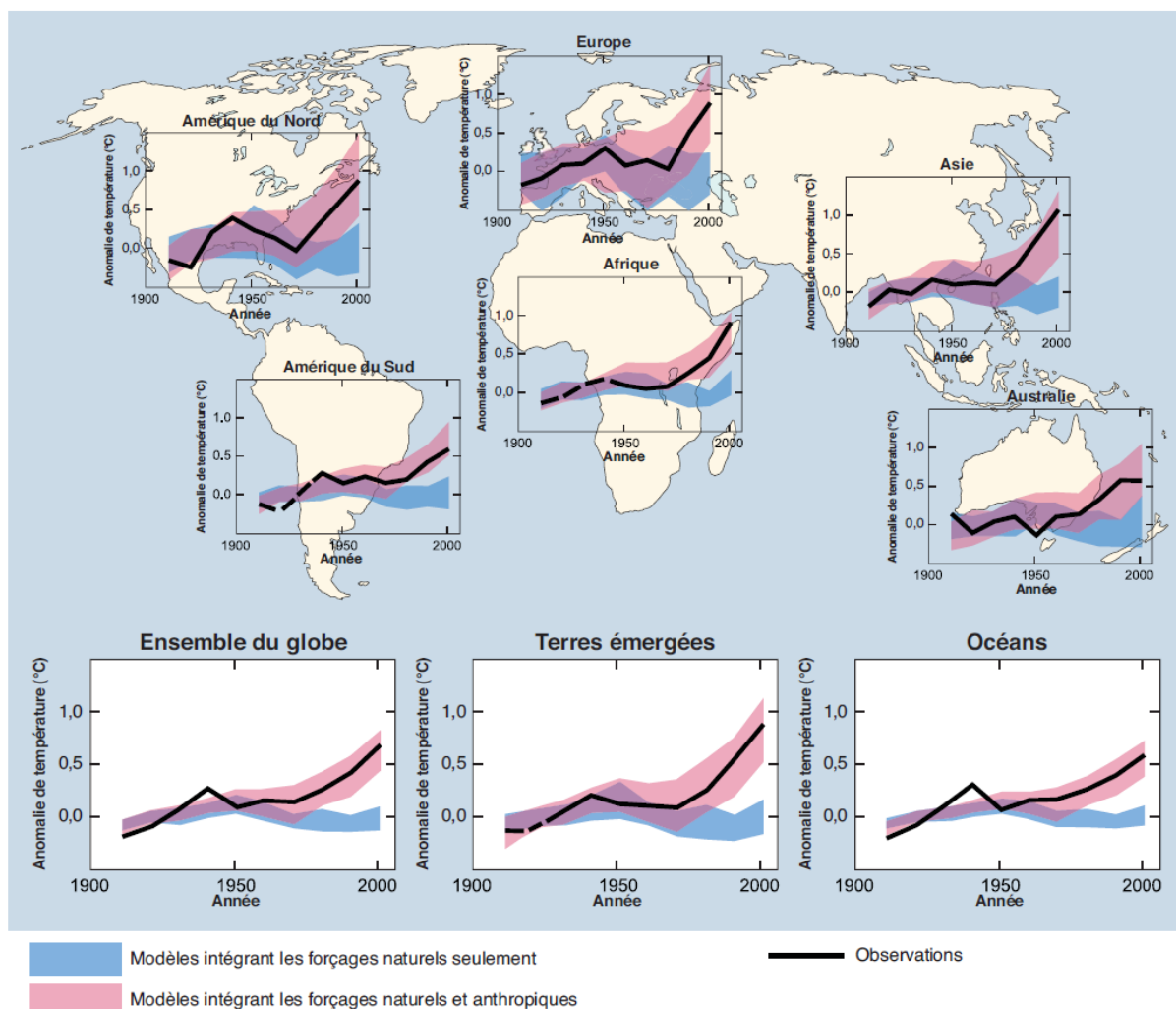


Figure A.9. Comparaison des variations de la température en surface observées à l'échelle du globe et des continents avec les résultats simulés par des modèles climatiques intégrant les forçages naturels seuls ou les forçages naturels et anthropiques. Les moyennes décennales des observations effectuées de 1906 à 2005 (ligne en noir) sont reportées au milieu de chaque décennie en comparaison de la moyenne correspondante pour la période 1901-1950. Les lignes en pointillés signalent une couverture spatiale inférieure à 50 %. Les bandes ombrées en bleu indiquent la fourchette comprise entre 5 et 95 % de dix-neuf simulations issues de cinq modèles climatiques qui ne considèrent que les forçages naturels produits par l'activité solaire et volcanique. Les bandes ombrées en rouge représentent la fourchette comprise entre 5 et 95 % de cinquante-huit simulations obtenues avec quatorze modèles climatiques tenant compte des forçages naturels et anthropiques [GIEC, 2007].

La famille B2 se caractérise par des niveaux intermédiaires de croissances démographique et économique, privilégiant l'action locale pour assurer une durabilité économique, sociale et environnementale. La famille A2 décrit un monde très hétérogène avec une forte croissance démographique, un faible développement économique et de lents progrès technologiques [GIEC, 2007]. Dans le cinquième rapport du GIEC (attendu pour 2013-2014), les scénarios socio-économiques sont

relayés par des *Representative Concentration Pathways* (RCP). Scénario et RCP ne sont pas bâtis selon la même philosophie, mais les forçages climatiques associés sont du même ordre.

Les scénarios auxquels sont associées les plus fortes émissions de GES sont les A2 et A1FI. Il en résulterait une élévation probable (différence entre 1980-1999 et 2090-2099) de la température moyenne à la surface du globe de 4,0°C (A1FI, [2,4-6,4]°C) et 3,4°C (A2, [2,0-5,4]°C) (Figure A.10., gauche). Le réchauffement associé au scénario A1B est de 2,8°C ([1,7-4,4]°C) ; pour les scénarios A1T et B2, il est de 2,4°C ([1,4-3,8]°C). Enfin, le scénario B1 conduit à un réchauffement de 1,8°C ([1,1-2,9]°C). Notons que pour le cas où les concentrations de GES resteraient au niveau de l'année 2000, la température augmenterait de 0,6 °C ([0,3-0,9]°C).

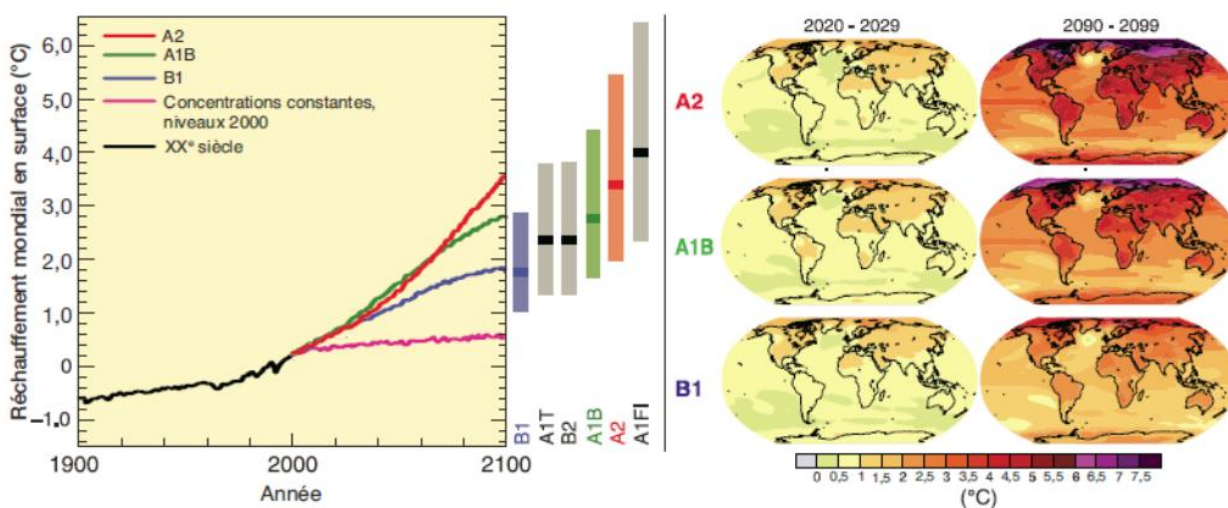


Figure A.10. À gauche : Les courbes en trait plein correspondent aux moyennes mondiales multimodèles du réchauffement en surface (par rapport à la période 1980-1999) pour les scénarios A2, A1B et B1 du SRES, dans la continuité des simulations relatives au XX^e siècle. La courbe orange correspond au cas où les concentrations se maintiendraient aux niveaux de 2000. Les barres au milieu de la figure indiquent les valeurs les plus probables (zone foncée) et les fourchettes probables selon les six scénarios SRES de référence pour la période 2090-2099 par rapport à 1980-1999. Ces valeurs et ces fourchettes tiennent compte des projections établies à l'aide des modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO) (partie gauche de la figure), ainsi que des résultats d'une hiérarchie de modèles indépendants et des contraintes liées à l'observation. À droite : Évolution projetée de la température en surface pour le début et la fin du XXI^e siècle par rapport à la période 1980-1999, selon les projections moyennes obtenues à l'aide de plusieurs modèles MCGAO pour les scénarios A2 (en haut), A1B (au milieu) et B1 (en bas) du SRES, pour les décennies 2020-2029 (à gauche) et 2090-2099 (à droite) [GIEC, 2007].

À l'horizon 2050, les différences entre les projections relatives au réchauffement à la surface du globe des scénarios A2, A1B et B1 sont très faibles. Si la tendance au réchauffement devient modérée pour les scénarios B1 et A1B à l'horizon 2100, celle du scénario A2 est en constante augmentation. Spatialement, le réchauffement se localiserait avant tout sur les terres émergées et sur les hautes latitudes de l'hémisphère nord. Au contraire, la partie nord de l'Atlantique et l'océan Austral correspondent aux régions pour lesquelles les projections indiquent un minimum de réchauffement (Figure A.10., droite).

Ces simulations climatiques obtenues par les GCM permettent d'avoir un aperçu du changement climatique global attendu. La problématique de la présente thèse rend nécessaire d'accéder à des échelles plus fines par le processus de désagrégation du signal de large échelle. Il convient de séparer deux types de désagrégation : les désagrégations statistiques et les désagrégations dynamiques.

Les méthodes de désagrégation statistiques les plus simples appliquent une anomalie positive aux données d'observations. La relation entre les observations et les simulations du GCM pendant la période de contrôle est appliquée aux observations [Fowler *et al.*, 2007]. Ces modèles soulèvent néanmoins de nombreuses questions concernant l'application d'un biais constant ou d'un pattern spatial constant dans le temps, alors que celui-ci est susceptible d'évoluer avec le changement climatique [Diaz-Nieto et Wilby, 2005]. D'autres modèles statistiques sont utilisés, comme les modèles de régression, les méthodes basées sur les régimes de temps ou les générateurs de climat [Fowler *et al.*, 2007]. Ici, le climat à l'échelle régionale est en grande partie fonction de l'état atmosphérique à large échelle. Cette fonction est là aussi calculée à partir des comparaisons entre les observations et les simulations. Les variables climatiques de large échelle sont ainsi appelées prédicteurs et les variables locales sont appelées *prédicands* [Colin, 2011]. La régression établit une relation entre prédicteurs simulés et *prédicands* observés. Les modèles basés sur les régimes de temps établissent une classification synoptique des régimes de temps et relient prédicteurs et *prédicands* en fonction de la classification. Enfin, les générateurs de climat produisent des séquences de variables météorologiques aléatoires ayant un comportement similaire aux observations (distribution, écart-type...) [Colin, 2011]. Là encore, le choix des prédicteurs est primordial pour l'obtention de modèles fiables. Les prédicteurs doivent représenter de façon cohérente le climat des GCM et être capables de permettre le calcul des processus responsables de la variabilité climatique. De même, un prédicteur qui serait inutile dans l'actuel peut devenir prépondérant pour le climat futur.

Les modèles de désagrégation dynamiques dépendent essentiellement de modèles climatiques régionaux (RCM) ou modèles à aires limitées [Fowler *et al.*, 2007]. Ils utilisent les sorties des GCM pour forcer le signal aux limites de la zone et utilisent des processus physiques de l'atmosphère à une résolution inférieure au demi-degré de latitude-longitude sur la zone en question. Ils peuvent ainsi simuler de façon réaliste le climat régional. Leurs performances dépendent fortement des biais hérités des GCM et de la présence de forçages régionaux tels que l'orographie ou la couverture végétale. Ces modèles ont également une forte variabilité interne. Pour s'affranchir de ce problème, il est souvent nécessaire d'utiliser plusieurs modèles ou plusieurs paramétrages de modèles afin d'avoir un panel d'informations [Fowler *et*

al., 2007]. Les temps de calculs sont très élevés, ce qui en font des modèles lourds à utiliser. Un résumé des avantages et inconvénients des deux types de désagréations est proposé en figure A.11.

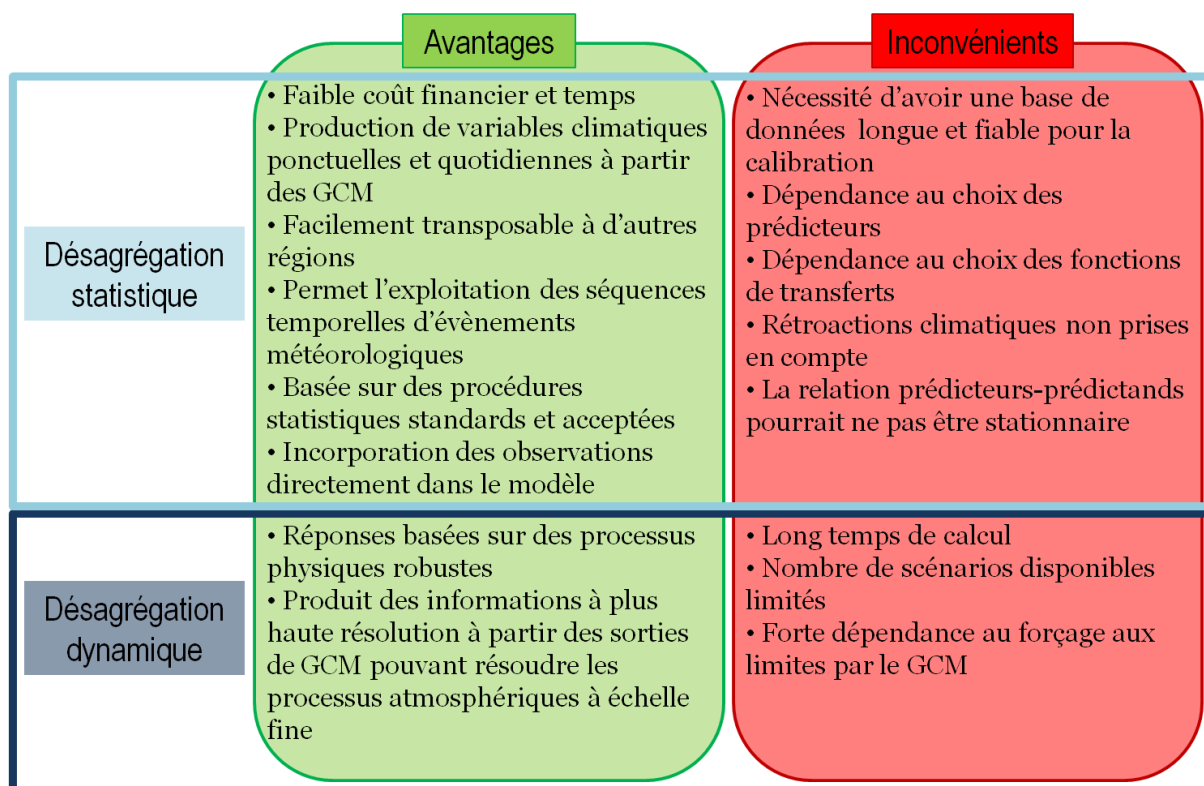


Figure A.11. Avantages et inconvénients de désagréations statistique et dynamique [adapté de Diaz-Nieto et Wilby, 2005 et Fowler *et al.*, 2007].

Le modèle ARW-Weather Research and Forecasting (WRF), utilisé pour cette thèse, est un modèle de désagrégation dynamique. WRF est fréquemment utilisé avec succès pour la désagrégation régionale du climat [Liang *et al.*, 2006 ; Salathé *et al.*, 2008 ; Zhang *et al.*, 2009 ; Xu *et al.*, 2012]. Il sera présenté plus en détail dans le chapitre D. Notons enfin que les études d'impacts basées sur un RCM à une échelle fine (5 km) sont encore très rares, mais en développement grâce à des projets européens comme PRUDENCE, ENSEMBLES...

Les impacts de tels changements sont très différents en fonction de la région d'étude. Ils varient en fonction de l'état initial du climat régional et de l'amplitude des changements qui s'y manifestent. Une augmentation de température de 3°C en moyenne n'aura pas le même effet en Sibérie qu'en Indonésie. La plupart des impacts potentiels qui toucheront les populations sont liés à l'eau et la sécheresse (Asie, Australie), avec parfois de lourdes conséquences sur la sécurité alimentaire (Afrique) (Tableau A.1.). L'eau pourra également affecter l'Europe et une partie de l'Asie par les inondations qu'elle causera. La température, de par son augmentation, sera liée à des

vagues de chaleur plus importantes en termes d'intensité et de fréquence (Europe). Le changement climatique touchera également la biodiversité et les écosystèmes, notamment en Amérique Latine et dans les régions polaires.

Régions du monde	Impacts
Afrique	<i>D'ici 2020, 75 à 250 millions de personnes devraient souffrir de stress hydrique et la production agricole pourrait être durement touchée : lourdes conséquences sur la sécurité alimentaire et la malnutrition.</i>
Asie	<i>Modification de l'hydrologie avec impacts sur la santé publique dus aux crues/sécheresses</i>
Australie/NZ	<i>Sécheresse et difficulté d'approvisionnement en eau pour certaines régions + productions agricoles et forestières en diminution</i>
Europe	<i>Risques d'inondations éclaircies, de fontes des glaciers importantes, de sécheresses dans le sud de l'Europe et risques de vagues de chaleur et d'incendies accrus</i>
Amérique Latine	<i>Fort impact sur la biodiversité des forêts tropicales et sur la disponibilité en eau pour les populations</i>
Amérique du Nord	<i>Augmentation des risques d'inondations dans les régions montagneuses, de vagues de chaleur dans les villes : conséquences sur la santé.</i>
Régions polaires	<i>Fragilisation des écosystèmes locaux et mode de vie des autochtones touché.</i>
Petites îles	<i>Augmentation des risques liés à la proximité des côtes : tempêtes, inondations, érosion. Problème de ressources en eau pour certaines îles.</i>

Tableau A.1. Tableau des impacts probables du changement climatique en fonction des régions du Monde [adapté du GIEC, 2007].

A.II. LA VIGNE ET SA RELATION À LA TEMPÉRATURE

A.II.1. La vigne (*Vitis vinifera*)

A.II.1.A. GÉNÉRALITÉS ET CYCLE VÉGÉTATIF

Comme toute plante pérenne, la vigne commune (*Vitis vinifera*) est caractérisée par ses limites de résistance aux pressions climatiques. Ainsi, elle peut subir des dégâts à partir de -15°C. Les gelées de printemps, qui occurrent pour les bourgeons de vigne vers -3°C [Luisetti *et al.*, 1991], affectent les organes herbacés, et celles d'automne limitent le cycle végétatif et rendent les récoltes aléatoires et peu rentables [Galet, 2000]. Au-delà de 40°C, une baisse notable de l'activité photosynthétique est notée [Luo *et al.*, 2011] et des dégâts sur le feuillage et les baies peuvent apparaître, dus en partie à un déficit hydrique des tissus végétaux [Kriedemann, 1968].

Vitis vinifera est considérée comme étant une plante à jour long [Alleweldt (1963), cité par Costacurta et Roselli, 1980]. Son système racinaire est capable d'atteindre de grandes profondeurs, ce qui en fait une plante résistante à la sécheresse. Elle peut vivre dans des conditions de précipitations annuelles inférieures à 250 mm, à condition qu'elles soient bien réparties [Costacurta et Roselli, 1980]. Motorina [1958], cité par Galet [2000], situe l'optimum photosynthétique entre 24 et 28°C selon les cépages (septentrionaux à méridionaux).

Comme toutes les plantes, la vigne a son propre cycle phénologique. Ce cycle se compose d'une chronologie des stades phénologiques de la vigne (du développement des bourgeons à la période de dormance en passant par la floraison et la maturation des fruits). Différentes échelles existent pour classer ces différents stades. Il est donc important de définir les plus couramment utilisées : Baggiolini (1952) et Eichhorn et Lorenz (1977).

L'échelle de Baggiolini [1952] désigne, par des lettres de A (bourgeon d'hiver) à J (nouaison), dix stades principaux de la vigne. Les stades K, L, M, N, O et P de ce système sont couramment utilisés [Baillod et Baggiolini, 1993]. Ils englobent les stades du grain de pois (K) à la chute des feuilles (P) (Figure A.12., A). L'échelle d'Eichhorn et Lorenz [1977] vise à préciser et à subdiviser les stades. Ainsi, un code allant de 00 à 50 a été créé (Figure A.12., B).

Le cycle de la vigne se différencie principalement en deux cycles simultanés : le cycle végétatif qui débute à la levée de la dormance et se termine à la chute des feuilles et le cycle reproductif qui commence par l'initiation florale jusqu'à la récolte.

Notons qu'à partir de la floraison, il y a une concurrence trophique entre les cycles [Garcia de Cortazar Aauri, 2006].

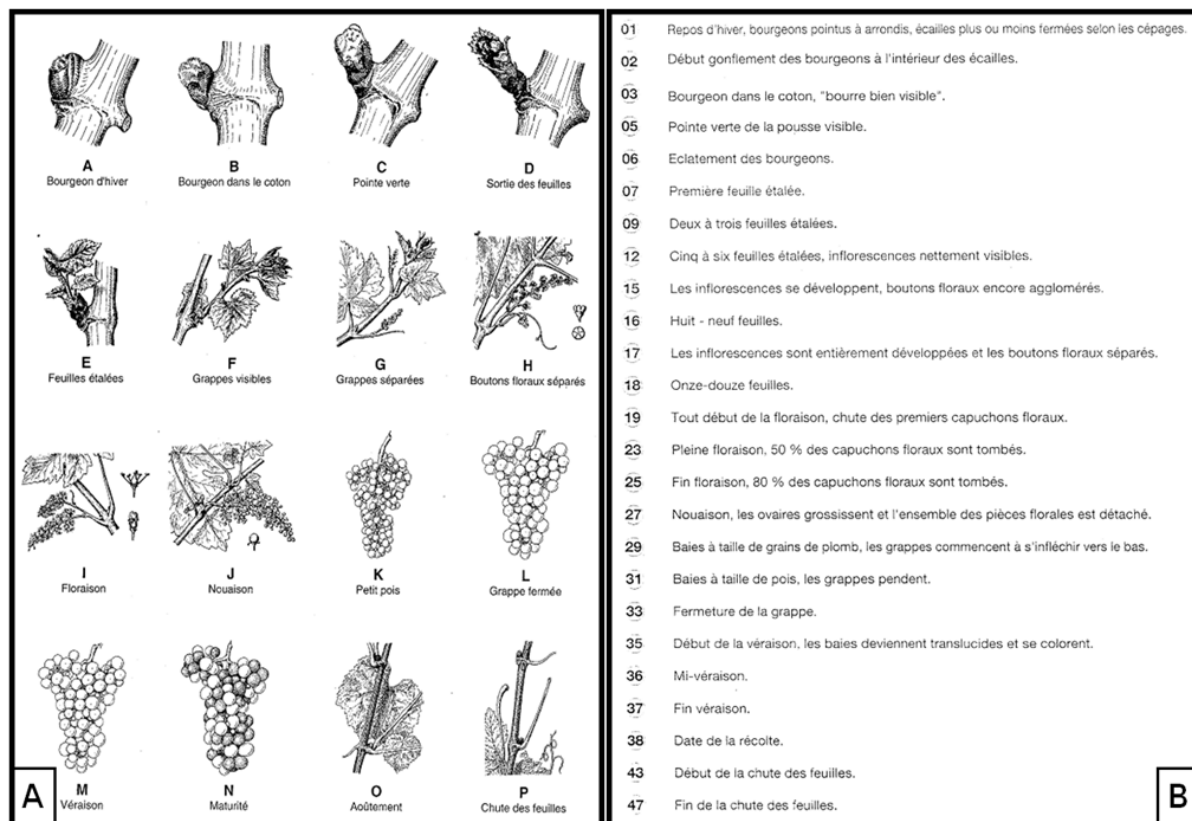


Figure A.12. Échelles phénologiques de la vigne. A : Échelle de Baillod et Baggioini [1993]. B : Échelle d'Eichhorn et Lorenz [1977].

La partie suivante présente les principaux stades phénologiques de la vigne ; leur correspondance dans les différentes échelles seront par la suite présentées de la façon suivante : *échelle de Baggioini* et **échelle d'Eichhorn-Lorenz**.

- Bourgeon d'hiver (A, 01)

Cette période, appelée aussi stade du repos d'hiver, correspond à la période pendant laquelle la plante n'a aucune activité végétative et reproductive. Les bourgeons, dits latents, sont déjà organisés et présents pendant la floraison de l'année précédente. Dans la phase de pré-dormance (mai-juin selon les cépages), ces bourgeons sont aptes à débourrer. Au stade de la véraison (approximativement), les bourgeons perdent cette aptitude : c'est la phase d'entrée en dormance (deux semaines environ). La phase de dormance commence après la phase précédente et prend fin en novembre. La dormance est levée après une période de sept jours de froid successifs (10°C pour certains cépages). Après cette période, les bourgeons acquièrent la possibilité de débourrer mais les températures, trop basses, ne leur permettent pas. Enfin, la période post-dormance emmène les bourgeons jusqu'au

débourrement, dont la date dépendra de la précocité des cépages et des températures extérieures subies durant tout le processus [Pouget, 1988]. Pendant cette période (fin février-début mars en hémisphère nord), un phénomène appelé « pleurs » correspond à la reprise d'activité racinaire et par conséquent au début de la montée de sève dans la plante.

- Éclatement des bourgeons (*B*, **03**)

Suite aux pleurs, le bourgeon gonfle, la bourre est visible et se recouvre d'une protection cotonneuse. Le gonflement des bourgeons va durer jusqu'à l'apparition d'une jeune pousse verte. Lorsque 50 % des parcelles ont atteint le stade 06 de l'échelle d'Eichhorn-Lorenz (« éclatement des bourgeons »), la vigne atteint le stade du débourrement [Bonnardot, 1996]. Toutefois, des agronomes viticoles considèrent le stade précédent C ou 05 (« pointe verte ») pour la notation de la date de débourrement. La date de débourrement dépend essentiellement du cépage, des conditions environnementales et du mode de conduite de la vigne, notamment la taille. La durée du débourrement peut aller de trois à dix jours et varie en fonction de la température moyenne quotidienne [Pouget, 1988].

Après l'apparition de la première feuille (*D*, **07**), les feuilles sont visibles (*E*, **07**), puis les grappes (*F*, **12**). Ces grappes sont dites séparées (*G*, **15**) lorsqu'elles s'espacent en s'allongeant sur la pousse. Les organes floraux, agglomérés au stade précédant, s'isolent les uns des autres (*H*, **17**) avant de fleurir.

- Pleine floraison (*I*, **23**)

La plante atteint ce stade lorsque 50 % des parcelles observées sont au stade 23 de l'échelle d'Eichhorn-Lorenz, c'est-à-dire que 50 % des capuchons (corolles) sont tombés. Ces capuchons chutent, poussés par les étamines qui s'étalent ensuite autour de l'ovaire mis à nu. La date de floraison dépend ici encore du cépage et des conditions environnementales.

Pendant la période de floraison, les fleurs vont être fécondées et les bourgeons latents s'organiser ; ils ne seront efficaces qu'à partir du prochain débourrement. Après fécondation, l'ovaire commence à grossir, les grappes se mettent en position horizontale et les fruits atteignent 30 % de leur taille finale : c'est le stade de la nouaison (*J*, **29**). Les grains grossissent jusqu'à se toucher, cachant la rafle : on dit que la grappe se ferme (*L*, **33**). Cette première phase de croissance des raisins est causée par la multiplication et l'élongation cellulaire. C'est durant cette première phase de développement qu'est accumulée une grande quantité de l'acide malique du

raisin. Suit alors une phase de latence durant laquelle la croissance des baies est ralentie.

- Véraison (*M*, **35**)

Après la fermeture de la grappe, les baies changent de couleur et se ramollissent : c'est la véraison. La perte de chlorophylle donne aux baies des cépages blancs un aspect translucide. Chez les cépages noirs, la pellicule des raisins se colore en raison de l'accumulation de pigments (anthocyanes). La véraison marque le début de la phase de maturation du raisin. Durant cette nouvelle phase de croissance des baies, l'acide malique est pour partie consommé *via* le processus de respiration. Une forte accumulation de carbone d'origine phloémienne (sève élaborée) est observée : la baie se charge en sucres. Lors de ce processus, la grappe devient plus compacte et les sarments principaux deviennent brunâtres et ligneux (phénomène qui s'amplifiera après la récolte).

- Maturité (*N*, **38**)

La maturité physiologique, qui correspond au stade auquel les pépins sont aptes à germer. Néanmoins, on désigne en général par « maturité » l'instant où le raisin est prêt pour la récolte (vendanges), qui n'est pas nécessairement synchrone avec la maturité physiologique. La qualité du vin qui sera issu de la récolte dépendra en grande partie du rapport sucre/acidité des baies, ainsi que des composés aromatiques (ou précurseurs d'arômes) et de la teneur des tanins et des anthocyanes du raisin.

Après la récolte, le processus de brunification et de lignification des sarments arrive à son terme : on dit que les bois sont mûrs, c'est l'aoûtement (*O*, 41, 91). Ce processus débute à l'arrêt de la croissance des rameaux qui a lieu en principe au moment de la véraison [Galet, 2000]. À l'aoûtement succède la chute des feuilles (*P*, 47, 97), dernier stade avant le repos d'hiver.

Un schéma récapitulatif des cycles et des principaux stades est proposé par Galet en 2000 (Figure A.13).

Les facteurs environnementaux de la région où la vigne se développe vont influencer ce cycle [Amerine et Winkler, 1944]. Ainsi, pour un même cépage, les dates des principaux stades phénologiques sont très variables en fonction de la latitude, de la longitude et de l'altitude du vignoble [Bonnardot, 1996 ; Jones et Davis, 2000]. Le type de climat, la pente, le type de sol sont d'autant de facteurs contraignant la vigne mais donnant sa typicité et son authenticité au vin [Amerine et Winkler, 1944]. Son aire de culture est située entre 20°N et 50°N et entre 20°S et 40°S [Costacurta et Roselli, 1980], la Bourgogne étant proche de la limite septentrionale de cette aire.

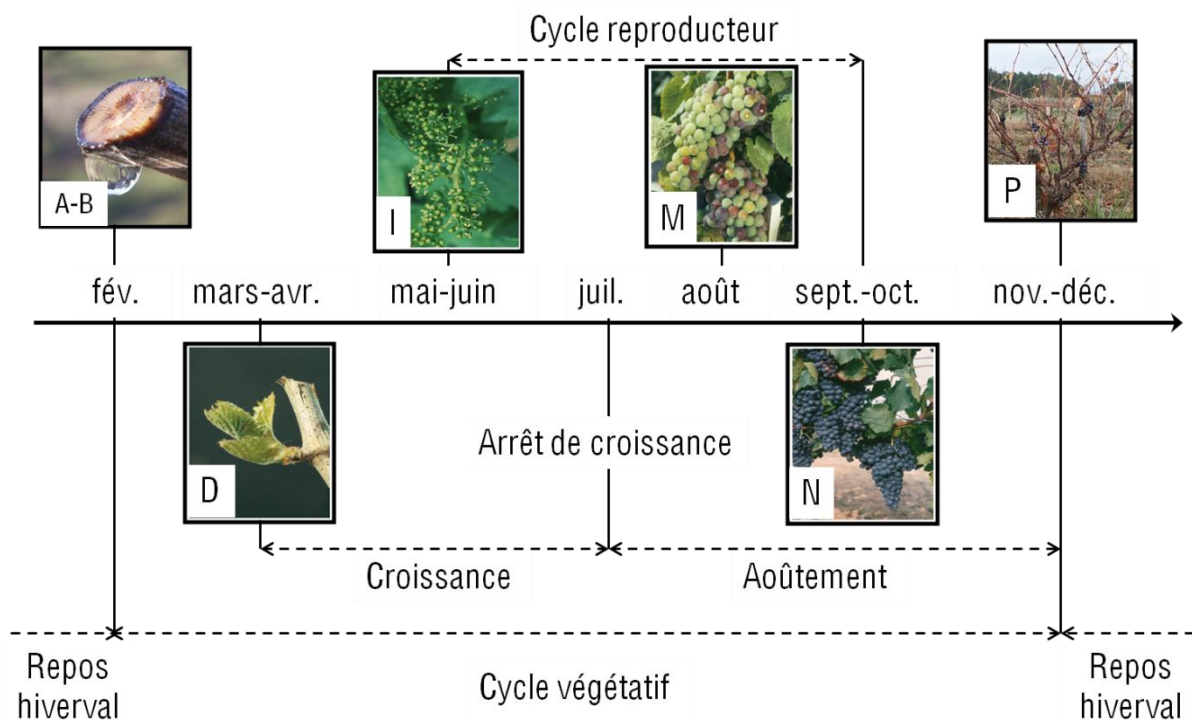


Figure A.13. Cycle phénologique de la vigne [adapté de Galet, 2000, et notation des stades de Baillod et Baggiolini, 1993].

A.II.1.B. LA VIGNE EN BOURGOGNE

Le vignoble bourguignon (27 966 ha en AOC) est divisé en cinq grands vignobles : le vignoble de Chablis/Grand Auxerrois (23,5 % de la surface totale), situé dans le département de l'Yonne, et les vignobles longeant la Côte, allant de Dijon (en Côte-d'Or) à Mâcon (en Saône-et-Loire) : du nord au sud, Côte de Nuits (13,5 % de la surface), Côte de Beaune (21,5 % de la surface), Côte chalonnaise (16 % de la surface) et Mâconnais (25 % de la surface) (Figure A.14.). Les climats auxquels sont soumis ces vignobles sont relativement différents. Le climat du vignoble de Chablis possède une forte influence océanique douce (4,3°C, moyenne 1988-2008) et pluvieuse en hiver, fraîche (19,1°C, moyenne 1988-2008) et humide en été. Le climat de la Côte subit des influences climatiques océaniques et méridionales, chaudes (19,7°C, moyenne 1988-2008) et sèches en été, plus froides que dans le Chablisien (3,5°C, moyenne 1988-2008) et pluvieuses en hiver [Chabin *et al.*, 1984 ; Chabin, 1985]. À une échelle plus fine, les disparités du climat local vont modifier les potentialités vitivinicoles participant à la variabilité des vins produits au sein d'une même aire d'appellation.

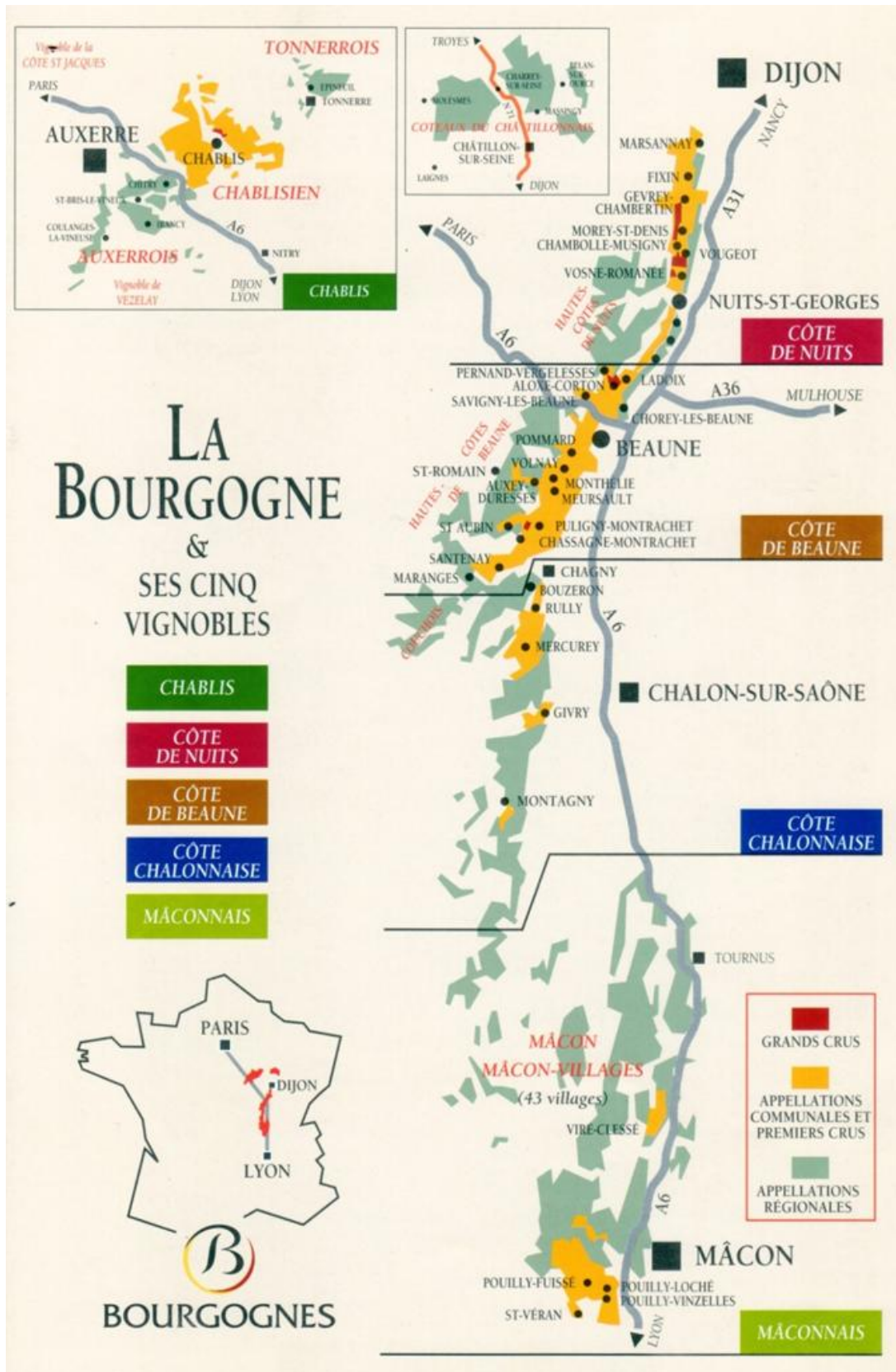


Figure A.14. Le vignoble bourguignon et ses appellations [www.vins-bourgogne.fr, janvier 2012].

Les principaux cépages de Bourgogne sont le Pinot noir (31,5 %), le Chardonnay (55,1 %), l'Aligoté (7,9 %) et le Gamay (5,0 %) (Figure A.15.). D'autres cépages sont

également représentés en Bourgogne, en très faibles proportions : le Sauvignon, le Sauvignon gris, le Tressot, le César, le Sacy et le Melon. La thèse s'intéressera essentiellement au cépage Pinot noir.

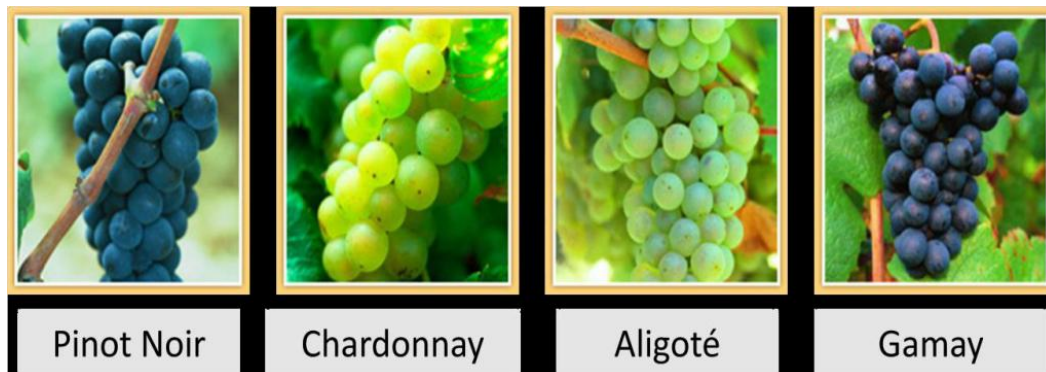


Figure A.15. Les principaux cépages en Bourgogne.

A.II.2. Influence de la température sur le développement de la vigne et la maturation du raisin

A.II.2.A. GÉNÉRALITÉS ET ÉCHELLE D'INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

La température d'un élément végétal dépend de son bilan radiatif et des échanges d'énergie entre cet élément et l'air sous forme de chaleurs latente et sensible. Des feuilles exposées au soleil auront une amplitude thermique quotidienne plus élevée que les feuilles à l'ombre et que l'air lui-même. L'écart entre la température de surface et la température de l'air est d'autant plus important que le rayonnement net est élevé et que l'évapotranspiration potentielle (ETP) est faible. De même, une faible humidité relative, le vent et une température de l'air élevée (ETP élevée) va tendre à diminuer cet écart [Verbrugge *et al.*, 1991].

Amerine et Winkler [1944] ont décrit, en Californie, des écarts notables de typicité entre vins provenant de régions chaudes et de vins provenant de régions fraîches. Sous des conditions chaudes, les qualités aromatiques des raisins perdent en délicatesse et richesse et les autres composants du fruit sont moins bien équilibrés. Les auteurs ajoutent que dans des conditions très chaudes, l'arôme de la plupart des vins secs est rude et grossier et les autres composants sont si pauvrement équilibrés que seuls des vins de table communs peuvent être produits. En revanche, l'excès de chaleur peut être bénéfique pour la production de vins doux (Porto, Muscatel...) car la somme de chaleur élevée, en particulier juste avant et pendant la période de maturation, favorise un haut taux de sucres dans le fruit. L'effet de la chaleur sur l'arôme est moins limitant que pour des vins secs.

Ils précisent également que les vins de meilleure qualité sont produits les années froides dans les régions chaudes, et les années chaudes dans les régions froides.

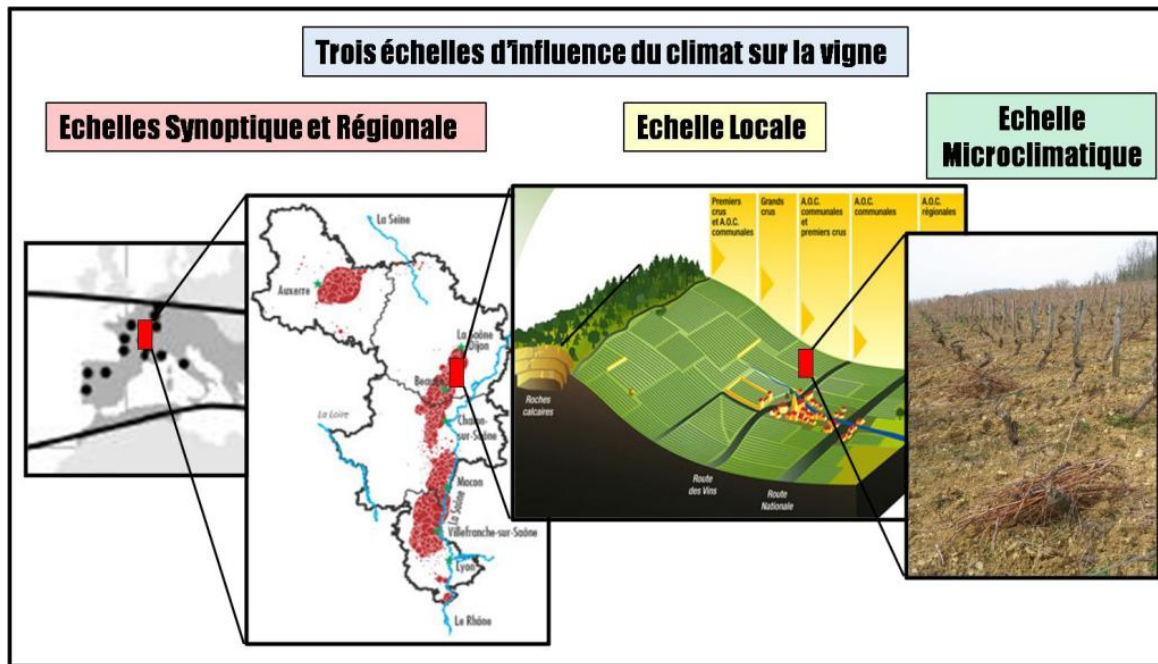


Figure A.16. Échelles d'influence du climat sur la vigne [adapté de Nigond *et al.*, 1968].

Nigond *et al.* [1968] définissent trois échelles d'influence du climat (Figure A.16.). L'échelle générale, qui intervient dans la localisation des grandes régions viticoles et va influencer le type de vigne qui va être cultivée, le cépage. Les cépages se répartissent en fonction de leur précocité/tardiveté. Les cépages précoces sont ceux qui subiront l'impact de la température à des degrés plus bas que les cépages tardifs qui auront besoin d'une température plus élevée pour arriver à maturité. Jones [2006] propose une classification de nombreux cépages basée sur la température moyenne de l'air d'avril à octobre (hémisphère nord) ou d'octobre à avril (hémisphère sud), correspondant grossièrement à la saison de végétation de la vigne dans la plupart des régions viticoles (Figure A.17). La température moyenne durant ce stade en Bourgogne, d'environ 15,2°C pour la période 1961-2009, positionne les cépages Pinot noir et Chardonnay de manière cohérente avec la classification de Jones [2006].

Le climat local (Figure A.16) influence, à l'échelle d'un groupe de communes, la hiérarchie entre les grands crus d'une même région. L'orientation et la déclivité des pentes sur lesquelles sont situés les vignobles vont interagir avec la climatologie à l'échelle locale. Les paramètres de pente vont influencer la durée d'insolation, l'angle d'incidence du rayonnement solaire (et ainsi la quantité d'énergie reçue par la vigne). La qualité des sols va influencer, entre autres, leur capacité à retenir ou non l'eau des précipitations.

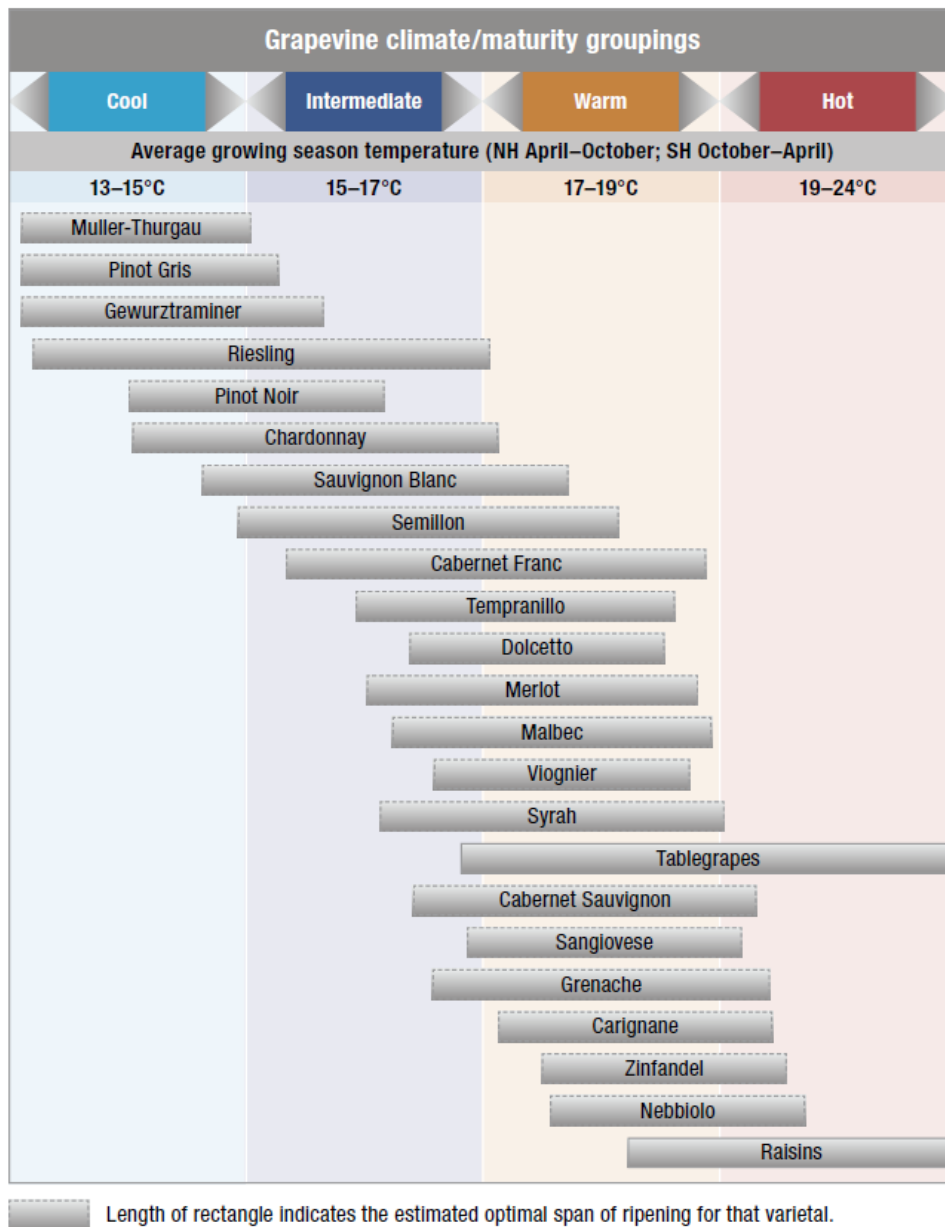


Figure A.17. Amplitudes de température optimale en période végétative en fonction des cépages [Jones, 2006].

L'influence du climat local permet d'expliquer le positionnement des diverses appellations des vins bourguignons (Figure A.18.). Globalement, les grands crus sont situés lorsque la pente est maximale. Gadille [1967] suggère l'existence d'une ceinture chaude à mi-pente, zone exempte d'accumulations d'air froid lors des inversions thermiques et encore peu influencée par le gradient adiabatique lié à l'altitude. En haut et en bas de coteaux sont généralement situés les premiers crus et les AOC communales. Plus bas dans la plaine, sont situées le reste des AOC communales et au-delà de la route départementale (D974) sont situées les AOC régionales.

Le microclimat concerne le climat à l'échelle de la parcelle et du cep. Il dépend en grande partie des caractéristiques agronomiques (densité de plantation, mode de

conduite), des caractéristiques biologiques de la vigne (génotype, croissance...) et du type de sol. Ici aussi, les caractéristiques de la pente jouent un rôle prépondérant.

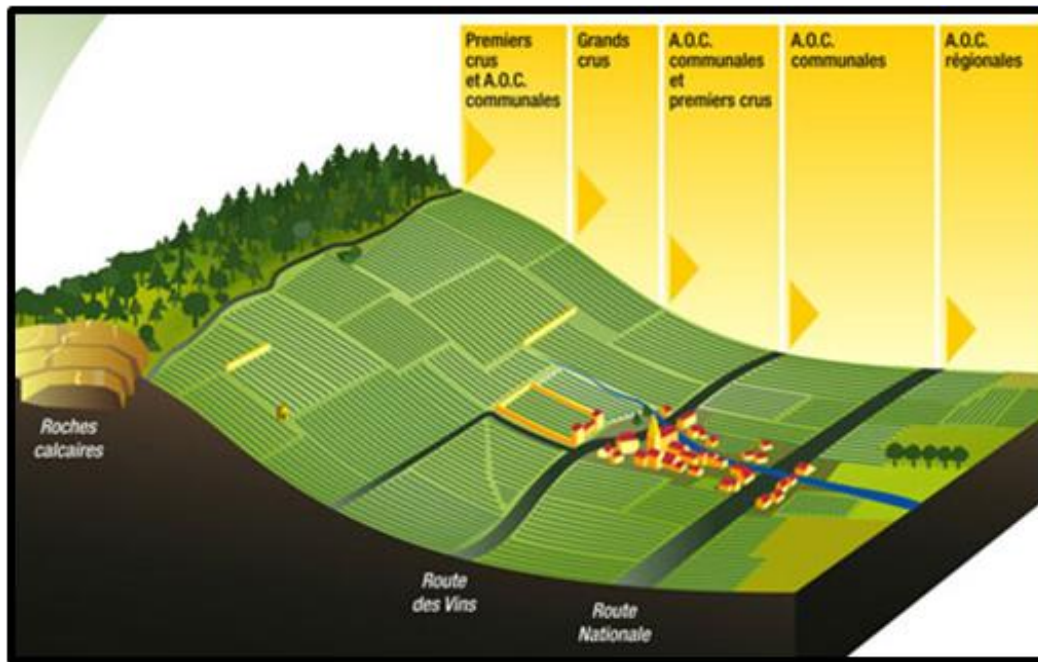


Figure A.18. Hiérarchisation des appellations au sein du vignoble bourguignon [http://www.vins-bourgogne.fr, août 2012].

La thèse fait le lien entre les échelles synoptiques et régionales et locales.

A.II.2.B. INFLUENCE STADE PAR STADE

- Débourrement et croissance

Galet [2000] fait remarquer que l'intensité du froid hivernal a un effet important sur la mise en dormance des bourgeons et sur le débourrement. Plusieurs expériences [Duhamel du Monceau (1758), cité par Galet en 2000] ont mis en évidence qu'une température élevée favorise un débourrement précoce.

Pouget [1972] définit par le calcul un seuil de vitesse de débourrement en dessous duquel il n'est pas visible et donc considéré comme nul. Cette vitesse correspond à l'inverse de la durée de débourrement de 50 % des bourgeons. La température nécessaire pour atteindre ce seuil dépend très fortement des cépages étudiés par Pouget (exemple : de 4,3°C pour le Perle de Csaba à 12,2°C pour le Cabernet-Sauvignon). La température agit sur la vitesse de débourrement de façon cumulative et irréversible. Si la succession de températures supérieures au seuil n'est pas assez longue, ou est suivie de températures plus froides, le débourrement sera ralenti. Les températures de débourrement du Chardonnay et du Pinot noir sont respectivement de 6,1°C et 8,7°C et le jour moyen de débourrement était de $66,89 \pm 7,71$ et $77,44 \pm 5,71$ pour la période 1970-1988 [Pouget, 1988].

Notons qu'un cépage est dit à débourrement tardif lorsque celui-ci a besoin d'une température plus élevée pour atteindre ce stade et inversement pour un cépage à débourrement précoce qui pourra débourrer à une température plus basse [Galet, 2000].

La température du sol intervient dans l'apparition des pleurs en déclenchant la reprise de l'activité cellulaire racinaire [Galet, 2000].

Pour la croissance de la vigne, la température de l'air joue un rôle important. Il existe des seuils dépendant du cépage pour les seuils de départ de croissance (débourrement) et de la physiologie même de la vigne. Pour Galet [2000], l'optimum de croissance est atteint à une température de 24-28°C. Au-delà de 40°C, l'auteur considère que la croissance s'arrête. Cette observation générale est probablement davantage le fait d'un effet combiné entre le déficit hydrique induit par les conditions climatiques associées à des températures élevées que l'impact de la température seule, car des expérimentations en conditions contrôlées suggèrent que la croissance, bien que fortement ralentie, est maintenue à 40°C [Kliewer, 1977].

- Floraison

L'initiation florale est conditionnée par la température pendant la période d'induction. Ici encore, la température limite en dessous de laquelle l'initiation est nulle dépend largement du cépage et atteint son maximum entre 30 et 35°C [Buttrose (1969, 1970), cité dans Galet, 2000 ; Galet, 2000].

Globalement, la floraison est retardée aux températures limites (en dessous de 15°C et au dessus de 35°C), ces valeurs variant selon les cépages et le nombre de degrés jour nécessaires à la floraison [Galet, 2000]. Buttrose et Hale [1973] considèrent qu'il faut une somme de températures moyennes quotidiennes supérieures à 10°C d'environ 350°C pour que la floraison puisse avoir lieu. Leur travaux menés sur le cépage Cabernet Sauvignon suggèrent qu'au-delà d'une température moyenne quotidienne de l'ordre de 23°C (26°C le jour et 21°C la nuit), la période entre débourrement et floraison n'est pas raccourcie. Par ailleurs, des températures trop élevées à cette période sont néfastes à la nouaison et le nombre de baies sur la grappe tend à diminuer au-delà de 25°C [Kliewer, 1977] (hypothèse d'une faible humidité sous haute température, affectant la germination). Buttrose et Hale [1973] suggèrent, pour les mêmes raisons, une température optimale d'environ 18°C entre débourrement et véraison. La fécondation des ovules est également affectée par des températures basses, en raison d'un ralentissement de la vitesse de croissance du tube pollinique [Staudt, 1982].

- Véraison/récolte

La température influence la date et la qualité des vendanges [Galet, 2000]. Daux *et al.* [2007] indiquent que les températures maximales d'avril à août sont corrélées avec la date des vendanges ($r^2=0,6$). L'étude de Jones et Davis [2000] montre que la date de vendange sera d'autant plus précoce que le nombre de jours où $T > 25^\circ\text{C}$ pendant l'intervalle floraison-véraison et où $T > 30^\circ\text{C}$ pendant l'intervalle véraison-maturité sera élevé, les $T > 25^\circ\text{C}$ pendant la floraison-véraison influençant la date de véraison. Daux *et al.* [2007], en comparant dates de vendanges et températures maximales d'avril à août, précisent qu'une augmentation de 1°C des températures maximales pendant la période de croissance équivaut à une précocité de dix jours de la date des vendanges, et ce quelle que soit la précocité/tardiveté du cépage et quelle que soit la zone géographique.

Durant la maturation du raisin, des températures élevées vont conduire à une baisse de l'acidité des baies, en raison de la dégradation de l'acide malique [Kliewer et Lider, 1970]. L'effet sur l'accumulation en sucres est différent selon les cépages et dépend de l'éclairement [Buttrose *et al.*, 1971 ; Kliewer, 1977].

La température agit sur la couleur des baies chez les cépages noirs (causée par l'accumulation d'anthocyanes dans la pellicule) [Buttrose *et al.*, 1971 ; Spayd *et al.*, 2002]. Pendant la maturation, lorsque la température diurne est basse (15°C), les baies seront plus colorées que lorsque la température est élevée (35°C). L'exposition au rayonnement solaire direct, pourtant favorable à la teneur en anthocyanes du raisin, va réduire leur concentration dans la pellicule des baies en induisant une augmentation de la température au sein de ces dernières [Bergqvist *et al.*, 2001]. La couleur sombre des baies accentue ce phénomène : des grains sombres vont absorber plus d'énergie en raison de leur faible albédo [Igounet *et al.*, 1995]. Une nuit fraîche n'inverse pas l'effet d'une journée chaude et le raisin sera moins coloré que lors de journées fraîches [Spayd *et al.*, 2002].

L'intérêt de l'étude est de comprendre et de quantifier les impacts du changement climatique sur la vigne. La partie suivante fera un tour d'horizon des impacts à travers le monde viticole.

A.III. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : QUELS IMPACTS SUR LA VIGNE ?

Le changement climatique a un impact certain sur le vignoble mondial. Cette partie propose un tour d'horizon des observations de ces impacts.

A.III.1. Les impacts observés sur la phénologie, la qualité du vin et l'économie vitivinicole mondiale

A.III.1.A. L'IMPACT DU POINT DE VUE PHÉNOLOGIQUE

Les changements de conditions ont déjà eu un impact sur la culture de la vigne dans le Monde. D'un point de vue phénologique, il semble clair que l'augmentation de la température permet un cumul plus rapide des degrés-jours (DD ou °C.J). Ces degrés-jours sont le fruit du cumul des valeurs de températures actives pour la plante. Le seuil couramment utilisé pour la vigne est de 10°C. Lorsque la température moyenne quotidienne est de 15°C, on estime que les cinq degrés au-dessus du seuil vont contribuer au développement de la plante. Le calcul se fait sur la période végétative de la vigne. Nous aurons l'occasion d'y revenir plus largement dans le chapitre C.

En Europe, le cycle phénologique de la vigne montre une très forte relation avec le réchauffement observé, avec une précocité allant de six à vingt-cinq jours. En moyenne, sur toutes les localisations et variétés, la phénologie de la vigne montre une réponse de trois à six jours de précocité par 1°C de réchauffement sur les trente-cinquante dernières années [Jones, 2007]. À Colmar (Alsace, France), le nombre de jours favorable au développement de la vigne (>10°C) a augmenté en moyenne d'un jour par année entre 1972 et 2002, et ce de façon équivalente que l'on soit au début ou à la fin du cycle de développement de la plante [Duchêne et Schneider, 2005]. Le changement climatique, de par l'augmentation de température, entraîne également une diminution du nombre de jours de gel. Sur la côte pacifique des États-Unis, la diminution du nombre de jours de gel augmente la durée de la période végétative potentielle et permet aux viticulteurs plus de souplesse dans le calendrier de culture [Nemani *et al.*, 2001].

Les séries temporelles montrent une précocité du débourrement pour la période récente [Jones et Davis, 2000]. Bellia *et al.* [2007] ont également observé une avancée du stade de débourrement pour le cépage Grenache en Côte du Rhône d'environ dix jours. Le stade de débourrement du Pinot noir en Bourgogne est globalement plus précoce de onze jours sur la période 1952-2004 [Jones *et al.*, 2005a].

De même, aux États-Unis, les dates de floraison ont également été avancées de vingt-quatre jours depuis les années 1950 jusqu'aux années 1990 [Nemani *et al.*, 2001]. Jones et Davis [2000] montrent qu'en Europe une précocité de la date de floraison s'observe à partir des années 1960.

L'évolution des dates de véraison en Europe se caractérise par une plus grande précocité depuis les années 1980 et 1990 [Jones et Davis, 2000]. Bellia *et al.* [2007] notent une avancée du stade de véraison pour le cépage Grenache en Côte du Rhône d'environ quinze jours entre 1976 et 2000. Le stade de véraison du Pinot noir en Bourgogne est avancé d'une dizaine de jours sur la période 1952-2004 [Jones *et al.*, 2005a]. Chabin *et al.* [2007] avaient également mesuré une plus grande précocité de la véraison pour le vignoble beaunois, d'environ cinq jours pour Beaune et de quinze jours pour La Rochepot (différences entre 1973-1987 et 1988-2006).

Aux États-Unis, la quantité de degrés-jours nécessaire pour arriver au stade de maturité est obtenue vingt à vingt-cinq jours plus tôt à la fin des années 1990 comparé au début des années 1950 [Nemani *et al.*, 2001]. Ceci entraîne une anticipation de la récolte. Le stade de maturité du Pinot noir en Bourgogne est globalement plus précoce de seize jours sur la période 1952-2004 [Jones *et al.*, 2005a].

Enfin, Mira de Orduña [2010] indique que la date de vendange actuelle a avancé elle aussi de trois semaines par rapport à celle du début du siècle à Chateauneuf-du-Pape. En Alsace, la date de début de vendange est restée stable, voire plus tardive sur la période 1950-1980, puis est devenue clairement plus précoce après 1980 (forte tendance). Le gain de température moyenne pendant la période de maturation est d'environ 0,15°C par an [Duchêne et Schneider, 2005]. Daux *et al.* [2007] montrent une relation négative entre la date de vendange et la température maximale moyenne d'avril à août. La valeur de pente (-0,1), identique quels que soient le cépage et sa situation géographique, indique que toute variation d'un degré Celsius de la température maximale moyenne entre avril et août correspond à une anticipation de dix jours de la date de vendange (Figure A.19.). Le même type de relation entre la température annuelle et la date de vendange a été mis en évidence en Bourgogne par Rochard *et al.* [2007] : 8,6 jours par degré Celsius. Seguin [2007] a également mis en évidence une précocité des dates de vendanges de pratiquement un mois sur le dernier demi-siècle à Chateauneuf-du-Pape, sans que cela puisse être uniquement expliqué par des modifications dans les pratiques culturales.

À Colmar, en ce qui concerne la durée « débourrement-floraison », il n'y a pas de tendance claire [Duchêne et Schneider, 2005]. Un raccourcissement de la durée « floraison-véraison » est observée et équivalente à un jour tous les cinq ans.

Pourtant, d'après Jones [2007], en Europe, toutes les durées interstade ont également diminué : quatorze jours pour débourrement-floraison, quinze jours pour débourrement-véraison et dix-sept jours pour débourrement-maturité.

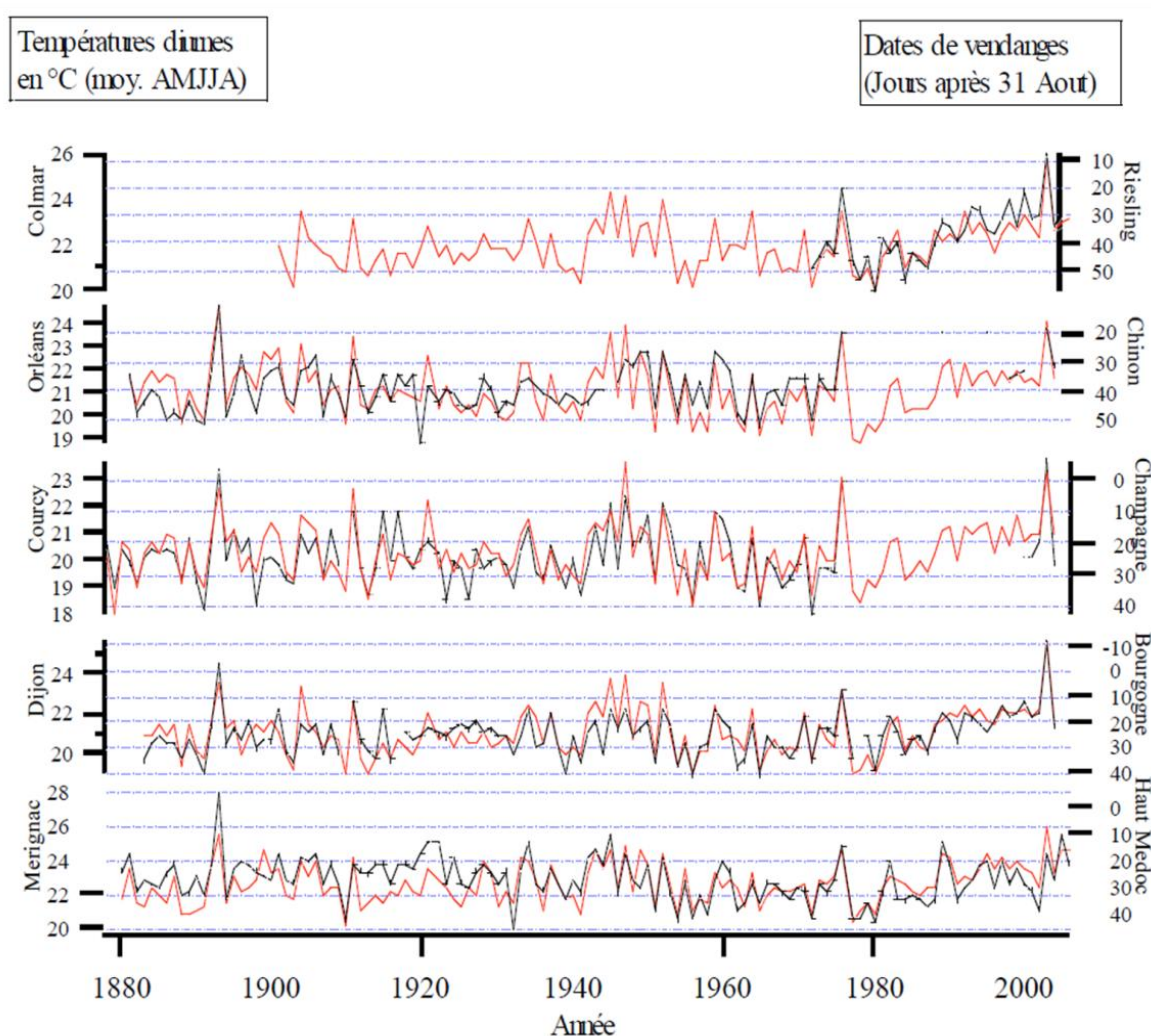


Figure A.19. Séries de dates de vendanges pour différents vignobles en France et série de températures moyennes diurnes d'avril à août [Daux et al., 2007].

A.III.1.B. L'IMPACT DU POINT DE VUE DE LA QUALITÉ DU VIN

L'augmentation de la température influence la composition des baies de raisin, notamment la quantité de sucres qui définit le titre alcoolométrique potentiel du vin qui en sera issu. À date identique, le potentiel alcoolique a augmenté pour tous les cultivars du sud de la France, alors que l'acidité a diminué, entre 1980 et 2000 [Mira de Orduña, 2010]. Le degré potentiel d'alcool du Riesling en Alsace à la date de vendanges a augmenté de 0,08 % par an entre 1972 et 2002, soit environ +2,5 % en trente ans [Duchêne et Schneider, 2005]. Deux variétés à Bordeaux (Merlot, Cabernet Sauvignon) ont montré des baies plus lourdes, avec un ratio sucre/acide plus élevé qui donne des vins mieux notés (selon les notes attribuées aux enchères Sotheby's

couplées à celle du magazine spécialisé The Wine Enthusiast) et une variabilité interannuelle plus faible [Jones, 2003].

Entre 1950 et 1999, conjointement avec l'augmentation de 1,26°C sur les régions viticoles mondiales, on observe une augmentation généralisée des notes de millésimes (Sotheby's et The Wine Enthusiast). Jones [2004] indique que l'augmentation d'un degré Celsius est associée à un gain de 13 point/100 de ces notes de millésimes et que les régions à climat frais en font de plus grands profits. Soulignons néanmoins que d'autres facteurs, comme l'expansion du commerce international du vin durant la fin du XXe siècle, conjointe au réchauffement global, peuvent également être à l'origine de cette tendance.

Les notes moyennes des vins californiens ont augmentés de 7.5 points/100 (Sotheby's) entre 1963 et 1996. La diminution de la fréquence du gel est fortement corrélée avec l'augmentation des notes des millésimes : ces notes semblent négativement corrélées avec le nombre de jours de gel (Figure A.20.) [Nemani *et al.*, 2001]. Le gel détruit en partie les premiers bourgeons de la vigne, épargnant les deuxièmes et troisièmes bourgeons qui sont moins productifs, tout en entraînant un retard physiologique de la plante, une maturité inégale ainsi qu'une qualité de vin plus faible [Jones, 2003]. Notons enfin que l'ensemble des vignobles bourguignons enregistrent, selon Jones *et al.* [2005b], une hausse significative de la qualité des millésimes sur les cinquante dernières années.

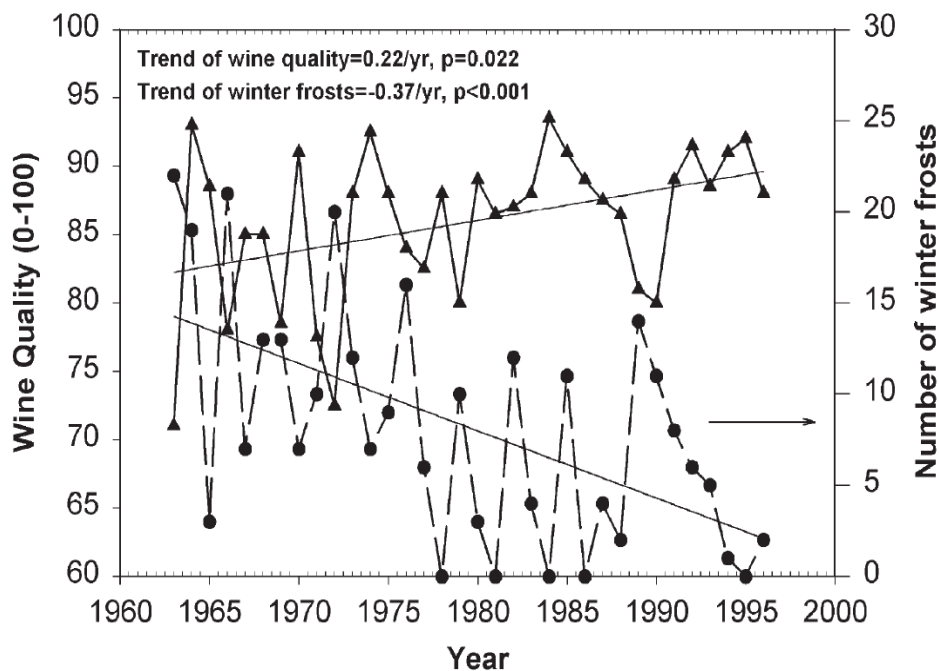


Figure A.20. Variabilité interannuelle de la qualité des vins et du nombre de jours de gel [Nemani *et al.*, 2001].

Ainsi, le changement climatique s'accompagne de nombreuses et importantes altérations dans : le calendrier phénologique de la vigne, la modification de la composition des raisins et du vin et donc des styles de vins régionaux, mais également une modification de l'encépagement et des changements spatiaux dans les régions viticoles viables. Le changement climatique, à travers son impact direct sur la production de raisin et de vin, a la capacité d'apporter indirectement une mutation culturelle en altérant des identités régionales de longue date [Jones, 2004]. L'évolution des pratiques viticoles (notamment la gestion de la pourriture grise) a permis aux viticulteurs de retarder quand nécessaire la date de récolte, pour garantir une meilleure maturation du raisin. Daux *et al.* [2007] estiment ainsi que les viticulteurs de la région bordelaise ont pu retarder la date de récolte du raisin de cinq à dix jours à partir de 1960, réduisant ainsi l'impact observé du réchauffement récent sur l'anticipation de la date des vendanges. La marge de manœuvre des régions plus fraîches est forcément plus grande que celles plus chaudes qui vont devenir des régions plus difficiles voire impossibles pour la culture de la vigne [Jones, 2004].

A.III.1.C. IMPACTS DU POINT DE VUE ÉCONOMIQUE : LES NOUVEAUX VIGNOBLES MONDIAUX

Depuis quelques années, les vignobles du *Nouveau Monde* font concurrence aux vignobles du *Vieux Continent*. S'il semble que le changement climatique ait affaibli de façon indirecte les vignobles historiques européens, l'émergence de nouveaux vignobles est avant tout due à des différences de législation entraînant plus de handicap pour les vignobles situés dans des pays à plus fortes restrictions. Jones [2004] précise que les viticulteurs vont avoir besoin de plus de souplesse pour faire face au changement climatique à court et long termes.

La superficie du vignoble mondial est en chute depuis 2003 (200 000 ha de moins entre 2003 et 2008). Entre 2003 et 2008, la production mondiale a chuté d'environ 25 000 000 hL, l'équivalent d'un tiers de la production française. Pourtant, la consommation mondiale est en constante augmentation depuis la fin des années 1990 (+ 25 000 000 hL).

Depuis 1995, la proportion de la superficie, de la production et de la consommation des vignobles européens est en constante diminution, au profit notamment des vignobles asiatiques et américains (Figure A.21.). L'augmentation de la production de vin asiatique est notamment due à la multiplication par quatre de la production de vin et de la superficie des vignobles chinois. Au contraire, le vignoble japonais et la production de vin japonais est en très forte diminution depuis la fin des années 1990, mais la consommation de vin au Japon est en constante augmentation, notamment au niveau des prix des vins achetés. L'achat de vins australiens par les

Japonais a été multiplié par huit en dix ans. De même, les vins français à fortes valeurs ajoutées sont désormais préférés par les Japonais.

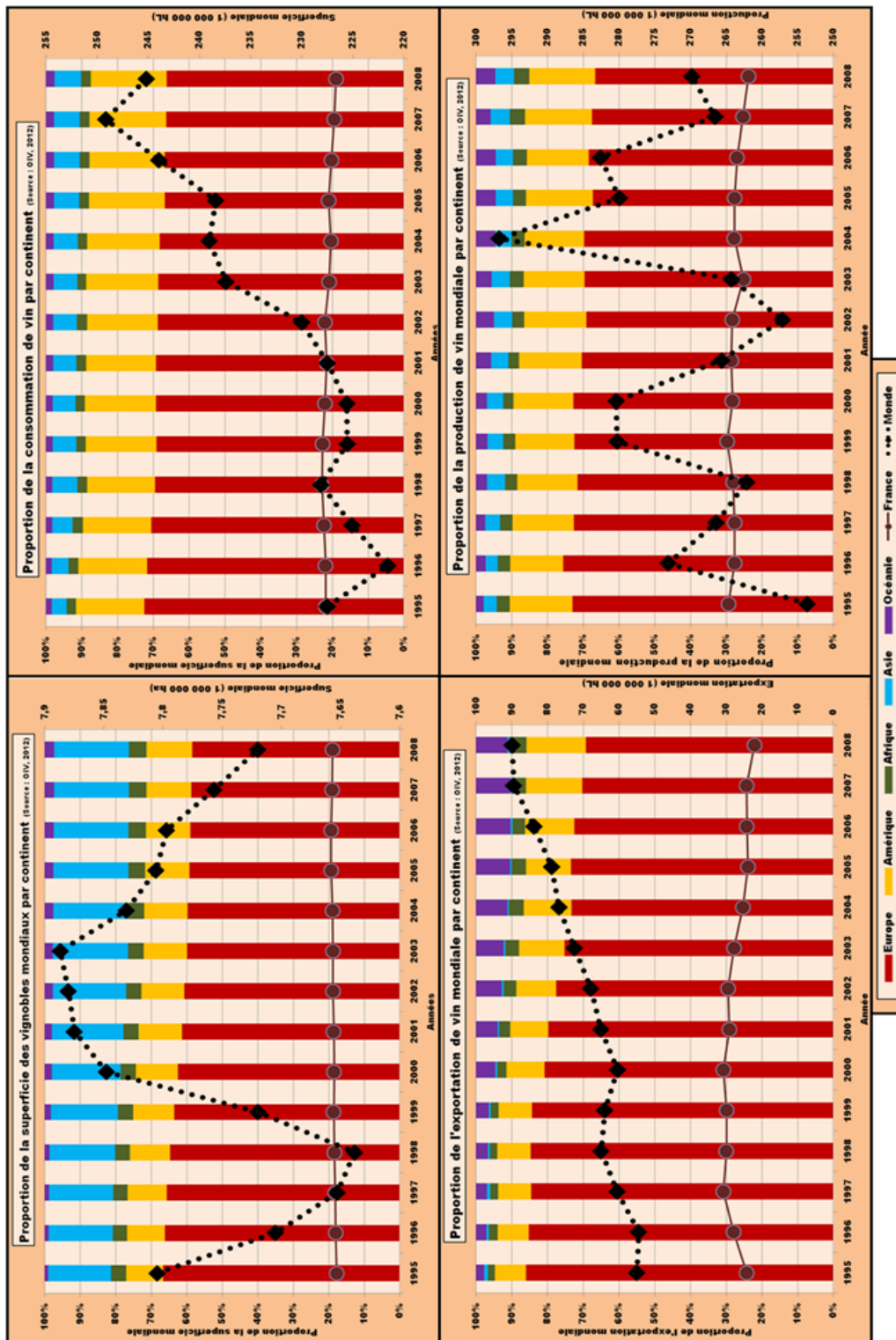


Figure A.21. Comparaison de la proportion de la superficie des vignobles, de l'exportation de vin, de la consommation et de la production de vins mondiales par continent. Les courbes en pointillés noirs indiquent les variations mondiales annuelles des variables étudiées. Les courbes continues marron représentent la proportion du vignoble français [source OIV, 2012].

En Amérique, la production est restée stable sur les dix dernières années. Seul le Mexique semble avoir faibli au niveau de la production de vin (production divisée par quatre depuis 1998). Au Chili, la production a été multipliée par trois depuis le début des années 1990, mais la consommation a fortement diminuée entre 1976 et 1993, puis s'est stabilisée. La consommation de vin a été multipliée par cinq au Mexique et par un et demi pour les États-Unis.

En Océanie, l'Australie a vu sa consommation stagner depuis la fin des années 1990, mais la production a connu une forte progression durant les années 1990 et le début des années 2000 ; elle connaît une stagnation depuis 2006. En Nouvelle-Zélande, la consommation est restée stable depuis 2000, mais la production a été multipliée par quatre. En Afrique du Sud, la production de vin est en légère augmentation depuis 1998 (+30 %), alors que la consommation diminue légèrement.

Un aspect important d'un point de vue économique, en particulier lorsque l'on parle de concurrence entre les nouveaux vignobles et les vignobles historiques, est l'exportation. Car si la quantité de vin qui transite d'un pays à l'autre a augmenté de 35 000 000 hL par rapport au milieu des années 1990, la proportion de l'exportation de vins européens est passée de 86 % à 69 %. À l'inverse, la proportion de l'exportation de vins américains a augmenté d'environ 10 %. En Argentine, l'exportation a été multipliée par quatre depuis 2000. Aux États-Unis, l'exportation a été plus chaotique, mais globalement en hausse depuis 2000. Le Mexique importe cinquante fois plus de vin qu'il n'en exporte. De même, l'exportation des vins d'Océanie est passée de 2 % à 9 %, avec l'Australie qui a multiplié ses exportations par huit depuis 1990 et la Nouvelle-Zélande par dix depuis 2000. Enfin, l'Afrique du Sud a multiplié ses exportations par quatre depuis 1998. Ces chiffres traduisent bien l'entrée en concurrence des vins du Nouveau Monde avec les vins historiques. Notons tout de même que l'exportation de vins asiatiques est négligeable à l'échelle mondiale.

Par comparaison, sur la période considérée (1995-2008), la surface de vignoble en Bourgogne a augmenté de près de deux mille cinq cents hectares, soit environ 10 % de sa surface totale. Néanmoins, depuis le milieu des années 2000, nous constatons une stagnation. Les récoltes ont connu une augmentation jusqu'à la fin des années 1990, mais stagnent depuis autour de un million et demi d'hectolitres. L'année 2003 a d'ailleurs été une mauvaise année en termes de quantité produite puisque seulement 1,1 million d'hectolitres ont été récoltés. Les ventes ont été stables lors de la dernière décennie : entre cent soixante-dix millions et deux cent dix millions de bouteilles. Enfin, l'exportation, notamment par la valeur des produits vendus, est en augmentation depuis la fin des années 1990, mais connaît une chute depuis 2007, du fait de la crise économique mondiale (Figure A.22).

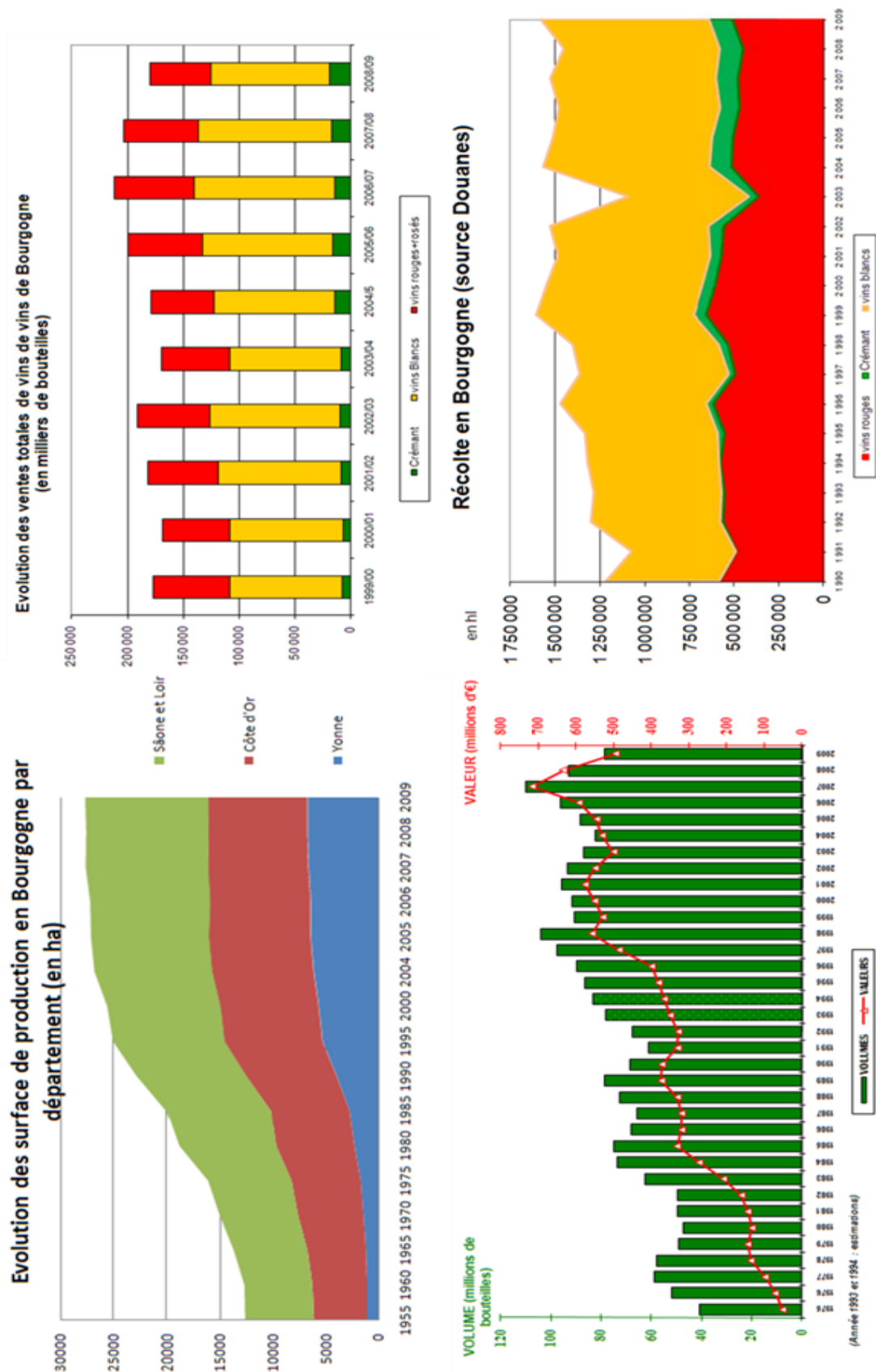


Figure A.22. Évolution des surfaces des vignobles, des ventes, des exportations et des récoltes en Bourgogne [source [www.vins-bourgogne.fr, août 2012].

A.III.2. Les impacts probables dans le futur

Les simulations d'impact du changement climatique sur la phénologie de la vigne montre qu'en Australie, aux horizons 2030 et 2050, une précocité globale pour le Chardonnay et le Cabernet Sauvignon, respectivement de -2 et -9 jours/-2 et -15 jours pour le débourrement et de -5 et -22 jours/-8 et -39 jours pour les vendanges. Également, une réduction de la durée du cycle végétatif (débourrement-maturité) est simulée (-2 à -20 jours/-3 à -40 jours) [Webb *et al.*, 2007].

Les changements probables entraîneront un décalage spatial des conditions de culture de la vigne. Le sud de l'Europe deviendrait trop chaud pour produire de « bons » vins et les régions septentrionales seraient capables de fournir les conditions nécessaires à la maturité du raisin. Les limites de la culture de la vigne (12°C-22°C) devraient migrer vers les pôles (150 à 300 km) pour 2049 avec un climat évoluant selon le scénario A1B. On rajouterait 125-250 km pour 2099 [Jones, 2007]. En utilisant le scénario A2, les régions produisant des vins à forte valeur ajoutée ('premium wine') aux États-Unis) pourrait diminuer de 81 % à l'horizon 2100 selon White *et al.* [2006] (Figure A.23.). Cette évolution spectaculaire reste néanmoins à préciser en améliorant la finesse spatiale des changements prédits, ainsi qu'en élargissant les changements possibles sur le cycle de l'eau par exemple.

Garcia de Cortazar Atauri *et al.* [2006] ont appliqué le modèle de plante STICS-vigne au scénario B2 du GIEC [GIEC, 2001] et évalué l'impact du climat simulé sur le développement de la vigne, la production et les potentialités du raisin pour la période 2070-2099. Ces valeurs sont comparées à des données simulées par ARPEGE-Climat pour la période 1960-1989. Pour le Pinot noir en Champagne, la précocité des principaux stades phénologiques va de dix-neuf jours pour la floraison, à quarante-et-un jours pour la véraison et la maturité. Le modèle STICS-vigne indique un raccourcissement de la période de floraison-véraison. La variabilité interannuelle est plus faible pour le scénario futur. De plus, la quantité de sucres à la date des vendanges augmenterait de 26 g/L (+15 %).

D'après Rochard *et al.* [2007], la date de vendanges moyenne pourrait, en Bourgogne, être comprise entre le 6 et le 10 septembre en 2050, entre le 14 août et le 4 septembre en 2100, selon les scénarios B1, A1B et A1F1 vus précédemment (Figure A.24.).

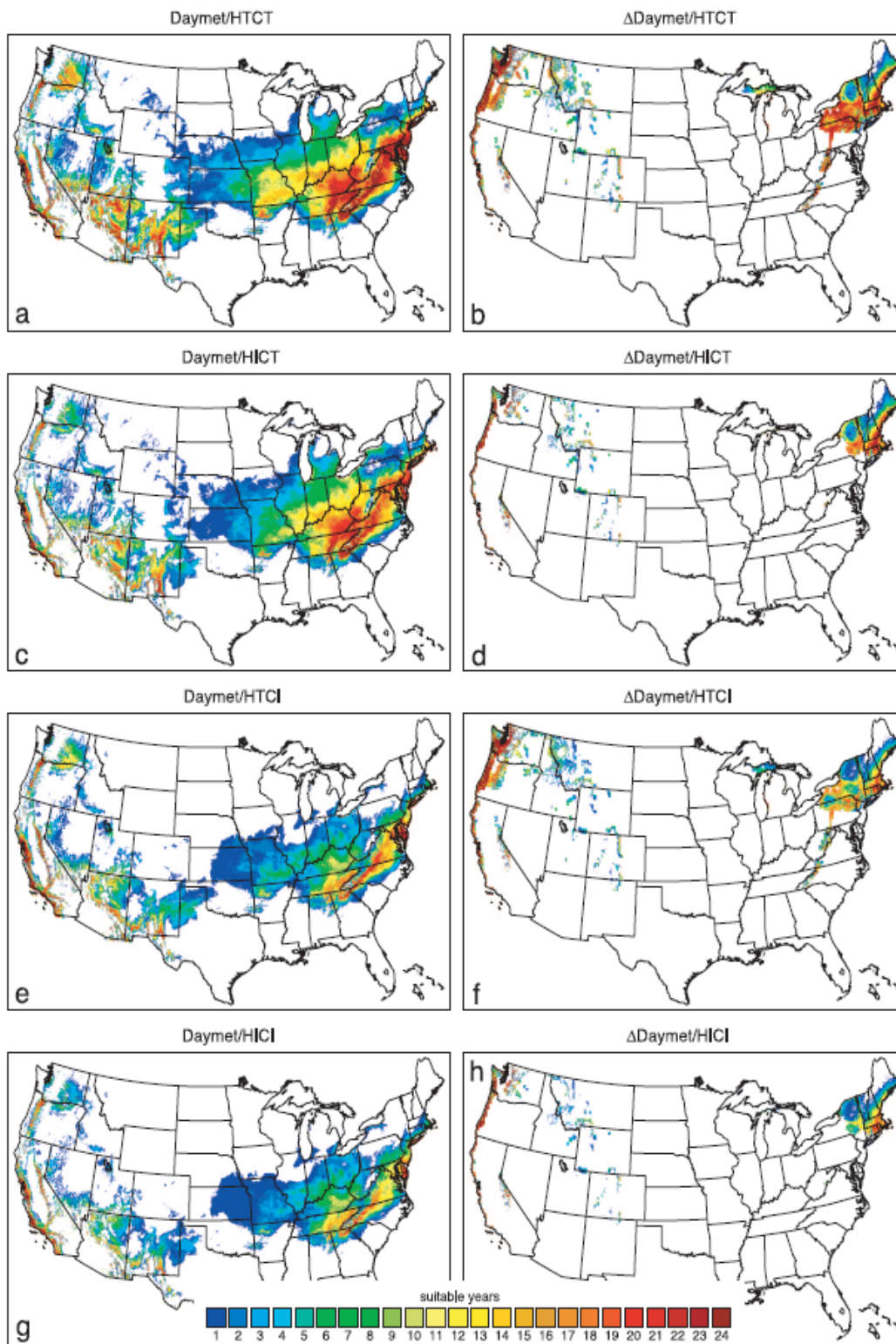


Figure A.23. Années appropriées (sur vingt-quatre possibles) pour la production de vins pour le climat actuel (Daymet) et le climat futur (Δ Daymet) pour quatre catégories de tolérances aux températures extrêmes (sept ou quatorze jours de froids pendant l'hiver ($<-12,2^{\circ}\text{C}$), le printemps et l'automne ($<-6,7^{\circ}\text{C}$) et chauds ($>35^{\circ}\text{C}$) pendant la période végétative et de récolte) : tolérance au chaud/tolérance au froid (HTCT), tolérance au chaud/intolérance au froid (HTCI), intolérance au chaud/tolérance au froid (HICT), intolérance au chaud/intolérance au froid (HICI) [White *et al.*, 2006].

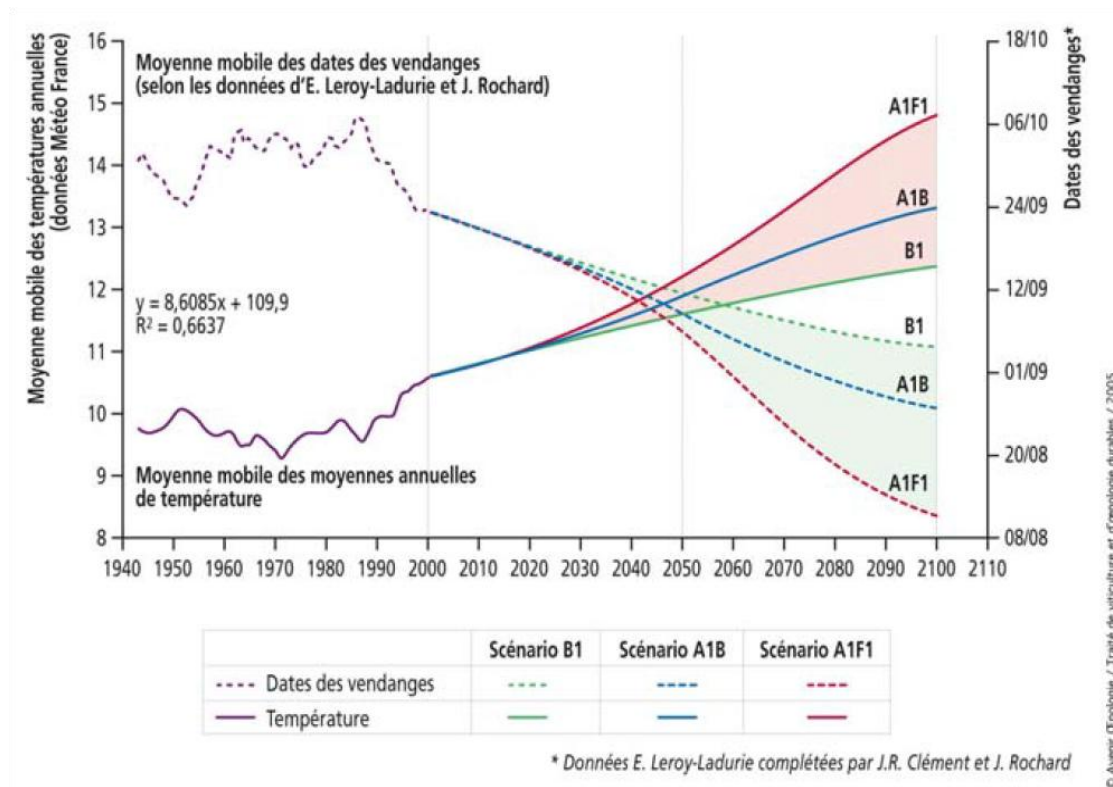


Figure A.24. Scénarios d'évolution de la température et des dates de vendanges au cours du XXI^e siècle [Rochard et al., 2007].

Conclusion du Chapitre A

Le contexte actuel du changement climatique est essentiellement marqué par une augmentation des températures. Cependant, ce réchauffement possède des caractéristiques qui varient en fonction de l'échelle à laquelle on l'étudie et de la région d'étude. Dans ce travail de thèse, nous allons étudier les caractéristiques et les impacts de l'augmentation des températures à l'échelle de la région Bourgogne. Nous chercherons à documenter ces éléments pour, à la fois, le réchauffement observé et le réchauffement projeté dans le cadre d'un scénario (SRES-A2).

De plus, la vigne est très réactive aux changements de températures. Il est donc primordial, dans ce contexte de changement climatique, de quantifier et qualifier la relation entre la température et la vigne, plus précisément le Pinot noir, en Bourgogne. Cette relation sera ensuite transposée à une période future pour répondre à la question de l'impact futur du changement du climat sur le Pinot noir. Cette dernière thématique nécessite de produire un climat « réaliste » à des échelles fines. Pour arriver à ceci, une approche dynamique de descente d'échelle climatique a été utilisée pour passer des mailles larges des modèles climatiques globaux à une maille fine (i.e. opérationnelle). Cette étape a mobilisé l'utilisation d'un modèle climatique régional également dénommé modèle climatique à aire limitée [Giorgi, 1990].

CHAPITRE B

Variabilité spatiotemporelle des températures en Bourgogne depuis 1961

'Il y a trois choses, dans la vie, que je ne supporte pas : le café brûlant, le champagne tiède et les femmes froides.'

Orson Welles



CHAPITRE B

Sommaire

B.I. BASE DE DONNÉES DE TEMPÉRATURES PONCTUELLES	83
B.I.1. Données initiales	84
B.I.2. Contrôles et traitements	85
B.I.2.a. Méthode de détection des valeurs aberrantes	85
B.I.2.b. Méthode de remplacement/suppression des données.....	87
B.II. ÉTUDE DES ÉVOLUTIONS DE TEMPÉRATURES EN BOURGOGNE	89
B.II.1. Recherche de ruptures ou/et de tendances : présentation des outils mobilisés	89
B.II.1.a. Test de Mann-Kendall (1945)	89
B.II.1.b. Test de Pettitt (1979)	89
B.II.1.c. Test de la Split Moving Window Dissimilarity Analysis (1973)	89
B.II.2. Évolutions observées.....	90
B.II.2.a. Évolutions des moyennes annuelles	90
B.II.2.b. Évolutions saisonnières	94
B.II.2.c. Évolutions des fréquences quotidiennes de métriques plus fines	96
B.II.3. Nuances infrarégionales.....	99
B.III. SPATIALISATION DES TEMPÉRATURES EN BOURGOGNE : DÉMARCHE ET MÉTHODOLOGIE .	103
B.III.1. Démarche : recherche préalable de structures spatiales récurrentes.....	104
B.III.1.a. Pourquoi une telle approche ?	104
B.III.1.b. L'outil de classification utilisé : la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)....	106
B.III.2. Méthodes d'interpolation	108
B.III.2.a. Prise en compte de la morphométrie avec une régression linéaire multiple	108
B.III.2.b. Le krigeage	109
B.III.2.c. Les splines en plaques minces	110
B.IV. Résultats.....	111
B.IV.1. Étude climatique sur la période 1973-2009.....	111
B.IV.1.a Mise en évidence de structures spatiales de températures (1973-2009)	111
B.IV.1.b. Les structures spatiales.....	114
B.IV.1.c. Évolution des fréquences d'occurrence de ces structures.....	117
B.IV.2. Spatialisation des températures quotidiennes pour la période 1989-2009	121
B.IV.2.a. Similitudes dans les structures spatiales et élaboration de classes.....	122

B.IV.2.b. Spatialisation par régressions multiples basées sur la morphométrie	123
B.IV.2.c. Interprétation des régresseurs.....	126
B.IV.2.d. Interpolations géostatistiques (krigeage) des valeurs résiduelles et distributions spatiales moyennes des températures de chacune des classes	132
B.IV.3. Évaluation et comparaison des méthodes d'interpolations.....	136
B.IV.4. Relation entre les structures thermiques en Bourgogne et les structures d'échelle synoptique.....	140
Conclusions du chapitre B	142





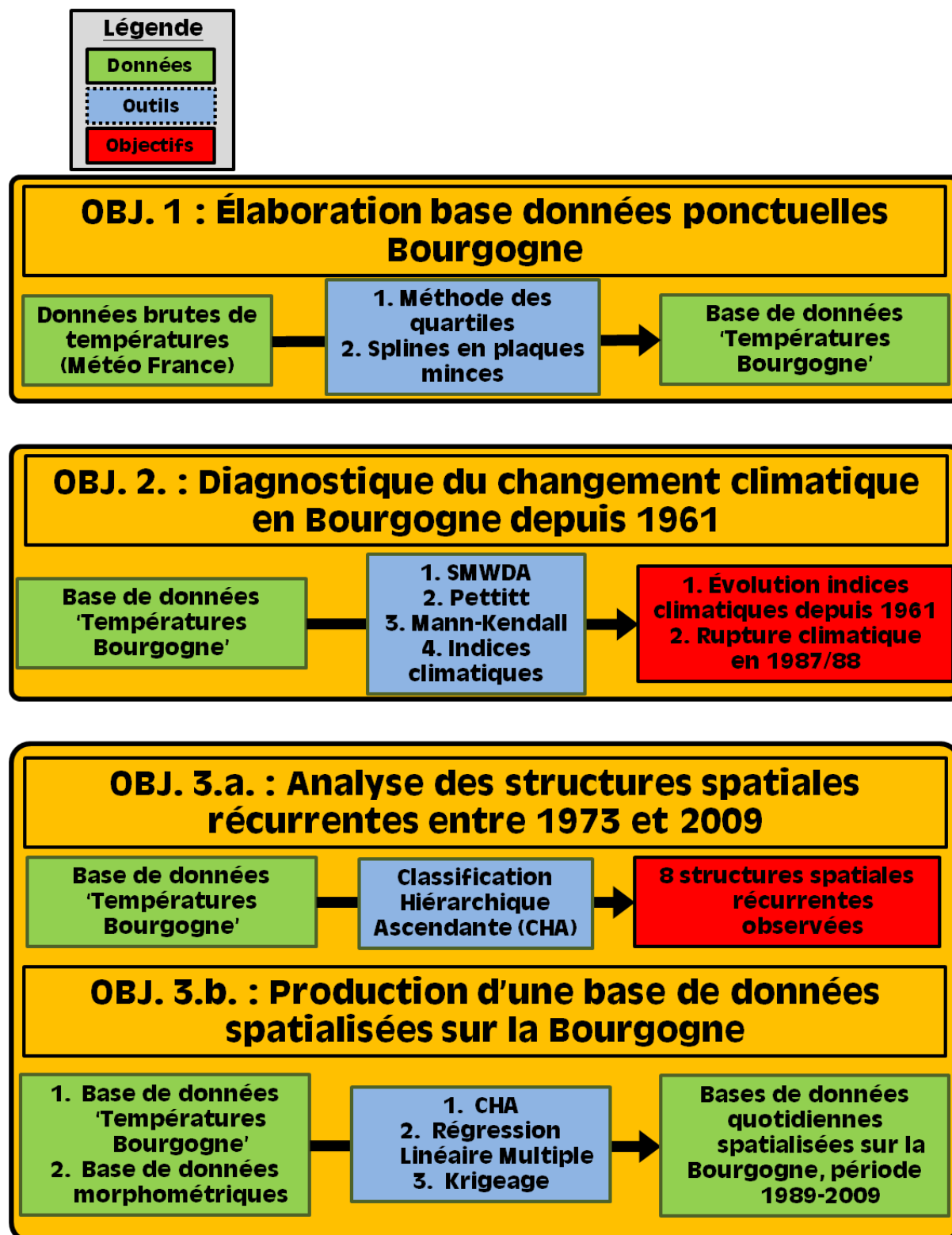


Figure B.1. Objectifs et étapes du chapitre B.



Caractériser la variabilité multi-scalaire des températures est un enjeu important, à la fois pour mieux appréhender les structures spatiotemporelles de la dynamique du climat et produire une information adaptée pour les études d'impact dans un contexte de changement climatique. Si les mesures stationnelles sont incontournables pour approcher et documenter directement ou indirectement ces éléments, il est, suivant les situations, difficile de les extrapoler aux espaces non instrumentés. Malgré de nombreuses études autour de ces questions, la complexité du travail (nature chaotique et multiples forçages et interactions entre les principaux compartiments du système climatique) fait qu'il est difficilement envisageable d'apporter une réponse « unique » à ce type de problème [Joly *et al.*, 2009 ; Joly *et al.*, 2010 ; Lloyd, 2010 ; Li and Heap, 2011 ; Joly *et al.*, 2012 ; Hengl *et al.*, 2012]. C'est la combinaison de plusieurs aspects (*e.g.* géographie et extension de la zone d'étude, grands traits du climat, niveau et qualité de l'instrumentation, variables d'intérêt et objectifs poursuivis) qui vont conditionner le type d'approche à développer et/ou mettre en œuvre. Ce chapitre a trois objectifs principaux (Figure B.1.) : 1/ **l'élaboration d'une base de données de températures** ponctuelles (minimales et maximales) quotidiennes sur la région Bourgogne ; 2/ l'analyse des évolutions de températures selon plusieurs pas de temps : annuel, mensuel et quotidien ; 3/ la **production** (et la mise à disposition aux partenaires) de **bases de données en points de grille documentant à la plus haute résolution possible les températures quotidiennes**. Après une brève introduction rappelant les grands traits du climat en Bourgogne, la première partie présente les données météorologiques, la deuxième décrit l'évolution des températures, la troisième décrit la méthodologie et les outils utilisés dans la quatrième partie qui traite de la spatialisation des températures.

B.I. BASE DE DONNÉES DE TEMPÉRATURES PONCTUELLES

L'étape initiale est l'élaboration d'une base de données et la vérification de sa qualité. Il s'agit de s'assurer que les séries couvrent une période suffisante au regard de la problématique, documentent correctement l'espace étudié et ne contiennent pas de données aberrantes ou manquantes. Concernant ce dernier point, plusieurs méthodes de détection et de remplacement de valeurs aberrantes sont utilisées. Au final, le travail aboutit à la constitution d'une base de données « Température Bourgogne » couvrant la période 1961-2009.

B.I.1. Données initiales

Les bases de données météorologiques sont issues du réseau de stations météorologiques de Météo-France. Initialement, elles comportent les données de températures minimales et maximales quotidiennes pour quatre-vingt-dix stations en Bourgogne et dans quelques départements limitrophes (Figure B.2., A). La distance minimale moyenne entre deux stations est d'environ quinze kilomètres (Figure B.2., B), les plus proches étant distantes de 2,8 kilomètres et les plus distantes de 37,3 kilomètres.

En comparant la distribution des altitudes du Modèle Numérique de Terrain (MNT) SRTM (*cf.* B.III.2.a.) avec celle des altitudes des stations (Figure B.2., C), on note une sur-représentation des basses altitudes (< 250 m) et une sous-représentation des altitudes comprises entre trois cents mètres et cinq cents mètres pour les stations. Enfin, au-delà de six cent cinquante mètres d'altitude, il n'y a plus de station, alors que le MNT montre des altitudes allant jusqu'à huit cent cinquante mètres (<0,5 % des altitudes).

La profondeur temporelle est comprise entre 1961 et 2009 (*cf.* Annexe B.1.). Chacune des séries d'observations est complète, c'est-à-dire sans donnée manquante, à partir du moment où elle débute jusqu'à la date où elle se termine. Ces séries de données peuvent parfois comporter des ruptures non climatiques. Ce problème intervient lors de changements de matériel, lors de déplacements de la station, *etc.* Il n'est pas fondamentalement contraignant lorsque l'on travaille sur les données dans leur ensemble. À l'inverse, les résultats obtenus sur des études stationnelles peuvent s'en trouver erronés. Les méthodes de corrections de séries de données ont été discutées et mises en œuvre dans de précédentes études [Alexandersson et Moberg, 1997 ; Moberg et Alexandersson, 1997 ; Mestre, 2000 ; Caussinus et Mestre, 2004]. Ces corrections sont très lourdes à mettre en œuvre et n'ont pas été réalisées pour cette thèse.

Il s'avère que certaines séries comportent des valeurs aberrantes (-10°C au lieu de +10°C ; une virgule mal placée par exemple). Ces valeurs peuvent fausser certains résultats statistiques et il est important de les identifier et de les corriger. La prochaine partie traitera de la mise en place d'une méthode de détection et de correction de ces valeurs aberrantes.

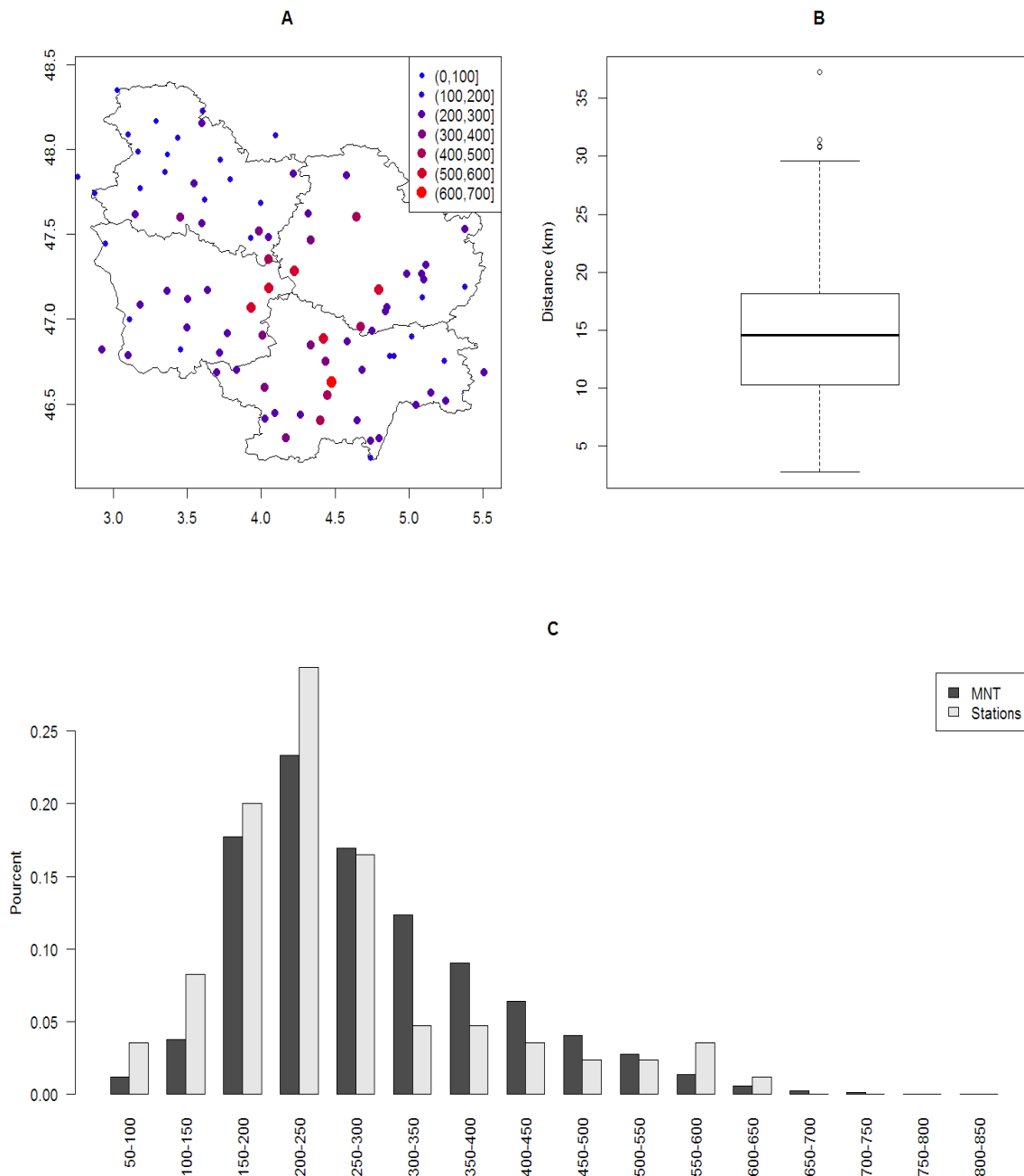


Figure B.2.. A. Répartitions des stations météorologiques et leurs altitudes ; B. Distribution statistique de la distance minimale entre deux stations. La boîte principale représente les 50 % autour de la médiane (trait horizontal épais). Les points représentent les valeurs situées au-delà de $\pm 1,58 \times$ l'écart interquartile / par la racine carré du nombre de valeurs de la série ; C. Distribution des altitudes du MNT à cinquante mètres pour la région Bourgogne (gris foncé) et du réseau de stations (gris clair).

B.I.2. Contrôles et traitements

B.I.2.A. MÉTHODE DE DÉTECTION DES VALEURS ABERRANTES

De nombreuses méthodes sont utilisées pour détecter les valeurs aberrantes. Elles reposent globalement toutes sur les mêmes principes : la relation entre le point aberrant et la distribution spatiotemporelle de la série.

Ici, la détection des valeurs aberrantes s'est faite en deux temps. Dans un premier temps, toutes les données inférieures à la moyenne moins 0,75 fois l'écart interdécile quotidien, ou supérieures à la moyenne plus 0,75 fois l'écart interdécile quotidien, sont repérées. Ces valeurs, extrêmes dans la distribution des données, ne le sont pas systématiquement spatialement. Par exemple, une station de plus haute altitude pourrait être beaucoup plus froide que les autres stations, sans que cela soit aberrant.

Ainsi, dans un second temps, les valeurs repérées sont affichées sur une carte des valeurs quotidiennes. Sur la figure B.3., deux cas de figure sont présentés : le premier cas (en haut dans la figure B.3.), pour lequel la valeur est en dehors de la distribution (supérieure à la moyenne plus 0,75 fois l'écart interdécile du jour en question), mais qui, dans la répartition spatiale, ne présente aucune aberration ; le second cas (en bas dans la figure B.3.) pour lequel trois valeurs sont considérées comme aberrantes et qui, dans la répartition spatiale, ne trouvent aucune explication et sont clairement hors de la distribution spatiale. Ici, il s'agit d'un problème de signe (l'ensemble des valeurs sont fortement négatives, sauf ces trois-là qui sont fortement positives sans raison apparente). Ainsi, pour toute valeur repérée dans la distribution, il y a eu vérification spatiale. Si la valeur est considérée comme aberrante, elle sera remplacée ou supprimée. C'est ce qui est montré dans la sous-partie suivante.

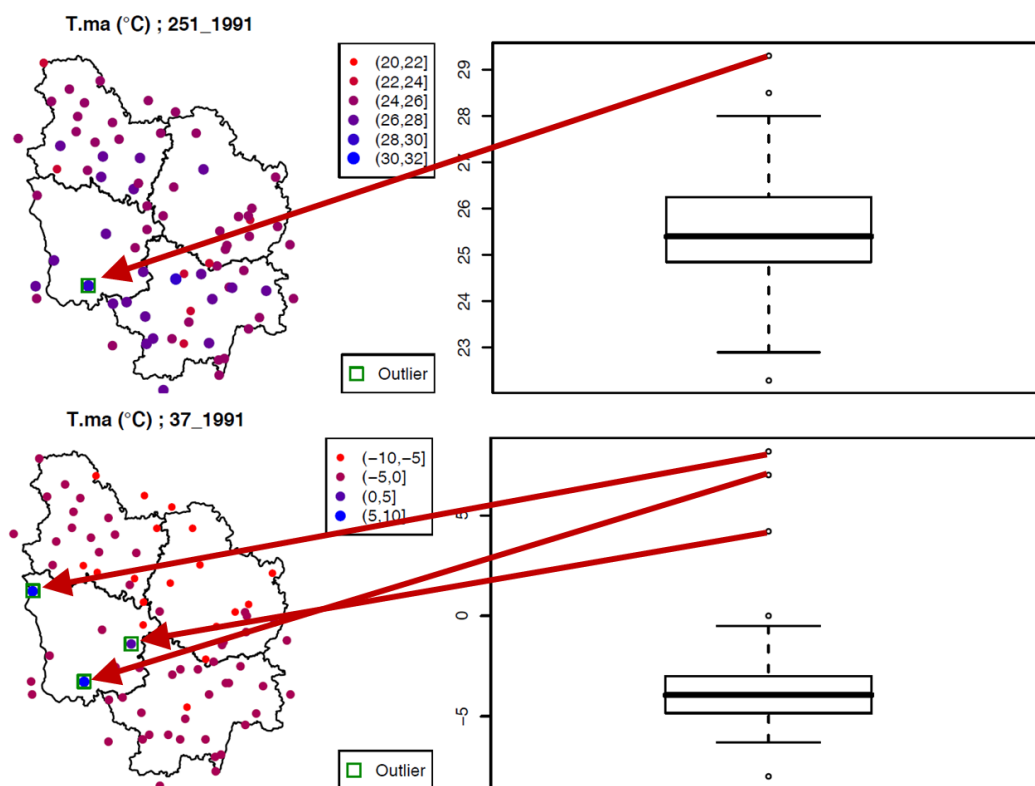


Figure B.3. Deux cas de valeurs aberrantes repérées dans la distribution des températures : en haut, la valeur détectée n'est pas spatialement aberrante ; en bas, les trois valeurs sont spatialement aberrantes.

B.I.2.B. MÉTHODE DE REMPLACEMENT/SUPPRESSION DES DONNÉES

Pour cinq séries, le taux de valeurs aberrantes était trop important : elles ont été supprimées de la base de données qui comporte désormais quatre-vingt-cinq séries. Le taux de données aberrantes dans les autres séries, inférieur à 1 % par série, nous permet de les remplacer sans modifier de façon drastique les caractéristiques de la série. Pour remplacer la valeur, celle-ci est ôtée du jeu de données puis remplacée par la valeur interpolée aux coordonnées de la station. La méthode d'interpolation retenue pour reconstruire les séries est la méthode des splines en plaque mince [Hijmans *et al.*, 2005 ; Li and Heap, 2011 – cf. chapitre B.III.2.c.]. Cette méthode a été choisie car elle est celle qui minimise au mieux l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre la valeur observée et celle estimée (Tableau et encadré B.1.).

Au total, deux cent quatre-vingt-huit valeurs pour les Tn et sept cent quarante-six valeurs pour les Tx ont été corrigées, soit 0.06 % de la base de données initiale. Une base de données «Température Bourgogne» a été créée, comportant sept fichiers : les données brutes (Tn et Tx), les données avec *outliers* (Tn et Tx), les données corrigées (Tn et Tx) et les coordonnées/altitudes des stations d'observations.

Méthode	RMSE
IDWA	1.371
Krig	1.367
Co-Kr	1.368
Spline	1.327

Evaluation des performances des méthodes d'interpolations : Pour estimer l'erreur de la méthode pour un jour donné, 75% des stations servent à initialiser le modèle et les 25% restant servent à évaluer l'estimation, ceci en ne gardant que les jours ayant une cohérence spatiale des températures (résidus faibles). Les estimations aux points des 25% restants sont comparées aux observations à ces mêmes points. Comparée à l'Inverse Distance, le Krigeage et le Co-Krigeage, c'est celle-ci qui a donné les scores de RMSE les plus faibles.

Tableau B.1. Erreur quadratique moyenne pour différentes méthodes de remplacements de données aberrantes. L'encadré explique la méthode utilisée pour estimer l'erreur de chaque méthode.

Les six fichiers de données, au format texte (.txt), se présentent de la façon suivante : en colonne, le numéro du poste climatique, l'année d'enregistrement puis les trois cent soixante-cinq jours de l'année (notons que les 29 février ont systématiquement été supprimés), le tout classé en ligne, par les années, puis par les numéros de stations. Les températures sont exprimées en degrés Celsius.

Pour s'assurer que les séries issues des stations sont cohérentes entre elles, chaque série a été comparée aux quatre-vingt-quatre autres séries (Figure B.4.). Toutes les valeurs de r^2 sont supérieures à 0.8, ce qui signe une très forte cohérence temporelle entre les séries. À noter que cette corrélation est portée par le cycle annuel.

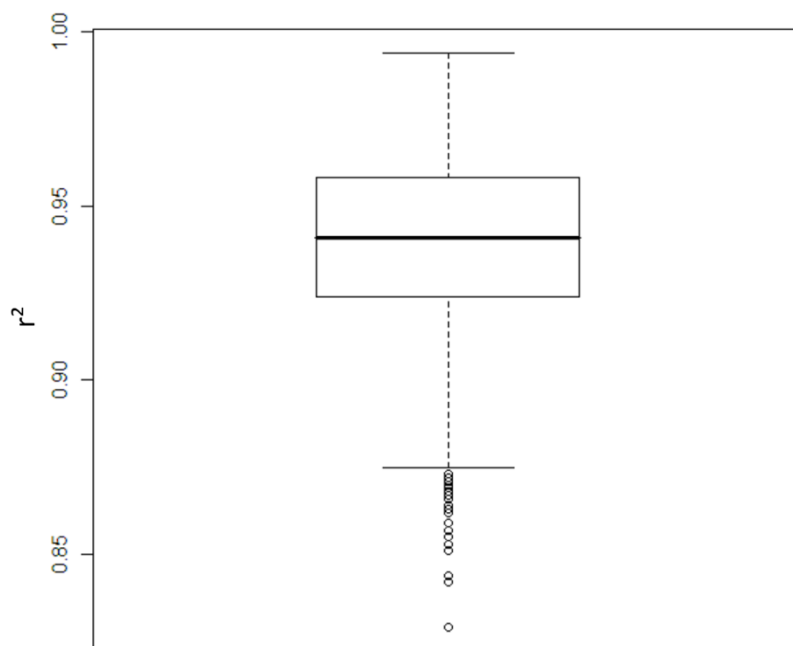


Figure B.4. Distribution statistique des corrélations entre les quatre-vingt-cinq stations (~7 000 comparaisons).

C'est à partir de la base de données corrigée que l'analyse de l'évolution en Bourgogne des températures sur les cinquante dernières années a été conduite.

B.II. ÉTUDE DES ÉVOLUTIONS DE TEMPÉRATURES EN BOURGOGNE

L'objectif est de diagnostiquer les évolutions de températures observées en Bourgogne entre 1961 et 2009. Cela passe par une recherche de tendance(s) ou de rupture(s) faite successivement aux pas de temps annuel (B.II.2.a.), saisonnier (B.II.2.b.) et quotidien (B.II.2.c.), permettant d'apprécier les principales caractéristiques du changement de température observé. L'échelle spatiale est étudiée en partie B.II.3.

B.II.1. Recherche de ruptures ou/et de tendances : présentation des outils mobilisés

La recherche de tendances et de ruptures a été réalisée à l'aide de trois tests statistiques : Mann-Kendall, Pettitt et Split Moving Window Dissimilarity Analysis (SMWDA).

B.II.1.A. TEST DE MANN-KENDALL (1945)

Ce test non paramétrique permet de caractériser une tendance ou un saut abrupt. Il est basé sur la corrélation entre les rangs d'une série chronologique et leur ordre. L'hypothèse nulle est qu'il n'y a pas de tendance. Pour chaque paire de valeurs y_i et y_j , où $i > j$, on teste si $y_i > y_j$ (P) ou si $y_i < y_j$ (M). La statistique est égale à la somme de la différence de rang de deux observations, c'est-à-dire $S = P - M$. La significativité d'une tendance peut être testée en comparant les valeurs standardisées U avec la variable de test au niveau de signification désiré [Kendall, 1975 ; Önöz et Bayazik, 2003 ; Hamed, 2008]. Pour la courbe directe, ce procédé est utilisé en partant du début de la série. Pour la courbe rétrograde, il est appliqué en partant de la fin de la série [Moron, 1994].

B.II.1.B. TEST DE PETTITT (1979)

Ce test non paramétrique est dérivé du test de Mann-Kendall. Il consiste à découper la série principale de N éléments en deux sous-séries à chaque instant t compris entre 1 et $N-1$. La série principale présente une rupture à l'instant t si les deux sous-séries ont des distributions différentes [Kingumbi *et al.*, 2000]. L'hypothèse nulle est la non-rupture [Paturel *et al.*, 1998].

B.II.1.C. TEST DE LA SPLIT MOVING WINDOW DISSIMILARITY ANALYSIS (1973)

Le principe s'appuie sur le découpage de deux fenêtres temporelles consécutives de taille identique dans la série et d'en comparer les moyennes. On identifie

graphiquement la date d'une rupture potentielle. Plusieurs tailles de fenêtres peuvent être utilisées simultanément en fonction de la longueur temporelle de la série à étudier [Kemp *et al.*, 1994].

B.II.2. Évolutions observées

B.II.2.A. ÉVOLUTIONS DES MOYENNES ANNUELLES

Les moyennes annuelles sont calculées pour chacune des stations, pour Tn et Tx respectivement. La moyenne des quatre-vingt-cinq séries est ensuite effectuée pour produire un signal régional. Pour une meilleure approche et dans le but de comparer les Tn et les Tx, les anomalies annuelles sont calculées, c'est-à-dire que la moyenne globale de la période 1961-2009 a été soustraite à chaque moyenne annuelle.

La répartition des années froides/chaudes montre un réchauffement sur cette période, et ce quelle que soit la variable (Figure B.5.). Les dernières années « froides », à savoir où la température fut inférieure à la moyenne 1961-2009, sont positionnées au milieu des années 1980. Réciproquement, la grande majorité des années « chaudes » se situe à partir de 1988. L'année 2003, remarquée notamment pour ses vagues de chaleur en juin et août, est clairement « hors catégorie » pour les Tx, mais ne l'est pas en ce qui concerne les Tn. À l'inverse, l'année 1994 est exceptionnellement chaude pour les Tn mais par pour les Tx.

La question que l'on se pose désormais est la suivante : si l'augmentation des températures semble évidente, a-t-elle été régulière, progressive, sur l'ensemble de la période 1961-2009 ? Une partie de la réponse à cette question est obtenue en calculant les régressions linéaires pour les Tn et Tx sur la période considérée et indépendamment pour chacune des séries. Ici, la valeur de la pente obtenue est multipliée par le nombre d'années de la série pour obtenir une valeur estimée du changement de température. Ces valeurs sont, pour la majorité, situées entre 0,3°C et 1,8°C pour les Tn et entre 0,7°C et 2°C pour les Tx (Figure B.6., A). Les températures maximales semblent s'être réchauffées plus fortement que les Tn (+0,3°C sur la médiane et +1°C sur les valeurs extrêmes maximales). De plus, les valeurs maximales sont supérieures à 1,8°C pour les Tn (dernier quartile) et supérieures à 2°C (dernier quartile) pour les Tx. Quelques séries montrent une tendance au refroidissement, mais, comme le montre la figure B.6. (C), ces séries sont souvent des séries courtes et donc potentiellement plus sensibles aux années situées à leurs extrémités. Il est intéressant de voir que, globalement, plus la série est longue, plus le réchauffement est avéré, mais qu'au-delà de trente ans, les valeurs de changement restent stables. Ce résultat suggère que le changement pourrait ne pas avoir été constant dans le temps.

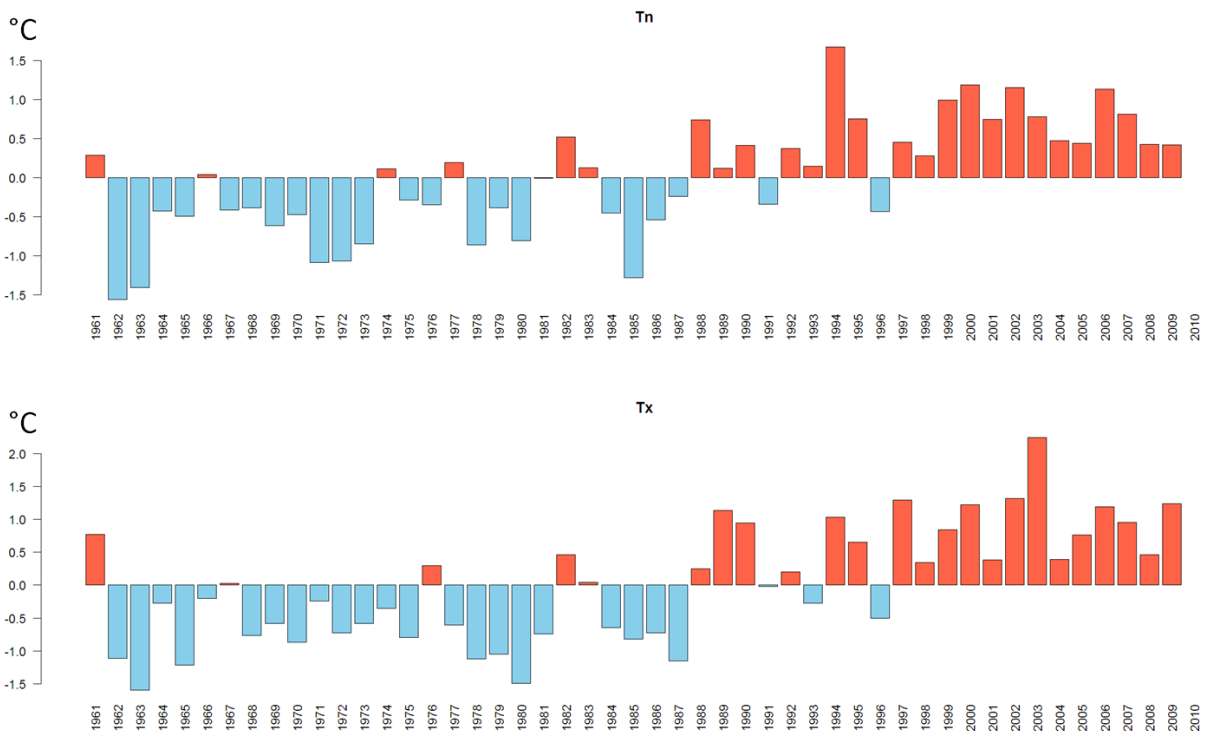


Figure B.5. Anomalies (base 1961-2009) des températures (Tn et Tx) annuelles moyennes sur la Bourgogne (1961-2009). Les barres bleues indiquent que la température annuelle est en dessous de la moyenne de la période 1961-2009 (années « froides »), les barres rouges indiquent que la température annuelle est au-dessus de la période 1961-2009 (années « chaudes »).

L'utilisation de la régression linéaire pour décrire le réchauffement des températures est fortement critiquable au regard des performances des modèles (Figure B.6., B). Les r^2 associés sont, pour 75 % des quatre-vingt-cinq séries, inférieurs à 0,4, c'est-à-dire que la variabilité expliquée par un modèle linéaire simple ne représente que 40 % de la variabilité totale. Ce résultat appuie une fois de plus le fait que le réchauffement n'a pas été régulier sur la période 1961-2009 et qu'il est nécessaire de faire une recherche plus approfondie de possibles ruptures de tendances, comme la figure B.5. le laisse penser.

Afin de chercher de possibles ruptures dans les séries de températures, nous leur appliquons successivement les trois tests statistiques présentés précédemment. Ces tests sont appliqués aux séries d'anomalies annuelles de températures minimales, maximales et moyennes. La stationnarité des températures pour les séries ayant une profondeur temporelle supérieure à trente ans oblige à orienter la recherche vers les séries plus longues, à savoir trente-cinq années ou plus (quarante-sept stations).

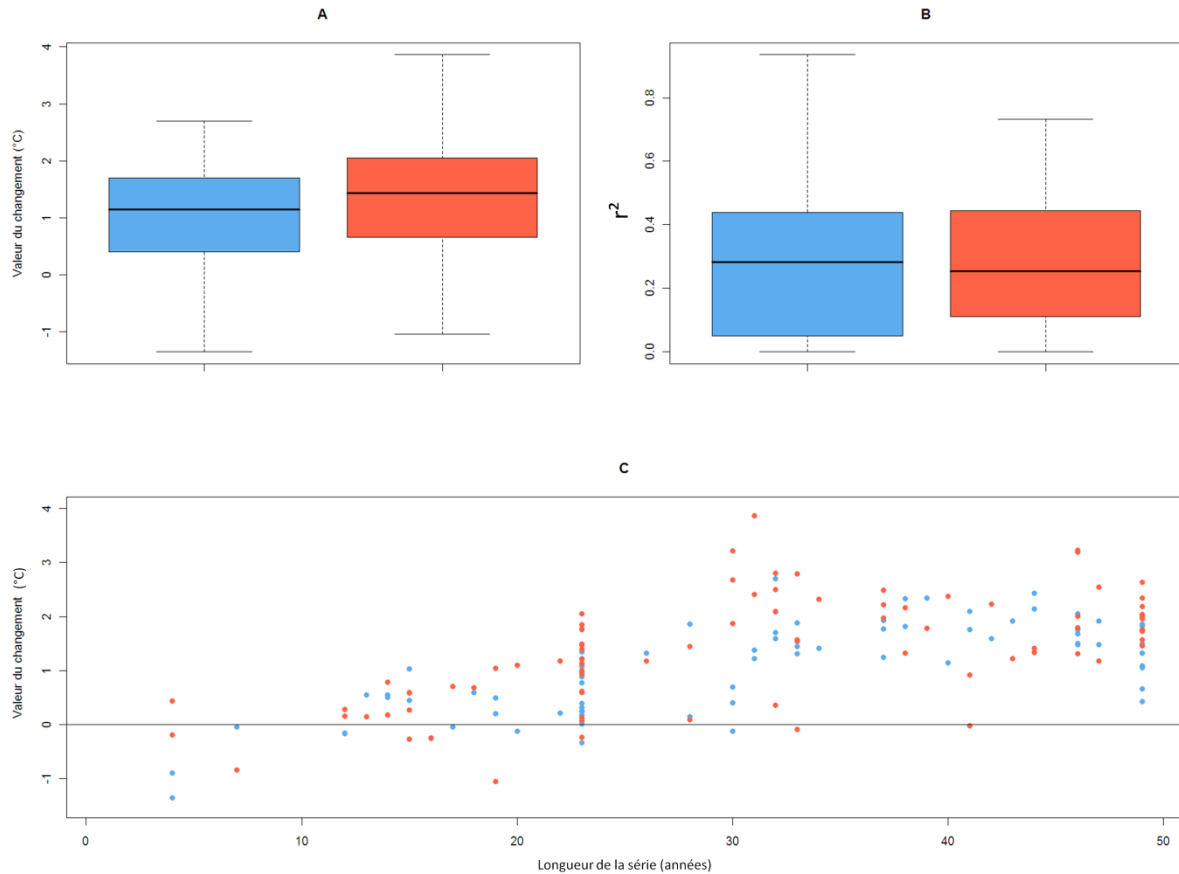


Figure B.6. Variations de températures et longueurs de séries. A : distribution statistique de l'augmentation des températures annuelles calculées à partir des coefficients de régressions linéaires (°C) pour l'ensemble des quatre-vingt-cinq séries de Tn (bleu) et Tx (rouge) ; B : coefficient de détermination calculé entre les modèles de régressions linéaires et les valeurs mesurées pour les Tn (bleu) et les Tx (rouge) ; C : valeurs de la variation de la température (°C) en fonction de la longueur de la série. Les points bleus représentent les Tn et les rouges les Tx.

Les résultats sont sensiblement différents pour les Tn et Tx (Figure B.7.). Pour la SMWDA, une valeur élevée signifie que la différence entre les bouts de séries des deux fenêtres est élevée. Si ce signal est fort, quelle que soit la taille de la fenêtre, il est probable qu'une anomalie, une rupture ou un groupe d'années extrêmes soient en jeu. Cependant, une valeur forte pour une petite taille de fenêtre peut simplement mettre en évidence un groupe d'années plus froides ou plus chaudes que le reste de la distribution. Ici, le signal pour les Tx est fort et significatif pour l'année 1987 pour les fenêtres quatre, huit et douze ans et pour l'année 1988 pour la fenêtre seize ans. Il y a donc systématiquement une grande différence entre les deux fenêtres lorsqu'elles sont centrées sur les années 1987 et 1988. Il est fort probable qu'une rupture ait eu lieu en 1987 ou 1988.

La forme parabolique de la courbe issue du test de Pettitt, pour les Tn, Tm et Tx, apporte une précision qui devra être confirmée par le test de Mann-Kendall : 1/ soit la série est en augmentation constante sur toute sa longueur ; 2/ soit il existe un changement soudain pour l'année où la valeur du test est minimale/maximale, c'est-

à-dire ici 1987. De plus, cette valeur obtenue pour l'année 1987 est significative à 95 %. La courbe au sens direct du test de Mann-Kendall (trait plein) montre une partie stable de 1961 à 1987, puis une partie montrant une tendance à l'augmentation après 1988 (courbe positive), confirmant la proposition 2/ faite précédemment.

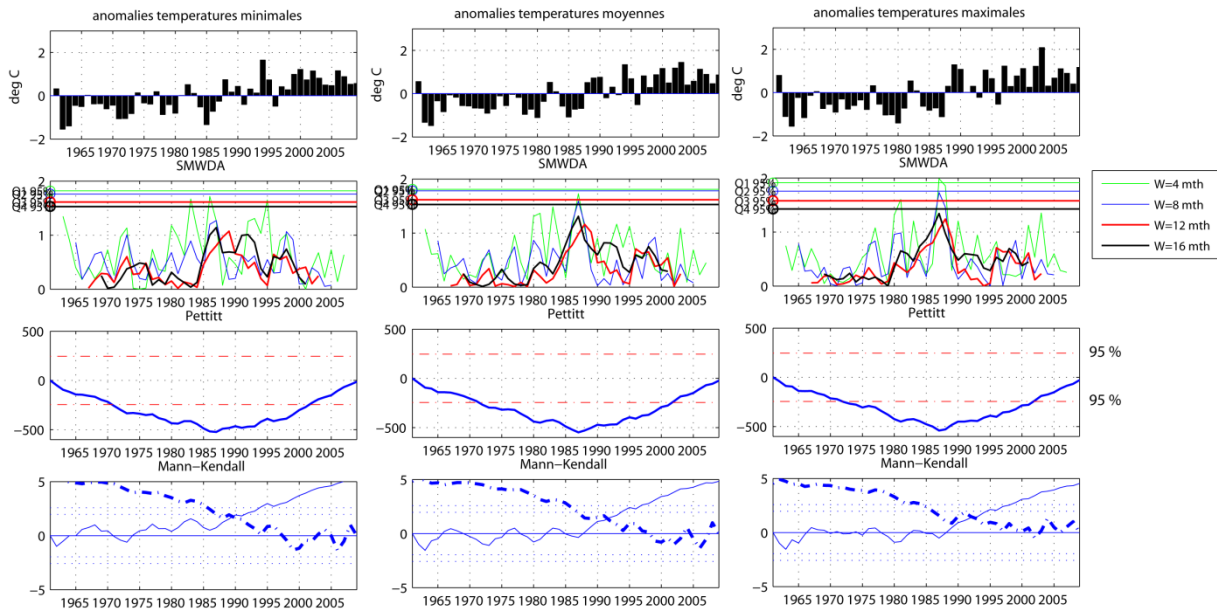


Figure B.7. Détection de ruptures dans les séries de températures annuelles. De haut en bas : a) anomalies de températures annuelles ; b) scores du test de la SMWDA pour les fenêtrages quatre (2 et 2), huit (4 et 4), douze (6 et 6) et seize (8 et 8) ans (significativité au test de Monte-Carlo) ; c) scores du test de Pettitt ; d) les scores du test de Mann-Kendall (trait plein : sens direct ; trait pointillés : sens rétrograde). De gauche à droite : températures minimales, moyennes et maximales.

Les éléments présentés par ces trois tests montrent que la série d'anomalies annuelles de températures maximales (T_x) a connu une période stable avant 1987, suivie d'une période pour laquelle la température est plus élevée et augmente.

Il est plus difficile de faire le même constat pour les T_n à partir des résultats du test SMWDA. En effet, une valeur plus élevée est observable pour l'année 1987 pour les fenêtrages huit et seize ans. Mais, d'une part cette valeur n'est pas significative, d'autre part les deux autres fenêtrages désignent deux autres années, en l'occurrence 1986 (fenêtre de quatre ans) et 1989 (fenêtre de douze ans). Cependant, le test de Pettitt montre (avec une forme de courbe parabolique) une valeur minimale pour l'année 1987. Le test de Mann-Kendall permet également d'observer une première partie avant 1986-1987 avec une légère tendance à l'augmentation qui est suivie, après 1988, d'une tendance plus marquée au réchauffement.

La courbe inverse du test de Mann-Kendall montre que la fin de la série se caractérise par une période plus stable à partir de 1997. Ce constat indique que le réchauffement observé a eu lieu essentiellement après 1987, mais avant 1997, nous laissant penser à une « rupture » dans les températures observées à partir de la fin

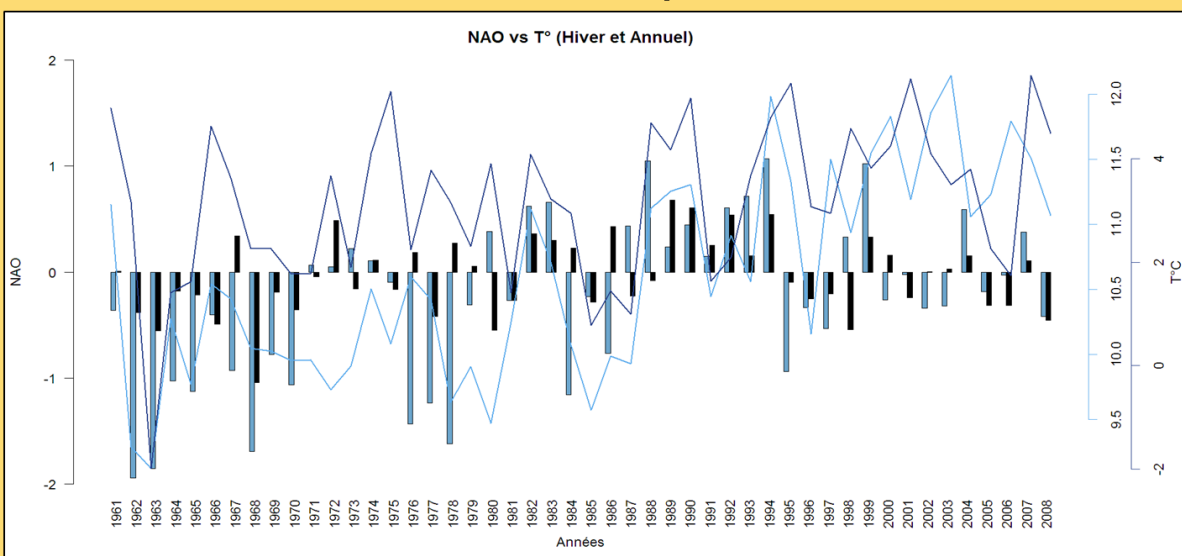
des années 1980 (1987-1988) avec une tendance à l'augmentation jusqu'en 1997 où la température semble s'être ensuite stabilisée. L'encart suivant propose une possible explication quant au déterminant de cette évolution. De plus, Sutton et Dong [2012] ont récemment montré le rôle clé de l'océan Nord Atlantique dans ce mécanisme.

Une hypothèse pour expliquer le saut de température à la fin des années 1980

La Northern Atlantic Oscillation (NAO) est l'oscillation naturelle des centres de basses et hautes pressions au niveau de l'Islande et des Açores. Cette oscillation est mesurée par un indice qui quantifie la différence de pression entre les deux centres. Concrètement, la NAO est soit négative (NAO-), soit positive (NAO+). En NAO+, les basses pressions sur l'Islande, couplées aux hautes pressions sur les Açores favorisent les flux d'ouest sur l'Europe. A l'inverse, la NAO- est souvent associée à des flux de nord. L'indice mesuré en hiver explique le mieux les températures de cette saison ($r=0,35$).

Dans les années 1960 et jusqu'à la fin des années 1970, la NAO est fortement négative, en particulier en hiver. Les températures moyennes et hivernales restent relativement basses. A la fin des années 1980, la NAO hivernale devient positive : les températures hivernales augmentent de plus de 1°C. La NAO reste positive jusqu'en 1994.

L'hypothèse est donc la suivante : la NAO- aurait inhibé le réchauffement dans les années 1960-1970 puis, le passage soudain et prolongé à une NAO+ aurait causé un bond dans les températures annuelles en Bourgogne. Par la suite, les situations de NAO- et NAO+ se succèdent sans tendance : les températures restent stables.



Les courbes représentent les températures annuelles (bleu clair) et de la moyenne saisonnière DJF (bleu foncé). Les barres représentent l'indice NAO annuel (noir) et saisonnier (DJF, bleu)

Les résultats sur les anomalies moyennes annuelles confirment ces résultats, conforté en cela par l'analyse sur les quatre-vingt-cinq stations qui, indépendamment les unes des autres, aboutissent aux mêmes conclusions.

B.II.2.B. ÉVOLUTIONS SAISONNIÈRES

Un travail similaire est accompli sur les moyennes saisonnières. Les quatre saisons ont été découpées comme suit : décembre-janvier-février (DJF, hiver), mars-avril-mai (MAM, printemps), juin-juillet-août (JJA, été) et septembre-octobre-novembre (SON, automne). Les anomalies saisonnières ont été calculées pour chacune des années, indépendamment, pour les Tn et les Tx. Elles sont présentées dans la figure B.8.

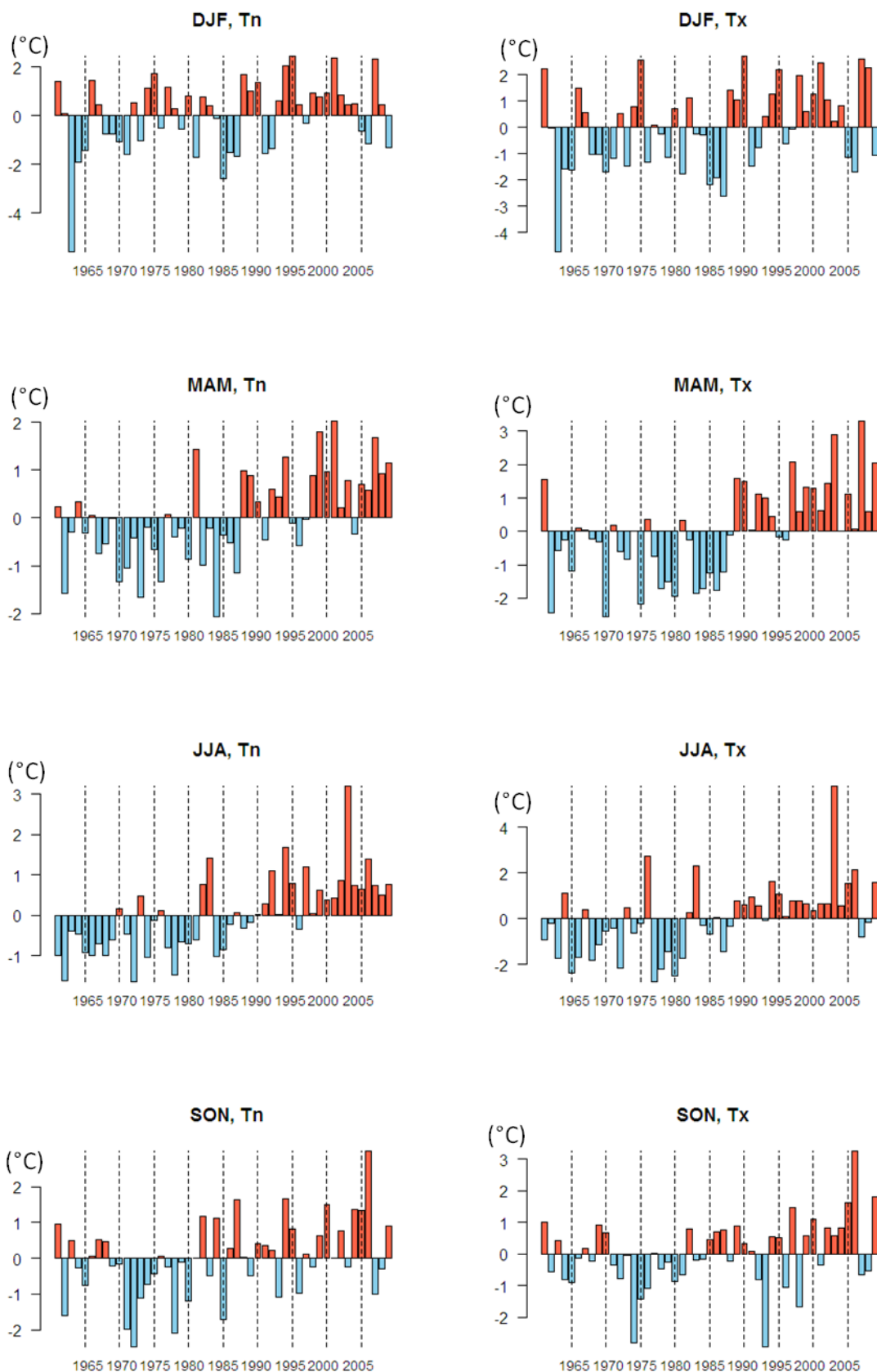


Figure B.8. Anomalies des températures (Tn et Tx) moyennes saisonnières sur la Bourgogne (1961-2009). a) hiver (DJF), b) printemps (MAM), c) été (JJA) et d) automne (SON). Les barres bleues indiquent que la température annuelle est en dessous de la moyenne de la période 1961-2009 (années « froides »), les barres rouges indiquent que la température annuelle est au-dessus de la période 1961-2009 (années « chaudes »).

En MAM et JJA, nous remarquons un profil saisonnier similaire au profil annuel (Figure B.8.). Les années le plus froides interviennent en début de période et les années chaudes en fin de période. Notons que les valeurs des anomalies saisonnières excèdent souvent celles obtenues pour les anomalies annuelles : l'amplitude du changement est plus forte pendant ces deux saisons.

Les profils des saisons d'automne (SON) et d'hiver (DJF) sont plus homogènes. On note une majorité d'années chaudes en fin de période. Néanmoins, quelques années très froides s'intercalent dans la période récente et quelques années chaudes dans la période ancienne.

B.II.2.C. ÉVOLUTIONS DES FRÉQUENCES QUOTIDIENNES DE MÉTRIQUES PLUS FINES

Le réchauffement devrait, en principe, agir sur le nombre de jours de gel. Notamment, cela devrait diminuer les gels tardifs et augmenter le nombre de jours chauds. Ces variables ont en particulier une forte incidence sur la vigne. Nous avons regardé cela à partir des séries complètes de la région Bourgogne et pour toute la période 1961-2009. Cela représente au total huit séries.

La figure B.9. montre que le nombre de jours de gel annuel a diminué significativement pour toutes les séries, de l'ordre de 40 % pour certaines. L'intérêt pour la vigne se situe également sur les gelées des mois d'avril et mai (gelées tardives) qui peuvent nuire au développement de la plante (*cf.* Chapitre A.II.2.). Le nombre de jour de gelées tardives a également diminué, allant parfois jusqu'à devenir nul certaines années (Figure B.9.). La diminution est significative pour six des huit séries (non significatif pour les stations de Châtillon-sur-Seine (21154001) et de Nevers (58160001). Le changement climatique observé induit une diminution de l'aléa des gelées tardives pour la vigne. Pour qu'il y ait diminution effective du risque, il faut s'assurer qu'une plus grande précocité des stades phénologiques, et en particulier du débourrement, ne présente pas un décalage calendaire identique à celui des dernières gelées.

Dans le chapitre A.II., il est indiqué qu'à partir de -15°C , la vigne commençait à subir des dégâts importants. L'étude de la fréquence du nombre de jours où la température minimale est inférieure à -15°C a montré que cette fréquence sur la période récente (1988-2009) est d'environ un jour par décennie, voire nulle, alors qu'avant 1988, la fréquence des jours de froid extrême était plus importante, parfois supérieure ou égale à quatre jours par an durant certaines années. Le record de jours froids est observé lors de l'année 1985 au cours de laquelle l'ensemble des huit

stations ont mesuré entre quatre et huit jours durant lesquels la température minimale était descendue en dessous des -15°C (cf. Annexe B.3.).

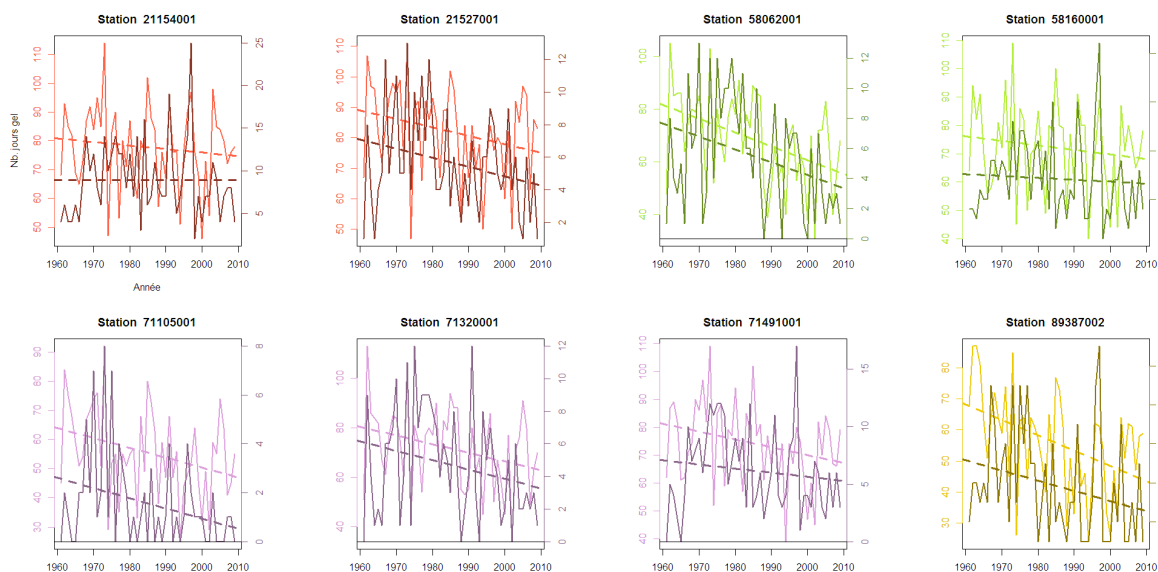


Figure B.9. Nombre de jours par an (courbes foncées) et tardifs (avril-mai, courbes claires) pour lesquels la température minimale est inférieure à 0°C , pour huit stations qui ont mesuré les températures sur l'ensemble de la période 1961-2009. En pointillés, la droite de régression correspondant à chaque courbe. Noms des stations correspondant au Code INSEE : Châtillon-sur-Seine (21154001), La Rochepot (21527001), Château-Chinon (58062001), Nevers-Marzy (58160001), Mâcon (71105001), Mont-Saint-Vincent (71320001), Saint-Yan (71491001) et Sens (89387002). Les couleurs différencient les graphiques en fonction du département d'appartenance de la station.

Pour les jours chauds ($T_x \geq 30^{\circ}\text{C}$), les huit séries enregistrent une augmentation significative de leur fréquence d'occurrences (Figure B.10.). Avant 1987, certaines stations ont, pour quelques années, jamais enregistré de température maximale de plus de 30°C . Ce n'est plus le cas depuis 1988, avec pour 2003 un nombre exceptionnel de vingt-cinq à cinquante-cinq jours au cours desquels la température a excédé 30°C .

Si les températures extrêmes ont bel et bien été impactées par le réchauffement climatique, qu'en est-il des variations de la distribution de l'ensemble des températures ? L'évolution de la distribution a été étudiée grâce aux coefficients de Kurtosis et de Skewness (cf. encadré ci-dessous). Plus précisément, pour chacune des huit stations et chaque année, une valeur de Kurtosis et de Skewness a été calculée. Pour chaque année, la valeur médiane de chacune des stations a été retenue et moyennée sur trois périodes de temps : trois, cinq et onze ans (Figure B.11.).

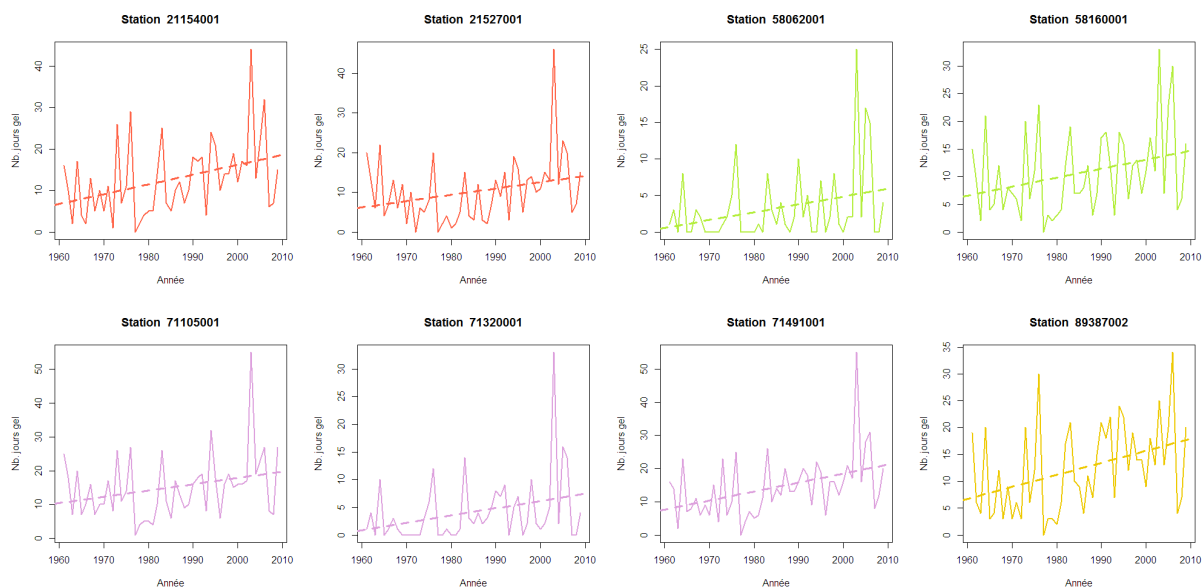
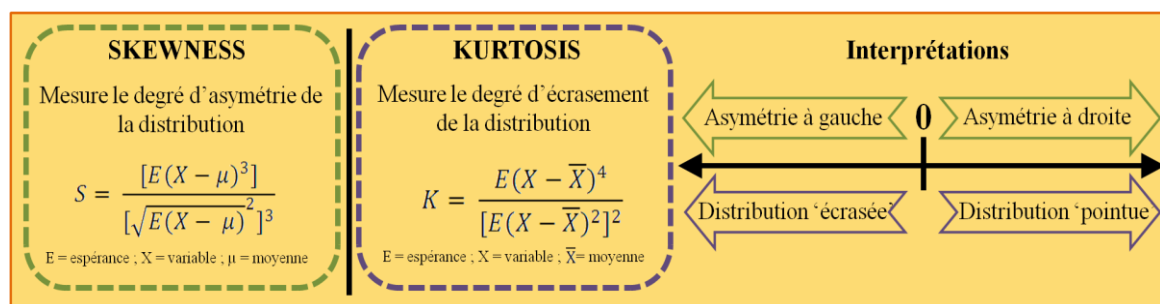


Figure B.10. Nombre de jours par an pour lesquels la température maximale est supérieure à 30°C, pour huit stations qui ont mesuré des températures sur l'ensemble de la période 1961-2009. En pointillés, la droite de régression correspondant à chaque courbe. Noms des stations correspondant au Code INSEE : Châtillon-sur-Seine (21154001), La Rochepot (21527001), Château-Chinon (58062001), Nevers-Marzy (58160001), Mâcon (71105001), Mont-Saint-Vincent (71320001), Saint-Yan (71491001) et Sens (89387002). Les couleurs différencient les graphiques en fonction du département d'appartenance de la station.

Un coefficient d'aplatissement (Kurtosis) élevé indique que la distribution est plutôt pointue en sa moyenne, avec des queues de distribution épaisses. Les valeurs de Kurtosis sont négatives pour les Tn et les Tx. Cela signifie que les séries ont des distributions plus aplaties que la courbe en cloche gaussienne. Au cours de la période 1961-2009, l'évolution des Kurtosis pour les Tx semble très faible ; celle des Tn présente deux pics (début de période et milieu des années 1980). Ces pics tendent à rapprocher le Kurtosis vers 0, c'est-à-dire d'une distribution gaussienne. Il n'y a pas de tendance nette, mais il semble que les valeurs de Kurtosis diminuent au cours du temps, du moins elles atteignent leur minimum depuis ces dernières années. Ceci ne traduit pas de tendance robuste à l'augmentation de l'occurrence des valeurs extrêmes. Pour les Tn, l'hypothèse contraire, à savoir des températures plus regroupées autour des valeurs centrales (mode, médiane et moyenne), et des extrêmes moins marquées, serait même privilégiée.



Le Skewness renseigne sur l'asymétrie de la distribution. Il existe une forte différence entre les Tn et les Tx. Les valeurs de Skewness pour les Tx oscillent autour de 0, alors que les valeurs pour les Tn sont clairement négatives, signifiant une distribution asymétrique à gauche et témoignant d'une occurrence de températures extrêmes négatives. Le Skewness pour les Tn diminue fortement au milieu des années 1980, ce qui corrobore que les froids extrêmes sont moins fréquents ces dernières années.

Le Kurtosis et le Skewness, surtout concernant les Tn, montrent qu'à la fin des années 1980, une modification dans les distributions s'est opérée. La diminution du Kurtosis et l'augmentation du Skewness montrent que l'évolution récente des températures tend à diminuer, en fréquence et en intensité, les nuits anormalement froides.

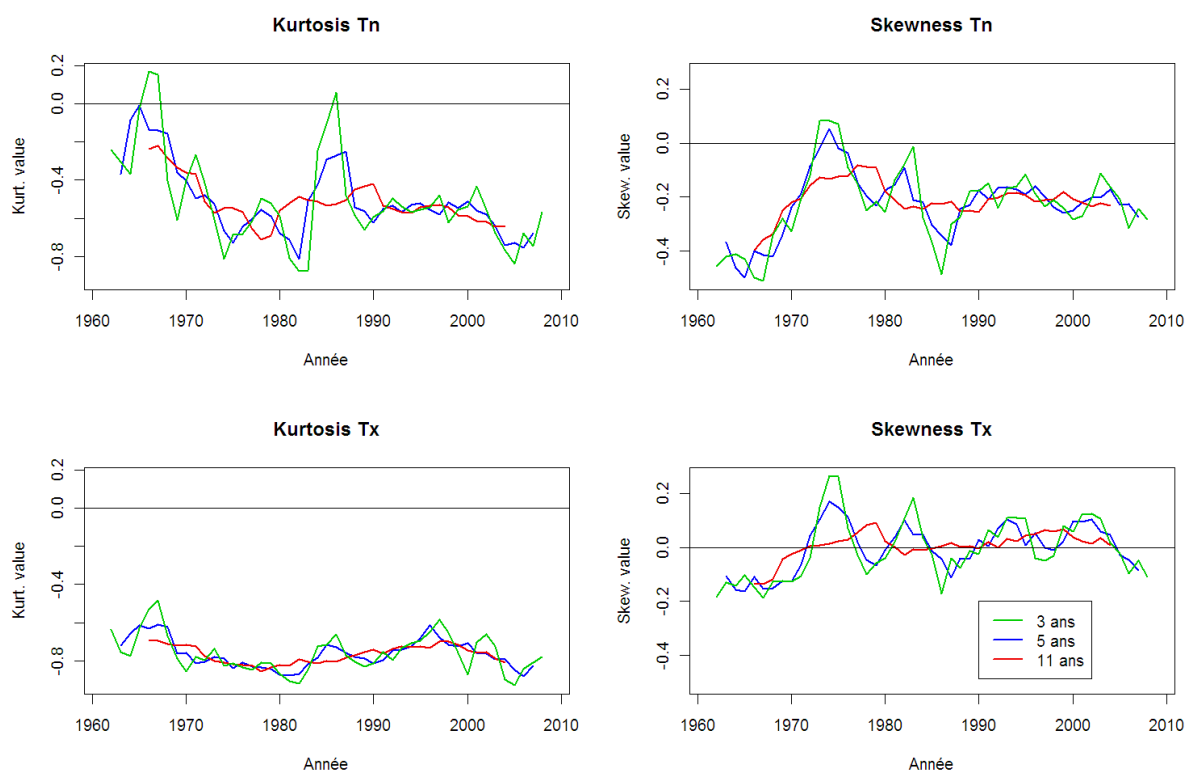


Figure B.11. Moyennes glissantes (trois, cinq, onze ans) des coefficients annuels de Kurtosis et de Skewness pour les températures minimales (Tn) et maximales (Tx).

B.II.3. NUANCES INFRARÉGIONALES

Si le réchauffement observé n'a pas été régulier sur la période 1961-2009, il n'a pas non plus été uniforme spatialement à l'échelle de la Bourgogne. Les différences entre les deux périodes (avant et après 1988) sont calculées et pour les quarante-deux stations qui présentent au minimum des mesures pour les dix années avant et les dix

années après la rupture. Notons que cette méthode de calcul est fondamentalement différente de celle utilisée dans les sous-parties B.II.2.a. et B.II.2.b.

Dans un premier temps, les moyennes annuelles sont calculées pour chacune des stations. La différence entre les deux sous-périodes est calculée en soustrayant les moyennes post et pré-rupture. Cette différence est testée grâce au test t de Student. Seules les valeurs significatives sont indiquées sur la figure B.12. Toutes les différences montrent une augmentation significative, sauf dans trois stations pour les Tn et une station pour les Tx. Les augmentations sont globalement plus fortes pour les températures maximales. On retrouve ici le réchauffement plus important des Tx, comparé aux Tn. La répartition géographique des différences est plus homogène pour les Tn que pour les Tx. Ces dernières sont plus élevées au sud-ouest et plus faibles au nord-est.

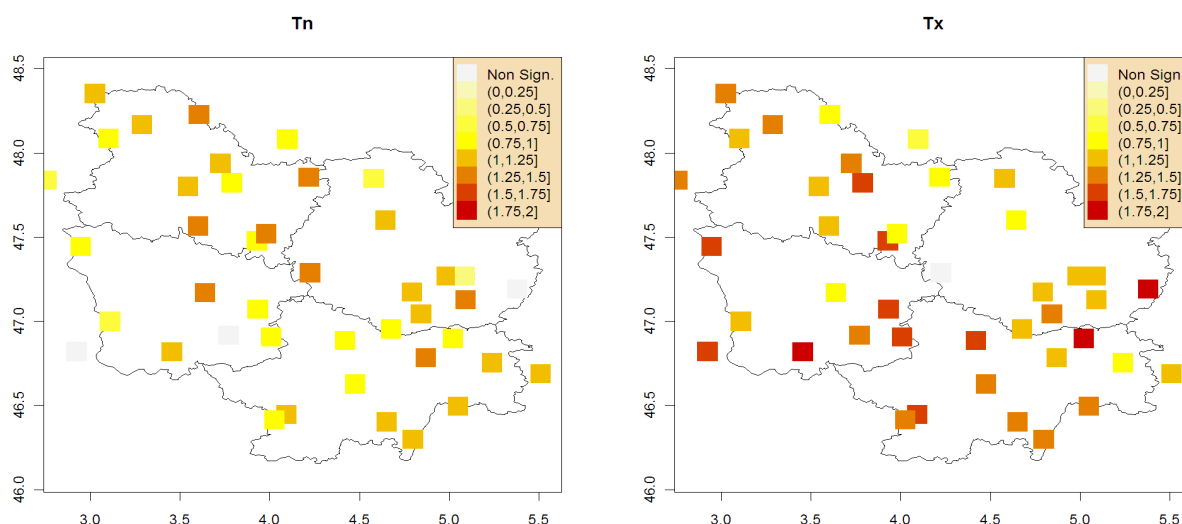


Figure B.12. Différences de températures annuelles minimales (à g.) et maximales (à d.) entre les sous-périodes 1988-2009 et 1961-1987. Chaque carré représente une valeur de différence pour une station. Les différences non significatives (Student, 95 %) sont représentées par des carrés grisés.

Les variations au pas de temps saisonnier montrent une saisonnalité de l'augmentation des températures (Figure B.13.). Comme vu précédemment, les saisons s'étant le plus réchauffées sont le printemps (MAM) et l'été (JJA). En effet, le nombre de stations ayant mesuré un changement significatif est plus élevé en MAM et en JJA que lors des saisons froides (OND et DJF). Ce nombre atteint même 100 % pour les Tx de la saison MAM. Cette saison comporte le plus de stations mesurant un réchauffement supérieur à 1,5°C. On retrouve un réchauffement moins fort des Tn. Même s'il n'apparaît pas de structure spatiale nette avec ce type de représentation, un gradient nord-est – sud-ouest du réchauffement des Tx semble se dessiner. Le réchauffement des Tn est, en revanche, plus homogène spatialement. Ces dernières constatations restent à confirmer.

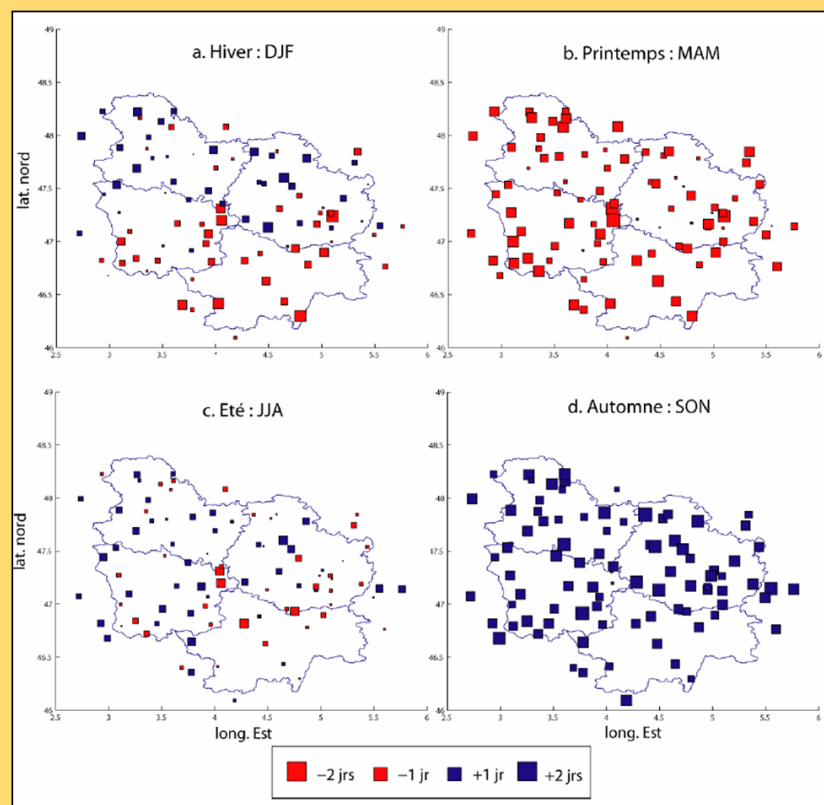
Enfin, contrairement à ce que les tendances ont montré plus haut (ce qui peut s'expliquer par la différence de méthodes utilisées pour calculer les tendances et anomalies de températures), les Tx de la saison SON ont moins augmenté. Seules quatre stations ont mesuré pour cette saison une augmentation significative. Pour les températures minimales de la saison SON, si le nombre de stations ayant mesuré une augmentation significative est plus grand que pour les Tx, l'intensité de ce réchauffement est plus faible que pour les saisons précédentes. De même, pour la saison DJF, il y a un réchauffement significatif pour la majorité des stations, plus fort pour les Tx que pour les Tn. Ces valeurs faibles de réchauffement pour les saisons SON et DJF sont en accord avec la plus grande variabilité interannuelle des températures vue dans le chapitre B.II.2.b.

L'augmentation de la température peut être liée à une augmentation de la durée d'ensoleillement et inversement, une diminution de la température maximale peut être liée à une diminution de la durée d'ensoleillement. Pour ce dernier paramètre, les données disponibles ne sont pas homogènes dans le temps notamment à cause des changements de capteurs qui ont eu lieu à la fin du XXème siècle, ce qui nous pousse à trouver d'autres indicateurs.

L'ensoleillement peut diminuer ou augmenter lorsque la nébulosité varie. Il ne pleut pas nécessairement lorsque le temps est nuageux. En Bourgogne, l'ordre de grandeur est de 10% d'heures pluvieuses et 50% d'heures nuageuses (Yves richard, CRC, communication personnelle). Nous pouvons nous poser la question suivante : une augmentation des précipitations est-elle liée à une augmentation de la nébulosité ? Si oui, cela pourrait en partie expliquer les variations de températures en automne.

D'autres hypothèses peuvent être formulées pour répondre à la question. Par exemple, une intensification des apports océaniques ou méditerranéens en automne, qui apporterait donc de l'air plus doux et plus humide sur la Bourgogne, entraînerait probablement une augmentation des précipitations. Dans ce cas, la faible diminution de température et l'augmentation des précipitations en automne ne seraient qu'indirectement liées, l'un n'étant pas la conséquence de l'autre et vice versa.

Une hypothèse pour la non augmentation des températures en SON : l'augmentation du nombre de jours de pluie



La possible structuration spatiale des variations de températures et l'hypothèse d'une augmentation du nombre de jours à nébulosité (*cf.* encadré), entre autres, nous amène à nous poser la question des structures synoptiques qui pourraient régir la répartition des températures, et de leur augmentation en Bourgogne. Pour affiner ce diagnostic, il convient maintenant de produire des champs continus et réalistes de la température.

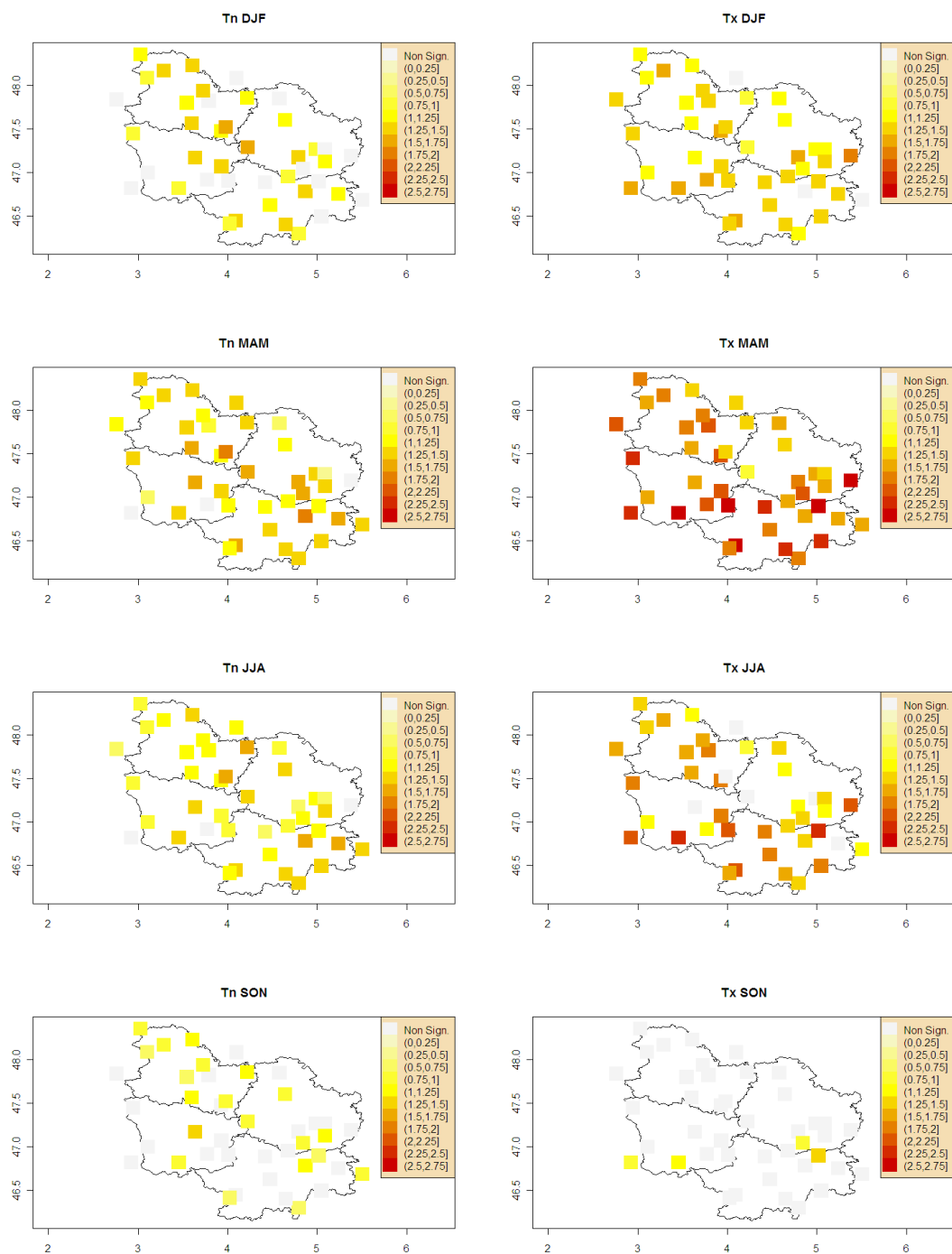


Figure B.13. Différences de températures saisonnières minimales (à g.) et maximales (à d.) entre les sous-périodes 1988-2009 et 1961-1987. Chaque carré représente une valeur de différence pour une station. Les différences non significatives (Student, 95 %) sont représentées par des carrés grisés.

B.III. SPATIALISATION DES TEMPÉRATURES EN BOURGOGNE : DÉMARCHE ET MÉTHODOLOGIE

Les données ponctuelles ont une portée très limitée lorsqu'il s'agit d'étudier les variabilités spatiales du changement climatique futur ou dans des études d'impacts comme celle de cette thèse. En outre, l'utilisation d'un modèle climatique régional (WRF, *cf.* Chapitre D.) est précédée d'une évaluation de ses performances à reproduire les températures. La comparaison directe point-maille induit des erreurs liées à la représentativité de la donnée ponctuelle. Pour répondre à cela, nous avons cherché à produire des champs de températures au pas de temps quotidien. La création de ces données s'est faite avec la volonté d'interpréter les paramètres qui entrent en compte dans la modélisation de la répartition des températures sur le territoire bourguignon. Pour cela, **la méthodologie proposée** s'articule autour de deux points : **1/ une classification des jours ayant des similarités dans la distribution spatiale des températures**, associée à **2/ une spatialisation des données classe par classe**.

Cette méthodologie recouvre **deux niveaux d'études**. Un **premier niveau qui consiste en une approche « purement » climatique** pour la **période 1973-2009** (le choix de la période est présenté en partie B.IV.1.). L'idée est ici d'analyser les variations annuelles et interannuelles de classes de températures en rapport avec le changement climatique. La spatialisation des données est ensuite effectuée à partir de la méthode des splines en plaques minces. Sur cette période, vingt-quatre stations ont mesuré des températures minimales et maximales de façon continue (Figure B.14, A).

Le deuxième niveau **visé la création de champs de températures quotidiennes spatialisées**. La spatialisation s'effectue à la maille du modèle WRF (cinq kilomètres). Elle mobilise deux jeux de données : les données de températures (ponctuelles) et les données morphométriques dérivées du MNT-SRTM (à quatre-vingt-dix mètres de résolution – <http://srtm.csi.cgiar.org/>) selon la méthode proposée par *July et al.* [2009]. Elle porte **sur la période 1989-2009**, fenêtre temporelle des données des réanalyses ERA-INTERIM disponibles au moment du travail et qui ont été utilisées pour forcer le modèle climatique régional WRF (*cf.* Chapitre D.). Pour cette période, cinquante stations ont enregistré des séries de données de façon continue sans valeur manquante. Les stations sont réparties de façon relativement homogène sur le territoire, Côte-d'Or excepté (Figure B.14., B).

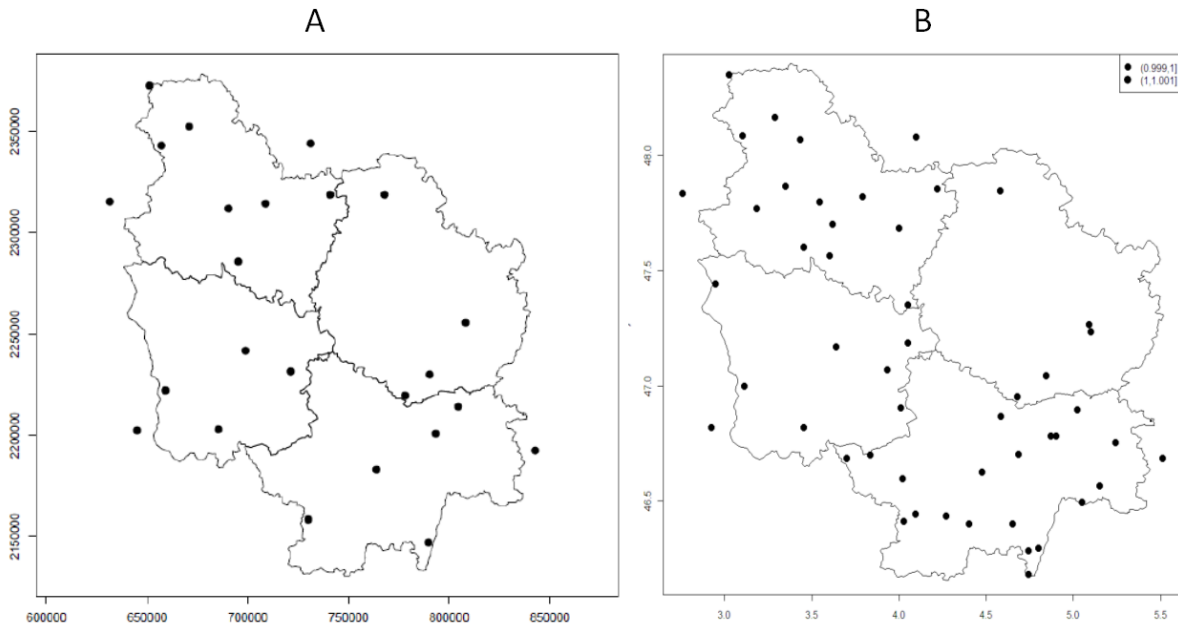


Figure B.14. Répartition des stations utilisées. A : pour la période 1973-2009 ; B : pour la période 1989-2009.

B.III.1. Démarche : recherche préalable de structures spatiales récurrentes

B.III.1.A. POURQUOI UNE TELLE APPROCHE ?

Cuccia et Bois [2010] ont montré que l'interpolation des jours pris dans leur ensemble ne permettait pas d'obtenir un résultat satisfaisant : l'erreur de l'estimation de la température est trop importante (Figure B.15.). Cela signifie que la variabilité de la répartition spatiale des températures d'un jour à l'autre est trop importante pour être interpolée à l'aide d'un modèle unique. De plus, « moyenner le climat », lisse la diversité des structures spatiales quotidiennes.

Au pas de temps mensuel, les résultats ne sont pas plus satisfaisants pour les Tn. En effet, excepté certains mois, les RMSE restent particulièrement élevées. Pour les Tx, les résultats sont meilleurs mais se dégradent pour certains mois (Tableau B.2.). La corrélation entre la température et l'altitude (Tableau B.2., colonne R(T/Z)) est très variable avec un effet altitudinal négatif « classique » sur la température quasi systématique. Certains mois (février, avril, juillet, août, septembre pour les Tn et février pour les Tx), le coefficient de corrélation est très proche de 0, voire positif. Ainsi, une station météorologique située en altitude ne sera pas systématiquement plus fraîche qu'une station située en plaine. Ceci nous amène à deux conclusions : (i) d'autres paramètres que l'altitude peuvent jouer sur la répartition spatiale des températures et (ii) il existe sans doute une variabilité très importante des structures spatiales de températures et du poids des paramètres qui les modulent. Le pas

temporel utilisé dans ce cas pour l'interpolation est trop grand pour prendre en compte cette variabilité. L'interpolation quotidienne des températures est une des voies possibles pour pallier cela [Cuccia et Bois, 2010].

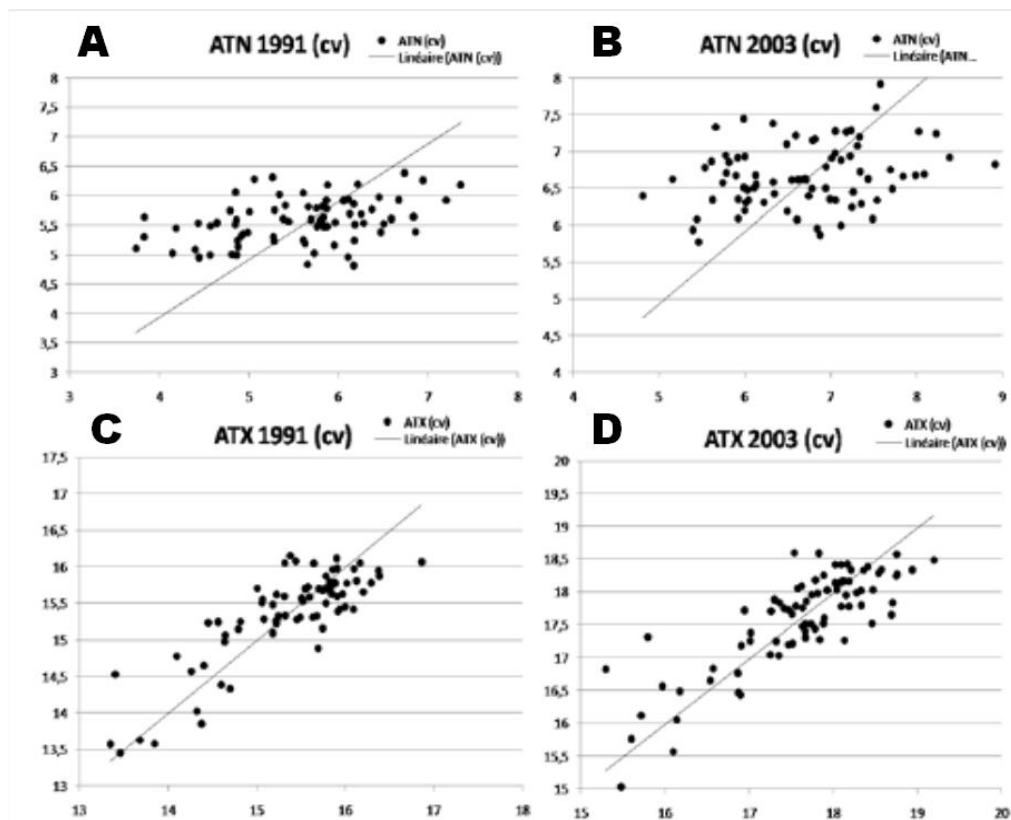


Figure B.15. Validation croisée relative aux interpolations au pas de temps annuel pour les années 1991 (Tn, A ; Tx, C) et 2003 (Tn, B ; Tx, D) [Cuccia et Bois, 2010]. Les droites matérialisent les situations pour lesquelles les estimations des températures par les modèles d'interpolation sont optimales.

En première approximation, la répartition spatiale des températures journalières d'un territoire est la résultante de processus de large échelle plus ou moins modulés par l'emboîtement complexe de processus d'échelle plus grande (*i.e.* fine), en lien notamment avec la géomorphologie du territoire. Nous avons tout d'abord cherché à identifier les principaux modes d'organisation des processus de large échelle. Pour cela, la méthode de Classification Hiérarchique Ascendante a été utilisée pour regrouper les structures spatiales récurrentes de large échelle des Tx et des Tn. C'est à partir de ce « filtrage » d'échelle que l'interpolation a été conduite par classe. Cette méthode présuppose donc qu'à l'intérieur de chaque classe c'est la modulation par les échelles plus fines (régionale à locale) qui prend le pas sur les larges échelles. À ces échelles, c'est une imbrication complexe de processus multi-scalaires qui détermine les champs des températures. Aborder directement ces éléments est difficilement envisageable, même à partir des modèles climatiques dynamiques. Pour cela, l'idée est de passer par l'intermédiaire des variables environnementales (morphométriques), tel que cela a été proposé par différents auteurs [Joly *et al.*,

2009 ; Hengl *et al.*, 2012]. En deuxième approximation, les processus (*i.e.* variables morphométriques associées) de modulation des températures (qui peuvent varier d'une classe à l'autre) sont considérés comme récurrents et stables à l'intérieur d'une classe donnée. La régression linéaire multiple sera utilisée avec les variables morphométriques comme régresseurs. Malgré le type, la finesse et le nombre des régresseurs morphométriques mobilisés, des structures locales peuvent persister. En troisième approximation, les résidus de la régression sont potentiellement porteurs d'une structure spatiale. Le krigeage ordinaire sera utilisé pour capturer cette structure résiduelle.

Tn					Tx				
Mois	N	RMSE	R ²	R(T/Z)	Mois	N	RMSE	R ²	R(T/Z)
Janvier	74	0,548	0,461	-0,444	Janvier	74	0,444	0,643	-0,606
Février	74	1,002	0,186	0,144	Février	74	1,051	0,056	-0,121
Mars	74	0,649	0,136	-0,254	Mars	74	0,416	0,739	-0,744
Avril	74	1,003	0,158	0,016	Avril	74	0,509	0,736	-0,841
Mai	74	1,122	0,294	-0,128	Mai	74	0,681	0,613	-0,636
Juin	74	0,597	0,648	-0,239	Juin	74	0,524	0,841	-0,407
Juillet	74	0,917	0,366	-0,055	Juillet	74	0,656	0,700	-0,437
Août	74	1,320	0,268	0,219	Août	74	0,654	0,571	-0,485
Septembre	74	0,936	0,209	0,103	Septembre	74	0,546	0,670	-0,658
Octobre	74	0,705	0,093	-0,189	Octobre	74	0,448	0,772	-0,880
Novembre	74	0,440	0,370	-0,569	Novembre	74	0,415	0,692	-0,709
Décembre	74	0,667	0,240	-0,193	Décembre	74	0,542	0,739	-0,358

Tableau B.2. Validation croisée pour les interpolations au pas de temps mensuel pour l'année 1991. Les parties gauche et droite du tableau présentent respectivement les résultats pour les Tn et les Tx. N : nombre de stations utilisées, RMSE : erreur moyenne quadratique de la validation croisée ; R² : coefficient de détermination entre les températures mesurées et les températures estimées ; R (T/Z) : coefficient de corrélation (R de Pearson) entre l'altitude et la température mesurée.

B.III.1.B. L'OUTIL DE CLASSIFICATION UTILISÉ : LA CLASSIFICATION HIÉRARCHIQUE ASCENDANTE (CHA)

La Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) permet de regrouper des individus et des ensembles d'individus ayant des similarités (spatiales dans notre cas). Elle a récemment été utilisée avec succès pour classer des données de précipitations journalières [Munoz-Diaz et Rodrigo, 2006 ; Crédat *et al.*, 2010]. L'idée est de rechercher à partir de la population que constituent les X jours de la période, sur les Y stations, une répartition en classes cohérentes qui puisse être interprétée.

La méthode consiste à créer une séquence emboîtée de partitions à partir d'une matrice de dissimilarité. À chaque étape, les n objets (ici les X jours) sont fusionnés en groupes de taille de plus en plus importante [Gong et Richman, 1995]. La CHA produit des séries de partitions Pn, Pn-1, ...P1 des données avec Pn qui correspond ici

à X classes d'objets uniques (*i.e.* 1 jour) et P1 à un groupe unique comprenant l'ensemble des X jours.

Une fois la matrice des distances euclidiennes calculée à partir de la matrice des anomalies journalières de températures de dimension X jours*Y stations, la procédure consiste à regrouper les classes selon l'algorithme de Ward en minimisant, à chaque étape, le carré des différences interclasses [Kalkstein *et al.*, 1987 ; Osswald et Martin, 2005]. Une fois la procédure terminée, on peut tracer un arbre de classification (*i.e.* construction d'un dendrogramme, figure B.16.) à partir duquel le choix du nombre de classes est réalisé par fixation d'un seuil de distance interclasse. À noter que ce choix n'est pas exempt de subjectivité. Cet arbre représente l'historique des relations (entre les individus) calculées par la CHA.

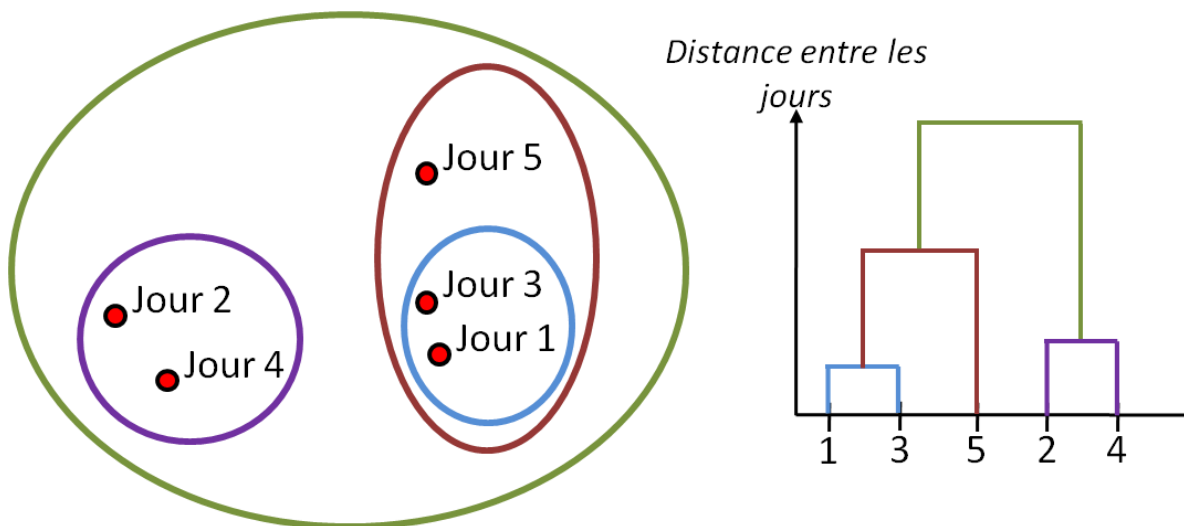


Figure B.16. Construction d'un dendrogramme. La CHA regroupe d'abord les jours 1 et 3 puis 2 et 4. Le jour 5 est regroupé avec la classe « 1 et 3 », puis la classe « 1, 3 et 5 » est regroupée avec la classe « 2 et 4 » [Cuccia et Bois, 2010].

Pour éliminer la variabilité saisonnière et ainsi éviter d'obtenir des classes dépendant essentiellement de l'amplitude annuelle des températures (par exemple, une classe « jours froids » et une classe « jours chauds »), la CHA se fera sur les anomalies spatiales quotidiennes, c'est-à-dire que, pour chaque jour, la moyenne spatiale de la température est retranchée aux valeurs mesurées à la station. On centre ainsi la moyenne spatiale à 0, rendant tous les moyennes des jours identiques (nulle), tout en laissant apparaître l'intensité de l'amplitude spatiale des températures.

Les températures des jours contenus dans les classes résultantes de cette CHA vont, comme dit précédemment, être interpolées. Les différentes méthodes d'interpolations qui sont utilisées dans cette thèse sont présentées dans la partie suivante.

B.III.2. Méthodes d'interpolation

B.III.2.A. PRISE EN COMPTE DE LA MORPHOMÉTRIE AVEC UNE RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE

La base des variables environnementales est dérivée d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Nous avons utilisé dans ce travail le MNT-SRTM (à quatre-vingt-dix mètres de résolution – <http://srtm.csi.cgiar.org/>) ré-échantillonné à une résolution de cinquante mètres. Onze variables ont été calculées à partir du MNT de la méthode développée par Joly *et al.* [2009]. Outre la pente, l'orientation et l'encaissement, la méthode permet de calculer les propriétés plus fines du terrain que sont : la rugosité, le rayonnement global théorique, l'ampleur des creux et des bosses, la longueur de la partie aval et l'orientation des versants exprimée par son sinus et son cosinus (*cf.* Annexe B.2.).

Les onze variables sont calculées pour sept fenêtres. La taille de la maille est de cinquante mètres quelle que soit la taille de la fenêtre. Les fenêtrages vont de trois mailles par trois mailles (3*3) à cent cinquante mailles par cent cinquante mailles (150*150). Par exemple, la fenêtre 3*3 signifie que la moyenne de carrés de trois mailles sur trois (soit neuf pixels en tout) est calculée et rapportée à la maille centrale du carré de 3*3. Le nombre de paramètres à différents fenêtrages à disposition est égal à soixante-deux. L'intérêt des fenêtrages est d'apprécier l'impact des différents paramètres environnementaux à plusieurs échelles spatiales et de répondre aux questions de type : *l'effet de l'altitude est-il d'échelle locale ou de large échelle ?*

Ces variables sont proposées comme prédicteurs dans le cadre de régressions linéaires multiples. La régression linéaire est une des méthodes les plus simples pour interpoler des variables. Ici, elle permet de poser une relation simple et linéaire entre la température (Y) et un paramètre environnemental (x) selon (éq. B.1.), où a et b sont les coefficients affectés à chaque paramètre :

$$Y = ax + b \quad (\text{éq. B.1})$$

La régression linéaire multiple concerne les équations composées de plusieurs paramètres (éq. B.2., ici trois paramètres : x, y, z) :

$$Y = ax + by + cz + d \quad (\text{éq. B.2})$$

Les résidus (écart entre $Y_{obs} - Y_{lm}$) sont finalement analysés par la méthode du krigeage.

B.III.2.B. LE KRIGEAGE

La première étape du krigeage est la construction d'un semi-variogramme. Ce graphique permet la mise en évidence d'éléments importants dans la relation entre les valeurs moyennes de la variance calculées (semi-variance) entre les couples des stations et la distance. Un exemple de semi-variogramme expérimental est présenté par la figure B.17. Plus la valeur de semi-variance est élevée, plus les valeurs de la variable entre les couples de stations, pour une distance donnée, sont dissimilaires (*i.e.* corrélation spatiale faible).

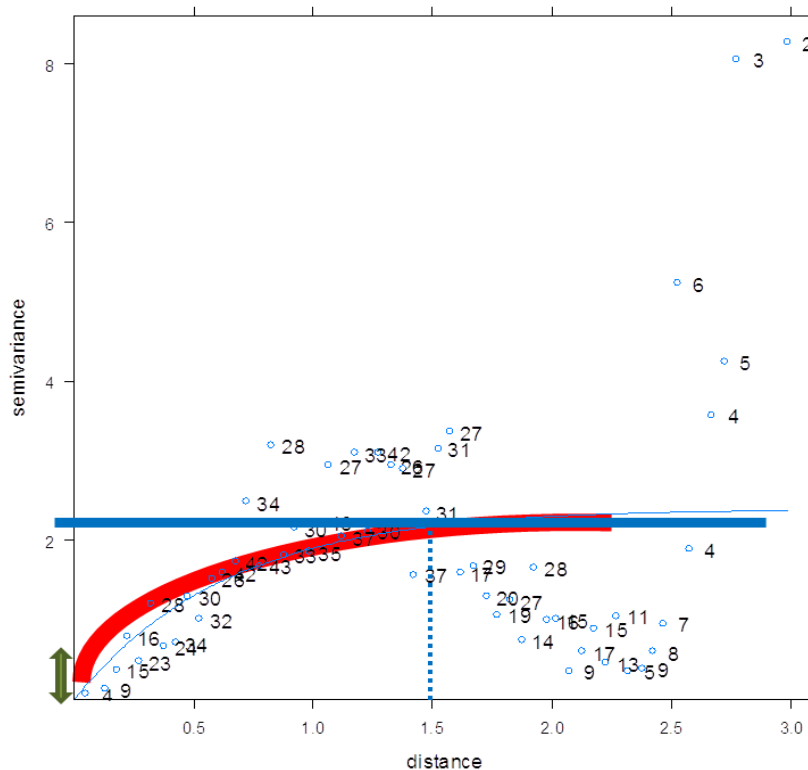


Figure B.17. Exemple de semi-variogramme. À chaque point est associé le nombre de couples utilisés pour calculer la semi-variance. La double flèche verte indique l'effet pépité ; la courbe bleue indique le seuil ; la courbe rouge indique la forme du graphique. Ici, la distance (abscisses) est en degrés.

Trois éléments permettent de définir la corrélation spatiale : la forme de la relation (Figure B.17., tracé rouge), l'effet pépité (Figure B.17., flèche verte) et le plateau (Figure B.17., droite bleue). La forme du graphique définit si la relation évolue de façon linéaire, logarithmique ou exponentielle avec la distance. L'effet pépité est la valeur incompressible de la semi-variance qui existe en dessous d'un certain périmètre pour lequel nous n'avons pas de données. En général, si cet effet pépité est supérieur à un tiers du seuil, on considère que le krigeage comportera trop d'erreurs. Le plateau permet de définir la distance ou portée à partir de laquelle la relation n'évolue plus (indépendance de la semi-variance avec la distance). D'autre part, il

permet de s'assurer de la stationnarité qui est indispensable à l'application du krigeage ordinaire.

C'est à partir du modèle qui est ajusté au semi-variogramme expérimental que les poids qui serviront à l'interpolation spatiale par le krigeage seront calculés. Cette approche est largement utilisée pour l'interpolation de données climatiques et environnementales [Hengl *et al.*, 2007 ; Lloyd, 2010 ; Li et Heap, 2011].

B.III.2.C. LES SPLINES EN PLAQUES MINCES

La méthode des splines en plaques minces est une technique d'interpolation déterministe, localement stochastique [Boer *et al.*, 2001], qui consiste à appliquer une suite de fonctions polynomiales f reliant des points expérimentaux, sur un intervalle à deux dimensions, et de les implémenter pour obtenir une surface en trois dimensions [Hartkamp *et al.*, 2001]. Elle est l'équivalent mathématique de l'application d'une longue règle flexible à une série de points de données. Elle est définie comme suit (éq. B.3) :

$$z_i = f(x_i) + \varepsilon_i \quad (\text{éq. B. 3})$$

où x_i = coordonnées du point d'estimation i ; z_i = valeur au point i ; ε_i = erreur aléatoire (mesure + modèle splines).

Cette technique permet également de prendre en compte les relations avec des variables environnementales, comme l'occupation des sols ou l'altitude par exemple. Dans notre étude, les splines sont ajustées pour respecter au mieux la relation, si elle existe, entre la température et l'altitude.

B.IV. Résultats

Comme introduit en début de partie B.III., les analyses s'appuient sur deux études distinctes et portent sur deux jeux de données différents :

- les premières (B.IV.1.) privilégient la profondeur temporelle (1973-2009) en intégrant des années antérieures et postérieures à la rupture de 1987-1988 (cf. B.II.). Ce choix se fait au détriment de la densité de stations (vingt-quatre). Sur ce jeu de données, la stratégie d'interpolation mise en œuvre s'appuie sur les splines en plaques minces ;
- les secondes (B.IV.2.) s'appuient sur un plus grand nombre de stations (cinquante), mais portent sur une période plus restreinte (1989-2009) située exclusivement après la rupture climatique identifiée en B.II. Sur ce jeu de données, la stratégie d'interpolation mise en œuvre s'appuie sur l'enchaînement régression linéaire multiple-krigeage.

Dans les deux cas, une CHA est préalablement effectuée (cf. B.III.1.b.). Dans une dernière rubrique (B.IV.3.), des comparaisons permettent d'évaluer les performances des différentes méthodes mises en œuvre. Enfin, une analyse des concordances temporelles entre la classification sur la période 1989-2009 et les types de configurations synoptiques est proposée en partie B.IV.4.

B.IV.1. Étude climatique sur la période 1973-2009

Benichou [1985] a été l'un des premiers à montrer que des structures spatiales d'échelle synoptique pouvaient être récurrentes. Depuis, la thématique des régimes de temps s'est considérablement développée. La question posée dans cette partie relève d'une échelle différente : existe-t-il des structures spatiales de températures de surface qui soient récurrentes en Bourgogne ? Si oui, quelles sont leurs fréquences d'occurrences et en quoi le changement climatique a-t-il pu affecter ces fréquences ? Comme précisé en partie B.III., les structures récurrentes ont été recherchées à l'aide d'une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA). Notons que cette partie a pour unique but de quantifier et de qualifier l'impact du changement climatique sur les structures récurrentes au cours de la période 1973-2009.

B.IV.1.A MISE EN ÉVIDENCE DE STRUCTURES SPATIALES DE TEMPÉRATURES (1973-2009)

Les rubriques précédentes de la partie B.II. attestent d'un réchauffement à l'échelle de la Bourgogne. Des caractéristiques saisonnières, ainsi que diurnes (différences entre maximales diurnes et minimales nocturnes), ont été identifiées. L'ultime

rubrique dédiée à la caractérisation du réchauffement va s'attacher à ses éventuelles variations dans l'espace. Le réchauffement est-il homogène à l'échelle de la Bourgogne ? Et s'il ne l'est pas, quelles sont ses structures spatiales ? Rechercher des structures spatiales sur un temps long exige à la fois densité du réseau et longues séries. Ces deux exigences sont diamétralement opposées. La période 1973-2009 permet de disposer de quinze années précédant la rupture de 1987-1988 et de vingt-deux années après.

Les vingt-quatre stations sont réparties sur un espace de plus de trente mille kilomètres carrés. Chaque station est supposée représenter mille à mille cinq cents kilomètres carrés. Cela reviendrait à des mailles de trente à quarante kilomètres de côté.

La CHA regroupe entre eux les jours pour lesquels la répartition des températures est similaire. Appliquée sur l'ensemble des jours de la série, elle nous permet d'obtenir un certain nombre de patterns spatiaux récurrents. Nous pouvons ainsi identifier les fréquences d'occurrence des structures spatiales de températures et comment elles ont évolué en analysant les différences entre les périodes 1988-2009 (vingt-deux ans) et 1973-1987 (quinze ans).

Dans la partie B.III.1.b. nous avons mentionné que la variabilité saisonnière des températures (alternance de jours froids en hiver et chauds en été) peut influencer et biaiser les résultats de la méthode de classification. Ainsi pour chaque jour, la moyenne spatiale des vingt-quatre stations est calculée puis retranchée à chacune des valeurs de températures mesurées aux stations. Tous les jours sont comparables entre eux, sans pour autant perdre l'amplitude thermique spatiale quotidienne.

La CHA est appliquée aux trois cent soixante-cinq jours sur trente-sept années, soit un total de treize mille cinq cent cinquante jours. Elle crée ainsi, aux extrêmes, treize mille cinq cent cinquante classes d'objets uniques et une classe contenant treize mille cinq cent cinquante objets. Entre les deux et en se basant sur l'algorithme de Ward, une série de partitions est produite de façon à ce que le carré des différences interclasses soit minimisé [Kalkstein *et al.*, 1987 ; Osswald et Martin, 2005].

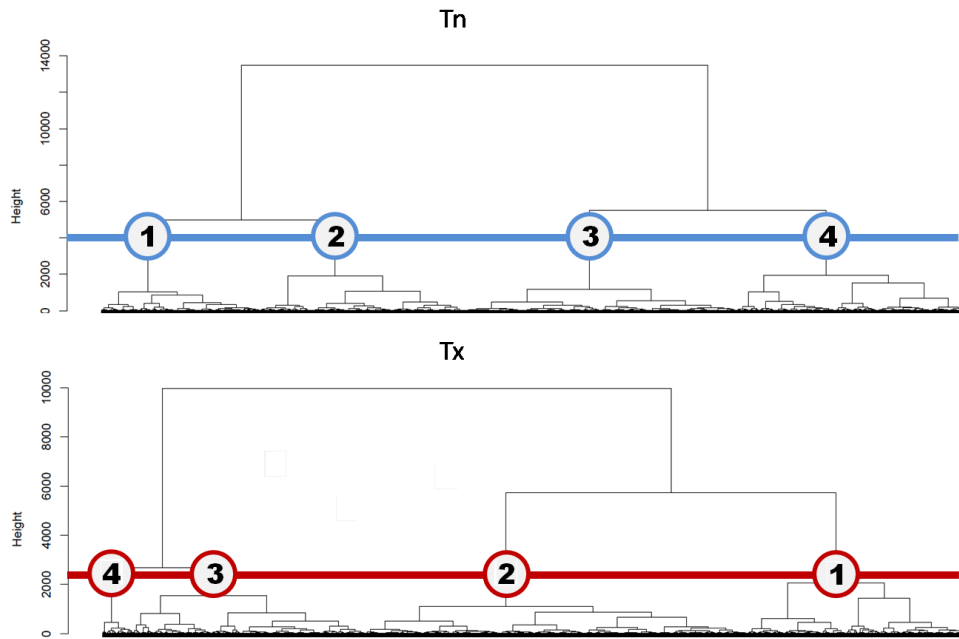


Figure B.18. Dendrogrammes construits par la CHA à partir des répartitions quotidiennes des températures minimales (en h.) et maximales (en b.). La ligne horizontale représente la valeur de seuil retenue pour l'obtention des classes. Les numéros, présents à chaque intersection entre la ligne horizontale et une branche du dendrogramme, identifient chacune des classes.

Une fois la procédure terminée, le dendrogramme est tracé (Figure B.18.). Sur ce dendrogramme, chaque saut indique l'introduction d'une partition supplémentaire. Plus le saut est grand, plus la différenciation entre les classes précédant le saut et la nouvelle qui est créée est élevée. À partir de ce dendrogramme, un seuil de différenciation est fixé. Ce seuil est choisi en fonction des sauts et de la différenciation entre les classes. Concrètement, le choix doit être un compromis entre un saut important et un nombre de classes peu élevé. Cependant, il demeure important de s'assurer de ne pas laisser de côté une classe dont l'effectif serait faible alors que l'intérêt de la classe peut être élevé (par exemple : cas des inversions thermiques).

Pour les températures minimales, le choix est évident. Deux sauts importants sont observables : le premier donne deux classes, le second quatre classes. En fixant le seuil à 4 000, quatre classes (Figure B.18., haut) sont retenues. La répartition du nombre de jours par classe est relativement homogène (Figure B.19.), la classe 3 comportant 30 % des jours et la classe 1 18 % des jours.

Le choix pour les températures maximales est plus délicat. Si le choix de trois classes semble le plus approprié, une étude plus approfondie à quatre classes montre que la création de la quatrième classe met en évidence une classe importante d'un point de vue climatique (inversion thermique), même si elle est peu représentée (Figure B.19.). Le seuil de 2 300 a été retenu pour quatre classes.

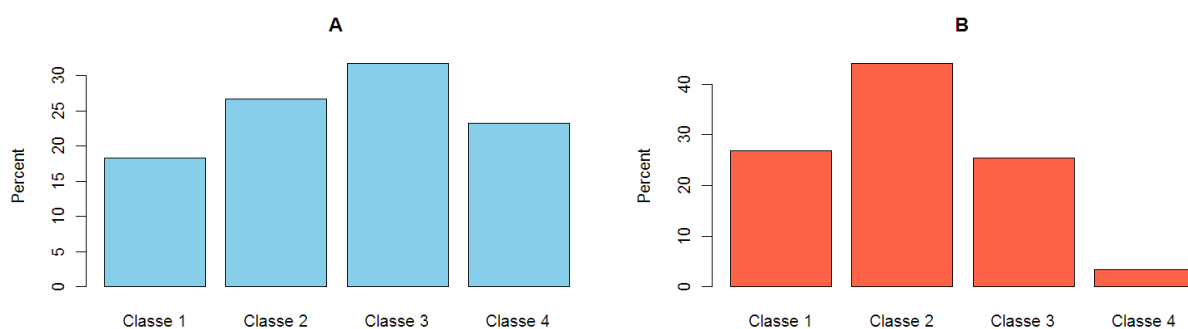


Figure B.19. Fréquence d'occurrence des classes de Tn (A) et des Tx (B) parmi les jours de la période 1973-2009.

B.IV.1.B. LES STRUCTURES SPATIALES

Ces quatre classes représentent chacune une structure spatiale récurrente de températures (respectivement pour Tn et Tx) que l'on considère être déterminée par la large échelle (*i.e.* régimes de temps). Pour chaque classe, nous avons calculé la moyenne stationnelle à partir des anomalies de températures calculées auparavant, c'est-à-dire la moyenne de l'ensemble des jours pour une classe et une station données. Le fait de travailler sur des anomalies permet de pouvoir apprécier les amplitudes entre le minimum et le maximum de température de chaque classe. Ainsi, les amplitudes représentées d'une classe à l'autre sont comparables entre elles. Les moyennes pour chacune des stations et chacune des classes sont interpolées sur une grille de un kilomètre de résolution par la méthode des splines en plaques minces (Figure B.20.).

Pour les Tn, la première classe présente un gradient nord-ouest – sud-est. À l'inverse, la classe 2 présente un gradient sud-est – nord-ouest. Les températures de la classe 3 sont plus froides en altitude et plus élevées en plaine, selon un gradient classique. Enfin, la classe 4 présente des températures maximales en altitude et des températures minimales en plaine de Saône, signalant la présence d'inversions thermiques de large échelle.

Pour les Tx, nous pouvons définir les mêmes classes : classe 1, gradient sud-est – nord-ouest ; classe 2, gradient altitudinal classique ; classe 3, gradient nord-ouest – sud-est et la classe 4 qui ressemble à un cas d'inversion thermique avec un très fort gradient sud-est – nord-ouest.

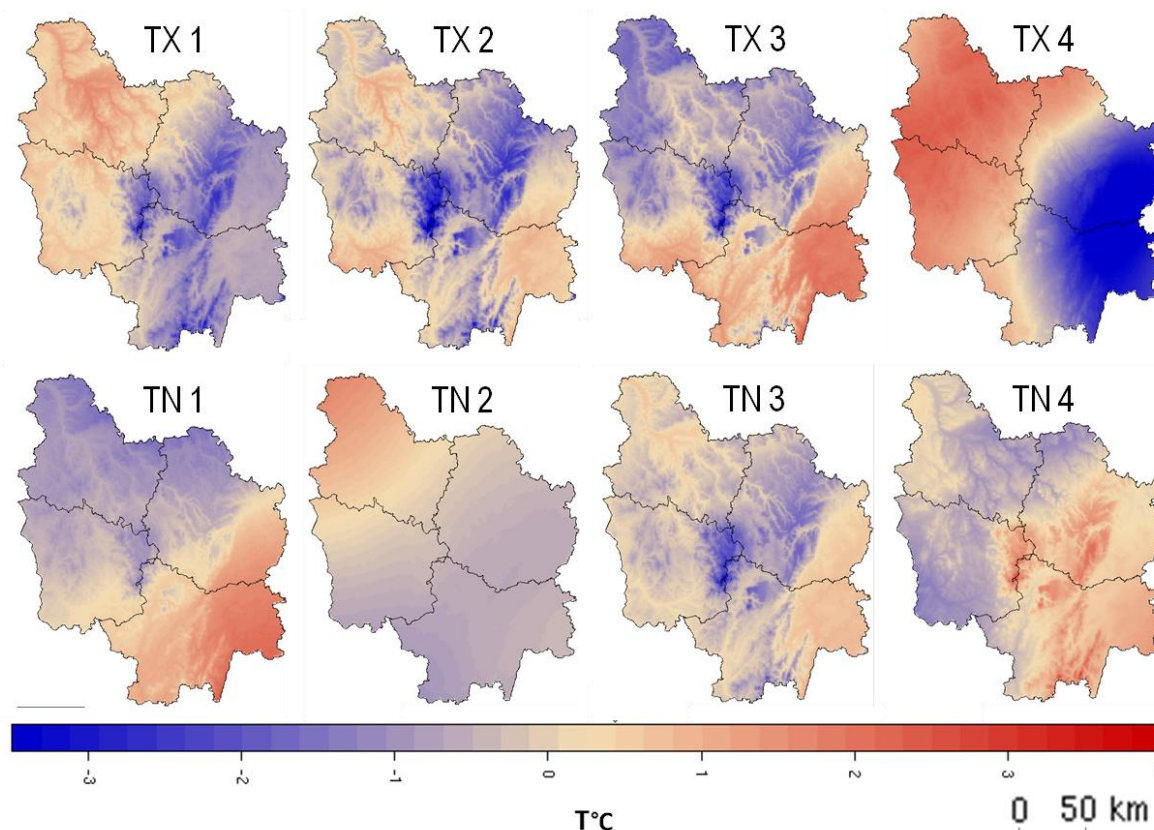


Figure B.20. Structures spatiales moyennes interpolées par classe. a) Tx, b) Tn.

Afin d'apprécier la robustesse de ces classes, il est important d'étudier la variabilité intra-classe. Idéalement, une station située dans une zone fraîche devrait être plus fraîche pour tous les jours d'une classe donnée et ce n'est que l'intensité de la « fraîcheur » de la station qui varierait en fonction du jour. Pour évaluer cela, nous calculons l'écart-type pour chacune des stations pour l'ensemble des jours appartenant à la même classe. Nous obtenons ainsi une valeur d'écart-type par station et par classe. De la même manière que pour les moyennes des classes, nous interpolons ces valeurs d'écart-type par la méthode des splines en plaques minces à la résolution de un kilomètre (Figure B. 21.). L'encadré donne une idée de l'interprétation que l'on peut avoir sur les cartes d'écart-type.

Globalement, les valeurs d'écart-type sont comprises entre 0.5 et 2°C pour les Tn et entre 0.5 et 3°C pour les Tx. Pour les deux variables, la répartition spatiale et l'intensité des écarts-types sont différents en fonction des classes et renseignent sur le niveau de confiance associé à chaque classe.

Pour les Tn, les valeurs le plus faibles sont observées pour la classe 3 (gradient altitudinal classique). La variabilité interne de la classe 3 est relativement faible. Il subsiste un gradient nord-sud de l'écart-type, qui indique que les stations au sud tendent à varier plus fortement que celles situées au nord. Un gradient similaire est

observé pour la classe 2, dont les valeurs sont plus élevées que celles des autres classes. La structure spatiale des écarts-types peut laisser penser à une modification du gradient qui pourrait être sud-est – nord-ouest ou est-ouest. Le nord-ouest de la région est en moyenne plus chaud que le reste de la région. Les valeurs de la classe 1 sont réparties de façon homogène sur le territoire et sont comprises entre 1 et 1,5°C. Enfin, la classe 4 a des valeurs plus élevées sur les zones d'altitudes de l'est bourguignon. Il pourrait s'agir d'une variation d'intensité des inversions thermiques en plaine de Saône et sur les hauteurs de la Côte.

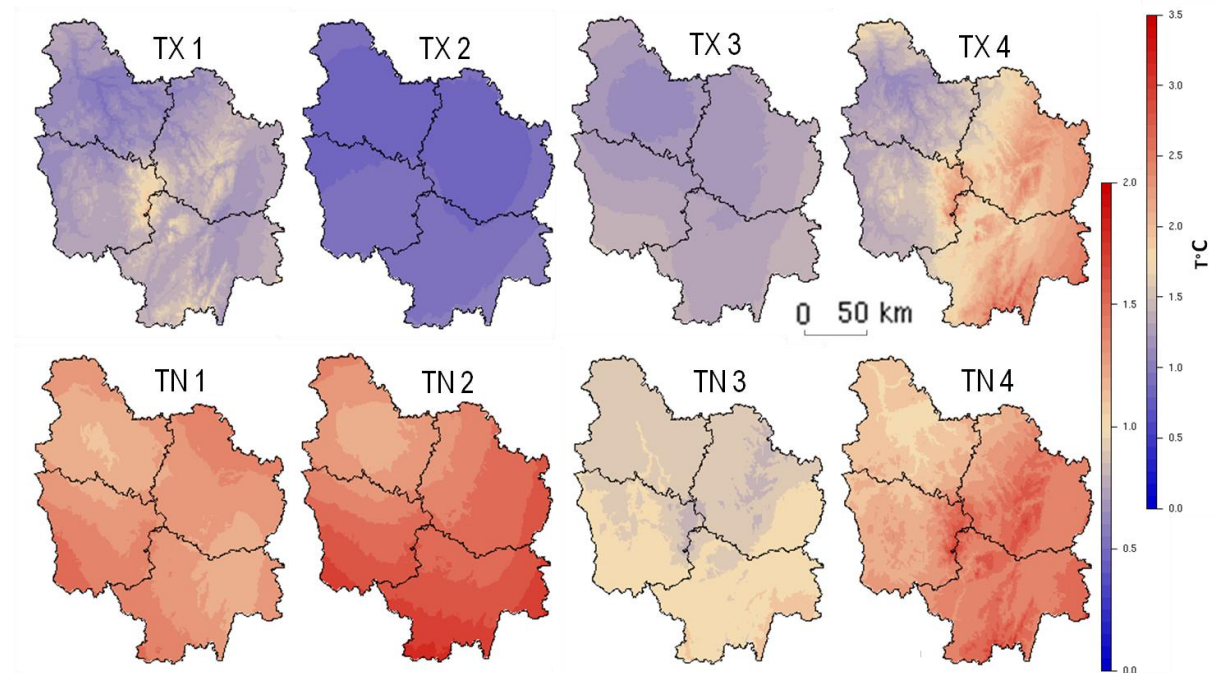


Figure B.21. Variabilité spatiale des écarts-types calculés aux stations pour chacune des classes de Tn et de Tx puis interpolés.

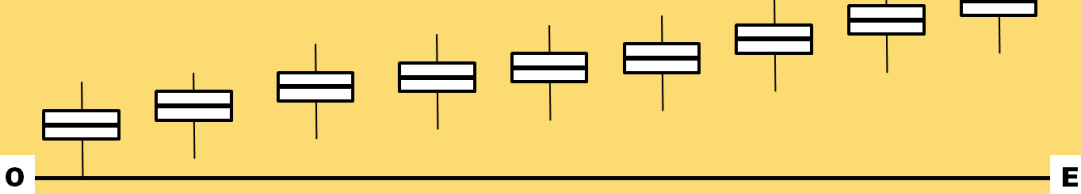
Les écarts-types pour les Tx ont globalement des valeurs inférieures à 2°C, sauf pour la classe 4 dont les valeurs oscillent entre 2 et 3°C. La répartition est homogène pour les classes 2 et 3, mais semble dépendante de l'altitude pour la classe 1. Ceci peut montrer que pour la classe 1, le gradient sud-est – nord-ouest est plus ou moins impacté par l'altitude en fonction du jour. Enfin, la variabilité montrée pour la classe 4 est similaire, à un degré d'intensité près, à celle observée pour la classe 4 des Tn du même type, c'est-à-dire une très forte disparité des valeurs en plaine de Saône et sur le Morvan. Ici encore, l'hypothèse la plus probable est que cette variabilité soit due à une intensité du phénomène d'inversion thermique plus ou moins forte.

Interprétation de l'écart-type

Les écarts-types sont calculés à chaque station pour chacune des classes. Ainsi, un fort écart-type sur une station signifie que les valeurs de températures qu'elle a mesuré sont très différentes d'un jour à l'autre. La spatialisation de ces écarts-types nous informe sur la répartition spatiale de ces écarts-types. Ainsi, elle permet de définir des zones géographiques qui sont plus ou moins éloignées du pattern spatial moyen.

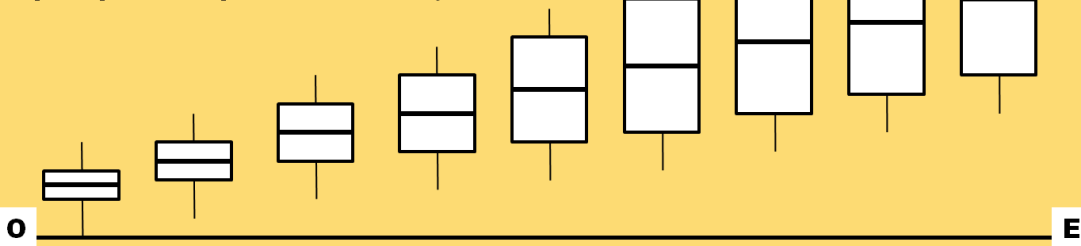
A. Gradient Ouest-Est de la température, à écart-type constant

La température est plus élevée à l'est qu'à l'ouest et ce gradient a une amplitude quasi similaire pour l'ensemble des jours de la classe.



B. Gradient Ouest-Est de la température, à écart-type croissant

La température est plus élevée à l'est qu'à l'ouest et ce gradient a une amplitude plus faible ou plus forte en fonction du jour de la classe.



B.IV.1.C. ÉVOLUTION DES FRÉQUENCES D'OCCURRENCE DE CES STRUCTURES

Dans un premier temps, nous avons étudié la distribution mensuelle pour chacune des classes sur la période 1973-2009. Pour chaque mois, le pourcentage d'occurrences de chaque classe est calculé. Les effectifs de chacune des classes ne sont pas répartis de façon homogène tout au long de l'année (Figure B.22.).

La classe 3 qui correspond aux Tn, négativement corrélées à l'altitude, représente plus de 20 % des jours de l'année, avec un creux en août-septembre et un maximum de décembre à mars (40 %). La classe 4 (jours avec inversion thermique, cf. encadré) est fortement présente pendant les mois d'été (juin-juillet-août) et peu présente en novembre-décembre-janvier. Indépendamment de cette fréquence élevée, on précisera que l'amplitude des inversions thermiques est faible en été et forte en hiver (cf. encadré). Les fréquences d'occurrence de la classe 1 (gradient nord-ouest – sud-est) sont supérieures à 20 % d'avril à septembre. Enfin, les fréquences d'occurrences de la classe 2 (gradient sud-est – nord-ouest) sont plus élevées pendant les mois froids (octobre à février).

L'inversion thermique

En conditions atmosphériques moyennes, la température diminue en fonction de l'altitude. On parle alors de relation inverse entre l'altitude et la température ou encore de gradient normal. Il existe des situations pour lesquelles la température est plus élevée en altitude qu'en plaine : c'est ce que l'on appelle une inversion thermique ou encore gradient thermique positif ou inverse. Ces situations ne peuvent se développer qu'en relation avec une très grande stabilité atmosphérique. Deux cas de figure :

Situation radiative : un refroidissement des basses couches

Situation advective : mouvement d'une masse d'air froid sous une masse d'air chaud

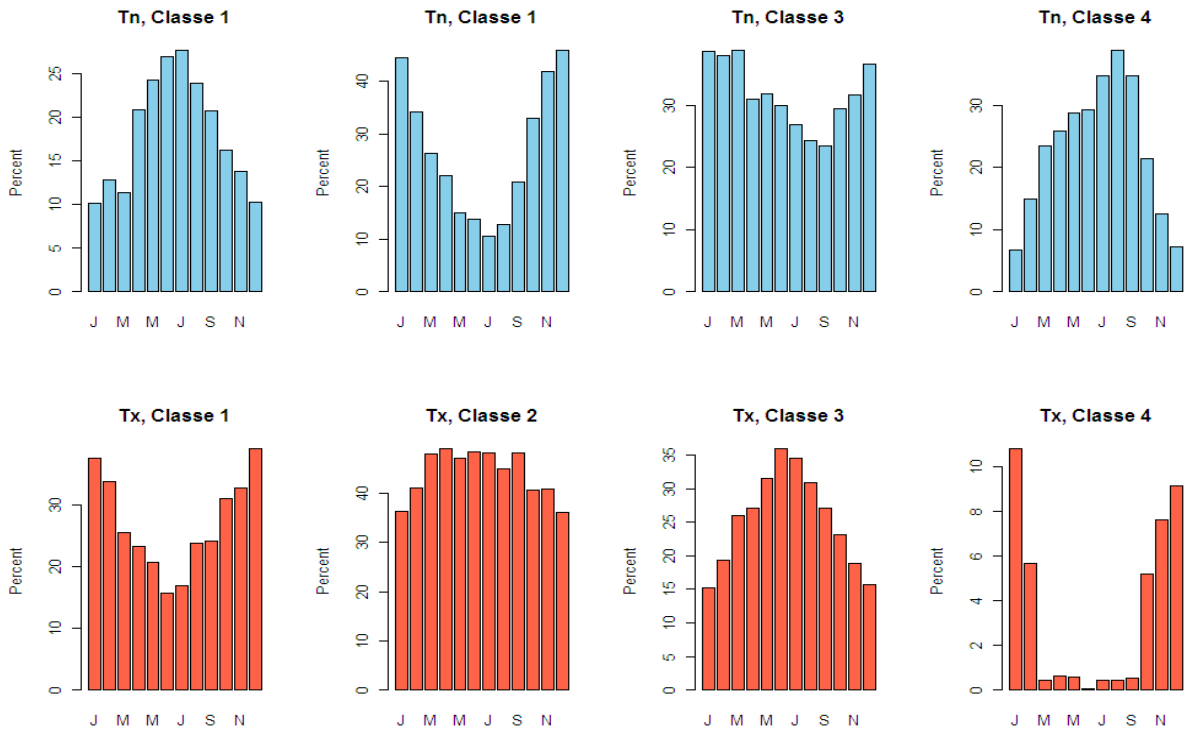
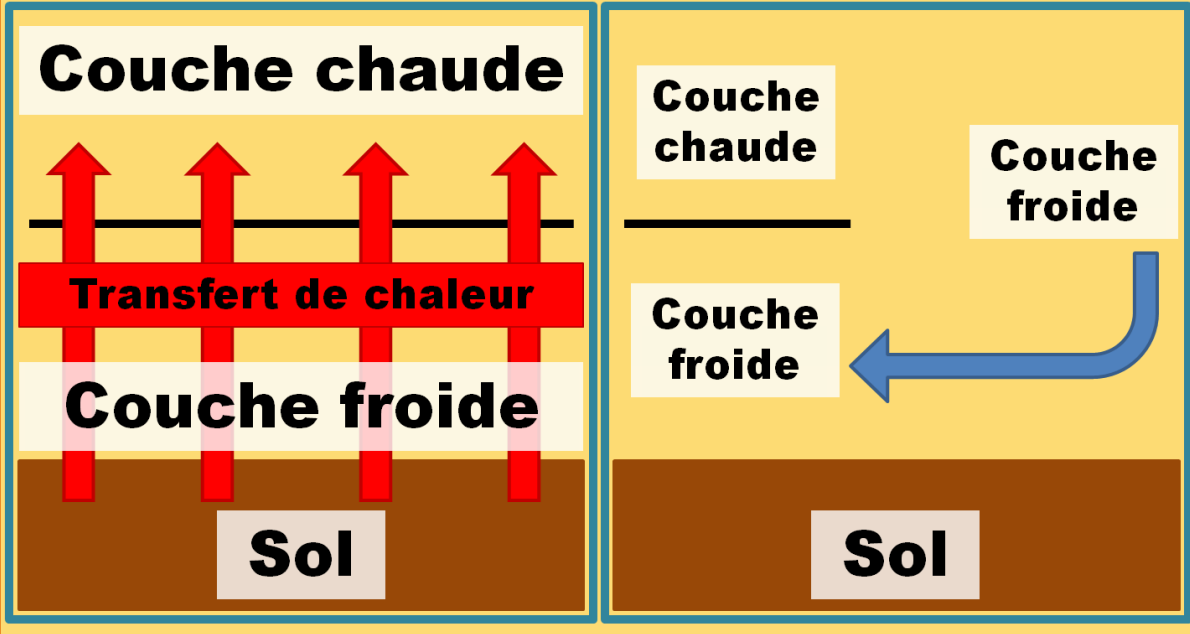


Figure B.22. Fréquences mensuelles d'occurrences des classes de Tn (histogrammes bleus) et Tx (histogrammes rouges) pour les jours de la période 1973-2009.

Pour les Tx, des résultats similaires aux Tn sont observés pour les classes à gradient nord-ouest – sud-est et sud-est – nord-ouest (classes 1 et 3). Les jours où il fait plus chaud en plaine de Saône qu’ailleurs sont plus fréquents d’avril à septembre. À l’inverse, les jours où le nord-ouest est plus chaud que le reste de la région sont plus fréquents d’octobre à février. La fréquence des cas où le gradient altitudinal est bien marqué est stable au cours de l’année entre 35 et 45 %. Le cas d’inversion thermique est plus rare pour les Tx. Il est plus fréquent entre octobre et février, et quasiment inexistant le reste de l’année. Ce cas de figure serait dû à une persistance du brouillard en journée dans la plaine de Saône. Cette hypothèse est appuyée par des écarts-types élevés à l’est de la région.

Il est intéressant désormais de replacer les précédentes observations dans le contexte du changement climatique. La question étant : la fréquence d’occurrences des classes a-t-elle évolué entre 1973-2009 ? Les deux périodes (1973-1987 et 1988-2009) sont séparées par la rupture climatique détectée autour de 1987-1988 [Cuccia, 2008]. La démarche consiste à comparer les occurrences moyennes des classes de jours avant et après cette rupture (Figure B.23).

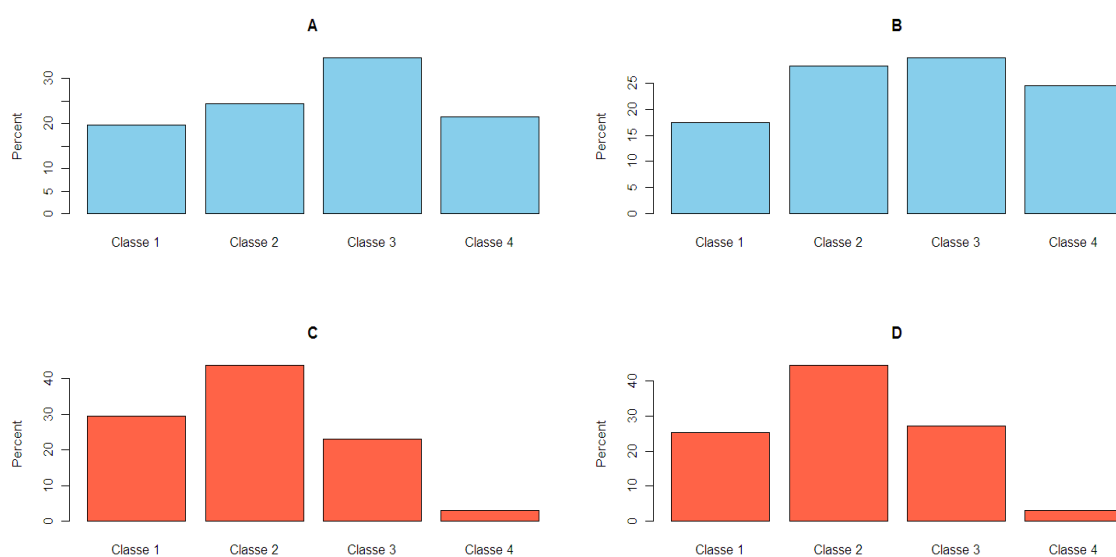


Figure B.23. Fréquences d’occurrences des classes pour les Tn (A et B) et les Tx (C et D) et pour les sous-périodes 1973-1987 (A et C) et 1988-2009 (B et D).

On observe une diminution des fréquences d’occurrences des classes 1 et 3 au profit des classes 2 et 4 pour les Tn. Ces variations, significatives selon le test de Student (95 %), indiquent, entre autres, que le gradient nord-ouest – sud-est (*sud-est – nord-ouest*) devient plus (*moins*) fréquent pendant la période 1988-2009. Cette évolution est en accord avec les tendances (1901-2000) mises en avant par Moisselin

et al. [2002] qui identifient, à l'échelle de la France, pour les températures minimales, un gradient sud-est – nord-ouest du réchauffement.

Une augmentation de la fréquence d'occurrences de la classe 3 aux dépens de la classe 1 est observée pour les Tx. Les variations des classes 2 et 4 pour les Tx ne sont pas significatives au test de Student. Cette variation indique que le gradient sud-est – nord-ouest (*nord-ouest – sud-est*) est devenu moins (*plus*) fréquent. Ici encore, l'analogie avec les résultats de Moisselin *et al.* [2002] est à noter puisque la tendance qu'il observe pour les températures maximales (1901-2000) met clairement en évidence un réchauffement plus important au sud qu'au nord.

Ces variations ne sont pas homogènes au pas de temps mensuel (Figure B.24.). Pour la classe 1 des Tn, la diminution est plus faible pour les mois d'avril à juin et d'octobre à janvier. La diminution pour la classe 3 est plus nette d'octobre à juin (entre -10 % et -4 %). Les mois de juillet-août-septembre montrent une très légère augmentation (<2 %). La classe 4 montre une augmentation au cours des six premiers mois de l'année. Enfin, pour la classe 2, l'augmentation a lieu pour les mois où elle est déjà très fortement représentée.

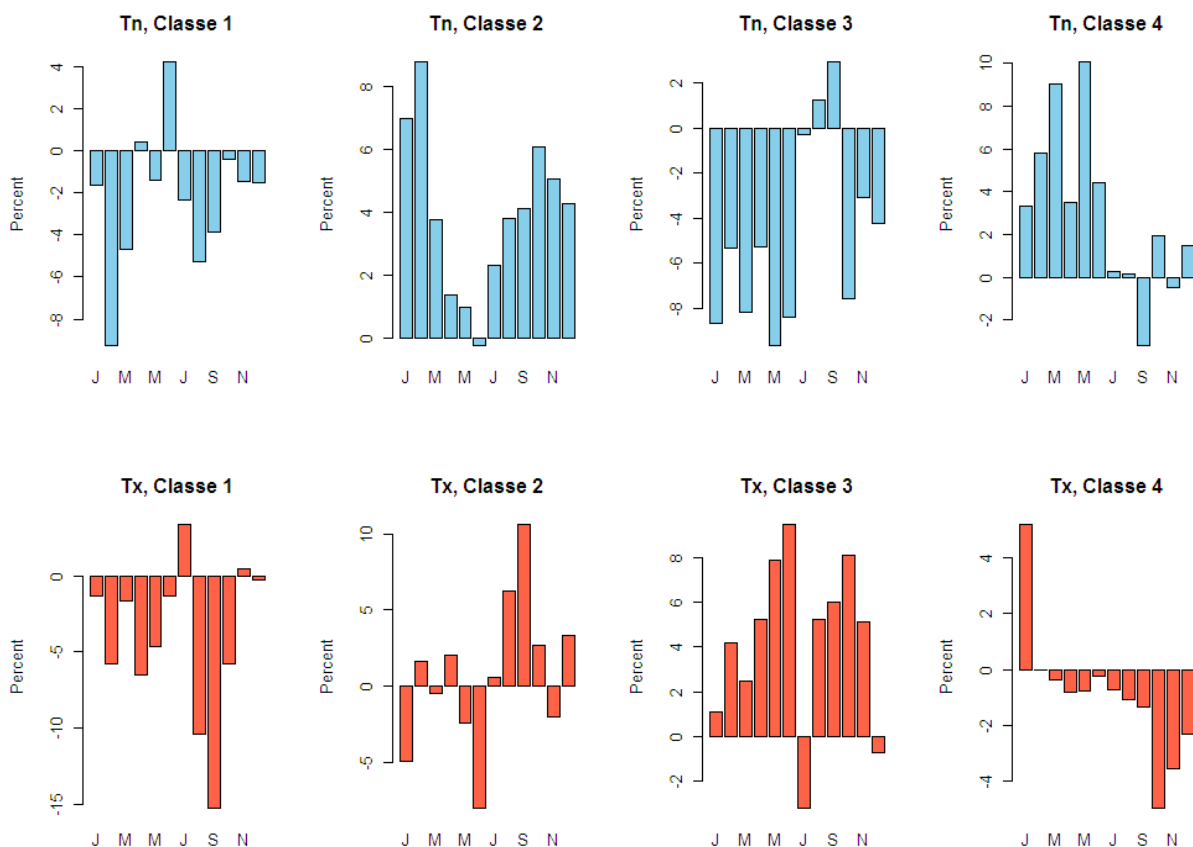


Figure B.24. Fréquences d'occurrences mensuelles des classes pour les Tn (A et B) et les Tx (C et D) et pour les sous-périodes 1973-1987 (A et C) et 1988-2009 (B et D).

Pour les Tx, si les variations de la fréquence d'occurrences de la classe 4 ne sont pas significatives, nous remarquons tout de même qu'il y a une forte augmentation pour le mois de janvier et une diminution importante pour les mois d'octobre à décembre. La diminution de la classe 1 est très forte sur les mois d'août et septembre. La classe 3 enregistre un seul mois avec une diminution (juillet, qui est un mois où la classe 1 augmente). Les autres mois ont tous montré une augmentation avec des valeurs plus fortes pour les mois de mai, juin et octobre.

B.IV.2. Spatialisation des températures quotidiennes pour la période 1989-2009

La méthode mise en œuvre suit trois étapes : 1/ la recherche de similitudes dans les structures spatiales et l'**élaboration de classes de jours** (B.IV.2.a.). 2/ sélection des prédicteurs par classe, suivie de l'interpolation par régression linéaire multiple basée sur les régresseurs morphométriques sélectionnés. L'interpolation est réalisée à la maille (*i.e.* résolution) de cinquante mètres (B.IV.2.b.). **Les pixels de la grille sont ensuite agrégés à la résolution de cinq kilomètres selon la procédure décrite à la figure B.25.** Une interprétation des régresseurs est proposée en partie B.IV.2.c. Enfin, 3/ **pour chacun des jours, nous réalisons des interpolations géostatistiques (krigeage) des valeurs résiduelles** (B.IV.2.d.). Enfin, des comparaisons sont effectuées pour évaluer les performances de cette méthode (B.IV.3.). Nous concluons en analysant le lien entre la classification des patterns de températures avec les régimes de temps obtenus par la classification du géopotiel à 500 hpa par nuée dynamique [Ullmann et Moron, 2008] (B.IV.4.).

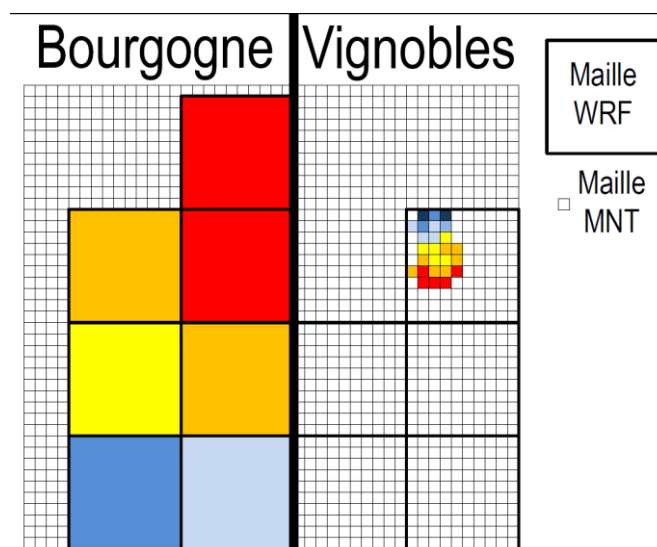


Figure B.25. Mailles d'interpolations des températures en Bourgogne sur la période 1989-2009. Initialement, la spatialisation se fait sur la maille à cinquante mètres de résolution, puis est agrégée à la maille de cinq kilomètres de résolution qui correspond à la résolution du modèle régional WRF. La résolution de cinquante mètres n'est utilisée que pour les zones à proximité d'un vignoble.

B.IV.2.A. SIMILITUDES DANS LES STRUCTURES SPATIALES ET ÉLABORATION DE CLASSES

Nous partons du postulat que pour une classe donnée, chaque pattern spatial quotidien obéit globalement aux mêmes mécanismes dont la structure spatiale est le résultat d'une modulation par les mêmes paramètres morphométriques. Les températures quotidiennes (T_n et T_x) sont réparties en k classes de structures spatiales homogènes à l'aide d'une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA). Pour chacune des k classes, un jeu de prédicteurs est sélectionné. L'analyse de ces prédicteurs permet d'identifier les déterminants, classe par classe, des structures spatiales récurrentes. Au final, chacune des classes possède un jeu de prédicteurs qui lui est propre. Afin de prendre en compte la variabilité quotidienne des patterns, pour chacun des jours de chaque classe, nous faisons varier les coefficients (poids) accordés à chaque paramètre.

Les jours vont être regroupés en classes, en fonction de leurs similarités en termes de répartition spatiale des anomalies locales de températures. Les deux CHA (T_n et T_x) portent sur les cinquante stations disponibles sur la période 1989-2009. Les dendrogrammes permettent de décider du nombre de classes à définir.

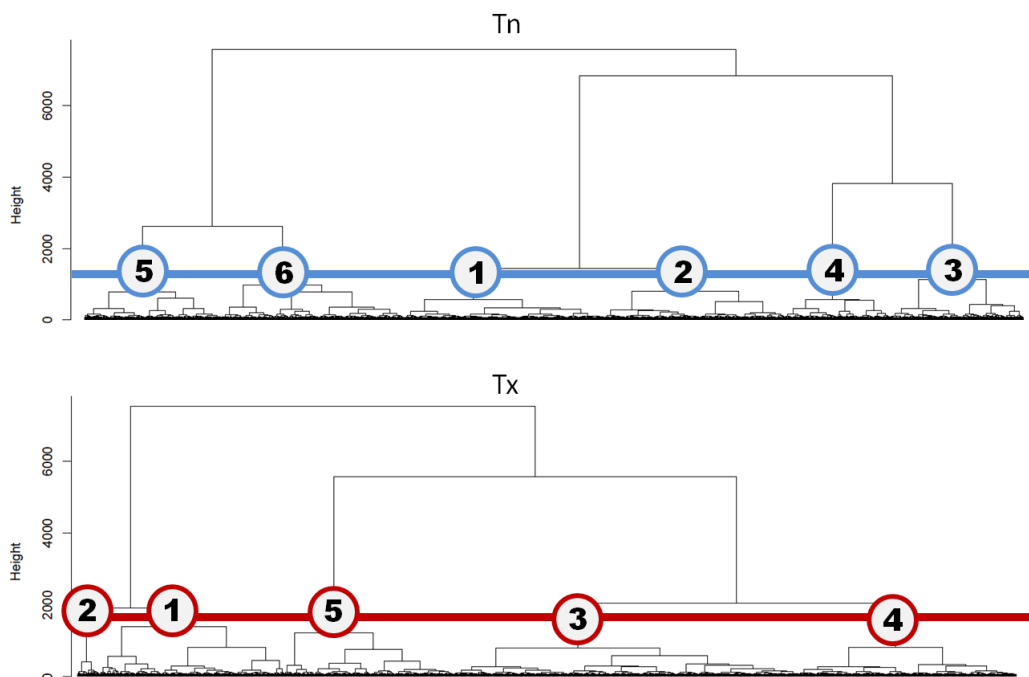


Figure B.26. Les dendrogrammes sont construits par la CHA à partir des répartitions quotidiennes des températures minimales (en h.) et maximales (en b.). La ligne horizontale représente la valeur de seuil retenue pour l'obtention des classes. Les numéros, présents à chaque intersection entre la ligne horizontale et une branche du dendrogramme, identifient chacune des classes.

Pour les Tn, les plus grands sauts permettent de définir trois (seuil à 5 000) ou cinq (seuil à 2 000) classes (Figure B.26., Tn). Cependant, le choix s'est porté sur un seuil à 1 200 afin d'obtenir des classes d'effectif équivalent. Nous obtenons ainsi six classes pour les températures minimales.

En ce qui concerne la fréquence d'occurrences, les classes 1, 2 et 6 comptent environ 20 % des jours, alors que les autres classes s'équilibrent entre 10 et 15 %, la classe 4 ayant la plus faible fréquence d'occurrences (Figure B.27.).

Pour les Tx, le choix a été plus délicat. Concrètement, en ne se basant que sur les sauts, le seuil aurait dû être placé à 4 000 afin d'obtenir trois classes. Cependant, comme précédemment, et nous le verrons dans la partie suivante, ce choix isole un pattern, très peu fréquent mais qui peut avoir une certaine importance en ce qui concerne les interpolations et leur qualité (Figure B.26., Tx, classe 2). Ainsi, le choix s'est porté à cinq classes (seuil à 1 800), la classe 2 étant la moins fréquente (< 5 %), la classe 3 la plus fréquente (>30 %) et les classes 1, 4 et 5 comptabilisant chacune environ 20 % des jours de la période 1989-2009 (Figure B.27.).

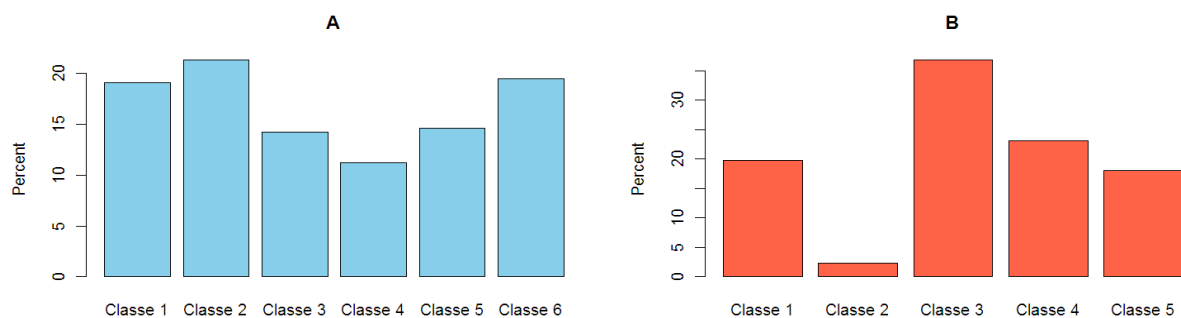


Figure B.27. Fréquence d'occurrences des classes de Tn (A) et des Tx (B) parmi les jours de la période 1989-2009.

B.IV.2.B. SPATIALISATION PAR RÉGRESSIONS MULTIPLES BASÉES SUR LA MORPHOMÉTRIE

Cette partie présente l'étape de la régression linéaire multiple, utilisant les données morphométriques à cinquante mètres de résolution. La première étape a été de chercher, parmi notre jeu de données environnementales, les paramètres qui permettent d'expliquer au mieux la distribution spatiale des températures. Une fois les paramètres identifiés, les coefficients quotidiens de la régression linéaire ont été calculés et appliqués aux paramètres.

L'idée ici est de sélectionner, pour chacune des classes des variables Tn et Tx, les paramètres environnementaux qui permettent d'expliquer au mieux la répartition des températures parmi le jeu de paramètres à notre disposition. Cette sélection va s'effectuer sur le champ moyen de chaque classe. Pour cela, la méthode

d'identification des paramètres qui a été retenue est la suivante : dans un premier temps, les paramètres environnementaux sont centrés réduits afin que leurs valeurs propres ne biaisent pas les résultats ni leur interprétation. Cela permet de donner le même poids à tous les régresseurs. Ensuite, les paramètres sont extraits à la position de chacune des cinquante stations utilisées pour la période 1989-2009. Nous obtenons ainsi, pour chaque station, une série de soixante-deux paramètres environnementaux et les valeurs moyennes des classes de Tn et Tx identifiées précédemment.

Une étude des corrélations entre la moyenne de chaque classe et les paramètres indépendamment les uns des autres permet d'avoir un aperçu des relations entre les paramètres et les données de température. Ainsi, le paramètre permettant d'expliquer au mieux la répartition des températures, à lui tout seul, est considéré comme le point de départ de la recherche pas à pas des paramètres environnementaux qui font partie du groupe de régresseurs. Lorsque le premier paramètre est trouvé, une boucle de calcul permet de l'associer aux soixante-et-un paramètres restants, un par un. Sur ces soixante-et-un paramètres, celui qui apporte une valeur ajoutée (augmentation du r^2) maximale à l'information apportée par le premier paramètre est considéré comme le deuxième paramètre de la régression linéaire. Le processus continue jusqu'à ce qu'un paramètre complémentaire n'apporte qu'une information inférieure à 3 % (+0,03 sur la valeur de r^2) de la variance totale. Le nombre de paramètres est ainsi limité par ce choix (Figure B.28.). Notons que forcer les régressions linéaires avec dix paramètres systématiquement ne modifie pas de façon significative les performances des interpolations (r^2 et RMSE proches), mais réduit finalement le recul sur la pertinence du choix des régresseurs.

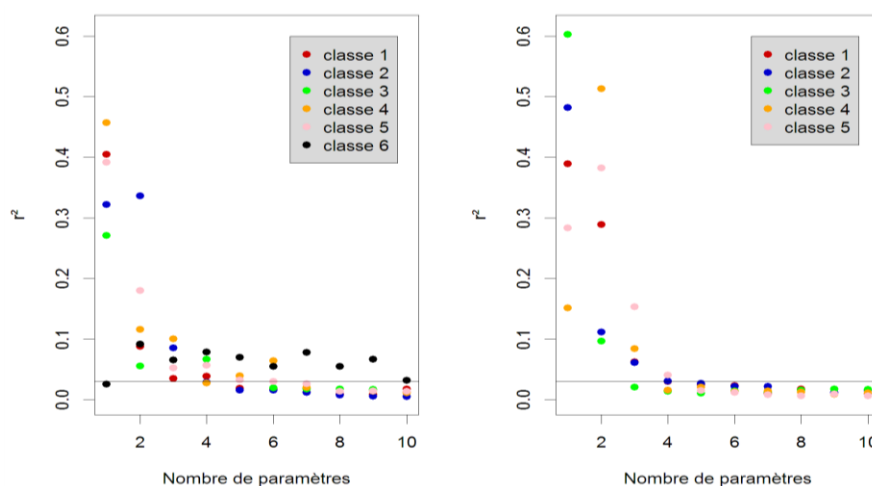


Figure B.28. Part de la variance expliquée apporté par chaque paramètre pour les classes de Tn (à g.) et Tx (à d.). En abscisses, le nombre de paramètres. En ordonnées, la valeur de r^2 . La ligne horizontale noire indique la limité à partir de laquelle un paramètre est considéré comme utile à la régression.

Le nombre de régresseurs qui sont retenus par classe est le suivant : $T_n = Cl_1 : 2 ; Cl_2 : 3 ; Cl_3 : 4 ; Cl_4 : 6 ; Cl_5 : 6$ et $Cl_6 : 9 ; T_x = Cl_1 : 4 ; Cl_2 : 4 ; Cl_3 : 2 ; Cl_4 : 3$ et $Cl_5 : 4$. Les paramètres sont présentés dans le tableau suivant (Tableau B.3., la signification de chaque paramètre est détaillée en annexe B.2.).

Classes\Paramètres	Par 1	Par 2	Par 3	Par 4	Par 5	Par 6	Par 7	Par 8	Par 9	Par 10
TN1	altit150	penste50	///	///	///	///	///	///	///	///
TN2	altit10	lat	lon	///	///	///	///	///	///	///
TN3	enca150	penste50	cosin3	Amplc5		///	///	///	///	///
TN4	lat	lon	Amplc5	penste25	altit150	Amplb25	///	///	///	///
TN5	lat	Amplc100	lon	altit150	altit50	penste150	///	///	///	///
TN6	Amplc5	lon	penste150	cosin25	enca3	sinus100	sinus50	enca100	altit150	lgava5
TX1	lon	Amplb50	altit10	rugos25	///	///	///	///	///	///
TX2	lon	rugos10	orien50	sinus50	///	///	///	///	///	///
TX3	altit10	altit150	///	///	///	///	///	///	///	///
TX4	altit10	lat	altit150	///	///	///	///	///	///	///
TX5	lat	altit10	lon	Amplb25	///	///	///	///	///	///

Tableau B.3. Identification des paramètres environnementaux utilisés pour chacune des classes de T_n et de T_x . Les significations de chaque paramètre sont présentées en Annexe B.2.

Chacune des onze classes est désormais associée à un jeu de paramètres environnementaux. Pour chaque classe le coefficient de détermination est calculé par une validation croisée (Tableau B.4.). Les fortes valeurs de r^2 montrent que la méthode permet, suivant la classe, d'expliquer entre 70 % et 93 % de la variabilité spatiale des températures.

	TN1	TN2	TN3	TN4	TN5	TN6
r^2	0,75	0,86	0,70	0,90	0,86	0,77
	TX1	TX2	TX3	TX4	TX5	
r^2	0,88	0,83	0,84	0,87	0,93	

Tableau B.4. Coefficients de détermination calculés à partir des moyennes de chaque classe pour les cinquante stations et les simulations issues de la régression linéaire en utilisant les paramètres sélectionnés.

Si le pattern général est très proche d'un jour à l'autre pour une classe donnée, il existe quelques différences qu'il est utile de prendre en compte. En effet, l'invariance intra-classe postulée pour le nombre et le type des régresseurs ne doit pas masquer la variabilité quotidienne des forçages qu'ils opèrent sur le champ de températures. Ainsi, pour chaque jour de chaque classe, les coefficients propres à chaque paramètre vont être recalculés, c'est-à-dire que pour chaque jour, la régression linéaire est forcée par les paramètres auxquels la classe du jour est associée, pour calculer de nouveaux coefficients dans l'équation de la régression. Les valeurs des coefficients vont pouvoir être comparées entre elles étant donné que les paramètres ont été standardisés au

préalable. Les disparités des coefficients sont présentées dans la figure B.29. Les coefficients associés aux régresseurs de la classe n'ont pas tous la même variabilité. De même, il est difficile d'interpréter cette variabilité puisqu'un paramètre peut avoir une forte variabilité de son coefficient pour une classe et une plus faible pour une autre classe. On peut remarquer que le signe d'un paramètre est soit négatif, soit positif, mais qu'il existe des cas particuliers pour chacun des paramètres, dans toutes les classes, pour lesquels les coefficients changent de signe. Une combinaison de deux causes pourraient expliquer ce changement de signe : 1/ la méthode de classification (CHA) a été contrainte de placer certains jours dans une classe par défaut et 2/ le choix des paramètres n'est pas optimal pour ces jours.

Cette partie a permis d'obtenir deux grilles de températures quotidiennes minimales et maximales : une grille pour les zones viticole à la résolution de cinquante mètres et une deuxième grille de cinq kilomètres de résolution couvrant l'ensemble de la Bourgogne.

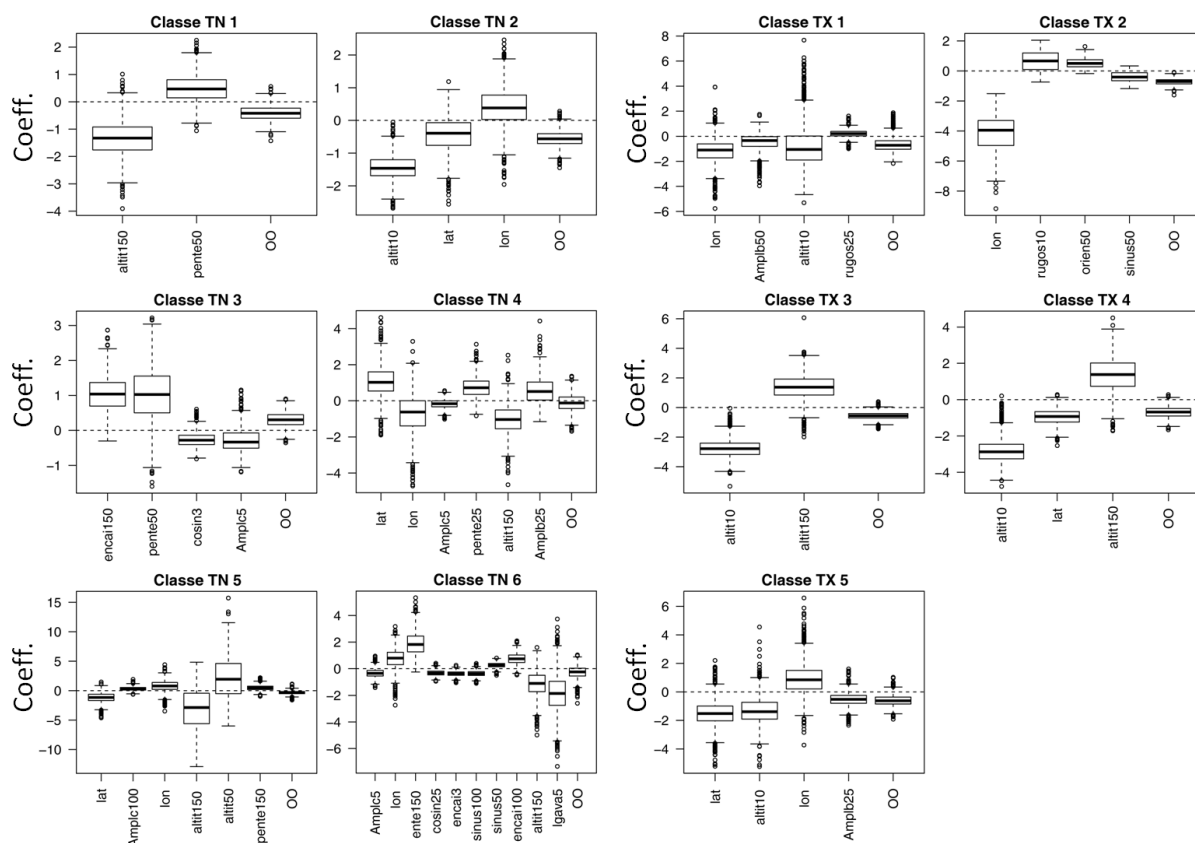


Figure B.29. Distributions statistiques des valeurs des coefficients de chaque paramètre en fonction de la classe.

B.IV.2.C. INTERPRÉTATION DES RÉGRESSEURS

Les régresseurs, retenus classe par classe, suggèrent des mécanismes de forçage que nous allons interpréter dans cette partie. Nous regarderons plus précisément les interactions entre régresseurs. Rappelons que les paramètres ont été choisis séquentiellement et que cette méthode impose un sens de lecture des résultats. La figure B.29. présente les boxplots des coefficients quotidiens associés à chaque paramètre et à chaque classe. La variabilité observée peut être analysée à partir des paramètres (en italique) de la taille de la fenêtre (souligné) et du signe des coefficients (en gras) comme suit :

- ***Classe TN1*** : ce pattern ne dépend que de deux paramètres : l'*altitude* de large échelle (**néгатif**, 150) et la *pente* à moyenne échelle (**positif**, 50). La température est d'autant plus basse que l'altitude est élevée. Ce phénomène de large échelle est lissé par l'effet de la pente à moyenne échelle : une pente forte est associée à des températures plus élevées et, inversement, une pente faible est associée à des températures plus basses. Nous sommes ici dans des cas pour lesquels l'état de l'atmosphère est stable, permettant la mise en place d'un gradient de température globalement négatif en fonction de l'altitude, tempéré par l'accumulation de masses d'air plus froid dans les endroits où la pente est plus faible.
- ***Classe TN2*** : le choix des paramètres montre que l'*altitude* à échelle fine (**néгатif**, 10), la *latitude* (**néгатif**) et la *longitude* (**positif**) entraînent en compte dans la régression linéaire multiple. Ici, la variation de la température est très étroitement liée à l'altitude à échelle fine, et ce de façon négative (plus froid en altitude). Cependant, ce gradient altitudinal est combiné à un gradient nord-ouest – sud-est. Notons que la latitude et la longitude varient de façon indépendante l'une de l'autre en fonction des jours de cette classe. Concrètement, la différence entre les classes TN1 et TN2 est la présence de températures plus chaudes dans la vallée de l'Yonne pour la première et dans la vallée de la Saône pour la seconde. Ceci est vraisemblablement à mettre en relation avec des phénomènes de plus large échelle (régime de temps).
- ***Classe TN3*** : le premier paramètre entrant dans la régression est l'*indice d'encaissement* au fenêtrage 150. Sa relation **positive** avec la température impose des températures d'autant plus basses que le fond de vallée sera étroit et d'autant plus élevées que le sommet sera pentu. À ce fenêtrage, la relation ne prend en compte que les reliefs le plus marqués comme le Morvan par exemple. La relation **positive** avec la *pente* (50) renforce le fait qu'il fait plus chaud en altitude qu'en bas de versant. Plus la pente est élevée, plus la température l'est également. Sur les températures minimales, majoritairement nocturnes, ceci

peut être mis en lien avec l'écoulement d'air froid sur ces pentes : une pente forte favorise l'écoulement d'air froid et la formation de poches d'air froid. À cette échelle, cela sous-entend des températures très basses en plaine de Saône et plus élevées sur la Côte viticole et une partie du Morvan. La relation **négative** avec le *cosinus* (3) signifie que tous les versants orientés au sud sont plus chauds que ceux orientés au nord. Enfin, la relation **négative** entre la température et *l'ampleur des creux* (5) accentue le fait que la température est d'autant plus basse que le creux est profond et inversement lorsque la valeur d'ampleur de creux est faible (proche des sommets), la température est plus élevée.

- **Classe TN4** : ici, six paramètres sont retenus pour interpoler les valeurs de températures. La *latitude* (**positif**), la *longitude* (**négatif**), *l'ampleur des creux* (**négatif**, 5), la *pente* (**positif**, 25), *l'altitude* (**négatif**, 150) et *l'amplitude des bosses* (**positif**, 25). Dans un premier temps, l'organisation montre un gradient sud-sud-est – nord-nord-ouest de la température. La relation négative avec l'ampleur des creux (différence entre le niveau des crêtes environnantes et la valeur d'altitude du pixel, cf. Annexe B.2.) signifie que la température est d'autant plus basse que l'ampleur du creux est élevée. Cependant, les coefficients liés à ce paramètre restent assez faibles. Comme pour la classe TN1, une pente forte est associée à des températures plus élevées et inversement. L'altitude impose un gradient de température négatif et de large échelle. Enfin, la relation positive avec l'ampleur des bosses impose un même gradient de température que l'ampleur des creux. Concrètement, ce pattern est associé à un gradient de large échelle sud-sud-est – nord-nord-ouest et altitudinal, secondairement et localement à des gradients de pentes et de versants qui favorisent l'accumulation d'air froid en fond de vallée.
- **Classe TN5** : pour ce pattern, la *latitude* (**négatif**), *l'ampleur des creux* (**positif**, 100), la *longitude* (**positif**), *l'altitude* (**négatif**, 150), *l'altitude* (**positif**, 50) et la *pente* (**positif**, 150) ont été utilisées. Le gradient de large échelle est nord-nord-ouest – sud-sud-est. La relation entre l'ampleur des creux et la température, positive et de large échelle, impose des températures plus chaudes dans les grandes plaines (plaine de Saône) et plus fraîches sur les principaux reliefs (e.g. Morvan). Le gradient altitudinal négatif de large échelle corrobore l'observation précédente. Un gradient altitudinal positif à échelle plus fine est également observé. Il existe une forte relation entre les deux niveaux où l'altitude est considérée : lorsque le coefficient pour l'altitude à large échelle est élevé, le coefficient pour l'altitude à échelle plus fine est faible, et inversement. Cela montre que le gradient négatif à large échelle, de la

température en fonction de l'altitude est lissé par un gradient positif à méso-échelle, qui va tantôt minimiser la variabilité altitudinale de la température, tantôt la maximiser. Ce gradient est régulé par une relation positive entre la température et la pente, à large échelle, qui, là encore, favorise l'apparition de masses d'air froid pour les pentes à faibles pendages.

- **Classe TN6** : au total, dix paramètres ont été utilisés pour décrire la répartition des températures dans l'espace. L'interprétation des relations entre les dix paramètres est délicate. Cependant, la relation **négative** avec *l'ampleur des creux* (5) impose que la température soit plus basse lorsque l'ampleur du creux est élevée. La *longitude* impose un gradient est-ouest. La relation entre la *pente* et la température (**positif**, 150) impose des températures plus élevées en altitude qu'en plaine. Les versants exposés au nord sont les plus froids (*cosinus*, **négatif**, 25). Sur les reliefs à échelle fine, les températures sont plus chaudes en fond de vallée (*encaissement*, **négatif**, 3). Le *sinus* est représenté à deux fenêtrages et surtout pour les deux signes : **négatif** pour le fenêtrage à 100 pixels et **positif** pour 50 pixels. Cela signifie que pour les versants principaux (large échelle), la température est plus chaude lorsqu'ils sont orientés vers l'ouest, minimisé à échelle plus fine par une relation inverse. La répartition des températures à large échelle est aussi modulée par des valeurs plus chaudes sur les reliefs positifs (*encaissement*, **positif**, 100). Tout ceci, modulé par l'altitude à large échelle et la longueur de la partie aval à échelle fine qui minimisent les relations précédemment énoncées.

Dix paramètres, au maximum, sont utilisés pour l'ensemble des classes de températures minimales (Tableau B.5.). Cinq d'entre eux interviennent souvent comme régresseurs significativement explicatifs dans le modèle.

Pour les Tn, l'altitude et la pente, présentes pour cinq classes sur six, sont les plus représentées. Leurs fenêtrages (*i.e.* échelles) concernent surtout les méso et large échelles, ce qui signifie que la température minimale est très régulièrement régie par les variations d'altitude et par des effets d'écoulement d'air le long des pentes.

La longitude est utilisée pour quatre classes sur les six classes de TN. Hormis pour la classe TN6, la longitude est indissociable de la latitude. Nous rencontrons ainsi deux cas de figure : 1/ le coefficient de la longitude est positif et le coefficient de la latitude est négatif et 2/ le coefficient de la longitude est négatif et celui de la latitude est positif. Le premier cas traduit un gradient nord-ouest – sud-est (classes TN2 et TN5) et le deuxième cas traduit un gradient sud-est – nord-ouest (classe TN4).

L'ampleur des creux est également utilisée pour quatre classes. Négative et d'échelle fine pour trois classes, la relation entre la température minimale et l'ampleur des creux induit des températures plus froides en bas de vallée qu'en haut des crêtes. Cette relation est d'autant plus forte que l'ampleur du creux est élevée.

La même procédure est utilisée pour interpréter les paramètres des classes de TX :

- **Classe TX1** : les températures de cette classe sont réparties en fonction de la *longitude* (**négatif**), *l'ampleur des bosses* (**négatif, 50**), *l'altitude* (**négatif, 10**) et la *rugosité* (**positif, 25**). Ici, le gradient principal de température est orienté est-ouest. À échelle fine, l'altitude a une relation négative avec la température, c'est-à-dire que, localement, il fait plus chaud en bas de pente qu'en haut de pente. Ceci est cohérent avec la relation négative à échelle moyenne entre l'ampleur des bosses et la température qui permet de dire que pour les reliefs de plus large échelle, la température est également plus faible en altitude qu'en plaine. Enfin, lorsque la rugosité est faible, la température est basse. Là encore, les faibles pentes permettent la stagnation des masses d'air froid.
- **Classe TX2** : les paramètres de la régression sont : la *longitude* (**négatif**), la *rugosité* (**positif, 10**), *l'orientation* (**positif, 50**) et le *sinus* (**négatif, 50**). La relation avec la longitude confirme le gradient principal est-ouest. La relation positive avec la rugosité surimpose des températures plus élevées en altitude qu'en plaine. Ici encore, ceci se rapproche d'un gradient altitudinal inverse. Enfin, les relations avec l'orientation et le sinus montrent que les versants orientés vers l'ouest et le nord-ouest sont plus chauds que les versants orientés vers l'est et le sud.
- **Classe TX3** : un seul paramètre pour ce pattern : *l'altitude* à deux fenêtrages : **10 (négatif)** et **150 (positif)**. Ici, le gradient est purement altitudinal négatif (plus chaud en plaine et plus froid en altitude). Ce gradient est lissé par un phénomène de large échelle qui le minimise ou pas en fonction du jour pris en compte.
- **Classe TX4** : comme pour la classe TX3, *l'altitude* est utilisée à deux fenêtrages : **10 (négatif)** et **150 (positif)**. Cependant, la *latitude* joue aussi un rôle (**négatif**). Ici, la relation entre la température et l'altitude est ainsi exactement la même que pour la classe TX3, affecté d'un gradient nord-sud.
- **Classe TX5** : pour ce pattern, la *latitude* (**négatif**), *l'altitude* (**négatif, 10**), la *longitude* (**positif**) et *l'amplitude des bosses* (**négatif, 25**) ont été incluses

dans la régression. La relation négative entre la latitude et la température impose un gradient nord-sud, faiblement impacté par un gradient ouest-est (longitude). Localement, la température est fortement impactée par l'altitude (plus froide en altitude qu'en fond de vallée). De même, la température est d'autant plus froide que l'ampleur des bosses est élevée. Ce pattern est donc caractérisé par des valeurs de température froides au nord et plus chaudes au sud, en particulier dans la plaine de Saône.

Pour les températures maximales, un seul paramètre sort du lot : l'altitude. Utilisée dans quatre des cinq classes (l'exception est la classe TN2). Cette variable est, comme pour les TN, un paramètre déterminant pour analyser la répartition de la température. Pour les quatre classes, le coefficient est essentiellement négatif lorsque le fenêtrage est de dix pixels, c'est-à-dire que les températures maximales sont plus froides en altitude qu'en plaine, en respectant les profils topographiques à échelle fine. À deux reprises, l'altitude est également utilisée à un fenêtrage de cent cinquante pixels, avec des coefficients essentiellement positifs. Associée à l'altitude calculée avec le fenêtrage à dix pixels, cela lisse le gradient altitudinal de la température.

Hormis l'altitude, tous les autres paramètres influencent les températures maximales à méso-échelle (fenêtres 10, 25 et 50).

TN	0	3	5	10	25	50	100	150	Total	Classes
Longitude	4	*	*	*	*	*	*	*	4	4
Latitude	3	*	*	*	*	*	*	*	3	3
Altitude	*	*	*	1	*	1	*	4	6	5
Pente	*	*	*	*	1	2	*	2	5	5
Encaissement	*	1	*	*	*	*	1	1	3	2
Cosinus	*	1	*	*	1	*	*	*	2	2
Ampl. Creux	*	*	3	*	*	*	1	*	4	4
Ampl. Bosses	*	*	*	*	1	*	*	*	1	1
Sinus	*	*	*	*	*	1	1	*	2	1
Long. Aval	*	*	1	*	*	*	*	*	1	1
Total	7	2	4	1	3	4	3	7	31	*
TX	0	3	5	10	25	50	100	150	Total	Classes
Longitude	3	*	*	*	*	*	*	*	3	3
Latitude	2	*	*	*	*	*	*	*	2	2
Altitude	*	*	*	4	*	*	*	2	6	4
Ampl. Bosses	*	*	*	*	1	1	*	*	2	2
Rugosité	*	*	*	1	1	*	*	*	2	2
Orientation	*	*	*	*	*	1	*	*	1	1
Sinus	*	*	*	*	*	1	*	*	1	1
Total	5	0	0	5	2	3	0	2	17	*

Tableau B.5. Synthèse des paramètres utilisés pour les régressions linéaires multiples et des fenêtrages concernés.

Finalement, deux niveaux d'échelles contrôlent la répartition des températures en Bourgogne : l'échelle fine et l'échelle synoptique. La question concernant la possibilité d'un lien entre l'échelle synoptique et les régimes de temps, relevant d'une échelle très large (Atlantique nord – Europe), est posée dans la partie B.IV.4.

Suite à l'étape de la régression linéaire multiple, une interpolation par krigeage est appliquée aux résidus. La partie suivante traite de ce sujet.

B.IV.2.D. INTERPOLATIONS GÉOSTATISTIQUES (KRIGEAGE) DES VALEURS RÉSIDUELLES ET DISTRIBUTIONS SPATIALES MOYENNES DES TEMPÉRATURES DE CHACUNE DES CLASSES

La régression linéaire multiple (RLM) ne suffit pas à expliquer la totalité de la variabilité spatiale des températures. Les résidus de la RLM sont possiblement porteurs d'une information sur la structuration spatiale des températures selon une auto-corrélation dépendant uniquement de la distance. L'interpolation des résidus par la méthode du krigeage est conduite pour chacun des jours (*cf.* exemple de semi-variogramme, figure B.30. et partie B.III.2.b.). Cette dernière étape permettra d'obtenir une interpolation quotidienne d'échelle locale de la température afin de se rapprocher le plus possible de la réalité du terrain. Cette démarche nous permet de garder un contrôle (*via* les prédicteurs sélectionnés pour la RLM) quant à l'explication sur les principaux déterminants de cette répartition. Un deuxième jeu quotidien de données interpolées est ainsi obtenu (interpolation des résidus). Ces interpolations (par krigeage, KR) sont ensuite ajoutées aux précédentes valeurs estimées par la régression linéaire multiple (RLM) pour obtenir le jeu de données de Tx et Tn interpolées quotidiennement (RLM + KR).

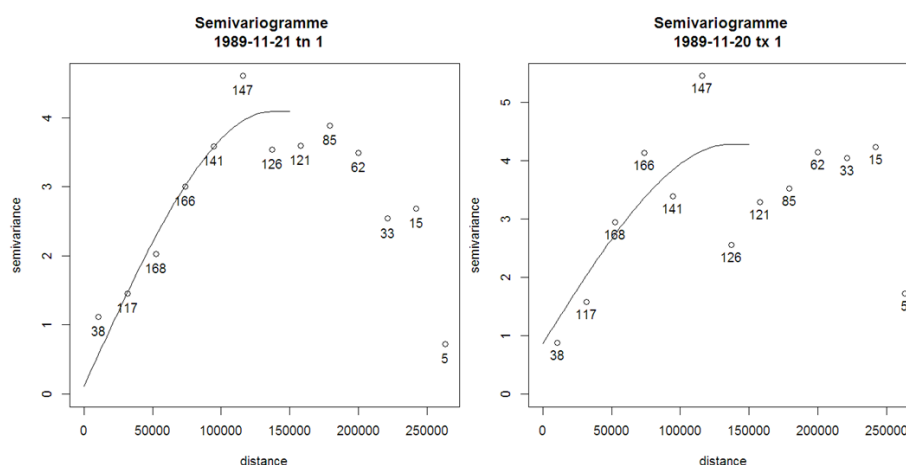


Figure B.30 Deux exemples de semi-variogrammes produits lors du krigeage pour le 20 novembre 1989 (Tx) et le 21 novembre 1989 (Tn). Les nombres sur les graphiques représentent le nombre de couples utilisés pour calculer la semi-variance à chaque point. Notons la stationnarité (présence d'un plateau) autorisant l'utilisation du krigeage ordinaire.

La répartition spatiale moyenne des températures « résiduelles » de chacune des classes est calculée en moyennant les valeurs de températures de l'ensemble des jours, maille par maille. La figure B.31 présente les onze cartes correspondantes.

Les classes TN1 et TN2 présentent un gradient altitudinal très marqué, conforme aux paramètres utilisés pour la régression. Pour la classe TN2, les valeurs de températures sont plus chaudes en plaine de Saône, ce qui explique l'utilisation de la longitude dans la régression (gradient ouest-est).

En ce qui concerne la classe TN3 (il en sera de même pour les classe TN6 et TX2), nous avons décidé de pousser l'analyse en comparant quatre jours. Le pattern moyen observé en figure B.31. n'est pas si éloigné de ce que l'on trouve sur les quatre exemples de la figure B.32. Ils présentent tous, globalement, de faibles valeurs de températures en plaine de Saône et dans les vallées de la Loire et de l'Yonne. Localement, les patterns présentent des températures élevées sur les sommets du Morvan, dans la région d'Autun, sur le Gradin de Côte-d'Or et dans le Charolais. Les différences de températures entre la plaine de Saône et le Gradin de Côte-d'Or sont variables en fonction des jours : pour les jours A et D, cette différence est de l'ordre d'un degré et pour les jours B et C, elle est de l'ordre de trois degrés. Nous sommes donc en présence d'un pattern de type inversion thermique dont l'amplitude spatiale des températures varie d'un jour à l'autre.

La classe TN4 est clairement caractérisée par un gradient sud-est – nord-ouest. La surimpression de l'altitude est également assez forte puisque le Morvan est caractérisé par des valeurs de températures plus froides que si le gradient était uniquement sud-est – nord-ouest. De même, les valeurs de pente plus fortes le long de la Côte viticole permettent probablement d'obtenir des valeurs plus chaudes que si le gradient était simplement sud-est – nord-ouest.

Au contraire, la classe TN5 est caractérisée par un gradient nord-ouest – sud-est, le tout surimposé d'un lissage des températures imposant des températures plus élevées dans les grandes vallées et plus faibles sur les principaux reliefs comme le Morvan.

Pour illustrer la variabilité de la classe TN6 et de la classe TN3, une comparaison de quatre jours est proposée (Figure B.32.). Ce pattern se caractérise par des valeurs de températures systématiquement très froides (entre 5 et 20°C d'écart avec le reste de la région) sur le sud-est de la Côte-d'Or à la frontière avec la Saône-et-Loire et également à l'extrême sud-ouest de la région, dans la vallée de la Loire. La différence entre les jours réside principalement dans l'amplitude de cet écart entre la zone froide et le reste de la région.

La classe TX1 est caractérisée par un très fort gradient est-ouest lissé par une surface de tendance méso-échelle influencée par l'ampleur des creux, induisant des valeurs de températures plus faibles au sommet des plus hauts massifs et plus élevées dans les plaines.

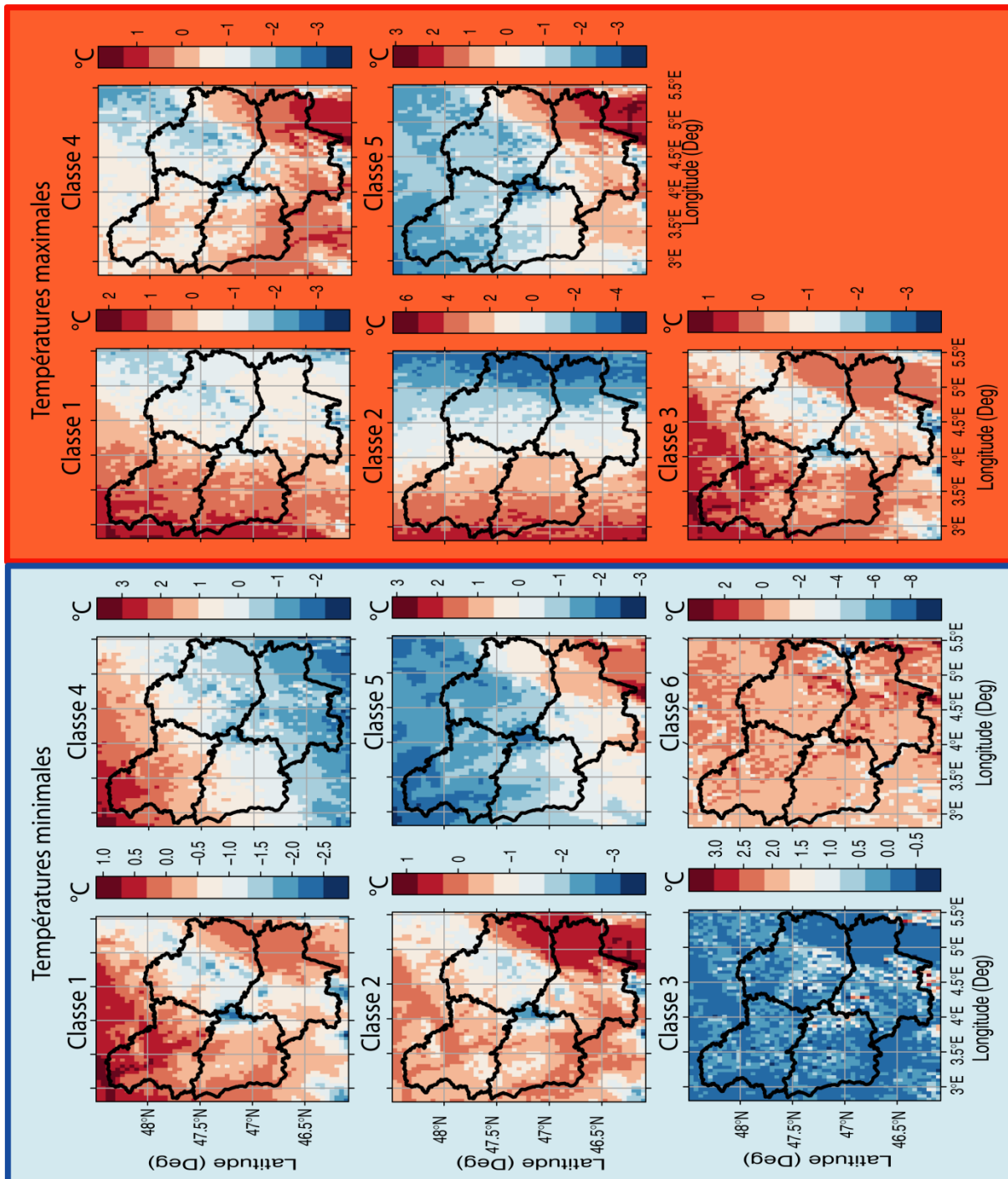


Figure B.31. Cartes moyennes des classes de Tn et Tx après la méthode RLM+KR.

En ce qui concerne la classe TX2, le gradient est-ouest est très fort quel que soit le jour (Figure B.32.). L'impact de la rugosité va donc jouer un rôle important sur le pattern quotidien. Lorsque la relation température/rugosité est élevée, la température en altitude est plus élevée (Figure B.32., jours A, B et C), sinon le gradient est principalement est-ouest (Figure B.32., jour D).

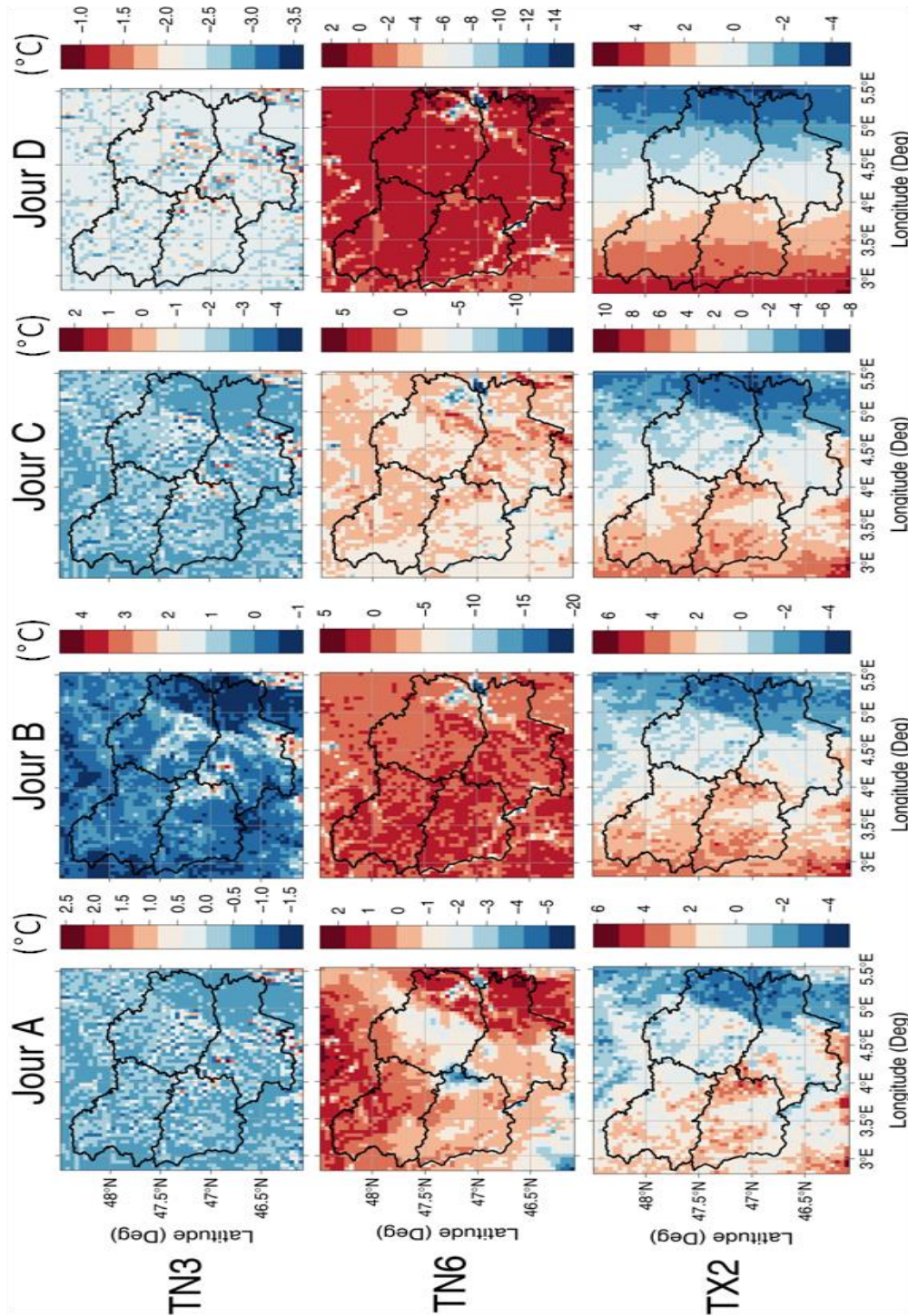


Figure B.32. Quatre exemples d'interpolations (jours A, B, C et D) pour les trois classes TN3, TN6 et TX2.

Le gradient des classes TX3 et TX4 est essentiellement lié à l'altitude. La très forte relation négative à échelle fine est lissée par une relation de large échelle qui minimise les écarts de températures entre les zones de plus hautes altitudes et les zones de faibles altitudes. Pour la classe TX4, la latitude joue un rôle en imprimant un gradient nord-sud à la température.

Enfin, la classe TX6 est caractérisée par un gradient nord-ouest – sud-est très fortement impacté par un gradient altitudinal négatif.

B.IV.3. Évaluation et comparaison des méthodes d'interpolations

Il est nécessaire d'éprouver cette méthode de « régression-krigeage » (RLM + KR) en la comparant à d'autres méthodes couramment utilisées. Ces méthodes sont : la méthode des plus proches voisins, la régression linéaire multiple seule, le krigeage ordinaire, les splines en plaques minces, ainsi que la régression linéaire multiple avec application des splines en plaques minces sur les résidus.

Les modèles d'interpolations sont comparés sur l'année 1989 à l'aide de leurs scores de validation croisée (*i.e.* Jackknife–Efron, 1979) : pour chaque jour j , le modèle d'interpolation est initialisé avec les cinquante stations moins une station (soit quarante-neuf stations) et nous interpolons la température à la cinquantième station. Lorsque la procédure a été réalisée autant de fois que le nombre de stations, nous passons au jour $j+1$ et ce jusqu'à $j+365$.

Le r^2 est calculé entre la série de cinquante valeurs quotidiennes interpolées et la série de cinquante valeurs quotidiennes observées. Nous obtenons ainsi autant de valeurs de r^2 par classe que le nombre de jours qui sont affiliés à cette classe. La distribution statistique de ces valeurs par classe est présentée par la figure B.33. Nous remarquons que tous les r^2 sont supérieurs en moyenne à 0,4, sauf pour la classe TN1.

Une forte variabilité intra et interclasse est observée, en particulier sur le TN. Les résultats sont globalement meilleurs et plus homogènes pour les TX. Ce résultat confirme la plus grande difficulté à interpoler les Tn. Comme mentionné par Daly *et al.* [2006], les températures minimales sont plus sujettes à des découplages locaux complexes, qu'il est nécessaire de documenter afin de mieux appréhender l'impact du changement climatique.

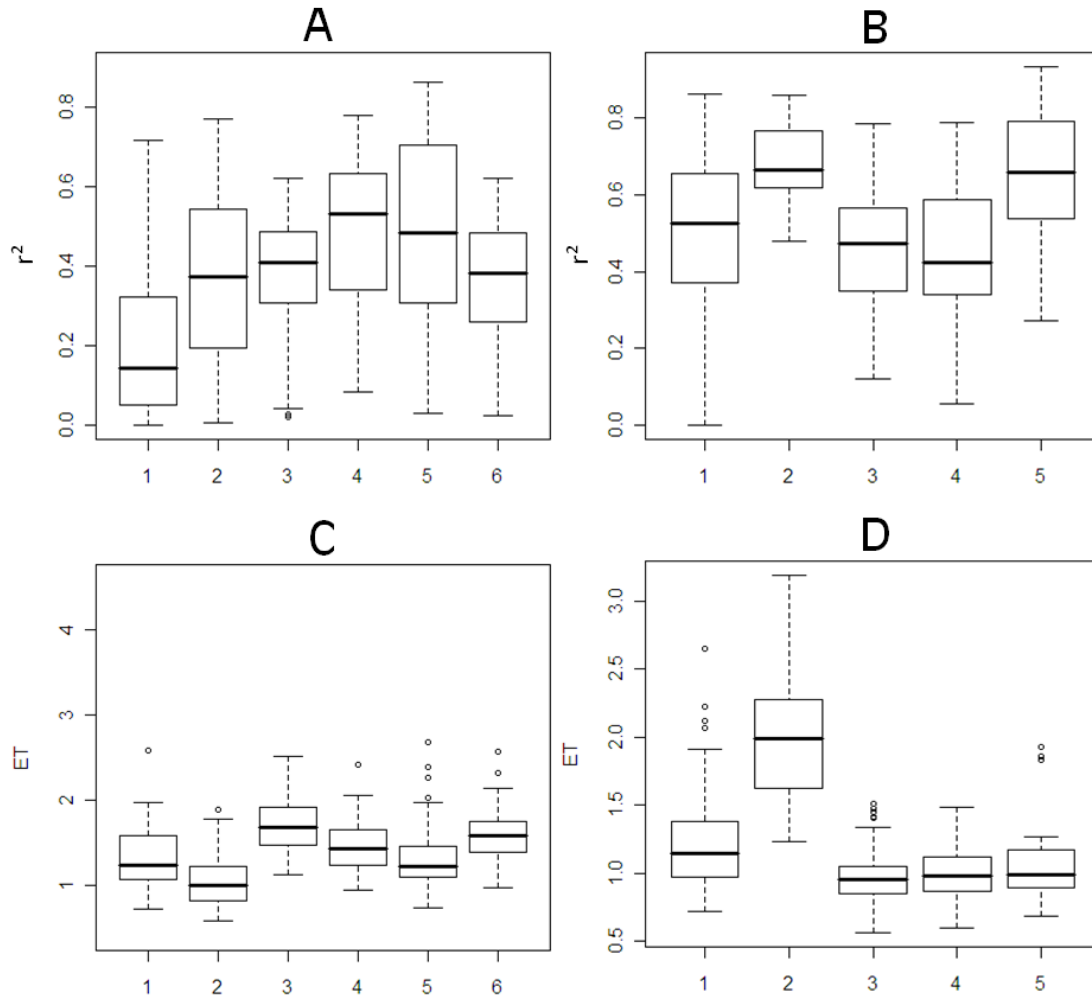


Figure B.33. Variabilité des coefficients de détermination et écarts-types associés obtenus pour chacune des classes de températures minimales (A, C) et maximales (B, D) pour la méthode de régression linéaire multiple + krigeage (RLM + KR).

Les r^2 obtenus pour les cinq méthodes d'interpolations sont ôtées des valeurs de r^2 obtenues pour la méthode de régression linéaire multiple + krigeage (RLM + KR). Une valeur positive de la différence signifiera que le modèle RLM + KR donne des résultats plus satisfaisants que le modèle comparé et, dans le cas contraire (valeur négative), cela signifiera que le modèle RLM + KR est moins efficace. Les différences de r^2 sont présentées sous forme de boîtes à moustaches (Figure B.34.).

Pour toutes les classes de T_n confondues, la méthode RLM + KR est plus efficace que la méthode des plus proches voisins (PPV). Si le gain est faible pour la classe 1 ($<0,1$), il est plus fort pour les classes 2, 4 et 5 ($<0,2$) et très fort pour les classes 3 et 6 ($>0,2$).

La comparaison entre le modèle RLM + KR et le RLM seul donne une information sur l'apport du krigeage dans la méthode. Le krigeage améliore le r^2 pour toutes les classes, sauf la classe 2 (pour laquelle la médiane est égale à 0). Ceci confirme

l'intérêt du régression-krigeage comme mentionné par Llyod [2010] ou plus récemment Hengl *et al.* [2012]. Le krigeage seul est largement moins performant que la méthode RLM + KR pour les classes 2, 3 et 6. Pour les classes 1, 4 et 5, l'amélioration des r^2 est faible.

Les splines en plaques minces ont de meilleurs r^2 pour les classes 1, 2, 4 et 5. Cependant, le manque de recul sur les paramètres utilisés pour les splines (uniquement la latitude, la longitude et l'altitude) et le peu de gain qu'elles apportent, ne permet pas de les préférer à la méthode RLM + KR. De plus, pour les classes 3 et 6, pour lesquelles l'altitude n'entre pas ou très peu en compte dans le jeu des paramètres, les r^2 montrent une augmentation entre 0 et 0,2. Enfin, le fait d'utiliser les splines au lieu du krigeage après la régression linéaire n'apporte ni ne dégrade les r^2 .

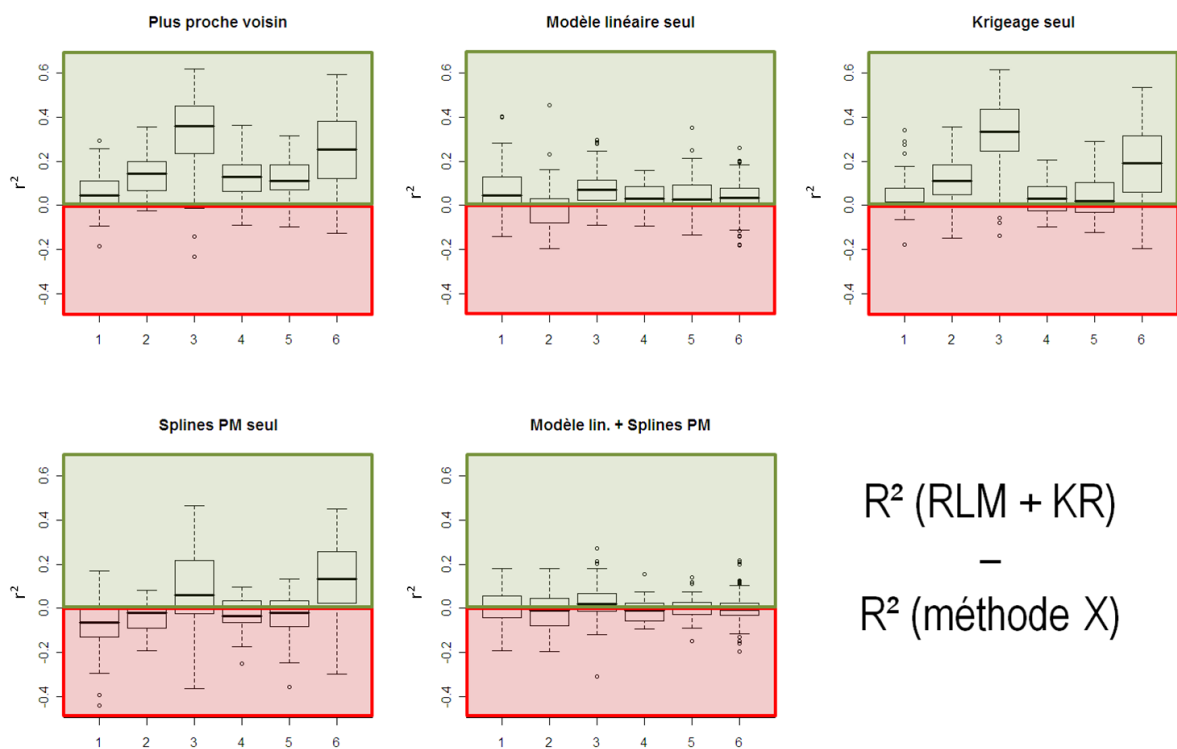


Figure B.34. Différences entre les coefficients de détermination obtenus pour les températures minimales par la méthode de régression linéaire multiple + krigeage (RLM + KR) et ceux obtenus par les cinq autres méthodes. Les valeurs positives (rectangles verts) montrent que la méthode RLM + KR est meilleure que la méthode comparée et inversement pour les valeurs négatives (rectangles rouges).

En ce qui concerne les Tx et la méthode des PPV comme pour les Tn, la méthode RLM + KR donne de meilleurs scores de r^2 pour toutes les classes, même si pour la classe 2 (inversion thermique), les gains sont plus faibles que pour les autres classes (Figure B.35.).

L'apport de RLM + KR par rapport à la régression linéaire multiple seule est important (entre 0 et 0,3). Là encore, cela montre que la RLM seule ne permet pas de modéliser de façon convenable la répartition spatiale des températures, de même que le krigeage seul ne permet pas non plus d'expliquer convenablement les répartitions spatiales de températures, hormis pour la classe 2 pour laquelle son association avec la RLM donne des résultats similaires.

Comme pour les Tn, la question de l'utilisation des splines en plaques minces au lieu du krigeage mérite d'être posée. En effet, pour les cinq classes, la différence entre les deux méthodes est faible. Cependant, là encore, nous disposons de plus d'éléments pour l'analyse et l'interprétation des résultats en utilisant la méthode RLM + KR. Si toutefois l'objectif est uniquement la spatialisation des températures journalières, les splines sont une alternative robuste à la méthode « régression-krigeage ». De même, il semble que les splines associées à la régression linéaire multiple augmentent les scores par rapport à notre méthode RLM + KR. Cependant, le krigeage et les semi-variogrammes qu'il produit nous permettent là encore de garder un recul utile sur les méthodes afin de mieux interpréter les résultats. Dans ce travail, nous avons fait le choix de garder la méthode RLM + KR.

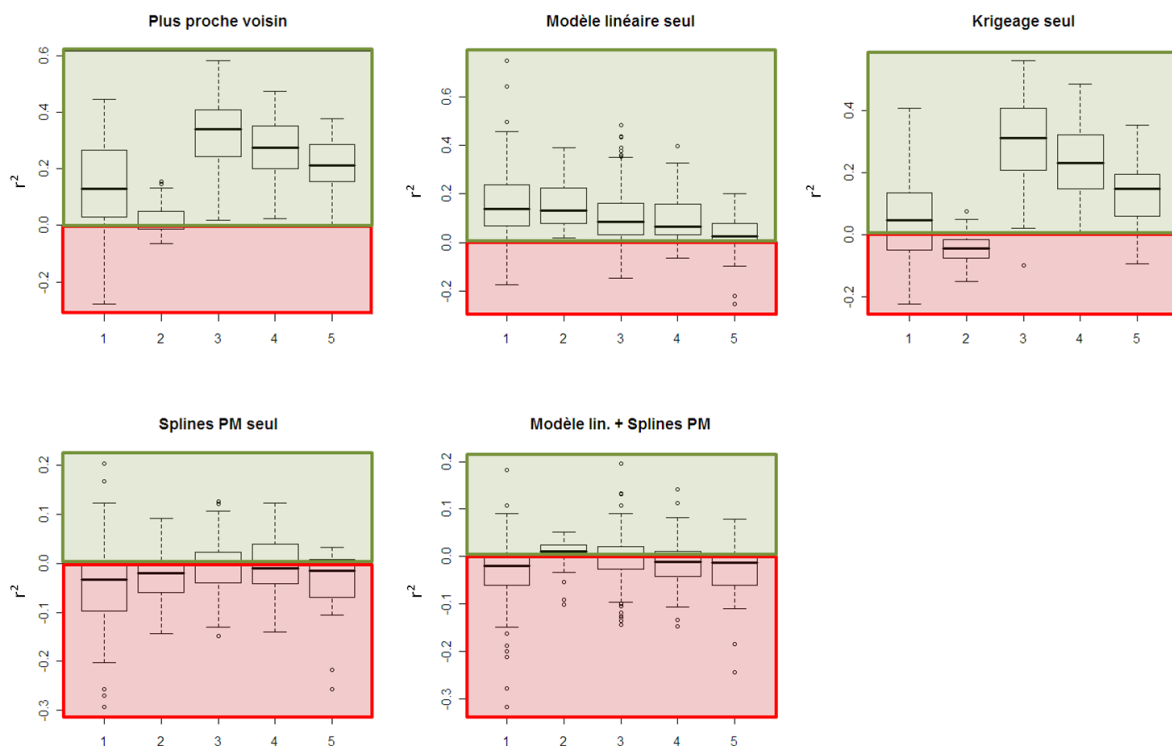


Figure B.35. Différences entre les coefficients de détermination obtenus pour les températures maximales par la méthode de régression linéaire multiple + krigeage (RLM + KR) et ceux obtenus par les cinq autres méthodes. Les valeurs positives (rectangles verts) montrent que la méthode RLM + KR est meilleure que la méthode comparée et inversement pour les valeurs négatives (rectangles rouges).

B.IV.4. Relation entre les structures thermiques en Bourgogne et les structures d'échelle synoptique

En quoi les patterns de températures à l'échelle de la Bourgogne sont-ils liés à des phénomènes d'échelles supérieures ? La présence fréquente de surfaces de tendances influençant les patterns spatiaux dégagés précédemment peut-elle nous permettre de mettre en évidence des relations avec des types de configurations synoptiques à l'échelle de l'Europe ? Pour répondre à cette question, la prochaine partie propose une confrontation de ces deux éléments.

L'idée ici est de comparer la classification des températures à celle réalisée sur les champs de pression de surface. Les champs de pression ont été regroupés par similitude spatiale en utilisant la méthode de k-means [Michelangeli *et al.*, 1995]. Ainsi, quatre régimes de pressions ont été identifiés (*cf.* Annexe B.4.) : (i) les situations de NAO+ (Cl. 1), qui présentent une accentuation de la différence entre le centre dépressionnaire au nord et le centre anticyclonique au sud, (ii) les situations de Blocage (Cl. 2), qui présentent de hautes pressions sur toute l'Europe centrale et de l'Est, bloquant les flux d'ouest, (iii) les situations de NAO- (Cl. 3), pour lesquelles l'anomalie de pression au nord est positive et négative au sud (diminution de la différence de pression entre les deux centres) et (iv) les situations dites Atlantic Ridge (Cl. 4), pour lesquelles les pressions sont plus faibles sur l'ensemble de l'Europe [Cassou *et al.*, 2003 ; Ullmann et Moron, 2008].

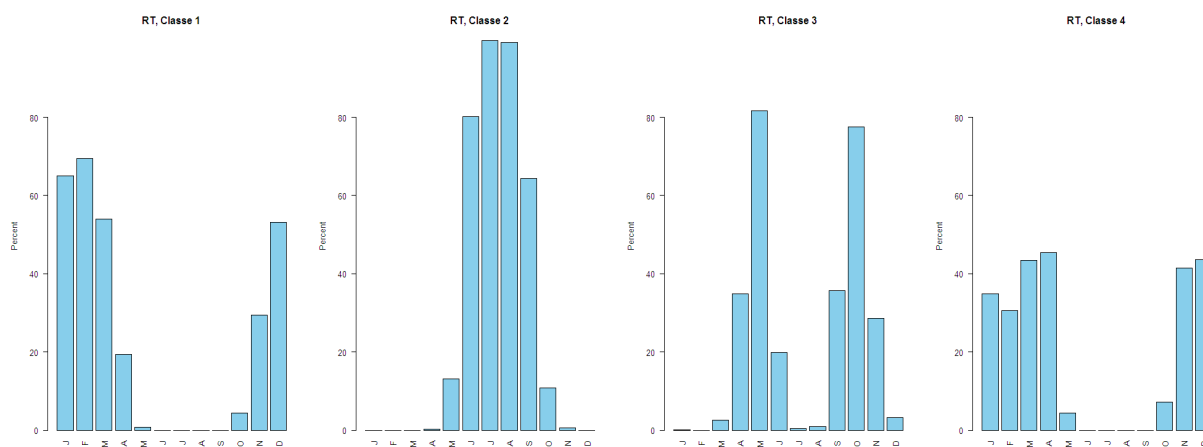


Figure B.36. Fréquences mensuelles des classes de régimes de temps pour la période 1989-2009.

La fréquence d'occurrence mensuelle de ces régimes de temps (RT) identifie clairement deux situations ayant lieu préférentiellement en hiver (NAO+, AR), une ayant lieu en été (Blocage) et une en saisons de transitions (NAO-) (Figure B.36.). Les fréquences d'occurrences des phases NAO+/NAO- sont cohérentes avec les

observations, c'est-à-dire une très forte fréquence des NAO+ en hiver et une plus forte fréquence d'occurrence des NAO- au printemps et en automne.

Ainsi, chaque jour de la période 1989-2009 est donc affilié à une classe de régime de temps et une classe de répartition des températures. La comparaison est effectuée à partir d'un tableau de contingence (Figure B.37.).

L'hypothèse nulle, ou d'indépendance entre les deux séries de classes, est rejetée au seuil 95 % du test du Khi 2. Les tableaux d'effectifs théoriques de la figure B.37. montrent les effectifs pour chaque couple si ces derniers étaient équi-répartis, c'est-à-dire s'il y avait une indépendance complète entre les deux séries. Ainsi, les différences entre ces valeurs théoriques indiquent où se trouvent les liens entre les deux séries.

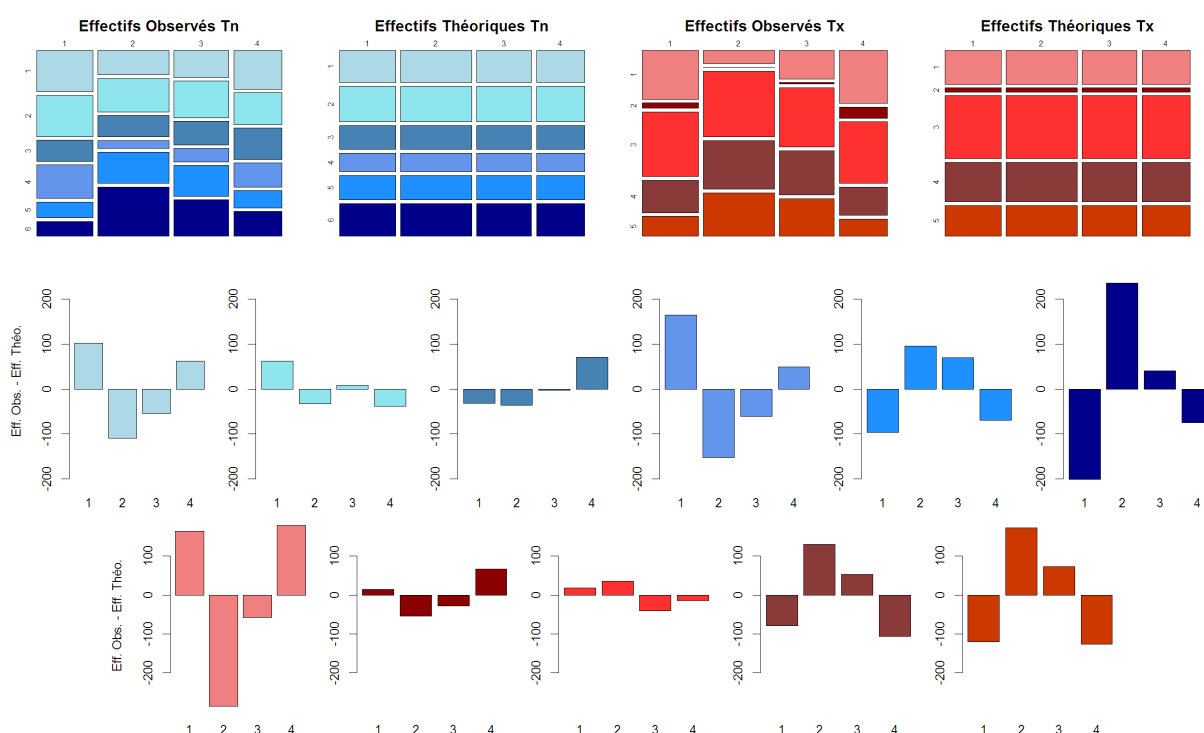


Figure B.37. Tableaux de contingence observés et théoriques pour les TN (tons bleues) et les Tx (tons rouges) et histogramme des différences entre les valeurs observées et les valeurs théoriques.

Une différence entre valeurs observées et valeurs théoriques signifie dépendance entre les deux classes. Par exemple, la classe 6 des Tn, où les déterminants d'échelle fine prennent le pas sur les surfaces de tendance, est sur-représentée lors des situations de blocage (régime 2). On peut supposer qu'en régime de blocage, la faiblesse des vents et/ou des conditions radiatives permettent à des poches de températures froides de stagner localement. Les situations d'inversions thermiques (Classe TN3) sont plus fortement liées à des situations synoptiques de classe 4, c'est-à-dire l'AR. Il est probable qu'il s'agisse de situations d'AR qui feraient qu'on se situe en situation de plus hautes pressions (noyaux anticycloniques plus au nord).

La classe TX1 (dominée par un gradient est-ouest) est liée à la fois aux situations de AR et de NAO+. Ces régimes de temps présentent des vents d'ouest ou de sud-ouest et avec une Bourgogne sous influence océanique.

Il nous faut malgré tout garder un recul sur les interprétations qui peuvent être faites à partir de ces comparaisons. La Bourgogne, par sa situation géographique, se situe aux limites des influences climatiques des situations AR, NAO- et NAO+. Ainsi, en fonction des situations géographiques des centres de hautes/basses pressions, la région ne subit pas systématiquement les mêmes influences pour une même situation synoptique. Il est donc probable que, si les situations synoptiques régissent le niveau de températures sur la région, il semble moins évident qu'il en soit de même pour la répartition de ces températures à l'échelle de la Bourgogne.

Conclusions du chapitre B

Le réchauffement climatique en Bourgogne est un fait avéré sur la période 1961-2009. Ce réchauffement, d'au moins 1,0°C, est plus fort pour les températures maximales que pour les températures minimales. De plus, il n'a pas été constant sur cette période. Une rupture de la tendance est identifiée dans les années 1987-1988. Cette rupture est caractérisée par un saut positif des températures. Avant cette rupture, les températures annuelles ne présentent pas de tendance claire. Après 1988, les températures montrent une tendance au réchauffement qui s'estompe à la fin des années 1990.

La répartition de ce réchauffement au pas de temps saisonnier n'est pas homogène. En effet, le réchauffement est plus fort pour les saisons printemps et été, faible pour l'hiver et quasi nul pour l'automne. Ce réchauffement s'accompagne d'une diminution significative du nombre de jours pour lesquels la température minimale est négative et une augmentation du nombre de jours pour lesquels la température maximale est supérieure à 30°C. De même, les risques de très fortes gelées ($T < -15^{\circ}\text{C}$) ont pratiquement disparus.

La production d'une base de données spatialisées à l'échelle de la Bourgogne sur la période 1989-2009 a été possible après l'élaboration d'une méthodologie spécifique en trois étapes. Premièrement, la Classification Hiérarchique Ascendante a abouti à identifier six patterns spatiaux récurrents des températures minimales et cinq pour les températures maximales. Deuxièmement, la régression linéaire multiple, forcée par les paramètres morphométriques, a permis d'expliquer entre 70 et 93 % de la variabilité spatiale des températures minimales et maximales et de garder un recul sur les paramètres qui régissent cette répartition spatiale. Troisièmement,

l'application du krigeage ordinaire sur les résidus de la régression linéaire multiple a permis de prendre en compte les possibles structures spatiales qu'ils comportaient.

Cette base peut servir de référentiel afin, notamment, d'évaluer les simulations régionales (modèle climatique régional) ou de spatialiser les dates d'occurrences des stades phénologiques pour le Pinot noir en Bourgogne.



CHAPITRE C

La relation entre la température et le Pinot noir : de l'observation à la modélisation

'Le vin est de l'eau emplie de soleil.'

Gallée



CHAPITRE C

Sommaire

C.I. DONNÉES/MODÈLES PHÉNOLOGIQUES ET MÉTHODOLOGIE	151
C.I.1. Objectifs et organisation du chapitre.....	151
C.I.2. Données phénologiques.....	152
C.I.3. Indices et modèles phénologiques.....	153
C.I.3.a. Les indices.....	154
C.I.3.b. Les modèles phénologiques.....	155
C.II. RELATION TEMPERATURE/PHÉNOLOGIE DU PINOT NOIR EN BOURGOGNE.....	163
C.II.1. Variabilité temporelle de la phénologie de la vigne	163
C.II.2. Évolution temporelle de la phénologie du Pinot noir à Savigny-lès-Beaune	164
C.II.3. Variabilité temporelle des indices agroclimatiques	167
C.II.4. Variabilité spatiale des indices sur la Bourgogne.....	170
C.III. Modélisation de la phénologie de la vigne	177
C.III.1. Évaluation des modèles phénologiques.....	178
C.III.2. Sensibilité des modèles phénologiques aux changements de température	182
C.III.2.a. Réchauffement des températures simulé par un modèle stochastique (LARS-WG)	182
C.III.2.b. Changement climatique simulé par dérive (+3°C, +5°C et +10°C)	185
C.III.2.c. Discussion sur les divergences entre les modèles.....	188
C.III.3. Applications des modèles sur les données spatialisées	193
C.III.3.a. Évaluation de la spatialisation de la phénologie	194
C.III.3.b. Application des modèles sur les données spatialisées à 5 kilomètres.....	200



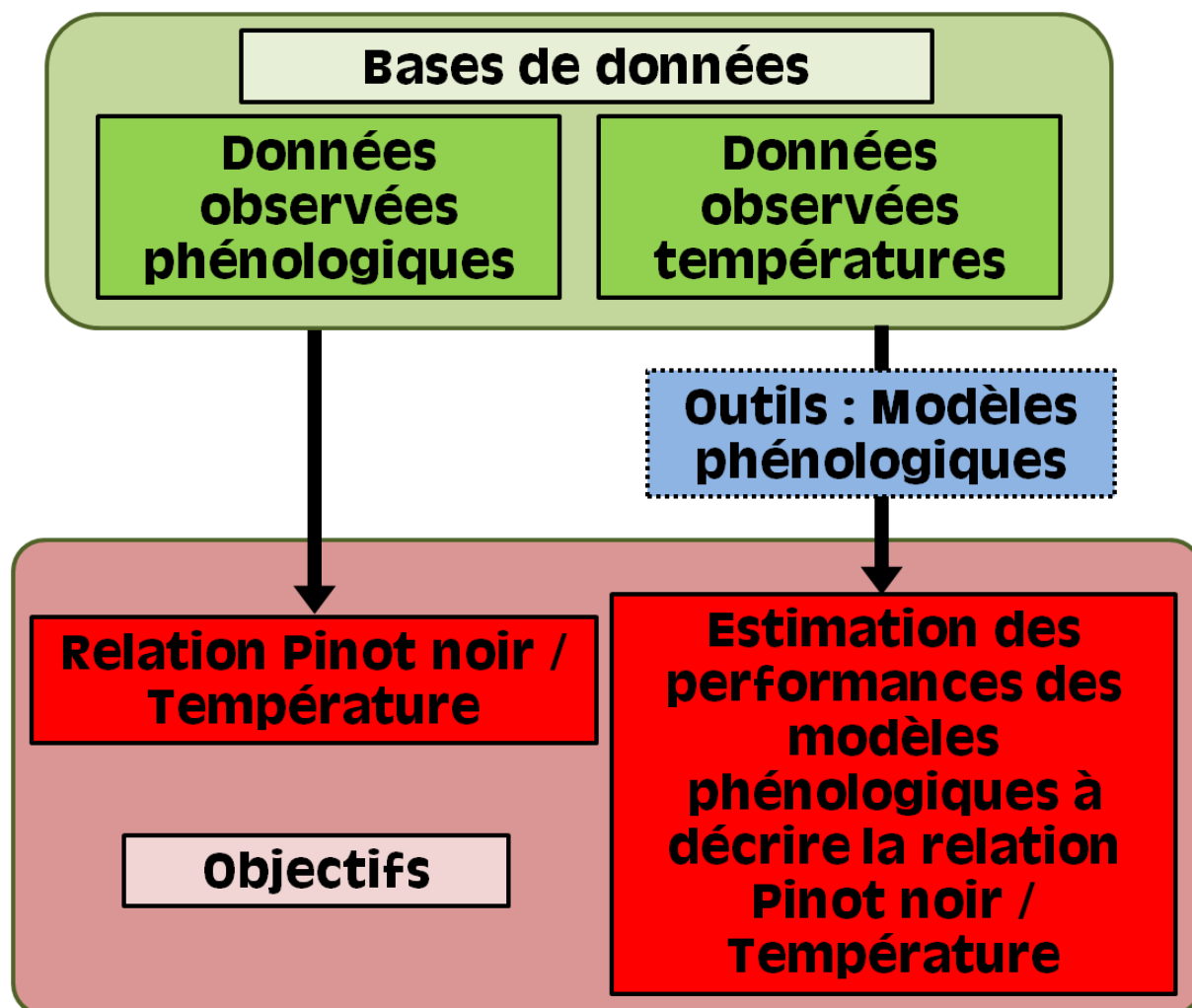


Figure C.1. Approche méthodologique mise en œuvre pour évaluer la relation température/Pinot noir en Bourgogne et estimer les performances des modèles phénologiques à décrire cette relation.



C.I. DONNÉES/MODÈLES PHÉNOLOGIQUES ET MÉTHODOLOGIE

C.I.1. Objectifs et organisation du chapitre

Pour passer de l'étude du réchauffement observé en Bourgogne depuis 1961 (*cf.* Chapitre B) à l'étude de ses impacts futurs sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne (*cf.* Chapitre D), nous avons jugé nécessaire d'évaluer ses impacts, passés et présents. **Le premier objectif de ce chapitre est de comprendre la relation entre le Pinot noir et la température en Bourgogne** (Figure C.1.). Cette relation est traitée dans la partie C.II. à l'aide d'indices agroclimatiques couramment utilisés en viticulture. Ces indices, principalement basés sur le principe de cumul thermique, sont présentés dans la partie C.I.3.a. En l'état actuel de la littérature, ces indices sont couramment utilisés pour effectuer des zonages climatiques de vignobles. Mais ils ne permettent pas d'évaluer avec précision l'impact passé et futur d'un réchauffement des températures sur la phénologie du Pinot noir.

Pour surmonter ce problème, nous avons choisi d'utiliser des modèles qui simulent des dates d'occurrences des stades phénologiques à partir de données de températures. Divers modèles existent, des plus simples, décrivant une relation linéaire entre la température et la réponse de la plante à des modèles plus proches des processus biologiques de la plante. Trois modèles phénologiques, de conception différente, ont retenu notre attention. Ils sont présentés dans la partie C.I.3.b. Ceci nous emmène **au deuxième objectif de ce chapitre, qui est d'estimer les différences entre les modèles phénologiques** (C.III.1.) lorsqu'on les applique sur les données de températures ponctuelles, mais également de **poser la question de leur fiabilité quant à leur application sur des climats plus chauds** (cas du changement climatique) (C.III.2.) (Figure C.1.).

Les modèles phénologiques sont appliqués aux données de températures spatialisées obtenues dans le chapitre B (C.III.3.). Rappelons que ces données de température ont été interpolées sur une maille à cinquante mètres puis agrégées à une maille de cinq kilomètres. La comparaison porte sur les dates d'occurrences des stades phénologiques observées et celles simulées par les trois modèles. Cela permet d'évaluer à la fois la variabilité spatiale des simulations des modèles, mais également d'obtenir des informations sur la fiabilité des spatialisations (*cf.* Chapitre B). Cela permet enfin d'évaluer la variabilité spatiotemporelle des dates d'occurrences potentielles des stades phénologiques en Bourgogne.

C.I.2. Données phénologiques

Deux séries d'observations phénologiques en Bourgogne ont été collectées (Figure C.2.).

La première, désignée ci-après « série SRAL », possède une grande profondeur temporelle, sur un seul site, pour lequel des observations de nombreux stades phénologiques sur Pinot noir et des mesures climatiques ont été réalisées sur la seconde moitié du XXe siècle, fournissant ainsi une base de données robuste pour la modélisation phénologique. Cette série consiste en des observations recueillies par le Service Régional de l'Alimentation (SRAL). La base de données contient la date d'occurrence des stades de 50 % de débourrement, de 50 % de floraison et de 50 % de véraison (stages 09, 65 et 83 de l'échelle BBCH, [Lorenz, 1994]) du Pinot noir pour chaque année de la période 1973-2007 (les années 1982, 1987, 1995, 2000, 2001, 2004 et 2005 présentent des valeurs manquantes). Le site d'observation, situé à Savigny-lès-Beaune (47,044°N-4,843°E), se trouve à proximité d'une station météorologique (~ cent mètres).

Pour le stade « maturité », nous avons choisi deux références : la date de ban des vendanges en Côtes de Beaune (source SRAL) et la date de début de vendanges au domaine Louis Latour situé à Aloxe-Corton (47,066°N-4,860°E), à quelques kilomètres de la parcelle et de la station de référence, sur la période 1942-2007.

La seconde série de données, désignée ci-après « série Respaud », offre une grande couverture spatiale, pour une profondeur temporelle plus réduite. Il s'agit d'une base de données réunissant des observations phénologiques (floraison essentiellement) réalisées par différents partenaires de la profession vitivinicole sur de nombreuses parcelles de Bourgogne (BIVB, Chambre d'agriculture de la Bourgogne et SRAL). Cette seconde série est un outil pertinent pour valider la spatialisation de la phénologie de la vigne en Bourgogne, simulée à partir de modèles phénologiques sur la base des températures quotidiennes interpolées (cf. Chapitre B).

Cette base de données phénologique a été mise en place par Respaud [2009] sur la période 1994-2008. Cette base comporte les observations phénologiques (cent quarante-six valeurs de mi-floraison et sept valeurs de mi-véraison) sur trente-six parcelles de Pinot noir.

Notons que par la suite, les stades de mi-floraison, mi-véraison seront appelés floraison et véraison.

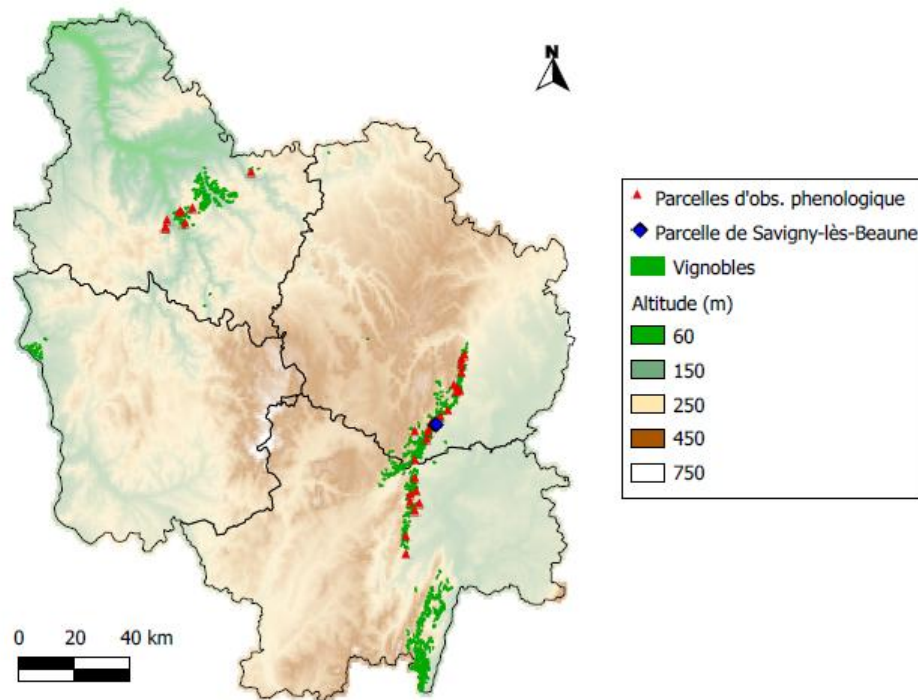


Figure C.2. Répartition des vignobles bourguignons et des parcelles d'observations phénologiques.

C.I.3. Indices et modèles phénologiques

La température de l'air joue un rôle essentiel en viticulture. Elle contrôle en majeure partie la vitesse de développement de la vigne [Huglin et Schneider, 1998], mais également la quantité [Buttrose, 1970] et la qualité du raisin [Buttrose *et al.*, 1971 ; Mori *et al.*, 2005].

La relation entre la température et la vitesse de développement de la vigne a fait l'objet de nombreuses recherches, dont certaines ont conduit à l'élaboration d'indices et de modèles plus ou moins complexes, permettant d'estimer, à l'aide de paramètres climatiques (ici, la température), les potentialités viticoles et/ou les dates d'occurrences des stades phénologiques de la vigne. Ces indices s'appuient presque exclusivement sur le concept de cumul de chaleur qui repose sur trois constats : 1/ en deçà d'une certaine température, le développement végétatif de la vigne est nul ; 2/ dans une certaine gamme, l'augmentation de la température conduit à un développement plus rapide de la vigne ; 3/ au-delà d'une certaine valeur pour laquelle la vitesse de croissance est maximale, l'augmentation de la température ralentit le développement de la vigne, voire empêche la croissance. La plupart des indices s'appuient sur les deux premiers constats, considérant que les situations dans lesquelles la température de l'air dépasse l'optimum de développement de la vigne sont rares.

Le cumul de chaleur, dans la plupart des indices agroclimatiques et modèles phénologiques, consiste à cumuler des degrés-jours (DD ou °C.J). Les degrés-jours sont les degrés au-dessus d'une certaine valeur appelée « zéro de végétation » ou « température de base ». Si la température mesurée est inférieure à la température de base, la valeur des degrés-jours est égale à zéro (l'impact des périodes froides n'est pas déductible). Le cumul des degrés-jours pour une période donnée est appelé somme des températures.

C.I.3.A. LES INDICES

Les degrés jours de Winkler [Amerine et Winkler, 1944]

Une des premières utilisations du concept de degrés-jours en viticulture, a été réalisée par Amerine et Winkler [1944] en Californie pour définir cinq types de régions viticoles en fonction des possibilités thermiques de leurs climats. Les degrés-jours dits « de Winkler » se calculent en sommant les températures moyennes quotidiennes supérieures à 10°C (50°F, la température de base), du 1^{er} avril au 31 octobre. On considère donc que les températures inférieures à 10°C n'ont qu'un effet minime, voire nul, sur le développement de la plante. Cet indice est bien corrélé avec les taux de sucres des baies ($r > 0,7$) [Huglin, 1978]. Winkler *et al.* [1974] proposent cinq classes de l'indice de Winkler afin de caractériser les régions viticoles : I : moins de 1371 DD ; II : 1371-1649 DD ; III : 1650-1926 DD ; IV : 1927-2205 ; V : plus de 2205 DD. Cette classification a été reprise par d'autres auteurs [Huglin et Schneider, 1998, par exemple].

Indice de Huglin (IH) [Huglin, 1978]

Cet indice est dérivé des degrés-jours de Winkler [Amerine et Winkler, 1944]. Huglin raccourcit la fenêtre temporelle utilisée pour le calcul : du 1^{er} avril au 30 septembre. Partant du postulat que certaines journées où la température moyenne est inférieure à 10°C peuvent comporter des températures diurnes supérieures à 10°C, il inclut les températures maximales dans le calcul. Enfin, la longueur du jour est prise en compte grâce à un coefficient variant de 1,02 à 1,06 en fonction de la latitude (40° et 50°). Pour la Bourgogne, ce coefficient est de 1,05 (entre 46°1' et 48°0').

$$IH = \sum_{0104}^{3009} \left[\frac{(Tmj - 10) + (Txj - 10)}{2} \right] \times K \text{ (éq. C.1)}$$

L'indice de Huglin (IH) est donc la somme, sur une période allant du 1^{er} avril au 30 septembre, de la moyenne des températures moyennes et maximales actives, affectée d'un coefficient k, représentant la longueur du jour (éq. C.1). Huglin [1978], considère qu'en dessous de 1 500°C.J pour cet indice, la culture de la vigne est compromise. Au-

delà de 2 400°C.J, Huglin considère que tous les cépages trouvent des conditions favorables.

Indice de fraîcheur des nuits (IF) [Tonietto, 1999]

La fraîcheur des températures nocturnes en période de maturation du raisin influence la coloration de la pellicule, la teneur en sucres et l'acidité du raisin de la baie [Mori *et al.*, 2005]. Ainsi, une température élevée en journée (sans excès) et une température fraîche pendant la nuit entraînent-elles une meilleure coloration des grains, des baies plus acides et plus sucrées. L'indice de fraîcheur des nuits, proposé par Tonietto [1999], vise à traduire l'impact jugé positif des nuits fraîches en période de maturation. Cet indice est égal à la température minimale du mois de septembre (moyenne des minimales en °C, hémisphère nord) [Tonietto, 1999]. Tonietto [1999] réalise un classement des nuits grâce à cet indice (Tableau C.1.) et montre que l'IF est un complément utile à l'IH pour définir plus précisément la variabilité thermique du milieu.

Indice de Fraîcheur des Nuits - *IF* (°C)

Classe de climat	Sigle	Intervalle de classe (°C)
<i>À nuits chaudes</i>	<i>IF</i> ₁	> 18
<i>À nuits tempérées</i>	<i>IF</i> ₂	> 14 ≤ 18
<i>À nuits fraîches</i>	<i>IF</i> ₃	>12 ≤ 14
<i>À nuits très fraîches</i>	<i>IF</i> ₄	≤ 12

Tableau C.1. Classe d'indice de fraîcheur des nuits [Tonietto, 1999].

D'autres indices existent : le Latitude-Temperature-Index (LTI) [Jackson et Cherry, 1988], le Latitude-Degree-Day (LDD) [Jackson et Cherry, 1988], l'indice de Fregoni [1973, cité par Fregoni et Pezzutto, 2000] ou encore, plus récemment, le BEDD (Biologically Efficient Degree Days [Gladstones, 1992 ; Jones *et al.*, 2009]. Ceux-ci ne sont pas utilisés dans cette thèse. Ces indices partagent le fait d'être liés à la température et la grande majorité intègre le concept des degrés-jours.

C.I.3.B. LES MODÈLES PHÉNOLOGIQUES

La simulation de la phénologie de la vigne s'appuie sur la vitesse de développement végétatif de la vigne en réponse à la température. De nombreux modèles existent. Certains prennent en compte une réponse linéaire de la plante à la température [Parker, 2011]. D'autres, privilégiant une approche biologique plus poussée, proposent une réponse plus complexe, basée sur des températures cardinales : des

températures minimale et maximale, en dessous et au-dessus desquelles la température n'a aucun impact sur la phénologie de la plante et une température optimale pour laquelle l'impact de la température est maximal [Garcia de Cortazar-Atauri, 2010]. Enfin, d'autres modèles utilisent une combinaison des deux types de modèles précédents, considérant que l'approche linéaire en début de cycle végétatif permet de simuler avec pertinence le développement des premiers stades phénologiques de la vigne, mais qu'en phase de croissance des fruits, il est nécessaire d'intégrer des modèles non-linéaires basés sur la réponse photosynthétique de la vigne aux conditions thermiques [Chuine et Beaubien, 2001 ; Chuine *et al.*, 2004].

Nous avons choisi de retenir trois modèles phénologiques principalement basés sur le concept de cumul thermique.

Le modèle Grapevine Flowering Veraison (GFV)

Le modèle GFV calcule la réponse linéaire de la plante à la température (Figure C.3.). Il s'agit d'un simple modèle de somme S_f (éq. C.2.) de températures supérieures à un zéro de végétation T_b (degrés-jours), cumulées quotidiennement à partir d'une date initiale t_0 . La date à laquelle S_f atteint un cumul seuil F^* donnée correspond à la date t_s d'occurrence d'un stade phénologique :

$$S_f(t_s) = \sum_{t_0}^{t_s} R_f(x_t) \geq F^* \quad (\text{éq. C.2.})$$

$$R_f(x_t) = GDD(x_t) = \begin{cases} 0 & \text{si } x_t < T_b \\ x_t - T_b & \text{si } x_t > T_b \end{cases} \quad (\text{éq. C.3.})$$

où R_f (éq. C.3.) est l'état de forçage de la température et correspond dans ce modèle à des degrés-jours ou Growing-Degree-Day (GDD dans l'équation C.3). x_t est la moyenne des températures minimale et maximale (moyenne) pour le jour t .

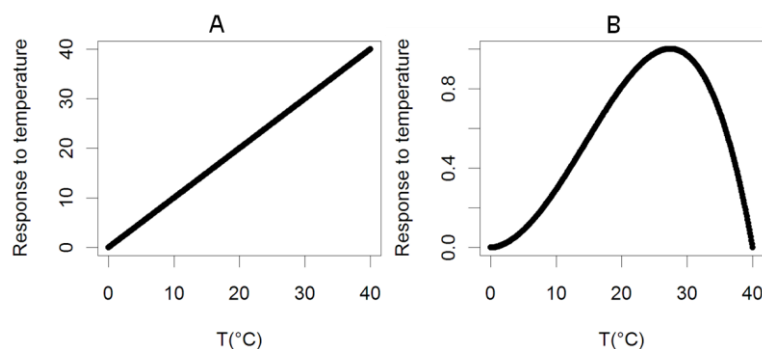


Figure C.3. Réponse des modèles phénologiques à la température. A gauche, le modèle GFV produit une réponse linéaire, proportionnelle à la valeur propre de la température. A droite, le modèle de Wang and Engel produit une réponse en cloche à la température, bornée par une température minimale (0°C) et maximale (40°C) et pour laquelle le sommet est obtenu pour une température optimale de 27,4°C.

Parker *et al.* [2011] ont paramétré les valeurs de t_0 , T_b et F^* (pour la mi-floraison et la mi-véraison) statistiquement à l'aide d'une base de données phénologiques et climatiques, réunissant plus de deux mille observations de dates d'occurrences des stades de mi-floraison et de mi-véraison parmi quatre-vingt-un cépages. Ces observations ont été réalisées au vignoble, en France (dont proviennent la majeure partie des données), en Italie (Toscane et Vénétie), Suisse (Vaudois) et Grèce (Péloponnèse). Les données de températures quotidiennes utilisées pour paramétrer le modèle proviennent de stations climatiques situées dans un rayon inférieur à cinq kilomètres du poste d'observation climatique présentant des écarts d'altitude de cent mètres au plus du point d'observation.

Les auteurs ont établi une valeur commune $t_0 = 60$ (le cumul débute au sixantième jour de l'année, soit le 1^{er} mars) et $T_b = 0^\circ\text{C}$ pour l'ensemble des cépages, constituant un compromis entre efficacité du modèle et simplicité d'utilisation du modèle. La valeur du zéro de végétation (T_b) de 0°C est la valeur qui, statistiquement, permet d'obtenir les simulations de date d'occurrence des stades de mi-véraison et mi-floraison avec la meilleure précision. Cette valeur est en désaccord avec les conclusions de nombreux travaux scientifiques s'intéressant à l'influence de la température sur le développement de la vigne [Pouget, 1972 ; Huglin, 1978 ; Moncur *et al.*, 1989]. Ceux-ci suggèrent un zéro de végétation de la vigne entre 5° et 13°C selon les stades de développement et les cépages. Pour chaque cépage, des valeurs différentes de F^* pour les stades de mi-floraison et mi-véraison ont été calculées par minimisation de l'erreur quadratique moyenne entre la date simulée par le modèle et la date d'occurrence du stade phénologique observée.

Pour le Pinot noir, F^* est égal à 1 219 pour la floraison et 2 507 pour la véraison. Pour ce même cépage, les valeurs d'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour la validation du modèle sont de 4,19 jours pour la floraison et de 8,07 jours pour la véraison.

Wang–Engel model (WE)

Ce modèle, plus sophistiqué, a été proposé par Wang et Engel [1998] pour le blé et adapté à la vigne par Garcia de Cortazar Atauri *et al.* [2010]. Il est caractérisé par une réponse dite « en cloche » (*bell shaped*) du développement de la vigne à la somme de température (éq. C.4. et figure C.3.). Ce modèle a été choisi pour son approche mécaniste, théoriquement plus proche de la réponse biologique de la vigne à la température de l'air. Il prend en compte trois températures primordiales : une température optimale et des seuils (valeurs minimale et maximale) en dessous et au-dessus desquels la température n'a aucun impact sur la plante.

Le modèle prend la forme suivante :

$$F^* = \sum_{t=0}^{t_{ver}} C(T_t) \quad (\text{éq. C.4.})$$

$$C(T_t) = \begin{cases} \frac{2(T_t - T_{min})^\alpha (T_{opt} - T_{min})^\alpha - (T_t - T_{min})^{2\alpha}}{(T_{opt} - T_{min})^{2\alpha}} & ; \text{ if } T_{min} < T_t < T_{max} \\ 0 & ; T_t < T_{min} \text{ or } T_t > T_{max} \end{cases} \quad (\text{éq. C.5.})$$

Le paramètre α de l'équation (5) est donné par :

$$\alpha = \frac{\log 2}{\log \left[\frac{T_{max} - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right]} \quad (\text{éq. C.6.})$$

où $C(T_t)$ est la mesure de températures de la journée. t , t_0 et x_t ont les mêmes significations et unités que pour les équations (2) & (3). Les trois paramètres de températures sont la température en dessous (T_{min}) ou au-dessus (T_{max}) desquelles l'activité de la vigne est considérée comme nulle et une température considérée comme optimale (T_{opt}) pour le développement de la vigne. Le stade de 50 % de véraison est atteint lorsque l'accumulation de la température atteint le seuil d'impact F^* . Les valeurs utilisées dans cette étude sont les suivantes : $F^* = 89,2$, $t_0 =$ le 74^e jour de l'année (15 mars), $T_{min} = 0^\circ\text{C}$, $T_{max} = 40^\circ\text{C}$ et $T_{opt} = 27,4^\circ\text{C}$. Les valeurs des paramètres ont été ajustées pour le calcul de la date de véraison du Pinot noir par Garcia de Cortazar Atauri *et al.* [2010], en s'appuyant sur la même base de données que celle utilisée par Parker *et al.* [2011], pour le paramétrage du modèle GFV. La validation du modèle conduit à une RMSE pour les dates de véraison du Pinot noir de 7,6 jours.

On peut remarquer que le modèle GFV commence au soixantième jour de l'année et le modèle WE commence au soixante-quatorzième jour de l'année. Cet écart de quatorze jours entre les deux dates de départ pourrait créer des incertitudes ou des différences dans les prévisions. En outre, les bornes du modèle WE et la température optimale imposent une date limite avant laquelle le stade de véraison ne peut avoir lieu. Théoriquement, cela se produit si tous les jours ont mesuré une température égale à la température optimale (c'est-à-dire $27,4^\circ\text{C}$ pour le Pinot noir), ce qui implique un impact quotidien maximal de 1. Cette date est le cent soixante-quatrième jour de l'année (13 juin). Le Pinot noir aurait donc au minimum quatre-vingt-dix jours pour atteindre le stade de véraison. Cette limite n'existe pas pour le modèle

GFV, ce qui signifie que plus les températures sont élevées, plus la date de véraison sera précoce.

Le modèle de Chuine [Chuine *et al.*, 2004]

Les recherches de Chuine *et al.* [2004] ont abouti à l'élaboration d'un modèle d'estimation des dates d'occurrence de la floraison, de la véraison et de la maturité pour le Pinot noir. Ce modèle est basé sur des données phénologiques et climatiques collectées à Colmar (France) entre 1964 et 2001.

Présentation du modèle

Chuine *et al.* [2004] font remarquer que la date de vendanges dépend essentiellement des deux stades qui la précèdent : la floraison et la véraison (corrélations respectives entre dates de vendanges et dates de floraison et de véraison: $r=0,90$, $p<0,0001$ et $r=0,92$, $p<0,0001$). Ainsi le modèle est-il décomposé en deux sous-modèles : le premier permet de simuler la date de floraison et le second la date de véraison. La maturité du Pinot noir ayant lieu en moyenne 33,5 jours après la véraison, elle pourra être estimée une fois la date de cette dernière connue.

Le modèle de floraison

Le modèle de floraison (Figure C.4.) reprend le principe des sommes de températures, avec une température de base T_b fixée à $8,63^\circ\text{C}$. Le calcul des sommes thermiques débute le quatre-vingt-douzième jour (2 avril) de l'année civile (hémisphère nord) et se poursuit jusqu'à ce que la somme-seuil soit atteinte, en l'occurrence $412,97^\circ\text{C}$: nous obtenons ainsi le jour de floraison simulé.

Le modèle de véraison

Ce modèle est lui-même divisé en deux sous-modèles correspondant aux deux phases de développement du fruit : une phase courte d'élongation des cellules (du jour t_f au jour t_1) et une seconde phase (du jour t_1 au jour t_v) d'accumulation de sucres produits par l'activité photosynthétique de la plante (photosynthétats). Les deux phases correspondent à des cumuls thermiques, mais à partir d'équations qui traduisent dans un premier temps le rythme d'élongation cellulaire $R_v(x_t)$, puis, dans un second temps, le cumul de photosynthétats $R_p(x_t)$ en réponse à la température (Figure C.4.) :

$$R_v(x_t) = \frac{1}{1 + e^{a(x_t - b)}}, \quad (\text{éq. C.7.})$$

et

$$R_p(x_t) = mx_t^3 + nx_t^2 + ox_t + p, \quad (\text{éq. C.8.})$$

$$m = \frac{-35n - o}{1425}, \quad (\text{éq. C.9.})$$

$$n = \frac{o(475 - T_o^2)}{T_o(35T_o - 950)}, \quad (\text{éq. C.10.})$$

$$p = 100 + oT_o \frac{(27075 - 1330T_o + 19T_o^2)}{57(35T_o - 950)}, \quad (\text{éq. C.11.})$$

$$o = \frac{-5700T_o(35T_o - 950)}{19T_o^4 - 1330T_o^3 + 15675T_o^2 + 266000T_o + 760000}, \quad (\text{éq. C.12.})$$

où a et b sont des paramètres empiriques ayant pour valeur $-0,504$ et $17,541$ respectivement ; T_o est la température optimale d'activité photosynthétique, ajustée à $20,34^\circ\text{C}$.

Les dates t_1 et t_v sont obtenues lorsque les cumuls thermiques atteignent les valeurs C^* et P^* , respectivement :

$$\sum_{t_f}^{t_1} R_v(x_t) = C^*, \quad (\text{éq. C.13.})$$

$$\sum_{t_1}^{t_v} R_p(x_t) = P^* \quad (\text{éq. C.14.})$$

Après paramétrage à partir de la base de données phénologiques et climatiques utilisée par Chuine *et al.* [2004], $C^*=15,96$ et $P^*=3605,9$.

Obtention de la date de maturité

Lorsque la date de véraison t_v est connue, la date de maturité est obtenue par ajout de 33,5 jours à cette date.

La simulation de dates de floraison/véraison/maturité à l'aide de données climatiques passées va permettre leur comparaison avec les données phénologiques observées pour les mêmes périodes. Ces données phénologiques serviront à la validation du modèle pour la Bourgogne.

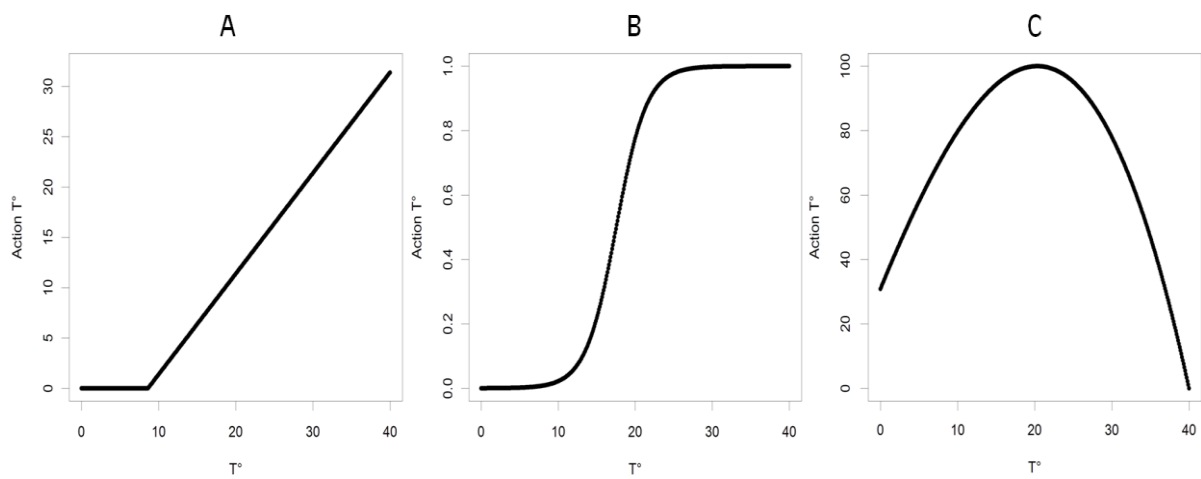


Figure C.4. Réponse des trois étapes du modèle de Chuine à la température. A : modèle de floraison ; B : première partie du modèle de véraison ; C : seconde partie du modèle de véraison.



C.II. RELATION TEMPERATURE/PHÉNOLOGIE DU PINOT NOIR EN BOURGOGNE

Cette partie a pour but d'étudier et de quantifier la relation, actuelle et passée, entre la température et la phénologie du Pinot noir en Bourgogne. Dans un premier temps (C.II.1. et C.II.2.), l'étude porte sur la variabilité intrasaisonnière de la phénologie du Pinot noir à Savigny-lès-Beaune et de son évolution interannuelle. Pour ce faire, est réalisé un parallèle entre stades phénologiques et températures sur la période 1961-2009. Notons que les quatre stades phénologiques étudiés dans cette partie et plus largement dans ce chapitre sont le débourrement, la floraison, la véraison et la maturité (*cf.* Chapitre A.II.1.). La relation avec la température est étudiée à travers l'utilisation des indices de Winkler, de Huglin et de fraîcheur des nuits.

Les variabilités temporelles (C.II.3.) et spatiales (C.II.4) de ces indices (C.I.3.a.) sont étudiées. L'étude temporelle de la variabilité des indices a été réalisée sur la période 1961-2009, appliquant les indices aux huit stations ayant mesuré des températures sur toute cette période. La variabilité spatiale a été étudiée sur la période 1989-2009, période pour laquelle nous disposons des données de températures spatialisées (*cf.* Chapitre B).

C.II.1. Variabilité temporelle de la phénologie de la vigne

En moyenne, sur la période 1988-2008, à Savigny-lès-Beaune, le mi-débourrement (stade C – pointe verte) du Pinot noir a lieu le 9 avril, la mi-floraison le 13 juin, la mi-véraison le 20 août et celui de la maturité le 17 septembre (Figure C.5.). La variabilité interannuelle est maximale pour le débourrement (écart interquartile = 17 jours) et minimale pour la floraison (EI = 5 jours) et la véraison (EI = 6 jours).

La précocité d'un millésime est souvent considérée en fonction de la date de vendanges. Cette dernière résulte en grande partie de la température moyenne de la saison de végétation [Chuine, 2004 ; Le Roy Ladurie *et al.*, 2006]. Ainsi, la variabilité interannuelle de la date de récolte est liée à la variabilité interannuelle des températures. De même, les stades phénologiques avant maturité, tels que le débourrement, la floraison ou encore la véraison, renseignent sur la réponse de la vigne aux variations saisonnières, mensuelles, voire quotidiennes, des conditions climatiques. En conséquence, un millésime peut afficher une grande précocité concernant certains des premiers stades phénologiques sans que la date de maturité soit particulièrement précoce.

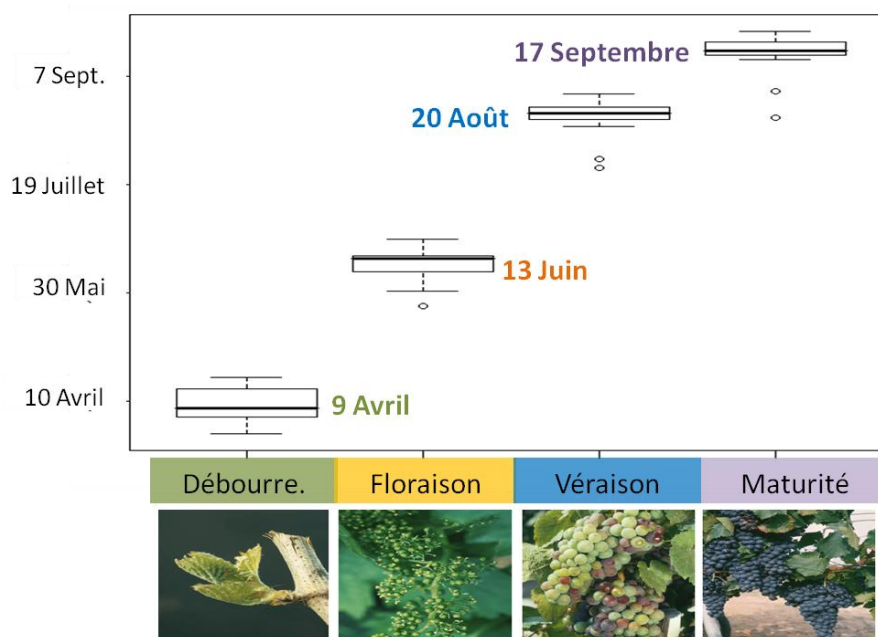


Figure C.5. Dates d'occurrences des stades phénologiques du Pinot noir à Savigny-lès-Beaune (1988-2008).

C.II.2. Évolution temporelle de la phénologie du Pinot noir à Savigny-lès-Beaune

La figure C.6. présente l'évolution depuis 1961, les températures et dates d'occurrence des principaux stades phénologiques du Pinot noir observées à Savigny-lès-Beaune. Les quatre stades montrent un écart entre les dates extrêmes plus faible (ou similaire pour la floraison) pour la période 1988-2008 que pour la période 1961-1987.

Sur la période 1961-2008, la date de maturité varie entre le 19 août (2003) et le 19 octobre (1980), soit cinquante-huit jours. Avant 1987, l'écart maximal en termes de date de maturité est de trente-neuf jours (du 11 septembre au 16 octobre), alors qu'il est de trente-huit jours (19 août au 26 septembre) de 1988 à 2008. Si l'on ôte l'année 2003 qui est extrêmement précoce, l'écart maximal se réduit à vingt-six jours (31 août au 26 septembre).

La date de véraison varie entre le 28 juillet (2003) et le 16 septembre (1980) sur la période 1961-2008, soit quarante-neuf jours. Avant 1987, l'écart maximal en termes de date de véraison est de vingt-sept jours (du 20 août au 16 septembre), alors qu'il est de vingt-quatre jours (28 juillet au 21 août) de 1988 à 2008. Si l'on ôte l'année 2003, extrêmement précoce, l'écart maximal se réduit à dix-sept jours pour la période récente (4 août au 21 août).

Sur la période 1961-2008, la date de floraison varie entre le 21 mai (2007) et le 4 juillet (1980), soit quarante-cinq jours. Avant 1987, l'écart maximal en termes de date

de floraison est de trente-deux jours (du 30 mai au 1^{er} juillet), alors qu'il est de trente-quatre jours (21 mai au 24 juin) de 1988 à 2008.

Enfin, la date de débourrement varie de trente-huit jours entre le 31 mars (1989 et 2003) et le 8 mai (1970) pour la période 1961-2008. Avant 1987, l'écart maximal en termes de date de débourrement est de trente-quatre jours (du 4 avril au 8 mai), alors qu'il est de vingt-trois jours (31 mars au 23 avril) de 1988 à 2008.

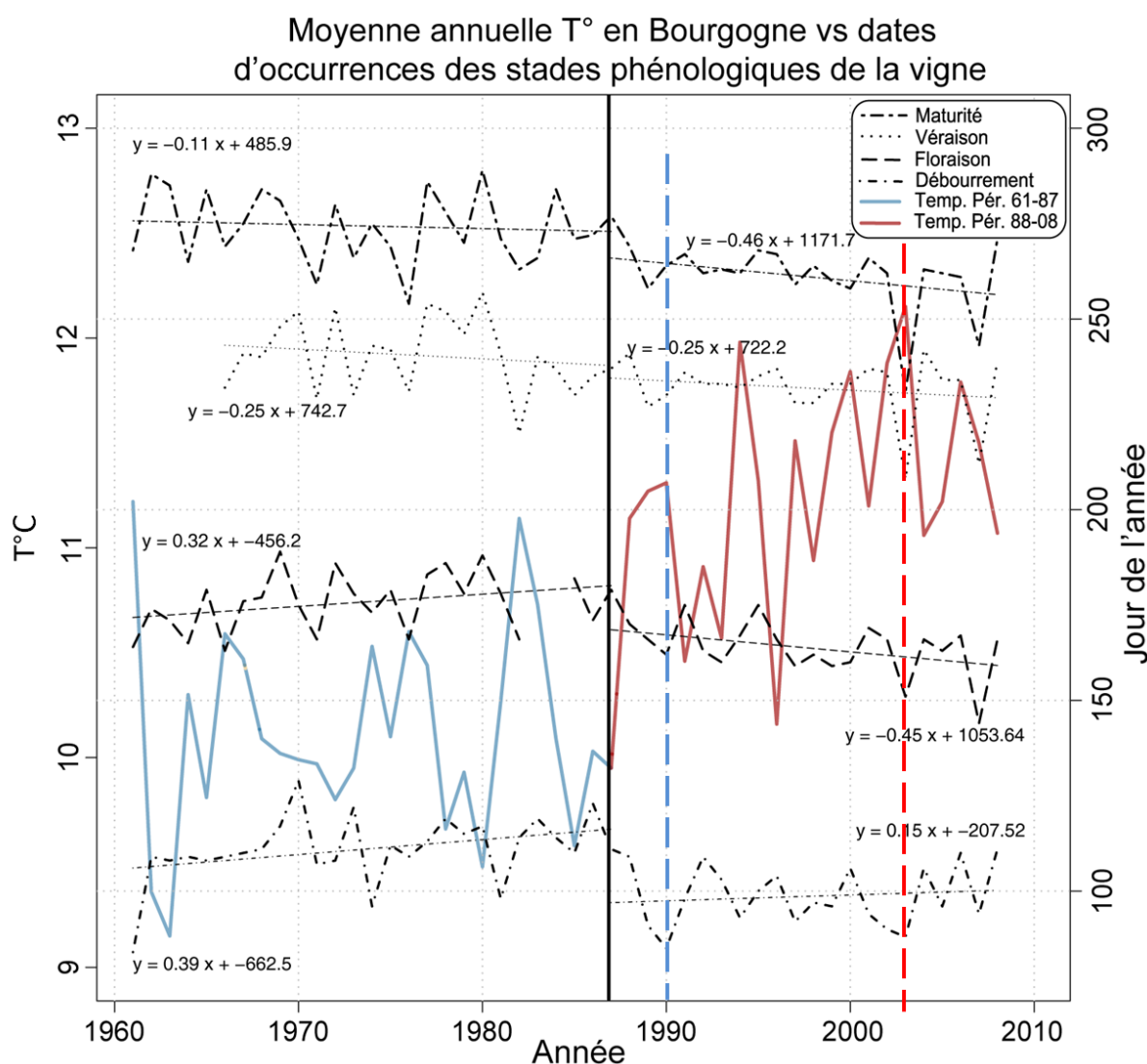


Figure C.6. Moyennes annuelles des températures en Bourgogne et dates d'occurrences des stades de débourrement, de floraison, de véraison et de maturité du Pinot noir à Savigny-lès-Beaune. Les barres verticales en pointillés identifient les années 1990 (bleu) et 2003 (rouge). La barre en trait plein noir indique la date de la rupture climatique.

Les dates d'occurrences de débourrement, de floraison, de véraison et de maturité étudiés sont présentées dans la figure C.7. En ce qui concerne les dates de débourrement, les deux séries (1961-1987 et 1988-2008) sont significativement différentes ($t.test_{0,95}$), les dates moyennes passant du 19 avril au 12 avril. C'est encore plus net ($t.test_{0,99}$) pour les dates de floraison et de véraison qui passent

respectivement du 19 juin au 10 juin et du 31 août au 11 août. Ceci correspond à une précocité moyenne des stades de débourrement, floraison et véraison de respectivement de sept, neuf et vingt jours. Pour la maturité, la date moyenne passe du 1^{er} octobre au 17 septembre, soit un avancement de quatorze jours. Pour la floraison, la véraison et la maturité, on observe également une diminution de l'écart interquartile de respectivement 2, 12,5 et 8,5 jours. Depuis 1988, une moindre variabilité interannuelle de l'ensemble des stades phénologiques du Pinot noir se combine donc à leur précocité.

Le graphique de la figure C.6. renseigne également sur les pentes des régressions linéaires pré et post-ruptures. En ce qui concerne le débourrement, les pentes associées aux deux sous-périodes sont positives. Cela signifie que, théoriquement, lorsque nous prenons les deux sous-périodes indépendamment l'une de l'autre, les dates de débourrement sont de plus en plus tardives. Cependant, en comparant les moyennes des deux sous-périodes, nous constatons une précocité de sept jours des dates de débourrement de la période 1988-2008 par rapport à celles de la période 1961-1987. Cela indique que les dates de débourrement sont marquées par un saut à la fin des années 1980 qui a induit cette précocité sur la période récente.

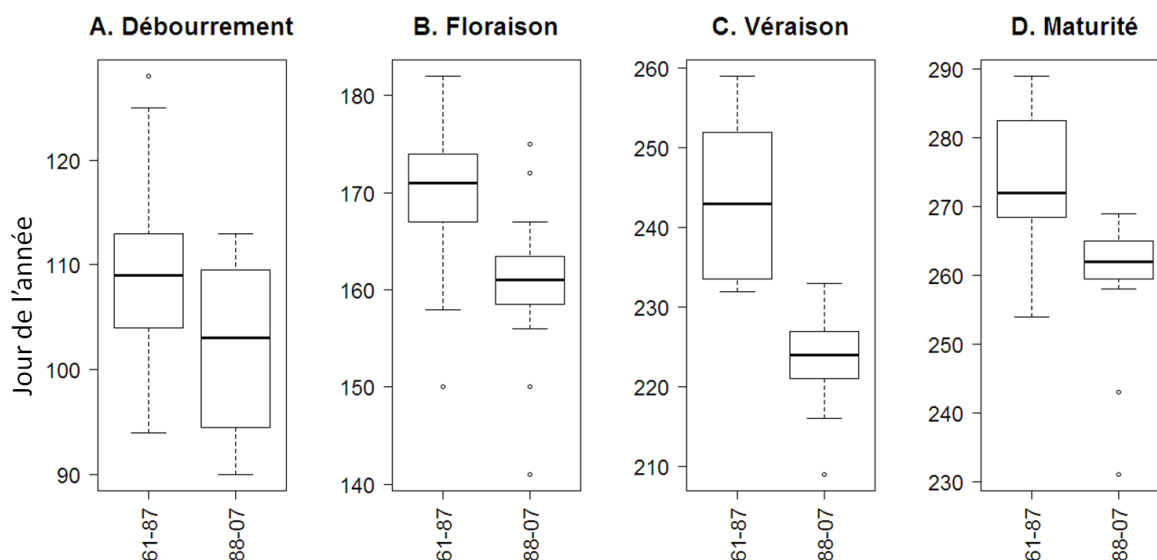


Figure C.7. Boxplots (1961-1987 et 1988-2007) des dates de débourrement (A), de floraison (B), de véraison (C) et de maturité (D) du Pinot noir à Savigny-lès-Beaune.

Pour la véraison et la maturité, les signes des pentes sont cohérents avec les précocités observées. Pour la véraison, la pente est identique pour les deux périodes, ce qui montre que la tendance à la précocité de ce stade est quasi continue sur la période 1961-2008. Pour la maturité, la pente est plus forte pour la période récente que pour la période ancienne. Cela sous-entend que ce stade tend à devenir de plus en plus précocé, et ce de plus en plus rapidement. Cette évolution est cohérente avec

l'évolution des températures avant et après la rupture. Enfin, pour la floraison, la pente est positive pour la période ancienne et négative pour la période récente, proche du profil d'évolution des dates de débourrement.

L'année 2003 est caractérisée par sa date de maturité très précoce (19 août, la moyenne de la période étant le 17 septembre). Pourtant, cette même année, la floraison et surtout le débourrement ont présenté une précocité moindre (respectivement : 30 mai (moy. = 10 juin) et 31 mars (moy. = 12 avril)). L'année 2003 se caractérise par des températures anormalement élevées en juin et août. Cette singularité est relativement intéressante pour l'analyse du changement climatique probable au XXI^e siècle, l'été 2003 ayant un profil climatique susceptible d'être fréquemment rencontré vers la fin du XXI^e siècle [Schar *et al.*, 2004]. Ainsi, pourrait-on s'attendre vers la fin du XXI^e siècle à un début de la récolte en Bourgogne vers mi-août. Cependant, cette supposition dépend en grande partie des scénarios climatiques du SRES et cette thèse n'a pas pour but de prévoir le changement climatique d'ici la fin du siècle.

Lors de l'année 1990, pour laquelle la maturité est dans la moyenne de la période considérée (21 septembre pour une date moyenne au 17 septembre), on observe le débourrement le plus précoce de la période 1988-2008 (26 mars pour une date moyenne au 12 avril). Il est probable que ce stade dépend plus des dates de levée de la dormance ou de la quantité d'énergie solaire reçue à un endroit donné, qui elle-même peut dépendre de conditions climatiques locales (brouillard, par exemple), ou à un réchauffement plus rapide au printemps qui participe probablement à un débourrement plus précoce. Ici, un hiver doux, suivi d'un printemps frais ont conduit à ces occurrences de dates cette année-là.

La tendance à la précocité des stades phénologiques du Pinot noir en Bourgogne est clairement identifiée. L'utilisation d'indices agroclimatiques, basés quasi exclusivement sur la température, est-elle adaptée à notre étude et permet-elle d'apprécier la variabilité spatiotemporelle de la phénologie du Pinot noir ?

C.II.3. Variabilité temporelle des indices agroclimatiques

La première étape de cette analyse de la variabilité temporelle des indices agroclimatiques a été de comparer les valeurs de l'indice de Huglin aux dates de maturité observées à Savigny-lès-Beaune. L'indice de Huglin, calculé pour la station de Savigny-lès-Beaune, est fortement corrélé aux dates de maturité observées ($r^2 = 0,77$, figure C.8). Le graphique de la figure C.8. permet de quantifier la relation entre l'indice de Huglin (IH) et les dates de maturité : une augmentation de l'IH de 160 degrés-jours (°C.J) équivaut à une précocité du stade d'environ dix jours.

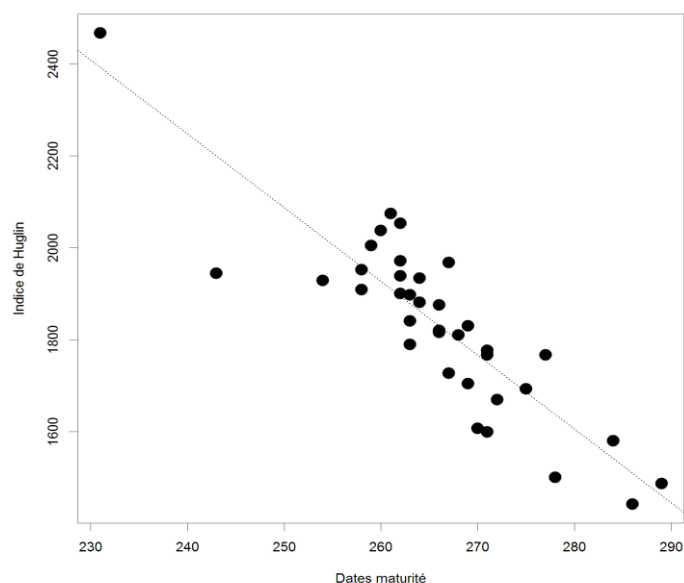


Figure C.8. Dates de maturité observées à Savigny-lès-Beaune et indice de Huglin (°C.J)

Afin d’apprécier les variations temporelles des indices de Winkler et de Huglin, les valeurs de ces indices sont comparées pour sept stations (Figure C.9., deux stations de la Côte viticole, deux stations d’altitude, une station au nord de la Bourgogne, une station en plaine de Saône et une station située à Chablis). Les deux sous-périodes (1961-1987 et 1988-2009) sont analysées.

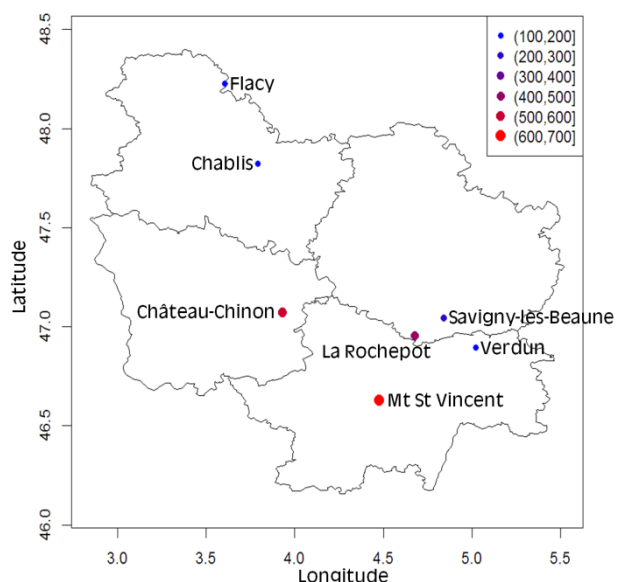


Figure C.9. Stations utilisées dans l’analyse de la variabilité temporelle des indices agroclimatiques. La gamme de couleurs représente l’altitude des stations (en mètres).

Les stations situées en altitude (Château-Chinon et Mont-Saint-Vincent) ont des indices faibles (Figure C.10.). La station le plus au nord (Flacy) obtient des valeurs

similaires à la station de La Rochepot (Hautes Côtes de Beaune), ce qui signifie que les deux stations sont dans des conditions thermiques assez proches. Les stations situées dans les vignobles (Savigny-lès-Beaune et Chablis) ont des résultats proches concernant l'indice de Huglin, alors que la station de Savigny-lès-Beaune montre de plus fortes valeurs sur l'indice de Winkler. La station située en plaine de Saône (Verdun) obtient les valeurs les plus fortes et ce pour les deux indices.

Conformément à ce que Bonnefoy *et al.* [2008] avaient montré, les indices à La Rochepot pour la période 1988-2009 correspondent à ceux de la station de Savigny-lès-Beaune pour la période 1961-1987. Le constat est le même pour la station de Flacy qui obtient des valeurs d'indice de Huglin pour la période 1988-2009 proches de celles de la station de Verdun (plaine de Saône) pour la période 1961-1987. Ceci confirme une migration latitudinale et altitudinale des conditions thermiques en Bourgogne au cours des derniers cinquante ans.

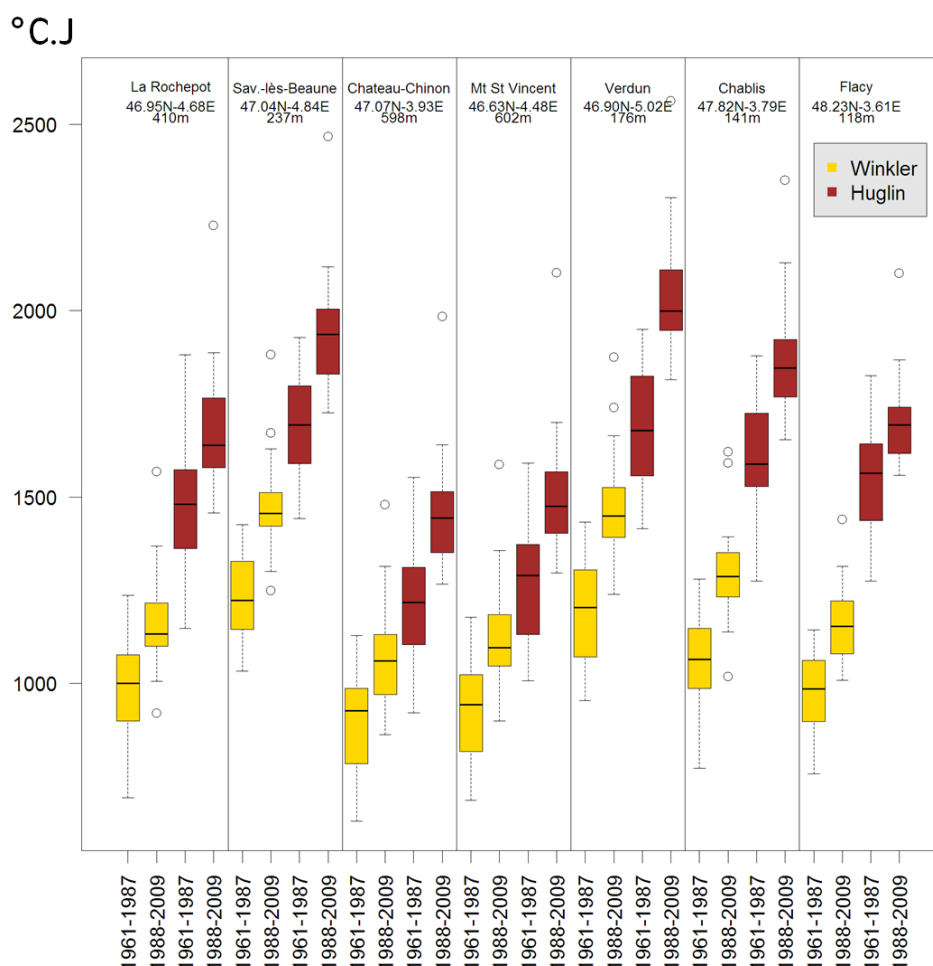


Figure C.10. Boxplot (1961-1987 et 1988-2009) des indices de Winkler (jaune) et de Huglin (marron) pour sept stations de Bourgogne. Les valeurs des indices (en ordonnée) sont en degrés-jours (°C.J).

Les variations d'une période à l'autre de l'indice de fraîcheur des nuits sont moins évidentes (Figure C.11.). Ceci est cohérent avec les résultats présentés au chapitre

B.II.3. (Figure B.13.) qui montrent que la température n'a que très faiblement augmenté en automne (SON). Contrairement aux indices de Winkler et de Huglin, l'indice de fraîcheur des nuits des stations d'altitude est proche de celui de Savigny-lès-Beaune. Si la différence entre le nord et la plaine de Saône reste importante, la station de La Rochepot est très proche de celle du Chablis en termes de fraîcheur des nuits.

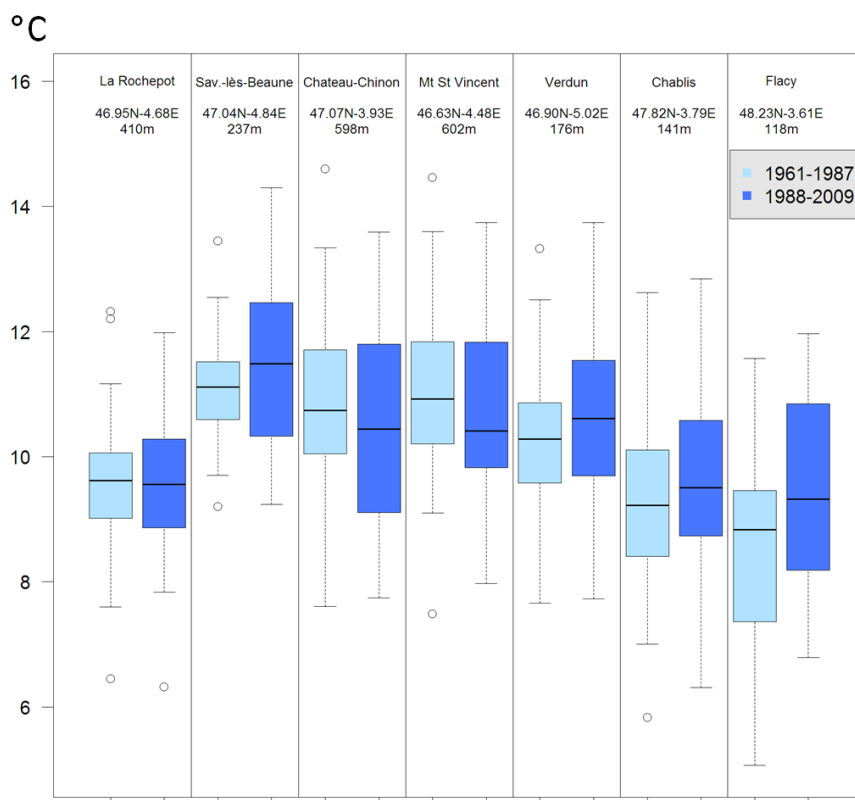


Figure C.11. Boxplot (1961-1987 et 1988-2009) des indices de fraîcheur des nuits pour sept stations de Bourgogne.

C.II.4. Variabilité spatiale des indices sur la Bourgogne

La variabilité spatiale de la phénologie est en grande partie définie par les conditions topoclimatiques et plus particulièrement par la température qui sera modulée, entre autres, par l'altitude, l'exposition au soleil du vignoble ou l'environnement direct (présence de végétation à proximité du vignoble...) (cf. Chapitre A). Cette température connaît des variations qui agiront différemment selon le stade phénologique. Par exemple, le stade floraison est systématiquement plus précoce dans le vignoble mâconnais que dans le Chablisien, traduisant un effet latitudinal du climat. *A contrario*, les dates de débourrement ne présentent pas la même structure spatiale [Respaud, 2009].

Les indices de Winkler, de Huglin et de fraîcheur des nuits sont appliqués aux données de températures minimales et maximales quotidiennes spatialisées (cf.

Chapitre B.IV.) sur la période 1989-2009. Ainsi, pour chaque année et chaque pixel du territoire bourguignon, une valeur de ces indices est calculée.

Les cartes d'indices de Winkler (figure C.12.) indiquent que globalement, l'ensemble du territoire bourguignon est en région I [Winkler *et al.*, 1974], c'est-à-dire que les valeurs de l'indice ne dépassent jamais 1371°C.J sauf en plaine de Saône qui est généralement située en région II. Pour les années 2005, 2006 et 2009, la plaine de Saône était identifiée en région III et l'année 2003, exceptionnellement chaude place la plaine de Saône en région IV et l'ensemble de la Bourgogne en région II et III soit dans les conditions de la plaine de Saône pour les autres années. Les valeurs le plus fortes (faibles) sont obtenues pour les années 2003 et 2006 (1996). De plus, les années pour lesquelles l'indice est le plus élevé se situent après 1998.

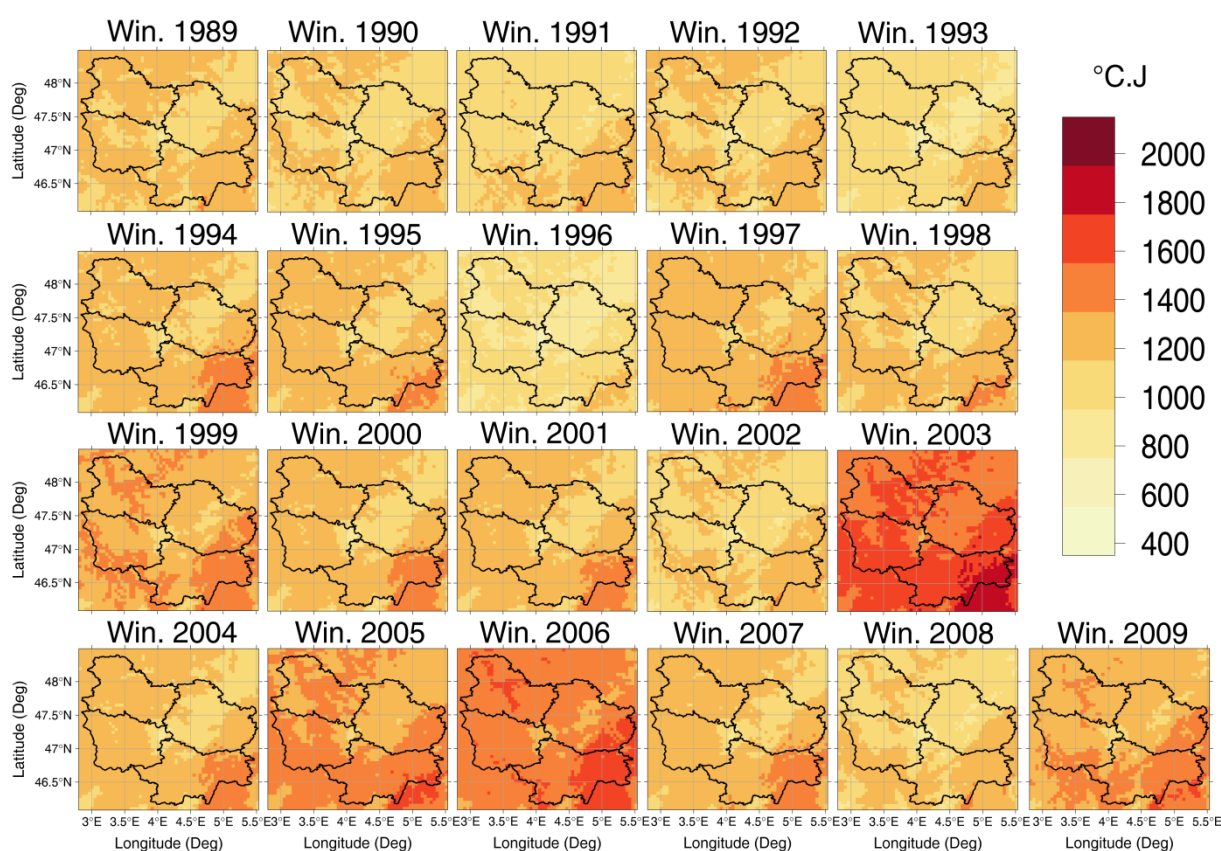


Figure C.12. Indice de Winkler (°C.J) appliqué aux données de températures spatialisées à une maille de cinq kilomètres.

Comme énoncé en partie C.I.3.a, Huglin estime qu'en deçà d'une valeur de 1 500°C.J de l'IH, la culture de la vigne est compromise. En Bourgogne, elle est de 1 710°C.J sur la période 1961-2009. Huglin [1978] estime que l'exigence du Pinot noir et du Chardonnay pour arriver à un taux de sucres de 180/200 g/L est de 1 700°C.J. Les cartes de la figure C.13 résultent de l'interpolation de l'IH moyen des périodes 1968-1987 et 1988-2007. Cet indice est calculé à chaque station disponible, puis

interpolé par la méthode des 'splines' en plaques minces intégrant l'altitude comme covariable environnementale (cf. B.III.2.c).

Dans la région de Chablis, l'indice de Huglin est passé de 1 400-1 600°C.J (période 1968-1987) à 1 600-1 800°C.J (période 1988-2007). Sur la Côte, il passe de 1 600-1 700°C.J à 1 800-2 000°C.J. Du fait du poids donné au Tx, l'indice de Huglin et l'altitude sont fortement corrélés, ce qui souligne le rôle du relief (Figure C.13.). Si l'on s'en réfère aux exigences thermiques des cépages proposées par Huglin [1978], avant 1987 le Pinot noir pouvait potentiellement arriver à maturité (180/200 g/L) en plaine de Saône, sur la Côte viticole et dans le fond des vallées de l'Yonne et de la Nièvre. Désormais, il peut potentiellement arriver au même niveau de maturation sur l'ensemble du territoire bourguignon, hormis sur les secteurs le plus élevés (Seuil de Bourgogne et Morvan).

Les zones viticoles situées au centre de l'Yonne (Chablisien et Tonnerrois), dans la partie sud-est de la Côte-d'Or et en Saône-et-Loire jouissent, dans l'ensemble, de valeurs d'indices de Huglin assez élevées, en comparaison avec le reste du territoire bourguignon. La Saône-et-Loire affiche généralement les valeurs le plus élevées.

La valeur de l'IH n'est inférieure à 1 500°C.J que sur le Morvan et le Seuil de Bourgogne (Figure C.14.). Sur le reste du territoire, sauf en 1993 et 1996, l'IH est supérieur à cette valeur limite. En raison du poids de la température maximale dans le calcul des degrés-jours de Huglin, il est naturel que les structures spatiales de l'indice de Huglin soient très proches de celles des températures maximales.

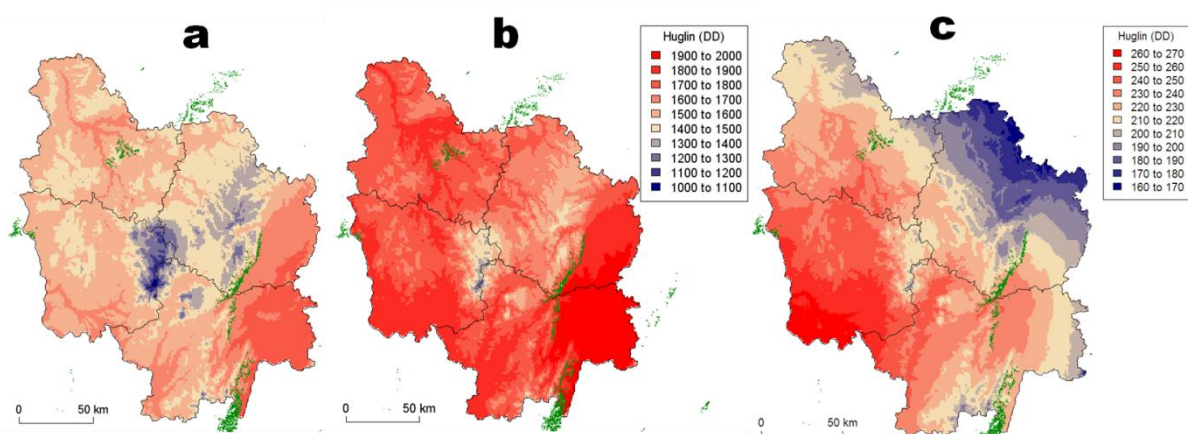


Figure C.13. Indice de Huglin interpolé. Variable dépendante : altitude, maille : un kilomètre. A) Période 1968-1987 ; B) Période 1988-2007. C) Différences 1988-2007 / 1968-1987. En vert, les parcelles de vignes. L'acronyme DD (de l'anglais *degrees days*) signifie degrés-jours.

Il n'est donc pas étonnant d'observer des valeurs d'indice de Huglin très fortes en 2003 (supérieures à 1 800 sur l'ensemble de la Bourgogne) et relativement élevées en 2006 et 2009. Ces trois années présentent des valeurs de températures maximales

plus élevées pendant le printemps et l'été (cf. Figure B.13.). Comme pour l'indice de Winkler, les valeurs le plus élevées sont observées en plaine de Saône. Les valeurs sur la Côte viticole sont toutes supérieures à 1 200°C.J, sauf pour l'année 1996.

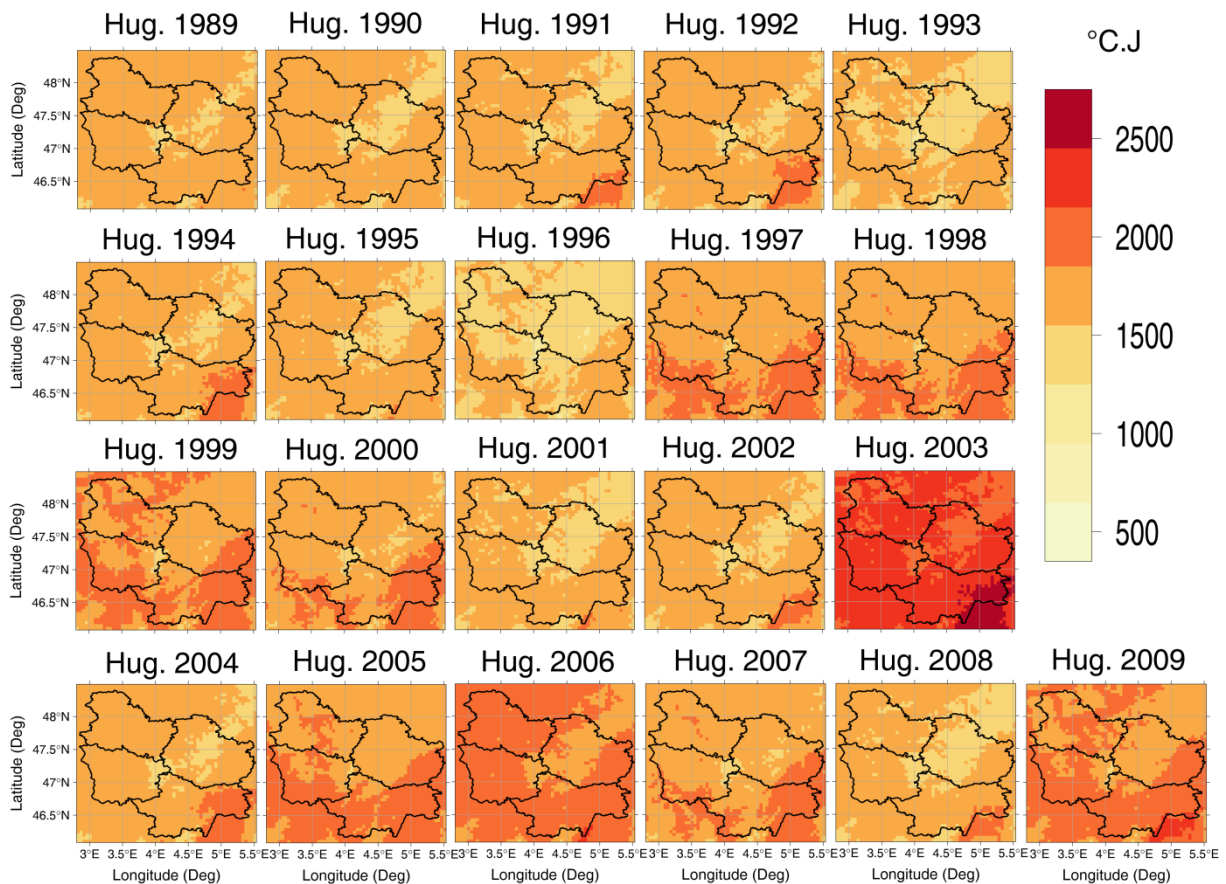


Figure C.14. Indice de Huglin (°C.J) appliqué aux données de températures spatialisées à une maille de cinq kilomètres.

Sur la période 1989-2009, l'indice de fraîcheur des nuits (IF) reste inférieur à 15°C (Figure C.15.) pour l'ensemble de la Bourgogne : la très grande majorité des nuits en Bourgogne sont considérées comme « fraîches » à « très fraîches », au regard du système de classification géoviticole proposé par Tonietto et Carbonneau [2004]. Hormis pour les années 1991, 1999, 2005 et 2006, l'ensemble des valeurs de cet indice sont inférieures à 12°C (« nuits très fraîches »). De plus, conformément aux observations climatiques stationnelles (Figure C.11.), il n'y a pas d'évolution de cet indice.

L'évolution de l'indice de fraîcheur des nuits (IF) est différente de celle observée sur les indices de Winkler et de Huglin. Ceci n'est pas surprenant dans la mesure où IF est calculé comme la moyenne des minima thermiques du mois de septembre, alors que les indices de Winkler et de Huglin intègrent des cumuls de températures (moyennes, maximale) durant la saison de végétation. On note, par exemple, qu'une année précoce comme 2003, affichant des valeurs d'indices de Huglin

exceptionnellement élevées (supérieures à 2 000°C.J sur l'intégralité du territoire), n'a pas été marquée par un mois de septembre particulièrement chaud (IF ~10°C sur l'ensemble de la Bourgogne). Le millésime 1991, marquée par un IF assez élevé, notamment dans les vignobles de Côte-d'Or et de Saône-et-Loire (proche de 15°C), ne correspond pas à un millésime particulièrement précoce (valeurs d'indice de Huglin globalement situées entre 1 500 et 2 000°C.J).

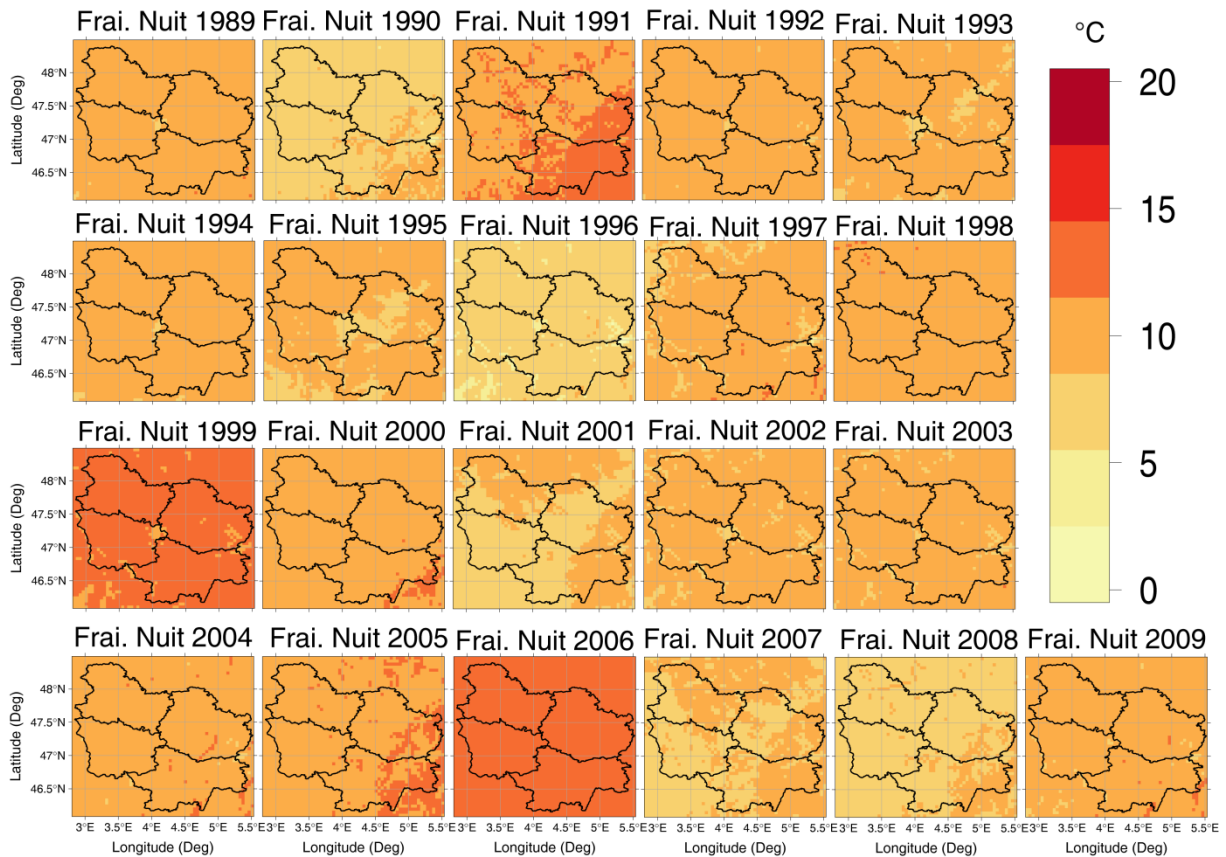


Figure C.15. Indice de fraîcheur des nuits (°C) aux données de températures spatialisées à une maille de cinq kilomètres.

On considère que des températures nocturnes trop élevées en période de maturation sont défavorables au potentiel œnologique du raisin (baisse de l'acidité, de la teneur en sucres et en anthocyanes, Buttrose *et al.*, 1971 ; Mori *et al.*, 2005). Des valeurs trop élevées d'IF pourraient donc être considérées comme défavorables à la qualité du raisin. En outre, l'IF, même s'il reste un indicateur global intéressant pour évaluer les potentialités climatiques des régions viticoles, ne traduit pas systématiquement avec pertinence les conséquences du changement climatique sur le potentiel œnologique du raisin : durant les millésimes précoces (comme par exemple 2003), la maturation du raisin a lieu avant le mois de septembre, mois durant lequel IF est calculé. Il est donc probable que l'avancement de la date de récolte dû à des cumuls de chaleur élevée au printemps et en été conduit à une maturation du raisin

au mois d'août, durant lesquelles les nuits sont moins fraîches qu'en septembre [Madelin *et al.*, 2010].

Cette limite souligne l'intérêt d'évaluer d'abord l'impact de l'évolution du climat sur les dates d'occurrence des stades phénologiques et la précocité de la récolte avant d'évaluer plus précisément l'impact potentiel du changement climatique sur la maturation du raisin. Cela requiert, dans un premier temps, l'utilisation de modèles agronomiques simulant la réponse phénologique de la vigne à la température.

La partie C.II. a permis de soulever quelques points importants concernant la relation entre température et Pinot noir en Bourgogne, *via* les indices de Winkler, de Huglin et de fraîcheur des nuits :

- la comparaison des dates d'occurrences des stades phénologiques du Pinot noir à Savigny-lès-Beaune entre les périodes 1961-1987 et 1988-2008 a montré qu'ils sont plus précoces actuellement de respectivement sept, neuf, vingt et quatorze jours pour le débourrement, la floraison, la véraison et la maturité. De même, l'écart interquartile a diminué de 2, 12,5 et 8,5 jours pour les stades de floraison, de véraison et de maturité respectivement ;
- il existe un gradient altitudinal et latitudinal de la répartition spatiale des indices de Winkler et de Huglin. Ces indices sont plus forts en plaine de Saône qu'ailleurs. Les valeurs de ces deux indices sont plus élevées pour la période 1988-2009 que pour la période 1961-1987. Pour les deux indices, l'année 2003 est caractérisée par de très fortes valeurs. L'indice de Huglin, fortement corrélé avec les dates de maturité, nous informe sur le fait qu'avant 1987, le Pinot noir ne pouvait arriver à maturité que sur la Côte viticole et la plaine de Saône, alors qu'il peut actuellement y arriver partout en Bourgogne, hormis les régions le plus en altitude ;
- l'indice de fraîcheur des nuits possède une faible variabilité spatiale. De même, il ne varie pas significativement en considérant les deux sous-périodes. L'indice de fraîcheur des nuits indique que l'ensemble des nuits de la région Bourgogne sont considérées comme fraîches à très fraîches et ne montre aucune tendance temporelle.



-

C.III. Modélisation de la phénologie de la vigne

L'usage de modèles de degrés-jours linéaires pour simuler la phénologie étant largement répandu en agronomie, beaucoup d'études prospectives sur le changement climatique s'appuient sur ces approches [Hall and Jones, 2009 ; Duchêne *et al.*, 2010]. Doit-on se contenter d'un modèle simple pour projeter les impacts du changement climatique ? Que peut apporter un modèle plus complexe ? Les trois modèles retenus dans le cadre de cette thèse ont été appliqués aux données de températures observées à la station de Savigny-lès-Beaune. Il s'agit (*cf* partie C.I.3.B.):

- du modèle GFV [Parker *et al.*, 2011], basé sur un simple cumul de degrés-jours en base 0°C ;
- du modèle mécaniste proposé par Garcia de Cortazar Atauri *et al.* [2010], adapté du modèle de Wang et Engel [1998], ci-après dénommé WE ;
- du modèle mixte proposé par Chuine *et al.* [2004], ci-après dénommé Chuine.

Les dates d'occurrences des stades de floraison et de véraison pour le Pinot noir simulés par ces trois modèles sont comparées à l'observation phénologique à la parcelle de Savigny-lès-Beaune sur la période 1973-2007 (C.III.1.).

Par la suite, dans le but d'estimer la sensibilité des modèles phénologiques à la température (C.III.2.), ils sont appliqués à des données de températures plus élevées, obtenues soit à l'aide d'un générateur stochastique de climat simulant les conditions thermiques à Savigny-lès-Beaune durant le XXI^e siècle (C.III.2.a.), soit aux données de température mesurées durant la fin du XX^e siècle à Savigny-lès-Beaune, auxquelles on ajoute 3°, 5° et 10°C (hypothèse d'un réchauffement climatique uniforme sur l'année, sans modification de la variabilité intrasaisonnière, partie C.III.2.b.). Les augmentations artificielles de 3°C et 5°C sont justifiées par les projections climatiques au XXI^e siècle pour le nord-est de la France [GIEC, 2007 ; Xu *et al.*, 2012], indiquant pour le scénario A2 du SRES une augmentation de la température d'au moins 3°C d'ici 2030-2050 et de 5°C d'ici la fin de siècle pour la Bourgogne. La valeur de +10°C n'a aucune réalité au sens climatique pour la région d'étude, mais est utilisée pour tester la sensibilité des modèles à des conditions extrêmes. En partie C.III.2.c., une discussion est proposée sur les divergences entre les modèles.

Enfin, les trois modèles sont appliqués aux données spatialisées au chapitre B (C.III.3.) à résolution de cinquante mètres (spatialisation initiale) et de cinq

kilomètres (après agrégation). Afin d'estimer les performances des modèles phénologiques et également de s'assurer de la validité des données spatialisées, les modèles ont été appliqués sur les pixels à cinquante mètres et à cinq kilomètres, et leurs simulations ont été comparées aux données phénologiques observées aux mêmes coordonnées (C.III.3.a.). Enfin, les trois modèles sont appliqués aux spatialisations à cinq kilomètres pour étudier la répartition spatiale des dates d'occurrences théoriques des stades phénologiques du Pinot noir en Bourgogne.

C.III.1. Évaluation des modèles phénologiques

Les dates de floraison et de véraison simulées par les modèles phénologiques sont comparées aux dates observées sur la période 1973-2007 (Figure C.16.).

En ce qui concerne la floraison, le modèle de Chuine (points rouges) est significativement différent de l'observation ($t.test_{0.95}$) : toutes les dates simulées par ce modèle sont plus tardives que les observations (biais de +5,7 jours, tableau C.2.). En revanche, la variabilité interannuelle est très bien reproduite : $r^2=0,89$. Le biais tardif systématique conduit à une erreur quadratique moyenne élevée (6,41 jours). Le modèle GFV est moins précis ($r^2=0,77$), mais la valeur de RMSE qu'il affiche (4,02 jours) est plus faible que pour le modèle de Chuine car les jours de floraison simulés par ce modèle ne présentent qu'un très léger biais (+0,7 jours).

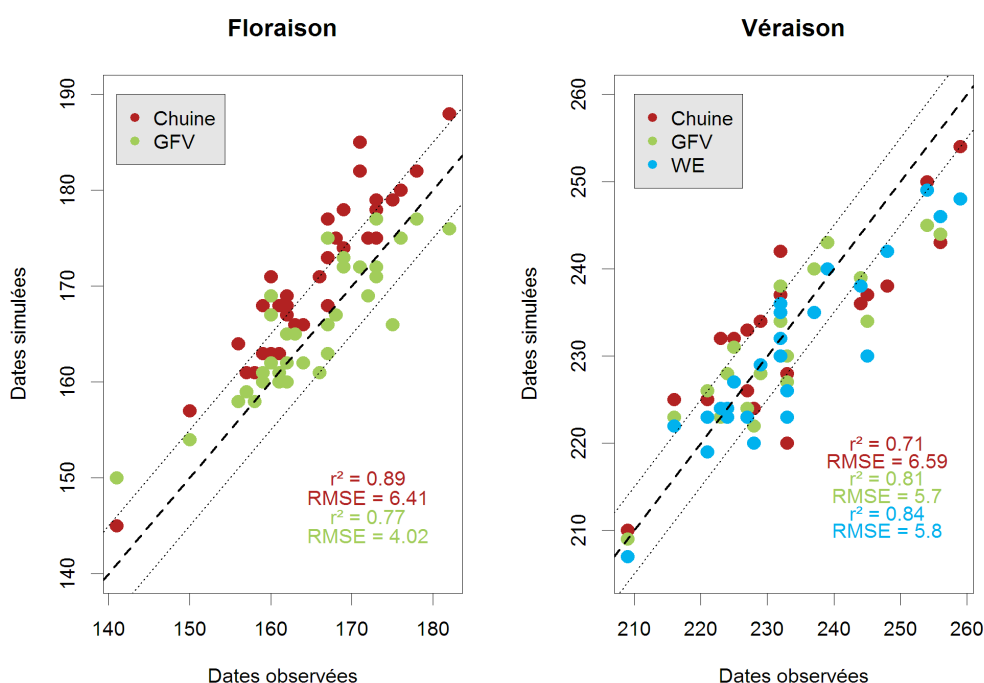


Figure C.16. Dates de floraison et de véraison observées et simulées par les modèles.

Les scores du modèle de Chuine pour la véraison sont moins élevés que les scores des deux autres modèles. La RMSE est élevée (6,59 jours). Bien qu'affichant un faible biais (-0,3 jours), la précision de ce modèle est inférieure à celle des autres modèles ($r^2=0,71$). Les coefficients de détermination des modèles GFV et WE sont respectivement de 0,81 et 0,84 et leurs valeurs de RMSE sont de 5,7 jours et 5,8 jours. Ces deux modèles tendent néanmoins à anticiper, en moyenne, les dates de véraison (biais de 1,5 et 2,9 jours, respectivement), notamment lorsque la véraison est tardive. Après le deux cent quarantième jour de l'année (28 août), les valeurs simulées sont systématiquement plus précoces que les valeurs observées (RMSE = 8,54, 9,38 et 9,51 pour respectivement les modèles de Chuine, GFV et WE).

Stade	Modèle	Tb / Tmin (°C)	T opt(°C)	Tmax (°C)	Biais (jours)	R ²	RMSE (jours)
Floraison	Chuine	8,63	-	-	5,7	0,89	6,4
	GFV	0	-	-	0,7	0,77	4,0
Véraison	Chuine ¹	~ 8	~ > 29 (ph. 1)	-	-0,3	0,71	6,6
		-4	20,34 (ph. 2)	40			
	GFV	0			-1,5	0,81	5,7
	WE	0		40	-2,9	0,84	5,8

Tableau C.2. Performances des trois modèles phénologiques lors de la confrontation aux observations à la parcelle de Pinot noir de Savigny-lès-Beaune des dates d'occurrences de mi-floraison et mi-véraison. Tb / Tmin = température de base (zéro de végétation) des modèles de degrés-jours ou température minimale (modèles WE et Chuine véraison) ; Topt = température optimale (modèles WE et Chuine véraison) ; Tmax = température maximale (modèles WE et Chuine véraison). RMSE = Root Mean Squared Error. Root Mean Squared Error.

D'autres facteurs climatiques, corrélés avec l'occurrence de faibles températures, pourraient expliquer un retard de véraison non pris en compte par les modèles : on peut supposer, par exemple, que durant ces millésimes, la fraîcheur induit une évapotranspiration réduite, favorisant la probabilité d'occurrence d'absence de contrainte hydrique qui pourrait alors retarder la véraison.

Globalement, la précision des modèles confrontés aux observations phénologiques à Savigny-lès-Beaune est similaire à celle issue des validations réalisées par les auteurs de ces modèles [Chuine *et al.*, 2004 ; Garcia de Cortazar Aauri *et al.*, 2010 ; Parker *et al.*, 2011] : RMSE de 5,5 jours et de 7,81 jours pour les modèles de floraison et de véraison GFV et de 7,6 jours pour le modèle WE (véraison).

¹ Le modèle de Chuine pour la véraison est constitué de sous-modèles (ph. 1 et ph. 2). Pour la première phase ph. 1, les valeurs Tmin et Topt sont approximatives car il s'agit d'un modèle sigmoïdal (asymptotique aux limites min et max).

La figure C.17 compare les simulations de dates d'occurrences des stades phénologiques entre les modèles deux à deux. Comme vu précédemment, le modèle de Chuine produit systématiquement des dates de floraison plus tardives que le modèle GFV (Figure C.16., floraison). La RMSE entre les dates simulées par ces deux modèles est supérieure à six jours. Malgré le fait que le r^2 soit élevé, les deux séries sont significativement différentes (test sur les moyennes : $t.test_{0,95}$). De plus, le modèle de Chuine n'est plus systématiquement tardif et l'erreur quadratique moyenne entre les deux séries est plus faible (cinq jours) que pour la floraison. Le modèle de Chuine a comblé le retard qu'il avait accumulé pour atteindre la floraison.

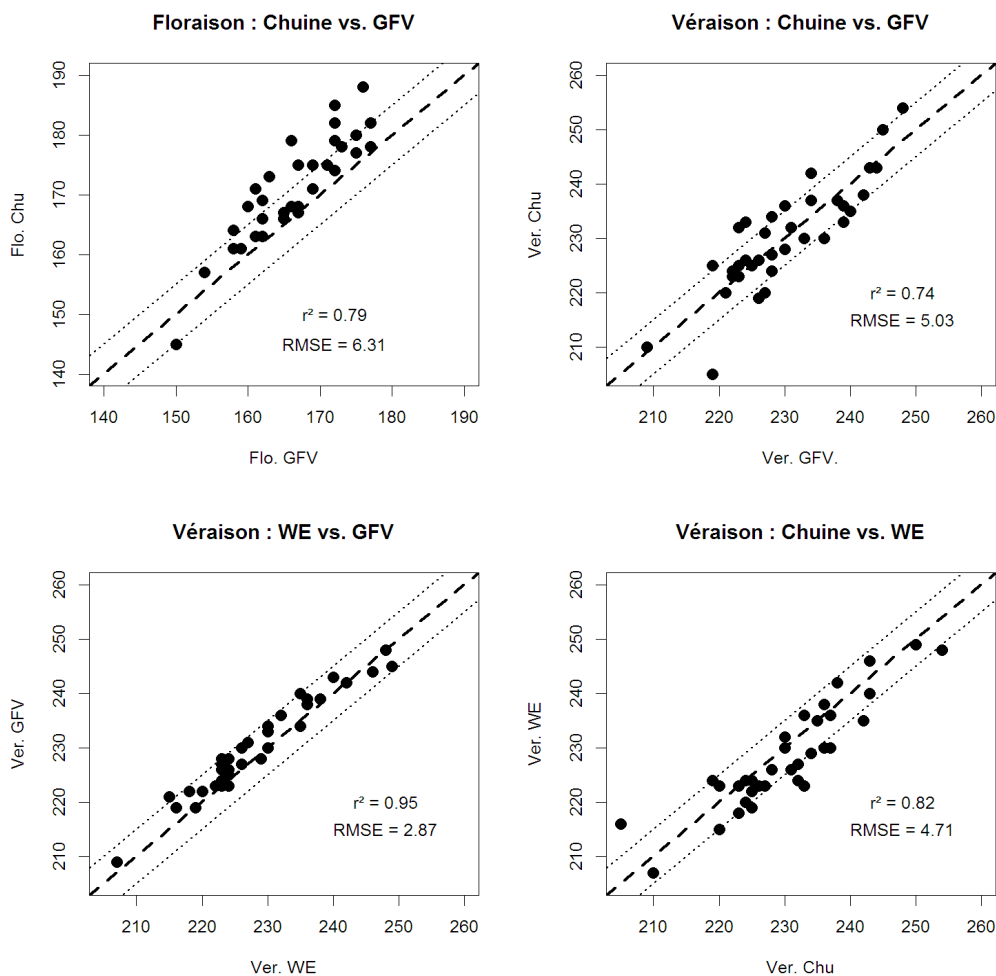


Figure C.17. Dates de véraison et de floraison simulées par les trois modèles phénologiques (Chuine, WE et GFV).

La comparaison entre le modèle de Chuine et le modèle WE montre que le modèle de Chuine simule des dates d'occurrences plus proches du modèle WE que du modèle GFV (r^2 plus élevé et RMSE plus faible), mais qu'il a tendance à être plus tardif que le modèle WE. Enfin, les modèles WE et GFV produisent des dates de véraison très proches les unes des autres. Le r^2 est très élevé (0,95) et la RMSE très faible (2,87)

jours). Le modèle WE présente cependant une tendance à être plus précoce que le modèle GFV.

Les modèles reproduisent relativement bien les dates de floraison et de véraison sur la période 1973-2007. Nous savons que, pendant cette période, une rupture climatique a été observée en Bourgogne en 1987-1988. Les modèles ont-ils bien reproduit ce saut climatique, saut observé également dans les observations phénologiques ? Un élément de réponse est apporté par la comparaison des dates simulées et observées pré et post-rupture.

Sur les boxplots de la figure C.18. (floraison), les observations phénologiques montrent un saut entre les deux périodes. Globalement, même si la tardiveté des dates simulées par le modèle de Chuine est clairement visible, les deux modèles reproduisent ce saut de façon cohérente. La différence entre les dates moyennes de floraison des sous-périodes pour les observations est de 9,7 jours. Pour les modèles de Chuine et GFV, cette différence est de 12,1 et 10,6 jours.

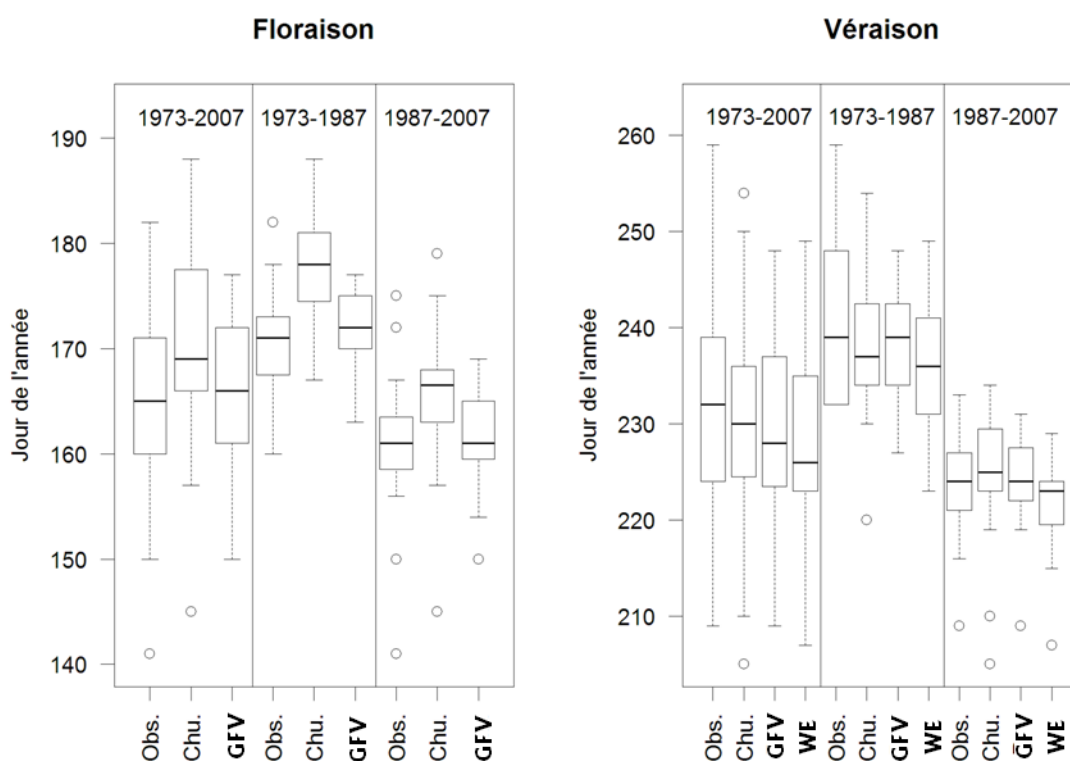


Figure C.18. Boxplots (1973-1987 et 1988-2007) des dates (simulées et observées) de floraison et de véraison.

En ce qui concerne la véraison, la rupture est plus importante pour les observations avec une différence moyenne entre les périodes de 18,2 jours. Les modèles minimisent la rupture puisque la différence n'est que de 13, 14,2 et 14,8 jours pour respectivement les modèles de Chuine, GFV et WE. La variabilité interannuelle est également plus faible pour la période récente que pour la période ancienne. La

gamme de variation pour les observations est de vingt-sept jours pour la période 1973-1987 et de dix-sept jours pour la période 1988-2007, soit une diminution de l'écart maximal des dates d'occurrence de la véraison de dix jours. Pour les modèles, cette diminution est de neuf, neuf et douze jours pour respectivement les modèles de Chuine, GFV et WE. C'est cohérent avec l'observation. Nous remarquons également que pour la période récente, aucune date de véraison n'a été observée après le deux cent trente-cinquième jour (23 août). Ainsi, les modèles n'affichent-ils pas de dérive importante sur la période récente, telle que celle observée durant les années tardives (Figure C.16).

C.III.2. Sensibilité des modèles phénologiques aux changements de température

Le comportement des modèles dans le présent montre que le modèle GFV est plus apte à simuler les dates de floraison que le modèle de Chuine. Les trois modèles sont cohérents lorsqu'il s'agit de simuler les dates de véraison, que ce soit en termes de valeurs propres et de diminution de la variabilité interannuelle. Lorsque la question des impacts futurs du réchauffement climatique est posée, elle conduit automatiquement à une autre question : les modèles phénologiques sont-ils adaptés pour être appliqués à des températures plus élevées ? Pour répondre à cette question, les modèles sont appliqués dans un premier temps à des données climatiques simulées par un générateur stochastique de températures (LARS Weather Generator, voir encadré), puis, dans un second temps, à la méthode des deltas générant des augmentations de températures respectant la variabilité infrasaisonnaire actuelle et observée.

C.III.2.A. RÉCHAUFFEMENT DES TEMPÉRATURES SIMULÉ PAR UN MODÈLE STOCHASTIQUE (LARS-WG)

Les modèles sont appliqués aux séries de températures générées stochastiquement par LARS WG pour le scénario A1B et les périodes actuelle/1976-2005 (cent années), 2011-2030 (cinquante années), 2046-2065 (cinquante années) et 2080-2099 (cinquante années). Ces simulations sont basées sur un paramétrage de LARS WG réalisé sur les données climatiques enregistrées à la station de Savigny-lès-Beaune (1976-2005).

Les modèles de Chuine et GFV produisent des dates d'occurrences assez éloignées en ce qui concerne la floraison, en raison du biais tardif du modèle de Chuine déjà souligné précédemment (Figure C.19.). Les r^2 pour les quatre périodes de simulation sont faibles ($\sim 0,5$). La RMSE, forte pour la période actuelle (7,26 jours), diminue au cours du XXI^e siècle de façon à atteindre 2,5 jours. Les dates de véraison simulées par

les deux modèles montrent une relation inverse à celle montrée par la floraison : les deux modèles sont plus proches pour les périodes actuelle et 2011-2030 que pour les périodes lointaines : le r^2 diminue (de 0,5 à 0,33) et la RMSE augmente (de 2,87 jours à 6,03 jours).

The Long Ashton Research Station Weather Generator (LARS WG)

LARS WG est un générateur stochastique de climat [Semenov et Barrow, 1997, Semenov et Barrow, 2002, Hashmi et al., 2011]. LARS-WG recherche les périodes sèches et humides dans les données pluviométriques observées et les distributions et les moments dans l'ensemble des données de températures. Ensuite, les simulations sont basées sur ces statistiques (distributions, moments) observées dans le présent et projetées dans le cadre du scénario A1B pour les périodes futures (CNRM-CM3, ARPEGE-Climat v3). LARS-WG crée des séries de données projetées à partir des modulations de l'écart-type pour les périodes futures. Les séries de données climatiques sont simulées pour Savigny-lès-Beaune (Bourgogne, France). Une centaine et une cinquantaine de simulations ont été effectuées pour les quatre périodes actuelles et futures suivant: actuel (1976-2005), futur proche (2011-2030), futur intermédiaire (2046-2065) et futur lointain (2080-2099). Chaque simulation correspond à une année complète.

L'un des inconvénients majeurs des générateurs de données météorologiques est la faiblesse de la modélisation de la variabilité interannuelle des températures [Semenov et al. 1998]. En outre, la faible résolution spatiale de la simulation climatique produite par les GCM sous-estime la variabilité du climat. Comme le montre le tableau ci-dessous, l'écart-type mesuré à Savigny était égal à 0,97°C. Pour les simulations par LARS-WG, il est compris entre 0,21 à 0,25°C. Cela signifie que la différence entre deux années est plus faible pour les simulations que pour les données mesurées.

Par contre, le tableau montre que la température moyenne est bien simulée par LARS-WG. La différence entre la température moyenne de la station de Savigny et celle simulée par LARS-WG pour la période 1976-2005 est égale à 0,1°C. Les simulations de LARS-WG atteignent la température moyenne de 19,9°C pour la période 2080-2099. On retrouve cette température actuellement en Californie (États-Unis) ou en Espagne (Xerez, Manche) [Jones et al. 2009].

	<i>Température de la période végétative de la vigne</i>		N
	Mean	Standard deviation	
<i>Observations à Savigny, 1976-2005</i>	16.5	0.97	30
<i>LARS-WG simulations, 1976-2005</i>	16.4	0.22	100
<i>LARS-WG simulations, 2011-2030</i>	16.9	0.23	50
<i>LARS-WG simulations, 2046-2065</i>	18.6	0.21	50
<i>LARS-WG simulations, 2080-2099</i>	19.9	0.25	50

Tableau : Augmentation de la température moyenne de la période végétative de la vigne et écart-type pour les périodes considérées.

Même constat en ce qui concerne la véraison pour les modèles de Chuine et WE. Les dates simulées par les deux modèles sont proches les unes des autres ($r^2 = 0,88$; RMSE = 3,88 jours) pour la période actuelle et sont éloignées pour la période 2080-2099 ($r^2 = 0,69$; RMSE = 6,22 jours). Cela signifie que les modèles ont tendance à diverger lorsqu'ils sont appliqués sur des températures plus chaudes. De plus, comme pour la comparaison avec le modèle GFV, le modèle de Chuine a tendance à être plus tardif que le modèle WE. Ainsi, il n'est pas surprenant d'observer la très forte relation entre les dates de véraison produites par les modèles WE et GFV. Si le r^2 est relativement faible et varie très peu en fonction du temps ($\sim 0,6$), la RMSE est également très faible (un ou deux jours).

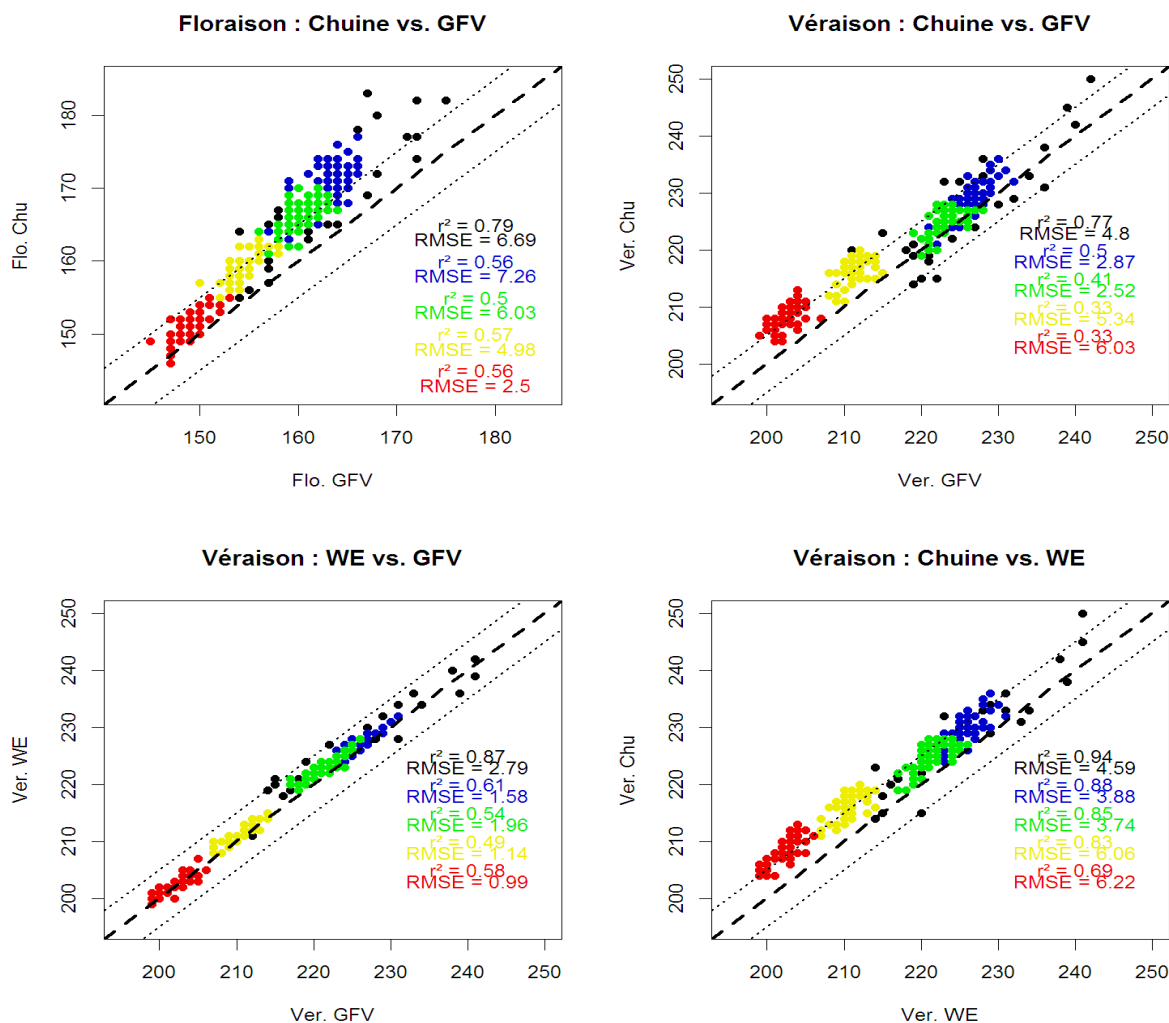


Figure C.19. Dates de floraison et de véraison simulées par les trois modèles et appliquées aux séries LARS WG. La période actuelle / 1976-2005 est représentée par des points bleus, la période 2011-2030 par des points verts, la période 2046-2065 par des points jaunes et la période 2080-2099 par des points rouges. Les données observées (1976-2005) sont représentées par des points noirs.

Les boxplots de la figure C.20. confirment que, pour la floraison, les dates simulées par les modèles de Chuine et GFV se rapprochent les unes des autres au cours du temps. Les dates de véraison simulées (figure C.20.) confirment également que, si les modèles WE et GFV produisent des dates de véraisons assez proches les unes des autres quelle que soit la période, les dates de véraison produites par le modèle de Chuine s'éloignent de celles des deux autres modèles en fonction du temps et donc du réchauffement.

La variabilité interannuelle des séries est beaucoup plus faible lorsque les modèles sont appliqués aux simulations de LARS WG que sur les données climatiques observées (mesures de la période 1976-2005). Ce phénomène, connu lors d'utilisations dans des études précédentes [Semenov *et al.*, 1998], n'explique pas la diminution de cette variabilité interannuelle au cours du temps, observée à la fois

pour les dates de floraison et de véraison. La discussion de la partie C.III.2.c. permet d'expliquer ce phénomène.

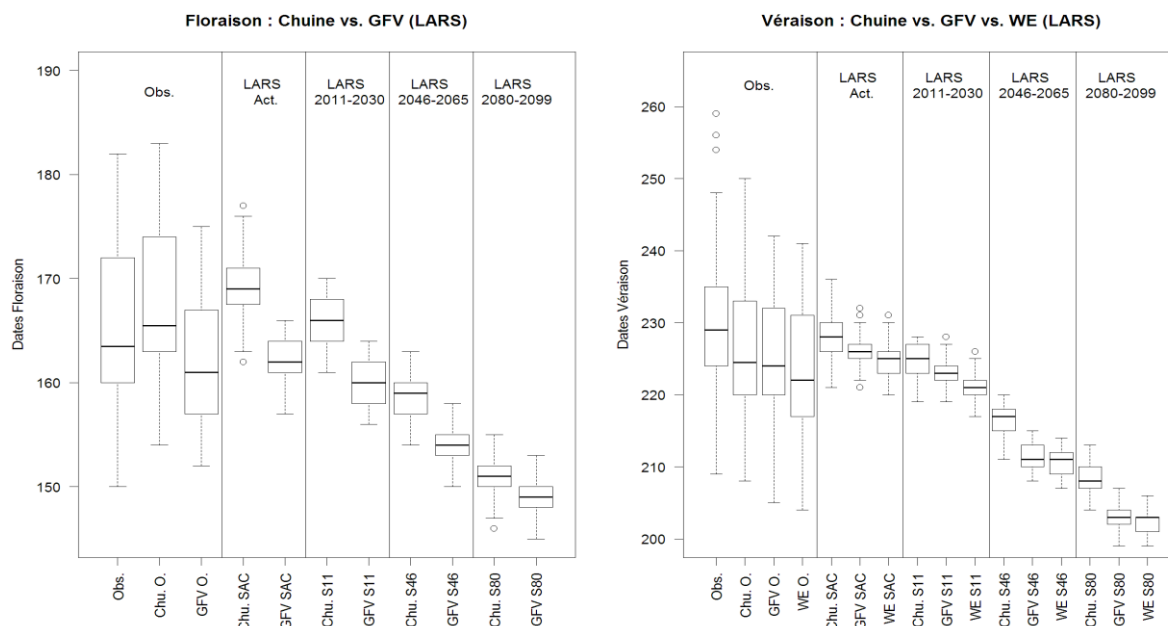


Figure C.20. Boxplots des dates de floraison et de véraison simulées par les applications des trois modèles aux séries climatiques mesurées (période 1976-2005) et simulées par LARS WG. LARS act. prend en compte les données simulées par LARS pour la période 1976-2005.

C.III.2.B. CHANGEMENT CLIMATIQUE SIMULÉ PAR DÉRIVE (+3°C, +5°C ET +10°C)

Afin de comprendre la diminution de la variabilité interannuelle conjointement au réchauffement attendu au XXI^e siècle et de savoir si c'est un « effet modèle », les modèles sont appliqués à ce que l'on va appeler par la suite des *deltas* (ou scénarios), c'est-à-dire qu'à partir des données de température de Savigny-lès-Beaune pour la période 1976-2005, nous créons trois nouveaux jeux de données en ajoutant une valeur de température fixe aux températures quotidiennes (comme vu précédemment en introduction de cette partie C.III.). Les deltas sont : +3°C, +5°C et +10°C. Ainsi, la variabilité interannuelle est identique pour chacune des séries puisque la distribution n'a pas été modifiée².

En ce qui concerne la floraison, les dates simulées par les modèles divergent fortement pour le delta +10°C (tableau C.3.). Les coefficients de détermination

² Notons qu'un ajustement mensuel a été testé, c'est-à-dire qu'au lieu d'ajouter une valeur quotidienne fixe, une valeur calée sur le réchauffement actuel, au pas de temps mensuel a été ajoutée. Les résultats qui en découlait n'étaient pas significativement différents de ceux sans ajustement, donc le choix s'est porté sur l'ajout de valeurs fixes sur l'ensemble de l'année, par souci de clarté et pour faciliter l'interprétation de la réponse des modèles à l'augmentation de la température.

chutent de 0,8 (+3°C) à 0,52 (+10°C) en passant par 0,74 (+5°C). Comme vu précédemment, le modèle de Chuine produit des dates d'occurrences de stades phénologiques plus tardives (Figure C.21.). Le modèle de Chuine, pour les dates de véraison, est assez éloigné des deux autres modèles et cet écart augmente en fonction des deltas. La RMSE pour le delta +10°C entre les modèles de véraison de Chuine et GFV est de 13,24 jours. Les dates de véraison projetées par ces deux modèles affichent un r² de 0,11 pour ce delta, indiquant une forte divergence entre ces deux modèles.

Floraison		Modèles		Chuine vs GFV			Véraison		Modèles			Chuine vs GFV			Chuine vs WE			WE vs GFV						
		Chuine	GFV	Diff. Moy.	t	RMSE			r ²	Chuine	GFV	WE	Diff. Moy.	t	RMSE	r ²	Diff. Moy.	t	RMSE	r ²	Diff. Moy.	t	RMSE	r ²
Données obs.	Moyenne	170,1	165,5	4,6				Moyenne	229,6	229,7	227,8	-0,1												
	Ec. Max.	31	27	4	*	6,31	0,79	Ec. Max.	40	39	42	1	-	5,03	0,74	-2	-	4,71	0,82	-3	-	2,87	0,95	
	Ecart-type	8,9	6,8	2,1				Ecart-type	10	8,8	9,5	1,2												
+3°C	Moyenne	151,8	149,8	2				+3°C	Moyenne	210,7	208,2	206,4	2,5											
	Ec. Max.	33	25	8	-	3,78	0,8	Ec. Max.	34	29	21	5	-	5,28	0,6	13	**	5,74	0,74	-8	-	2,64	0,91	
	Ecart-type	7,06	5,9	1,16				Ecart-type	7,5	6,5	6,5	1												
+5°C	Moyenne	142,2	140,9	1,3				+5°C	Moyenne	199,7	196,6	195,4	3,1											
	Ec. Max.	19	20	-1	-	3,38	0,74	Ec. Max.	20	28	22	-8	*	5,77	0,48	-2	**	5,93	0,63	-6	-	2,32	0,88	
	Ecart-type	6,1	4,9	1,2				Ecart-type	6,4	5,9	5,6	0,5												
+10°C	Moyenne	126,2	124,1	2,1				+10°C	Moyenne	185,9	173,7	177,4	12,2											
	Ec. Max.	11	16	-5	*	3,44	0,52	Ec. Max.	18	18	13	0	**	13,24	0,11	5	**	9,18	0,39	-5	**	4,9	0,48	
	Ecart-type	3,7	3,6	0,1				Ecart-type	4,3	4,6	3,3	-0,3												

Tableau C.3. Moyenne, écart maximal et écart-type des dates de floraison et de véraison simulées par les modèles de Chuine, WG et GFV. Les différences entre les modèles, la RMSE et le r² sont également présentés. La différence entre les séries est testée par le test de Student (- non significatif, * significatif à 0.95 et ** significatif à 0.99).

Les dates de véraison simulées par les modèles de Chuine et WE sont également très différentes les unes des autres. Pour les deltas +3°C et +5°C, les valeurs de RMSE sont de l'ordre de cinq ou six jours. La RMSE atteint 9,18 jours pour le delta +10°C, avec un r² de 0,39. Le modèle de Chuine est également globalement plus tardif que le modèle WE, quel que soit le delta. Cela devient systématique pour le delta +10°C.

Enfin, les modèles WE et GFV montrent une très forte similitude dans les simulations des dates de véraison pour les deltas +3°C et +5°C (r² > 0.85 et RMSE < 3 jours). Les deux modèles divergent pour le delta +10°C puisque la RMSE passe à 4,9 jours et le r² à 0,48. Pour ce delta, le modèle WE devient systématiquement plus tardif que le modèle GFV.

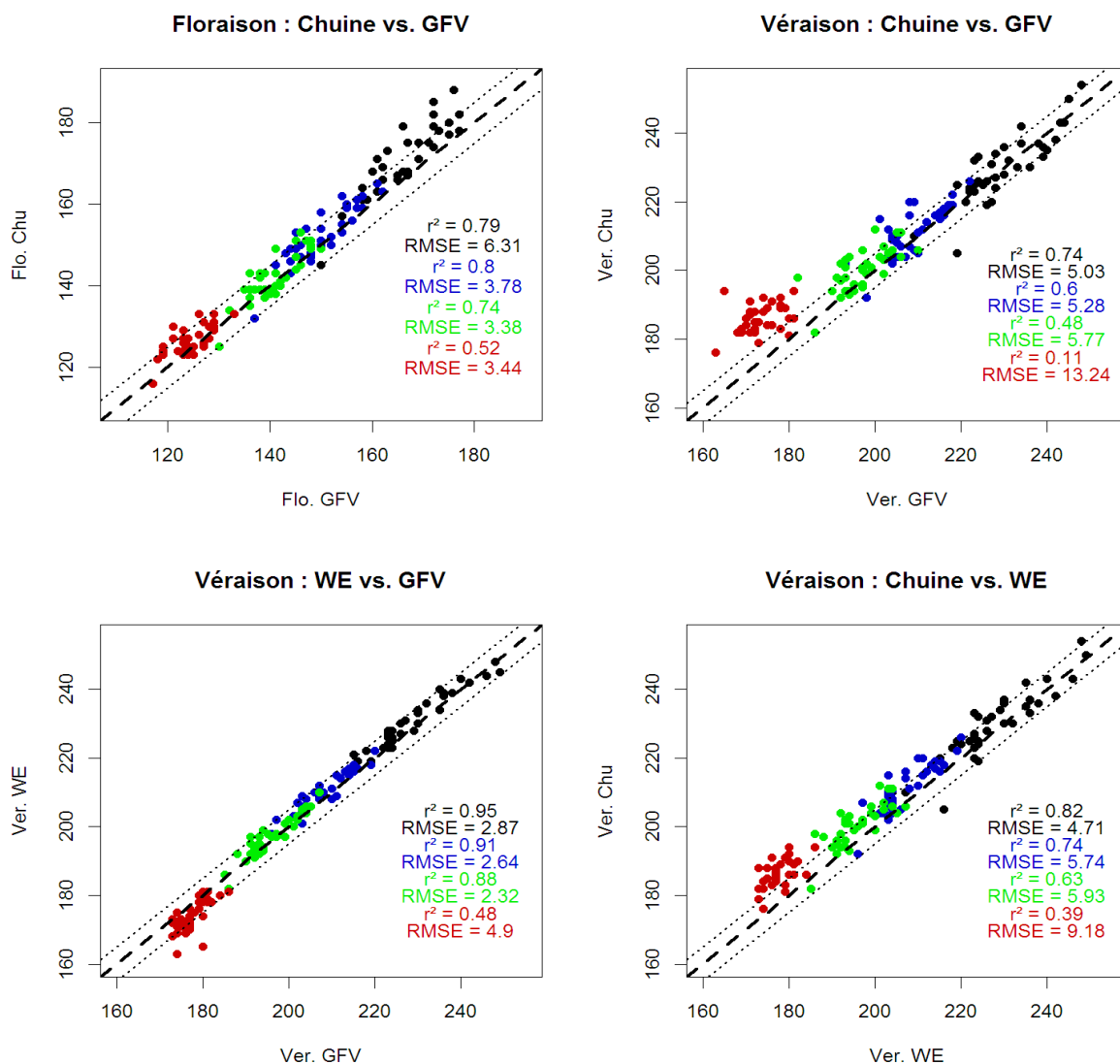


Figure C.21. Dates de floraison et de véraison simulées par les trois modèles, appliquées aux séries observées (période 1976-2005, points noirs) et de données des deltas +3° (points bleus), +5° (points verts) et +10°C (points rouges).

Les boxplots de la figure C.22. présentent les variabilités interannuelles des dates de floraison et de véraison. Elles diminuent en fonction de l'augmentation de la température, et ce pour tous les modèles. La différence maximale de dates de véraison passe de quarante à dix-huit jours entre l'actuel et le delta +10°C pour le modèle de Chuine. Pour les deux autres modèles (WE et GFV respectivement), elle passe de quarante-deux à treize jours et de trente-neuf à dix-huit jours. La partie suivante discute les causes de cette diminution de la variabilité interannuelle de la phénologie simulée en réponse à des températures plus élevées.

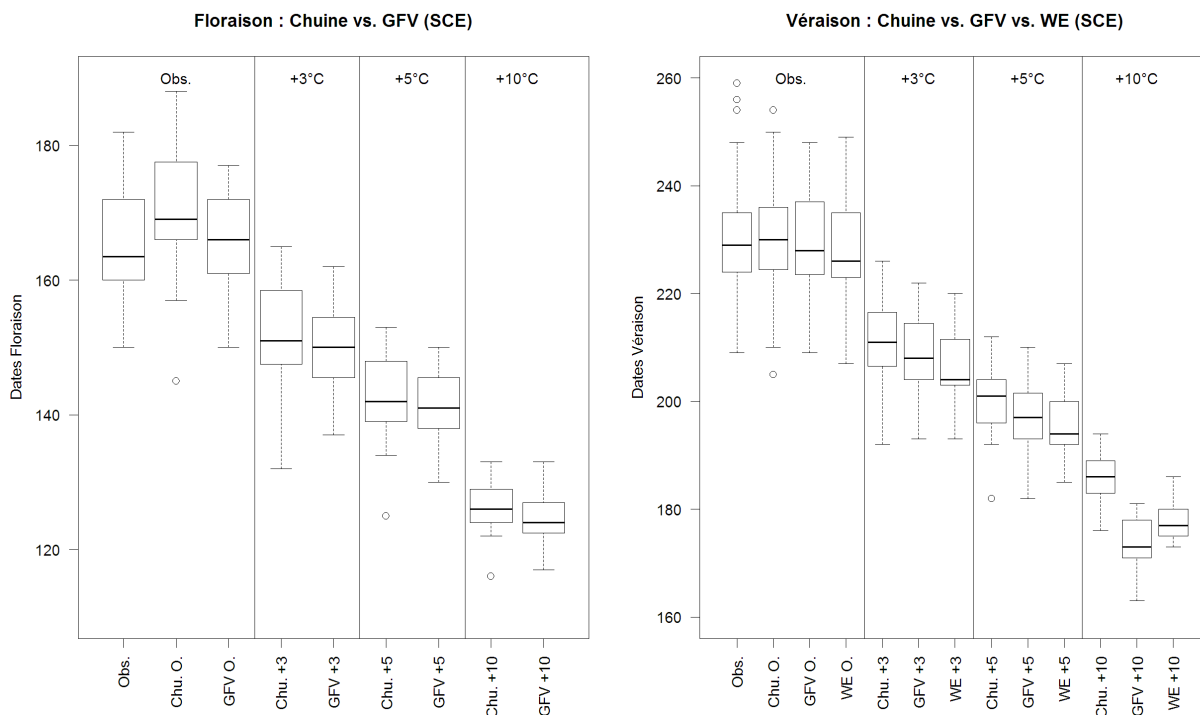


Figure C.22. Boxplots des dates de floraison et de véraison simulées par les applications des trois modèles aux séries observées (période 1976-2005) et issues des deltas +3°, +5° et +10°C.

C.III.2.c. DISCUSSION SUR LES DIVERGENCES ENTRE LES MODÈLES

L'action (*i.e.* impact) cumulée de la température, au cours de la saison végétative, simulée par chaque modèle, a été analysée afin d'évaluer le mode de réponse intraannuel de ces modèles à l'augmentation de la température. Deux jeux de données ont été utilisés pour cette analyse : le jeu de données de température original (période 1976-2005) et le delta +10°C.

En ce qui concerne la floraison (Figure C.23.), l'ensemble des courbes se resserrent pour le delta +10°C, ce qui indique une diminution de la variabilité des dates de floraison (*cf.* partie précédente). Pour ces deux modèles, la relation linéaire entre la température et son impact sur la vigne peut expliquer cette réduction de gamme de dates de floraison.

Une explication peut être donnée grâce à un exemple simple : connaissant la température de base (température active) du modèle GFV, prenons deux années A1 et A2 pour lesquelles les températures moyennes sont respectivement égales à 10° et 11°C (températures observées). Théoriquement, l'année A1 cumule quotidiennement dix degrés-jours et l'année A2 cumule onze degrés-jours, soit 10 % de plus que l'année A1. Pour le delta +10°C, les températures moyennes de A1 et A2 sont de 20° et 21°C. Ainsi, A1 cumule quotidiennement vingt degrés-jours et A2 cumule vingt-et-un degrés-jours, soit 5 % de plus que l'année A1. Ceci implique une différence entre les

deux années plus faible pour le delta +10°C (5 % d'écart de cumul) que pour les données originales (10 % d'écart de cumul).

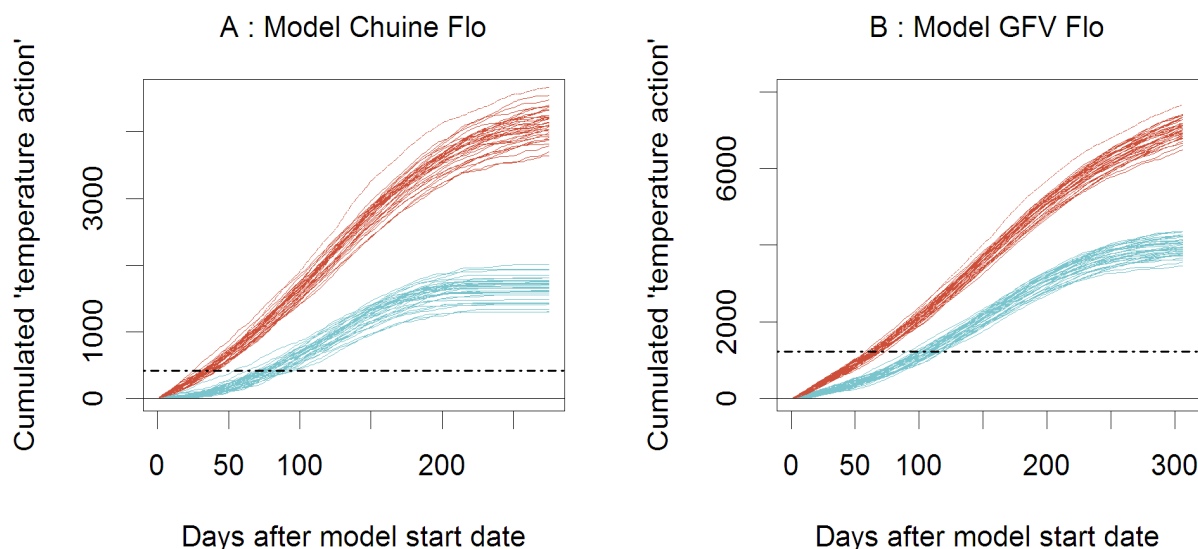


Figure C.23. Impacts cumulés de la température pour les modèles de floraison de Chuine et GFV pour toutes les années du jeu de données original (période 1976-2005), courbes bleues, et pour le delta +10°C, courbes rouges. L'axe des abscisses représente le jour après t_0 , la date de début du modèle (GFV = 60^e jour ; Chuine = 92^e jour de l'année). L'axe des ordonnées correspond aux impacts cumulés par la plante. La ligne horizontale représente le seuil d'impact nécessaire pour atteindre le stade de floraison.

Pour les dates de véraison, les enveloppes des courbes des modèles GFV et WE se réduisent pour le delta +10°C (Figure C.24.). Cette réduction induit ici encore une gamme de dates de véraison plus faible, qui est également cohérente avec les résultats montrés dans la partie précédente. Pour le modèle GFV, le mécanisme est identique à celui expliqué pour la floraison.

Pour la série climatique observée, les impacts cumulés de températures simulées par le modèle WE affichent un aspect sigmoïdal. Il en est de même avec le modèle GFV. En revanche, les impacts cumulés présentent un aspect linéaire pour le delta +10°C. Pour expliquer ce phénomène, la figure C.25. présente les boxplots des impacts de la température quotidienne pour les trente-sept années étudiées. L'évolution temporelle pour les observations (données mesurées, période 1976-2005, boxplots bleus) présente une première séquence lors de laquelle les impacts varient autour de valeurs médianes de 0,2 et 0,3 (15 mars au 15 avril, figure C.25., pointillés rouges). On peut identifier une seconde phase pour laquelle les impacts augmentent progressivement pour passer de 0,3 à 0,7 (valeurs médianes, entre le 12 avril et le 4 juillet, figure C.25., pointillés bleus). Il s'agit d'une phase d'augmentation rapide de l'impact de la température marquée par une variabilité interannuelle légèrement supérieure à celle observée en début de cumul. Les impacts de températures varient donc fortement sur une période assez restreinte (augmentation et variabilité interannuelle). Par conséquent, les variations thermiques dans cette période

induisent probablement un impact notable sur la date de véraison. Enfin, dans une troisième phase, l'impact de la température atteint un palier ($>0,8$). Lors de cette période, la valeur d'impact optimale (1) n'est atteinte que pour quelques années isolées.

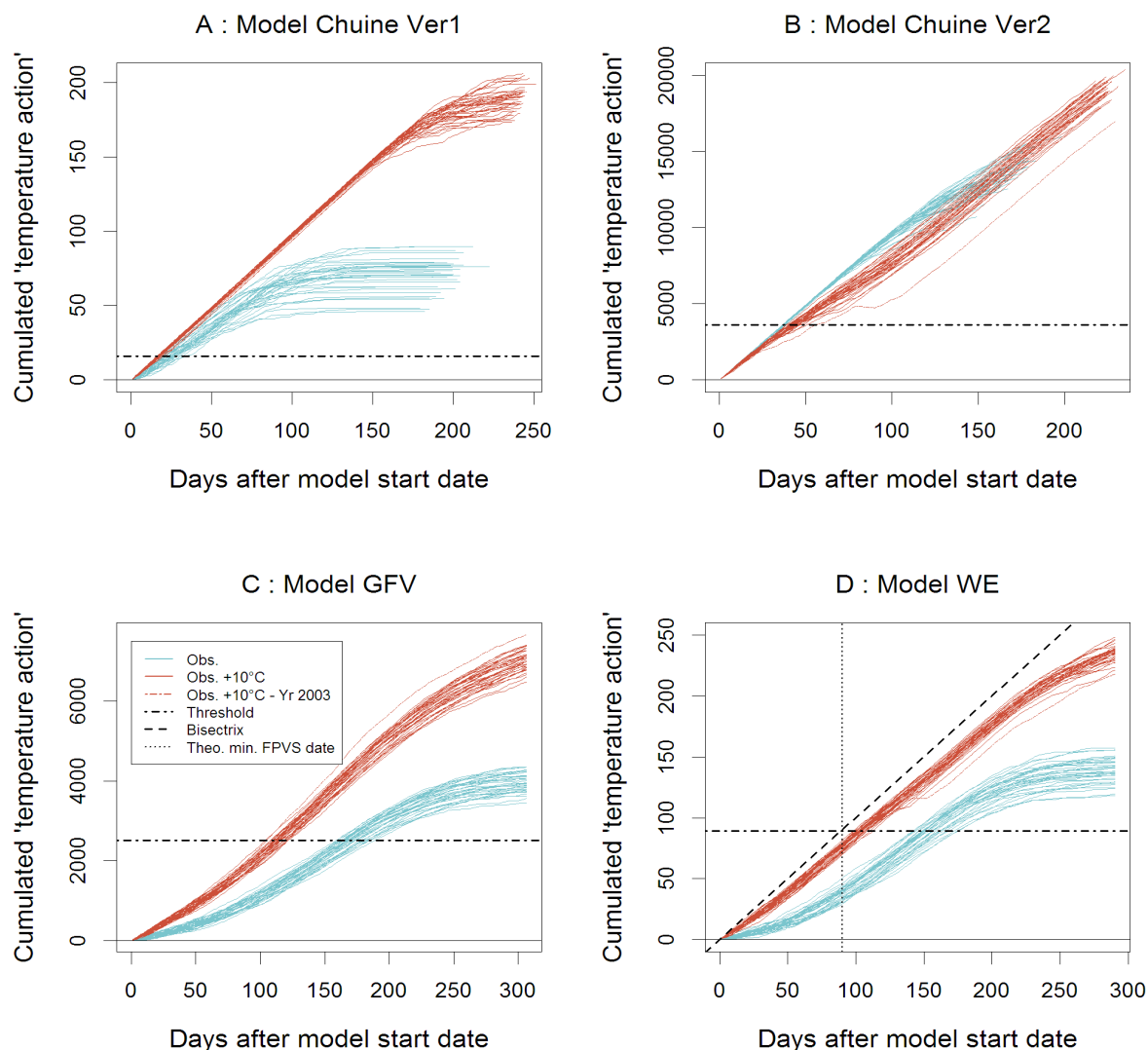


Figure C.24. Impacts cumulés de la température utilisés dans l'estimation de la date de mi-véraison dans les deux phases (élongation cellulaire et accumulation de photosynthétats) du modèle de Chuine (A et B) et pour les modèles GFV (C) et WE (D), pour toutes les années du jeu de données original (courbes bleues) et pour le delta $+10^{\circ}\text{C}$ (courbes rouges). L'axe des abscisses représente le jour après t_0 , la date de début du modèle (GFV = 60^e jour ; WE = 74^e jour ; Chuine = 92^e jour de l'année). L'axe des ordonnées correspond aux impacts cumulés. La ligne horizontale représente le seuil nécessaire pour atteindre le stade de véraison. La droite oblique en pointillés sur la figure D est la courbe d'impacts cumulés correspondant à un impact quotidien de 1 ($T_{opt} = 27,4^{\circ}\text{C}$). La droite verticale indique la date de véraison théorique le plus précoce que peut simuler le modèle WE.

Pour le delta $+10^{\circ}\text{C}$ (Figure C.25., boîtes rouges), on observe de fortes différences dans le profil de la courbe des impacts quotidiens de températures. Dans la première partie de la courbe (à gauche de la ligne verticale rouge en pointillés), les valeurs d'impact de températures sont au moins trois fois plus élevées que celles des données

originales. La variabilité interannuelle ainsi que l'augmentation au fil des jours des impacts de températures est toutefois similaire : elles sont simplement décalées sur des valeurs plus élevées. Des différences plus nettes sont observées pour la deuxième partie de la courbe (entre les lignes verticales en pointillés rouges et pointillés bleus), avec deux effets combinés : (i) un impact de la température très proche de l'optimum thermique ($27,4^{\circ}\text{C}$) suggérant une efficacité maximale de la température sur le développement de la vigne et (ii) une forte diminution de la variabilité interannuelle. Ceci confirme et explique les résultats présentés précédemment concernant la diminution de la variabilité interannuelle des dates de véraison simulées par le modèle WE pour un climat plus chaud.

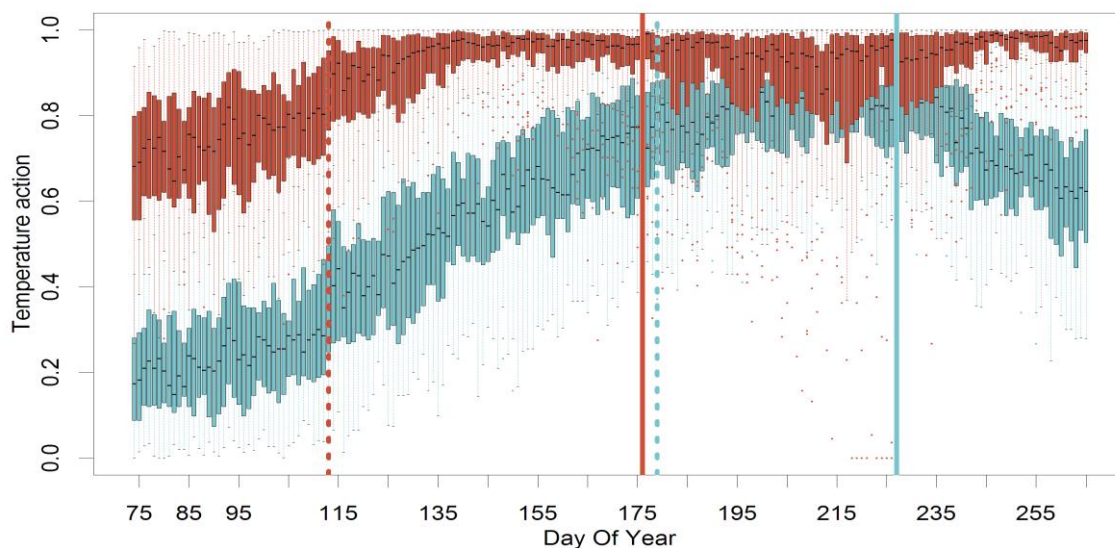


Figure C.25. Boxplot de l'impact quotidien de la température pour le modèle WE sur la période 1973-2005. L'axe des abscisses représente le jour de l'année. L'axe des ordonnées représente les valeurs de l'impact quotidien de la température, de 0 (aucun impact) à 1 (impact optimal), comme décrit dans le chapitre C.1.3.B. Les boxplots bleus représentent les valeurs d'impacts calculées pour les séries de températures originales. Les boxplots rouges représentent celles calculées pour le delta $+10^{\circ}\text{C}$. Les lignes verticales en pointillés (bleus pour les données originales, rouges pour le delta $+10^{\circ}\text{C}$) indiquent la date après laquelle l'impact de la température devient optimal ($> 0,8$). Les lignes verticales pleines (bleues pour les données originales, rouges pour le delta $+10^{\circ}\text{C}$) indiquent les dates de véraison moyennes pour la période 1973-2005.

La troisième partie de la courbe correspond à une phase après le jour 176 (27 juin, ligne pleine verticale rouge = date de véraison moyenne), durant laquelle les impacts de chaleur ont des valeurs moins élevées que durant la quarantaine de jours qui précèdent la véraison (jours 135 à 175, soit de mi-mai à fin juin), durant laquelle les impacts de chaleur ont une valeur proche ou égale à 1. Cette baisse des impacts de la température est la conséquence d'un dépassement fréquent de la température optimale ($27,4^{\circ}\text{C}$) dans le modèle WE.

C'est donc seulement dans des situations thermiques extrêmes, dans la simulation à +10°C analysée ici, que la température moyenne quotidienne atteint des valeurs suffisamment élevées pour avoir un réel effet limitant pour la cinétique de développement de la vigne. En outre, ces valeurs sont atteintes quasi systématiquement après la véraison.

Rappelons enfin que le delta +10°C est assez peu réaliste, en tout cas pour la Bourgogne viticole, y compris dans les scénarios d'évolution du climat les plus extrêmes.

Le seuil induit également un autre phénomène : dans le cas idéal où tous les jours auraient une température moyenne égale à la température optimale (27,4°C), l'impact quotidien de la température serait limité à 1 (valeur maximale). Ce cas de figure induirait une date de véraison limite au 11 juin, ce qui laisse quatre-vingt-dix jours entre le départ du modèle et la date de véraison. Ceci ne peut pas se produire avec le modèle GFV par exemple, dont les dates simulées vont tendre vers la date de début de calcul du modèle.

Les impacts cumulés de la température pour le modèle de Chuine doivent être traités en fonction des deux modèles proposés. Le premier modèle propose un impact nul de 0 à 10°C et optimal (=1) après 25°C. À 17°C, la valeur d'impact est de 0,5. Ainsi, la différence de forme de l'enveloppe des courbes d'impacts pour la première partie du modèle de véraison de Chuine peut être expliquée comme suit : pour la série de données d'observations, la température reste dans une gamme qui ne permet pas d'obtenir une valeur optimale systématiquement, alors que pour le delta +10°C, cette valeur est constamment atteinte. Les courbes pour le delta +10°C sont donc des droites (Figure C.24., A). Notons que la valeur-seuil est obtenue très rapidement (pointillés horizontaux sur la même figure).

La seconde partie du modèle de véraison de Chuine possède les mêmes caractéristiques que le modèle WE : une forme en cloche avec une valeur optimale d'impact de la température égale à 100 (pour T=20°C), une valeur de température (0°C) pour laquelle l'impact à la valeur minimale de 30 et une valeur maximale au-delà de laquelle l'impact sur la plante est nul (40°C). La valeur optimale, plus basse que pour le modèle WE, induit que, sous les conditions bourguignonnes, le modèle est actuellement en conditions optimales et sur la partie descendante de la courbe d'impact pour le delta +10°C. Il n'est donc pas surprenant d'observer pour ce modèle des impacts cumulés plus rapides pour les données actuelles de températures que pour le delta +10°C (Figure C.24., B). De même, la variabilité interannuelle des impacts cumulés est plus grande pour les observations que pour le delta +10°C pour la première partie du modèle et inversement pour la seconde partie du modèle.

De cette analyse on peut tirer les conclusions suivantes :

- parmi les trois modèles, le modèle linéaire de Chuine, avec une température de base de 8,63°C, reproduit avec la plus grande précision la date de floraison mais affiche un biais systématique élevé. Le modèle GFV, paramétré avec un plus grand jeu de données (observations phénologiques issues de différentes régions viticoles), affiche une plus grande robustesse et estime la floraison avec une erreur moyenne quadratique de l'ordre de quatre jours. Pour la véraison, GFV et WE sont plus précis que le modèle de Chuine, simulant la date de véraison avec une erreur moyenne quadratique (RMSE) légèrement inférieure à six jours ;
- l'augmentation de la température induit une occurrence plus précoce des stades phénologiques clés de la floraison et de la véraison, ainsi qu'une baisse de la variabilité interannuelle de ces dates d'occurrence ;
- les dates, simulées par les modèles, divergent graduellement sous climat plus chaud, avec un écart maximal entre des dates moyennes de véraison simulées de l'ordre de douze jours, pour une augmentation de la température de 10°C par rapport aux données climatiques mesurées sur la période 1976-2005 ;
- les dates de véraison simulées par le modèle WE montrent des biais graduels dépendant de l'augmentation de la température (cas des deltas). Ces biais sont 1/ précoces lorsque les dates simulées par le modèle WE sont comparées à celles simulées par le modèle de Chuine ou 2/ tardifs lorsque les dates sont comparées aux dates simulées par le modèle GFV ;
- finalement, l'impact des différents modèles est notable seulement pour une très forte augmentation de la température (+10°C), bien au-delà de celles attendues à la fin du XXI^e siècle.

C.III.3. Applications des modèles sur les données spatialisées

Après avoir évalué l'aptitude des modèles phénologiques à simuler de façon satisfaisante les dates de floraison et de véraison et leur sensibilité à la température, ces derniers ont été appliqués à des données spatialisées à cinquante mètres et cinq kilomètres (*cf.* Chapitre B). Dans un premier temps, nous comparons les dates d'occurrence des stades phénologiques de floraison et de véraison simulées à partir des données quotidiennes interpolées à cinquante mètres avec celles observées. Ceci permet d'évaluer la pertinence de la spatialisation de la phénologie en Bourgogne viticole. Dans un deuxième temps, nous réalisons la même étude sur les grilles de

données de température spatialisées à cinq kilomètres (*cf.* Chapitre B). Le but est d'estimer si cette échelle spatiale de cinq kilomètres, qui est celle des données désagrégées par le modèle climatique WRF, est pertinente pour l'analyse spatiale du changement climatique et de son impact sur la phénologie du Pinot noir. Dans un troisième temps, la variabilité spatiotemporelle de la phénologie sur la période 1989-2009 est analysée à partir des cartes de dates de floraison et de véraison simulées à cinq kilomètres (températures interpolées à cinquante mètres puis ré-agrégées à cinq kilomètres).

C.III.3.A. ÉVALUATION DE LA SPATIALISATION DE LA PHÉNOLOGIE

Comme précisé plus haut (*cf.* C.I.2. données phénologiques), deux bases de données d'observations phénologiques ont été utilisées :

- une base de données à forte profondeur temporelle (période 1973-2007), pour laquelle nous disposons d'observations sur de nombreux stades phénologiques, dont la mi-floraison et la mi-véraison. Il s'agit d'observations sur la parcelle de Savigny-lès-Beaune par le SRAL, qui ont été utilisées pour la validation locale des modèles phénologiques (*cf.* parties C.II.1., C.II.2. et C.III.1.) ;
- une base de données à plus faible profondeur temporelle (1997-2008), mais réunissant les observations sur trente-six parcelles réparties sur l'ensemble de la Bourgogne viticole (Figure C.2.). Malheureusement, cette base de données ne contient pas suffisamment d'observations de dates d'occurrences de mi-véraison, et seule la date de mi-floraison a été utilisée.

Dans un premier temps, les dates de mi-floraison et de mi-véraison observées à la parcelle de Savigny-lès-Beaune sont comparées aux mêmes stades simulés par les modèles phénologiques spatialisés aux coordonnées de cette parcelle. Notons toutefois qu'on s'attend ici à obtenir des écarts similaires à ceux observés entre la phénologie observée et celle simulée à partir des données de la station climatique de Savigny-lès-Beaune (*cf.* C.III.1.). En effet, cette station située à moins d'une centaine de mètres de la parcelle d'observation a été intégrée dans le processus d'interpolation des températures quotidiennes. Ainsi, la température interpolée au pixel de cinquante mètres dans lequel est située la parcelle d'observation est très proche de celle mesurée à la station de Savigny-lès-Beaune.

À la parcelle de Savigny-lès-Beaune, la comparaison entre phénologies observée et estimée à partir de la température interpolée à cinquante mètres confirme un biais notable des dates de floraison et de véraison simulées par les modèles (Figure C.26.).

Concernant la floraison, ce biais, tardif (Tableau C.4.), est plus élevé d'environ deux jours par rapport à celui observé lors de la comparaison observations/modélisations à partir des données de la station climatique de Savigny-lès-Beaune (Tableau C.2.). La RMSE est plus élevée pour les deux modèles. Cependant, la différence est de moins d'un jour pour le modèle GFV et de presque deux jours pour le modèle de Chuine. Par rapport à ce qui avait été vu précédemment (Tableau C.2.), le r^2 est plus faible pour le modèle de Chuine (0,85) et plus élevé pour le modèle GFV (0,84). La combinaison entre une forte valeur de r^2 et un biais fortement négatif pour le modèle de floraison de Chuine montre que le modèle reproduit des valeurs ayant une forte cohérence temporelle avec les observations, mais que l'erreur systématique (biais) est élevée. En ce sens, le modèle de floraison GFV est plus cohérent avec l'observation puisque son r^2 est élevé, que le biais est faible et la RMSE élevée, ce qui signifie que les valeurs oscillent autour de l'observation à hauteur de quatre jours en moyenne, mais que cette erreur n'est que faiblement systématique.

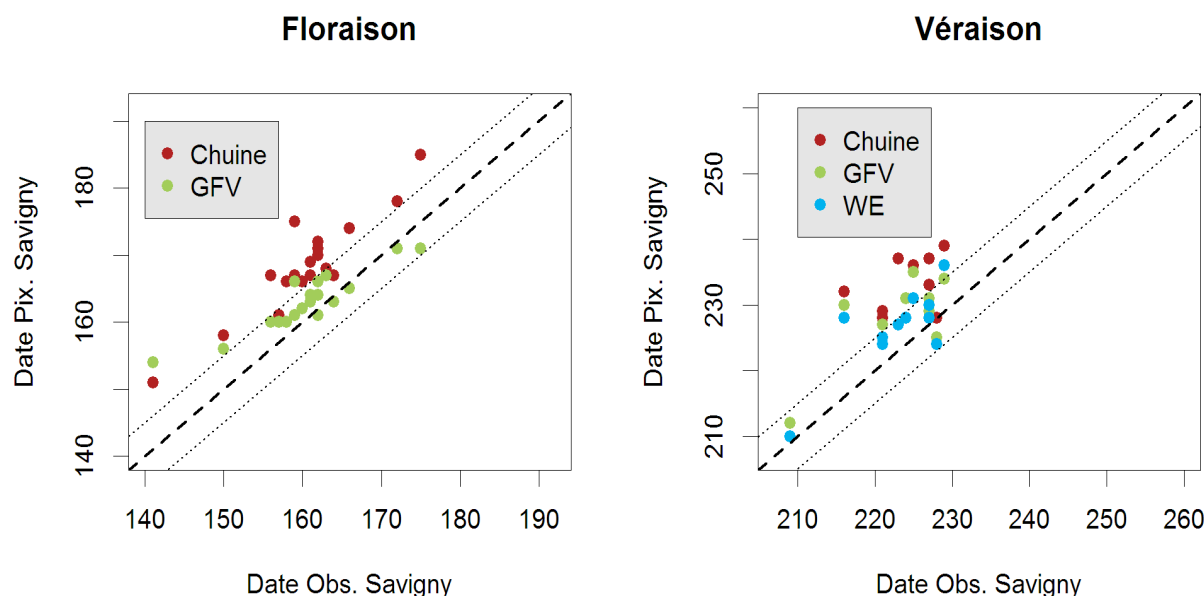


Figure C.26. Dates de floraison et de véraison observées à Savigny-lès-Beaune et simulées par les modèles phénologiques à partir des données de températures du pixel à cinquante mètres le plus proche de la parcelle (période 1989-2007).

Concernant la véraison, les valeurs de r^2 sont clairement plus faibles que pour les analyses précédentes (Tableau C.2.), et ce quel que soit le modèle. De même, le biais tardif pour le modèle de Chuine est très important (huit jours), alors qu'il était quasiment nul pour les simulations à la station. Les RMSE des modèles GFV et WE sont équivalents à ceux observés dans le tableau C.2. Cependant, les biais sont plus tardifs. Le modèle le plus performant concernant la simulation des dates de véraison est le WE.

Sav.	F. Chu.	F. GFV	V. Chu.	V. GFV	V. WE	Pix.	F. Chu.	F. GFV
r²	0,85	0,84	0,59	0,55	0,63	r²	0,78	0,75
RMSE	8,5	4,47	9,11	6,36	5,24	RMSE	5,92	4,59
Biais	-8	-2,56	-8	-4,92	-3,75	Biais	-4,66	-0,48

Tableau C.4. Tableau des performances des modèles de Chuine (Chu.), GFV et WE, pour la floraison (F.) et la véraison (V.). Le tableau de gauche présente les résultats concernant la comparaison entre les observations à la parcelle de Savigny-lès-Beaune et les dates simulées par les modèles au pixel à cinquante mètres de maille correspondant. Le tableau de droite présente les résultats concernant la comparaison entre les observations aux trente-six parcelles de Pinot noir en Bourgogne et les pixels à cinquante mètres correspondants.

Comme indiqué plus haut, la comparaison températures spatialisées à cinquante mètres / observations à la parcelle de Savigny-lès-Beaune ne permet pas d'évaluer rigoureusement la qualité de l'interpolation des données climatiques utilisées pour la spatialisation de la phénologie, car la station climatique de Savigny-lès-Beaune, utilisée dans le processus d'interpolation spatiale des températures minimales et maximales quotidiennes, est située à quelques dizaines de mètres de la parcelle de Savigny-lès-Beaune.

Une comparaison similaire entre phénologies observée et spatialisée, plus indépendante, a été réalisée à partir de la seconde base de données de trente-six parcelles de Pinot noir pour lesquelles nous disposons des observations de dates de mi-floraison sur la période 1997-2008. La validation concernant la véraison n'a pas été réalisée à cause du trop faible nombre d'observations pour ce stade (seulement sept observations au total).

Pour la mi-floraison, nous disposons de cent quarante-six observations, pour l'ensemble de trente-six parcelles sur la période 1997-2008. Néanmoins, le nombre d'observations par année varie (Tableau C.5.) : durant certains millésimes, comme 1998 ou 2000, la date d'occurrence de la floraison n'est disponible que pour quelques parcelles. Cela provient du fait que cette base de données a été construite à partir d'observations provenant de réseaux de parcelles de différents organismes (BIVB, SRAL et Chambres d'agriculture) dont la finalité première n'est pas systématiquement l'observation phénologique : le SRAL et les Chambres d'agriculture réalisent ces observations au pas de temps hebdomadaire, lors des observations phytopathologiques sur la vigne. Les observateurs de ces organismes notent les stades phénologiques, mais il arrive que leurs observations soient faites avant ou après l'occurrence de la floraison.

	Floraison Chuine				Floraison GFV			
	N	r ²	RMSE	Biais	N	r ²	RMSE	Biais
1997	9	0,4	9,55	9,33	9	0,21	2,24	-1,67
1998	2	NA	8,63	-8,5	2	NA	2,92	-1,5
1999	10	0,83	4,1	-3,2	10	0,77	4,14	2,9
2000	8	0,74	3,87	-3	8	0,69	3,06	-0,88
2001	9	0,43	6,96	-6,67	9	0,46	3,96	3,44
2002	11	0,29	7,08	-6,72	11	0,29	2,26	-0,36
2003	10	0,3	5,44	-5,2	10	0,17	3,13	-2,6
2004	19	0,19	5,71	-4,68	19	0,13	3,03	0,89
2005	18	0,43	4,94	-4,06	18	0,29	3,18	0,78
2006	14	0,25	2,3	-1,57	14	0,33	1,58	0,36
2007	14	0,38	6,76	-6,29	14	0,3	10,06	-9,86
2008	20	0,33	6,09	-2,8	20	0,3	5,53	0,85

Tableau C.5. Performances annuelles des modèles de Chuine (Chu.) et GFV pour la floraison. Le tableau de gauche présente les résultats concernant la comparaison entre les observations aux trente-six parcelles de Pinot noir en Bourgogne et les dates simulées par le modèle de Chuine aux pixels à cinquante mètres de maille correspondants. Le tableau de droite présente les résultats concernant la comparaison entre les observations aux trente-six parcelles de Pinot noir en Bourgogne et les dates simulées par le modèle GFV aux pixels à cinquante mètres de maille correspondants.

D'une façon générale, on observe une bonne corrélation entre la date de mi-floraison calculée à partir des données de température interpolée à cinquante mètres et les observations aux parcelles (Figure C.27.). Le modèle de Chuine présente à nouveau un biais tardif de 4,66 jours alors que le modèle GFV présente un biais quasi nul (+0,48 jours). Les r² associés aux modèles de Chuine et GFV sont respectivement de 0,78 et 0,75, ce qui exprime que les modèles expliquent au moins 78 % et 75 % de la variance observée. Les RMSE des deux modèles sont de 5,92 et 4,59 jours.

Afin d'évaluer la spatialisation de la phénologie modélisée, il est nécessaire de comparer dates observées et simulées année par année. Les performances des modèles ne sont pas identiques d'une année sur l'autre (Tableau C.5.). Ici, les r² mesurent la capacité des modèles à décrire la variabilité spatiale des dates de floraison. Pour les deux modèles, cette valeur est élevée en 1999 et 2000 (entre 0,69 et 0,83). Pour toutes les autres années et pour les deux modèles, les r² sont inférieurs à 0,5. Les r² du modèle de Chuine sont globalement supérieurs à ceux du modèle GFV. Cependant, pour le modèle GFV, les valeurs de RMSE sont inférieures à quatre jours, sauf pour les années 1999, 2007 et 2008 (respectivement 4,14 ; 10,06 ; 5,53). Pour l'année 2007, marquée par un printemps très chaud, le biais est très fort (-9,86) alors que pour les autres années, il oscille entre -2 et +2 jours.

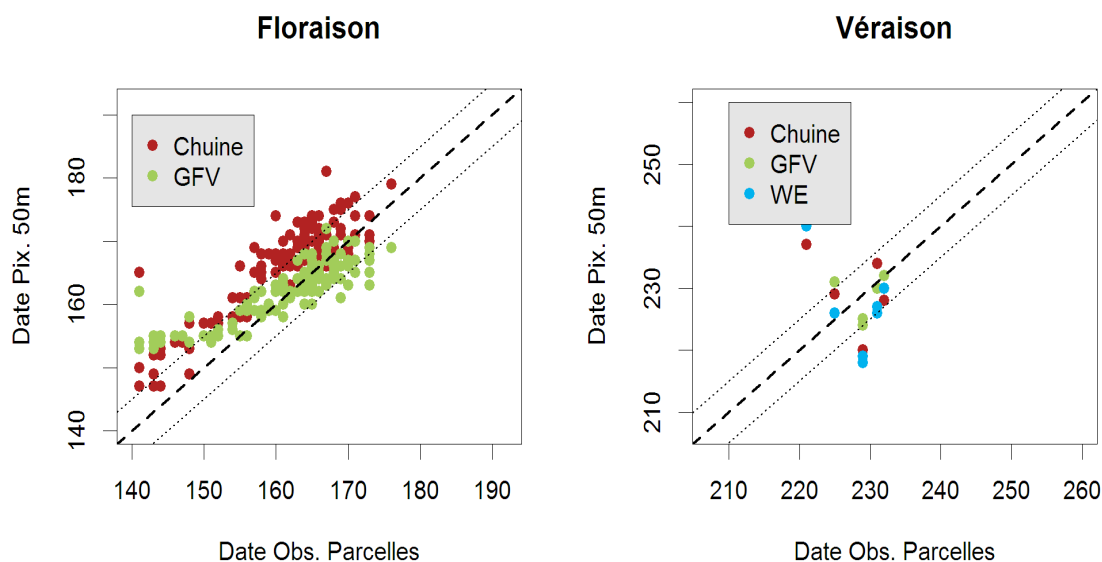


Figure C.27. Dates de floraison et de véraison observées aux trente-six parcelles de Pinot noir et simulées par les modèles phénologiques à partir des données de températures des pixels à cinquante mètres le plus proches des parcelles (période 1997-2008).

Pour le modèle de Chuine, tous les biais sont négatifs (sauf pour 1997). Ceci confirme le biais tardif du modèle observé précédemment. Ce biais est plus faible pour les années 1999, 2000, 2006 et 2008 (respectivement de -3,2 ; -3 ; -1,57 ; -2,8 jours). Les valeurs de RMSE sont supérieures à quatre jours (sauf pour les années 2000 et 2006).

Finalement, si le modèle de Chuine présente un biais systématique tardif important, les valeurs de r^2 montrent qu'il est plus performant pour décrire la variabilité spatiale des stades de floraison et de véraison. À l'inverse, le modèle GFV ne montre aucun biais systématique (hormis pour la véraison) mais explique de façon moins satisfaisante la variabilité spatiale des dates de floraison et de véraison. Enfin, le modèle WE simule de façon cohérente la variabilité spatiale des dates de véraison (r^2 plus fort que pour les deux autres modèles sur la validation au pixel à Savigny-lès-Beaune) et obtient une RMSE et un biais moins importants que le modèle GFV.

Ces résultats indiquent que la spatialisation de la phénologie basée sur des modèles phénologiques appliqués à des températures quotidiennes interpolées à cinquante mètres est relativement cohérente avec la réalité. Les différences entre observations et valeurs spatialisées des dates de mi-floraison, bien que parfois élevées, restent proches des barres d'incertitude inhérente aux modèles phénologiques. Cela suggère donc que l'erreur imputable à la spatialisation de la température n'impacte que modérément les dates phénologiques simulées.

Lors de la spatialisation des données de température (*cf.* Chapitre B.), les interpolations réalisées à la maille de cinquante mètres ont été agrégées à la maille de

cinq kilomètres afin de pouvoir être comparées aux désagrégations du modèle climatique régional WRF. Les modèles phénologiques sont appliqués aux désagrégations de WRF afin de connaître l'impact potentiel du changement climatique futur sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne (cf. Chapitre D.). L'idée est donc ici de connaître le comportement des modèles phénologiques lorsqu'ils sont appliqués à une maille de cinq kilomètres. En d'autres termes, on cherche ici à savoir si l'impact de la variabilité locale de la température, à l'échelle kilométrique à infra-kilométrique, non prise en compte par le modèle WRF, est suffisamment faible pour autoriser une analyse géographique de la phénologie à l'échelle de cinq kilomètres en Bourgogne viticole. La comparaison entre les dates simulées par les modèles phénologiques et les dates observées à la parcelle de Savigny-lès-Beaune est présentée dans la figure C.28.

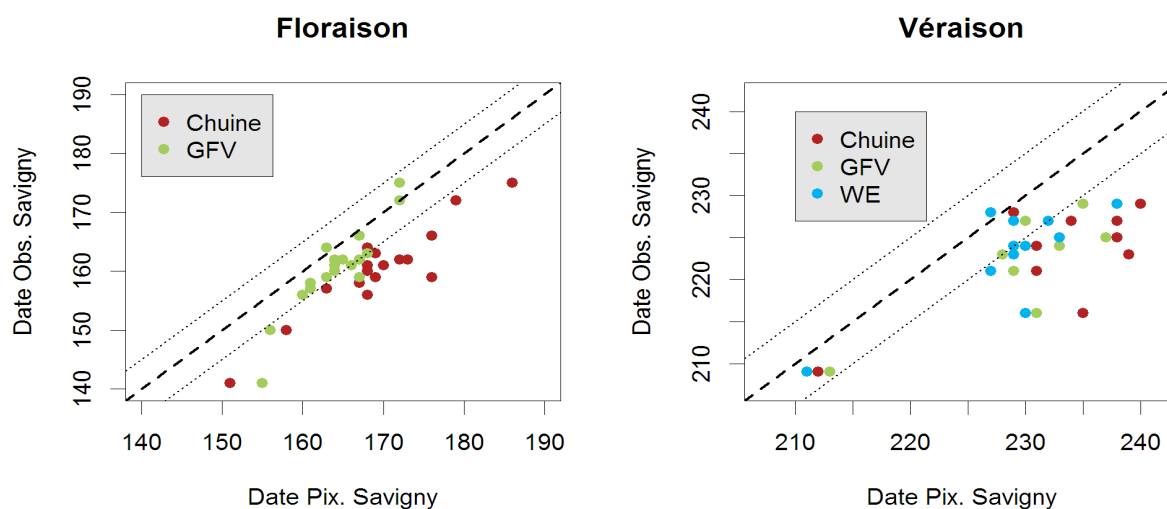


Figure C.28. Dates de floraison et de véraison observées à Savigny-lès-Beaune et dates simulées par les modèles phénologiques à partir des données de températures du pixel à cinq kilomètres dans lequel se situe la parcelle. Le r^2 , la RMSE et le biais [r^2 ; RMSE ; biais] sont pour le modèle de Chuine, pour la floraison : [0,85 ; 8,5 jours ; 8 jours] et pour la véraison : [0,59 ; 9,11 jours ; 8 jours] ; pour le modèle GFV, pour la floraison : [0,84 ; 4,47 jours ; 2,56 jours] et pour la véraison : [0,55 ; 6,36 jours ; 4,92 jours] ; et pour le modèle WE, pour la véraison : [0,63 ; 5,24 jours ; 3,75 jours] (période 1989-2007).

En ce qui concerne la floraison, deux informations sont identifiables. Les simulations des modèles sont plus tardives que les observations. Les coefficients de détermination sont de 0,86 et 0,84 respectivement pour le modèle de Chuine et le modèle GFV (Figure C.28.). Cet écart entre les simulations et les observations s'explique par la comparaison directe entre un point d'observation et une maille qui moyenne les conditions sur une zone de cinq kilomètres sur cinq kilomètres. Comme vu dans le chapitre C.I.2., la Côte viticole est d'une largeur parfois dix fois inférieure à la taille du pixel. Ainsi, les conditions à l'intérieur du pixel moyennent une partie de la Côte viticole, une partie de la plaine de Saône et une partie du Seuil de Bourgogne.

Le pixel, s'il comporte une partie plus large sur un secteur d'altitude, aura une température moyenne plus basse que s'il avait recouvert une plus large partie de plaine de Saône par exemple. Le pixel, plus froid, force les modèles à produire des dates d'occurrence de stades phénologiques plus tardives que les observations. Ainsi, les modèles simulent une date moyenne de floraison autour du 18 juin (Chuine) et du 13 juin (GFV) alors que l'observation est, en moyenne, autour du 9 juin.

Les dates de véraison sont aussi plus tardives que l'observation (en moyenne : 17 août pour les modèles de Chuine et GFV et 15 août pour le modèle WE contre une observation moyenne autour du 11 août) mais, en plus, la corrélation est faible avec des r^2 de 0,59, 0,55 et 0,63, respectivement, pour les modèles de Chuine, GFV et WE. Ici, on pose clairement le problème de la comparaison entre un pixel de 5 km² situé sur un relief accidenté et un point d'observation situé sur un des extrêmes du relief.

Bien que la spatialisation de la phénologie à cinq kilomètres soit dégradée et s'éloigne pour des raisons évidentes de l'échelle spatiale de l'observation à la parcelle, elle reste cohérente avec la phénologie observée. Néanmoins, le biais systématique, retardant artificiellement la floraison de 2,6 à 8 jours et la véraison de 3,75 à 8 jours (selon le modèle phénologique utilisé), doit ainsi être pris en considération dans les simulations du changement climatique réalisées au moyen du modèle WRF.

C.III.3.B. APPLICATION DES MODÈLES SUR LES DONNÉES SPATIALISÉES À 5 KILOMÈTRES

La structure spatiale des dates d'occurrence de la phénologie (à savoir obtenue à partir des températures minimales et maximales quotidiennes interpolées sur la période 1989-2009) est analysée à partir des grilles de données à résolution cinq kilomètres. Bien que l'on perde ici l'information de fine échelle (< 5 km), cette résolution permet de décrire la variabilité mésoclimatique de la phénologie simulée à l'échelle de l'ensemble de la région Bourgogne.

Afin d'apprécier les différences en termes de variabilité spatiale, les distributions des séries annuelles sont comparées (*cf.* en Annexe C.1.).

Que ce soit pour le modèle de Chuine ou pour le GFV, le pattern des dates de floraison est clairement dépendant du relief (Figures C.29. et C.30.) avec, généralement, des dates plus tardives sur le Morvan et le Seuil de Bourgogne et plus précoces en plaine de Saône. Les différences de dates entre les sommets du Morvan et le sud de la plaine de Saône vont de quatorze à vingt-cinq jours pour le modèle GFV et de quinze à trente-six jours pour le modèle de Chuine. Cette différence est généralement plus forte pour le modèle de Chuine que pour le modèle GFV, hormis

pour les années 1994-1995, 2001 et 2005 pour lesquelles le modèle GFV simule une gamme de valeurs plus grande (différences entre les modèles inférieures ou égales à deux jours). La variabilité interannuelle de cette variabilité spatiale est plus inconstante pour le modèle de Chuine que pour le modèle GFV avec de grandes différences interannuelles.

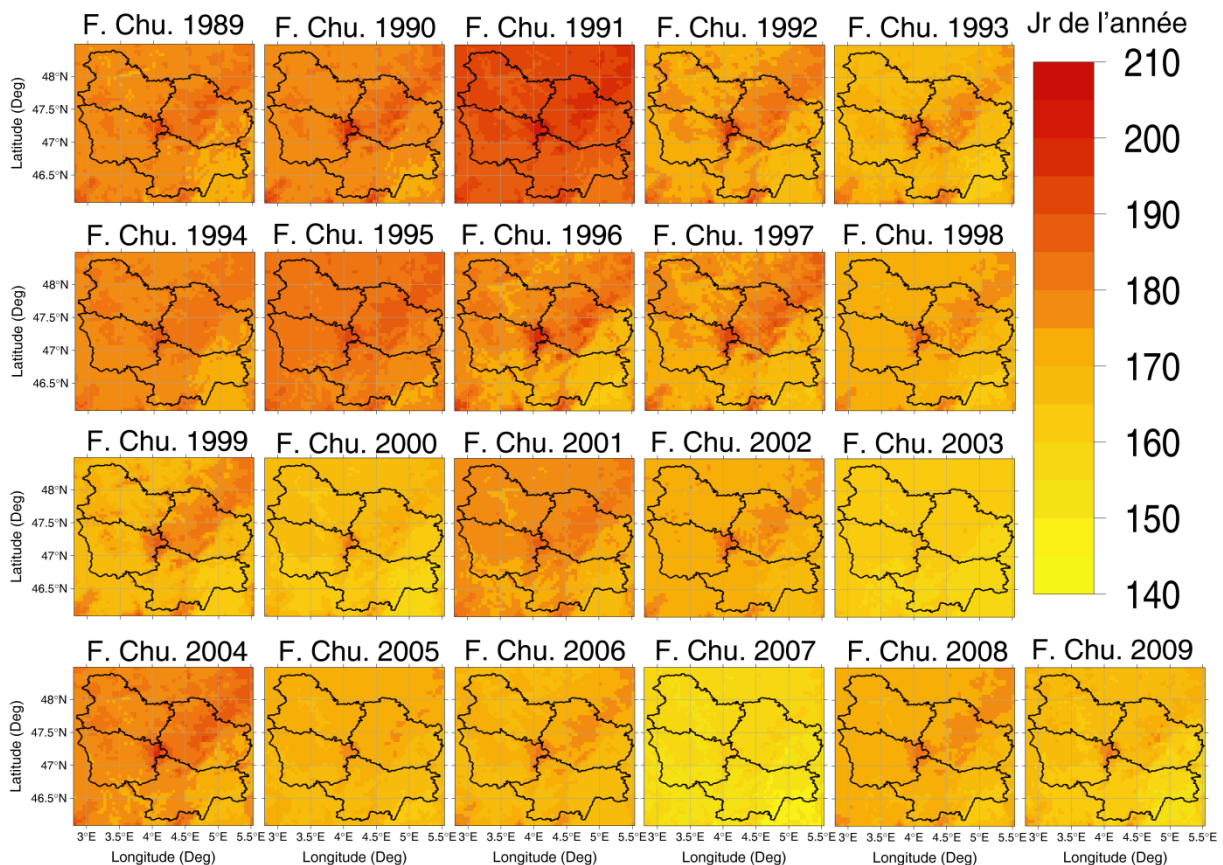


Figure C.29. Dates de floraison simulées par application du modèle de Chuine aux données de températures spatialisées (1989-2009).

Globalement, le modèle de Chuine simule des dates plus tardives que celles du modèle GFV (*cf.* Annexe C.1.). En moyenne, la différence est comprise entre deux et quatorze jours, sauf pour l'année 2007 pour laquelle le modèle GFV est plus tardif (de deux jours). Les années en début de série sont plus tardives que celles en fin de série, et ce pour les deux modèles : après 1998, seulement deux moyennes spatiales dépassent le 24 juin (2001, 2004) pour le modèle de Chuine, alors qu'avant 1998 une seule année était plus précoce que le 24 juin (1993). De même pour le modèle GFV, les valeurs ne dépassent pas le 19 juin (sauf 2004) après 1998, alors que cinq années sont plus tardives avant 1998. Pour les deux modèles, les années ayant respectivement les moyennes le plus précoces et tardives sont 2007 et 1991. Pour le modèle GFV, l'année 1995 est relativement tardive avec un jour d'avance sur l'année 1994. La différence entre ces deux années est de neuf jours pour le modèle de Chuine.

De même, l'année 2003 est, en termes de moyenne spatiale, plus proche de l'année 2007 pour le modèle GFV que pour le modèle de Chuine. Enfin, la différence entre les deux modèles est plus faible en fin de série et sur les années le plus précoces en début de séries.

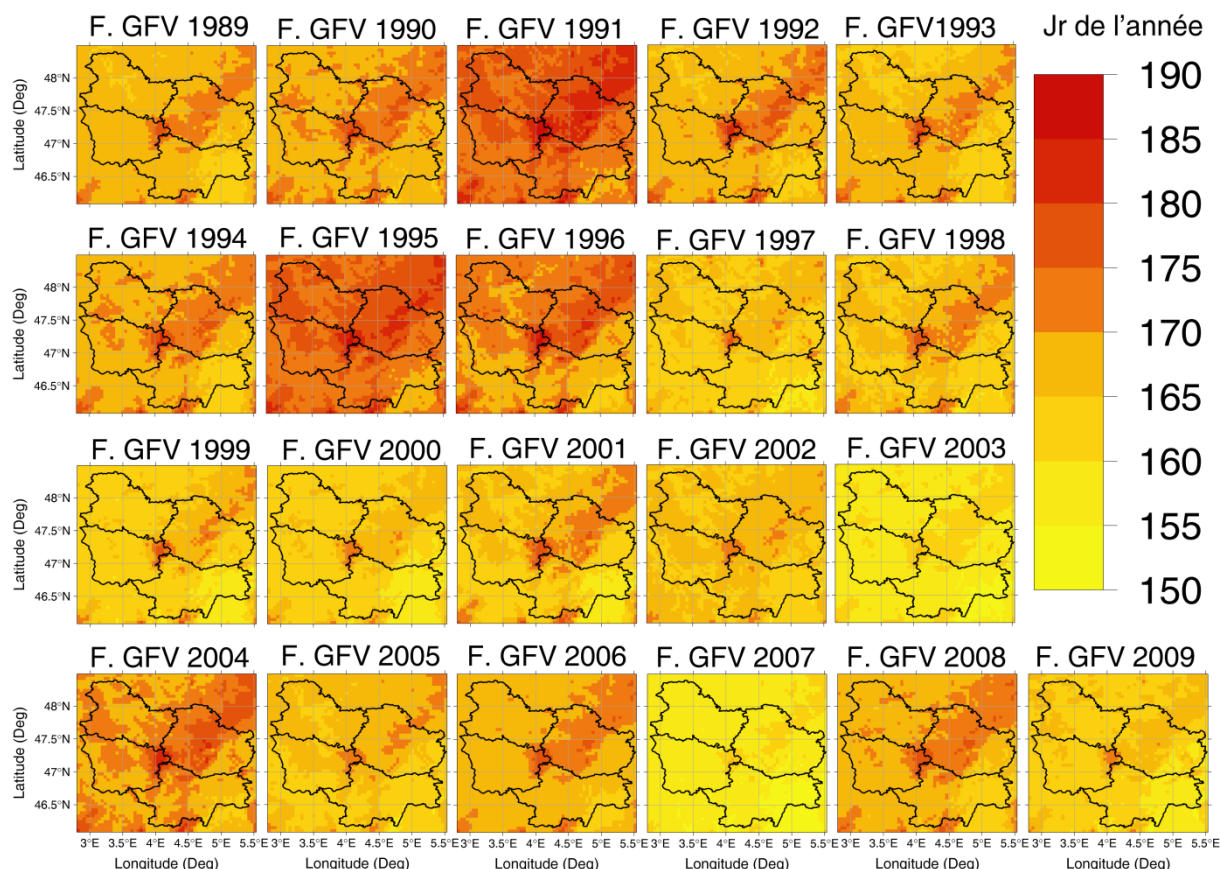


Figure C.30. Dates de floraison simulées par application du modèle GFV aux données de températures spatialisées (1989-2009).

Pour la véraison également, les patterns dépendent essentiellement du relief (Figure C.31., C.32. et C.33.). Les zones tardives/précoces sont toujours situées sur les sommets du Morvan/plaine de Saône. En observant les minima et maxima de chaque année pour chaque modèle, il est clair que la gamme de dates phénologiques est très large. Elle va de l'ordre d'une vingtaine de jours (les trois modèles) à plus de soixante-dix jours (modèle WE). Si les minima simulés par les modèles sont du même ordre de grandeur que les observations à Savigny-lès-Beaune, les maxima sont plus tardifs. Ainsi, certaines valeurs atteignent-elles le deux cent quatre-vingtième jour de l'année (7 octobre), ce qui est trop tardif pour espérer parvenir au stade de maturité. Ainsi, la comparaison sera faite sur les différences interquartiles. Pour le modèle de Chuine, cet écart s'échelonne de trois à quatorze jours, alors que pour les deux autres modèles, il s'échelonne de quatre à huit-neuf jours (GFV-WE). Pour les années 1993,

2000 et 2007, les valeurs de cet écart sont supérieures à dix jours. Pour les deux autres modèles, les années à fort contraste sont 1993 et 1996.

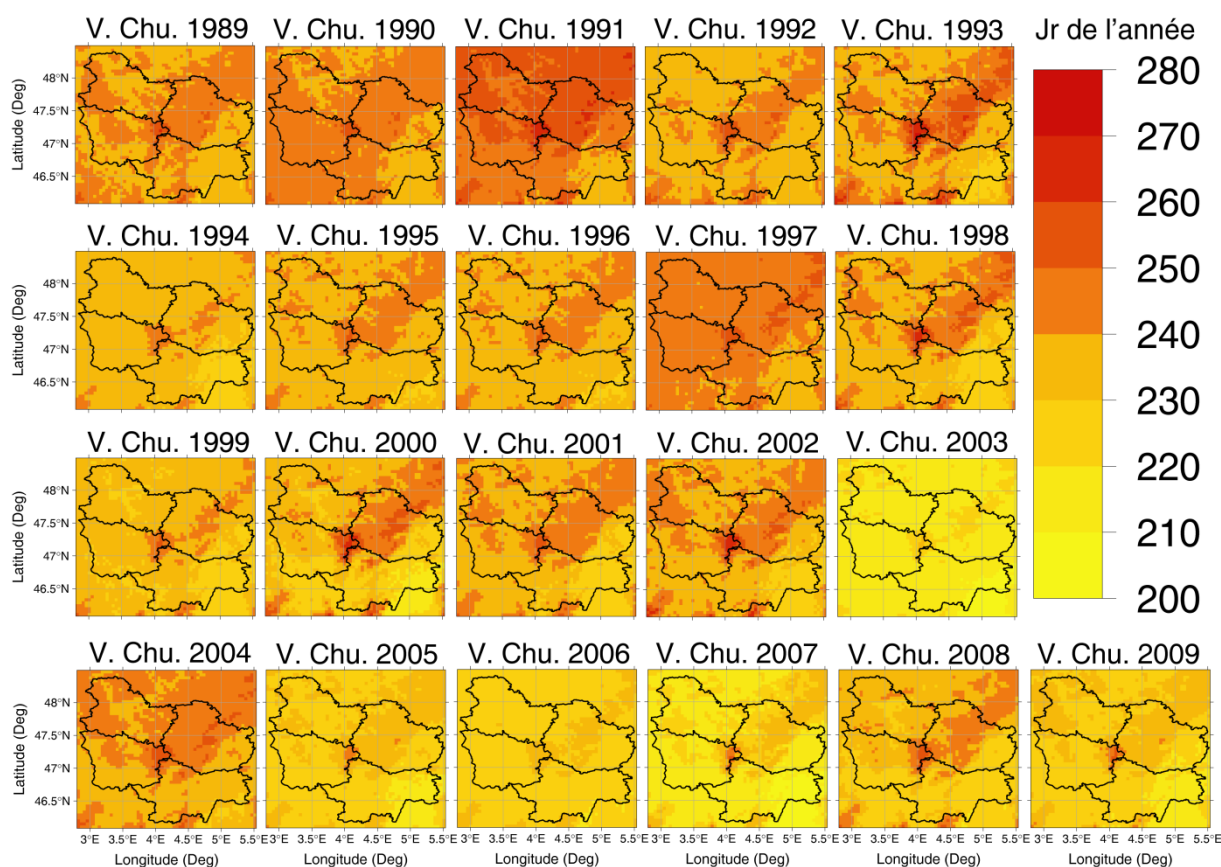


Figure C.31. Dates de véraison simulées par application du modèle de Chuine aux données de températures spatialisées (1989-2009).

Pour la floraison, l'année précoce était 2007 pour les deux modèles (Chuine et GFV). En ce qui concerne la véraison, seul le modèle de Chuine confirme l'année 2007 comme étant une année précoce. De fait, le modèle de Chuine est le seul pour lequel la date de véraison dépend de la date de floraison étant donné la continuité dans le processus de calcul. Cela n'est pas le cas pour les deux autres modèles qui ont tous deux observé seulement une année (2003) très précoce. Le modèle de Chuine obtient également des dates précoces pour cette année 2003.

Globalement, le modèle de Chuine est plus tardif que les autres modèles avant l'année 2005. Lors de cette période, les dates simulées par les modèles GFV et WE sont très proches les unes des autres. Comme pour la floraison, avant l'année 1998, les dates de véraison sont généralement plus tardives. En revanche, à l'inverse des résultats obtenus pour la floraison, les modèles ne sont pas plus proches les uns des autres malgré le fait que la date de véraison est plus précoce.

De plus, notons que le phénomène aperçu lors de l'étude des indices phénologiques est mis en évidence ici, avec des années plus précoces plus nombreuses après 1998.

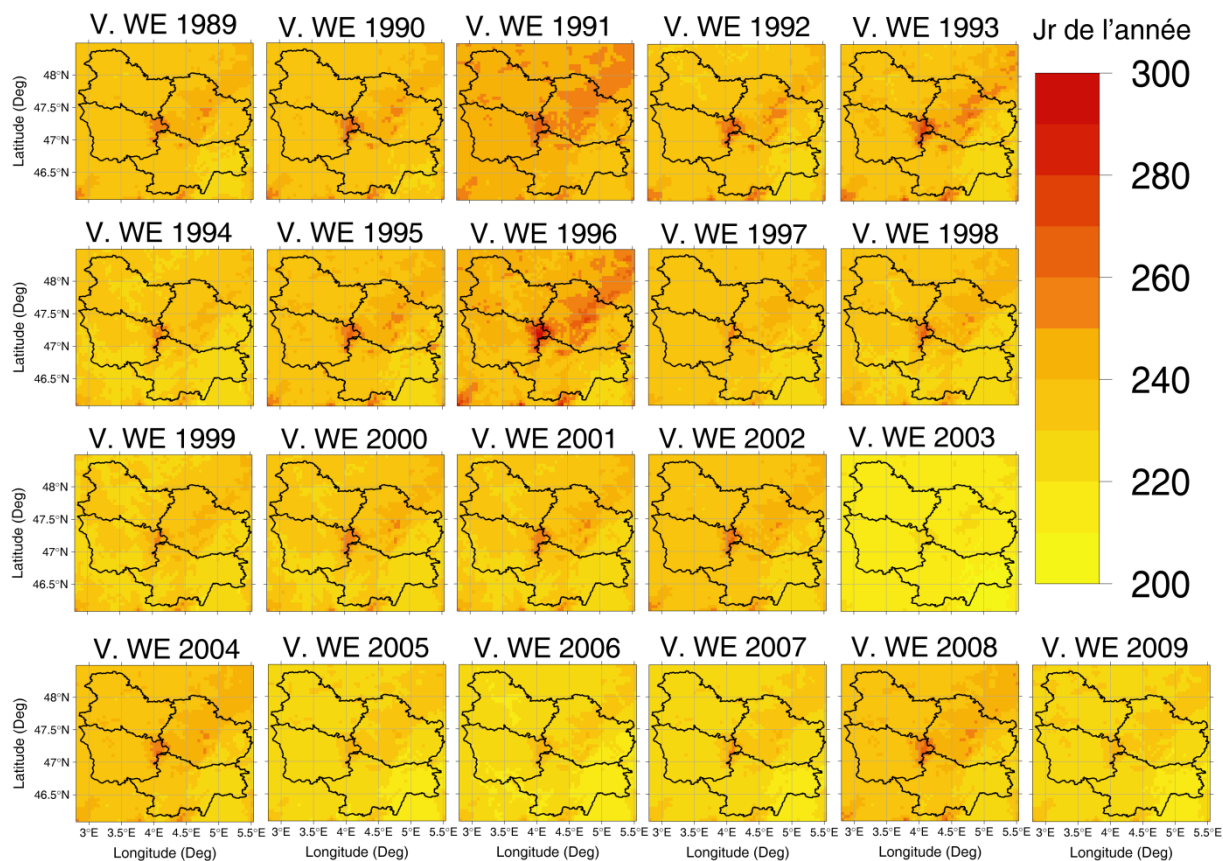


Figure C.32. Dates de véraison simulées par application du modèle WE aux données de températures spatialisées (1989-2009).

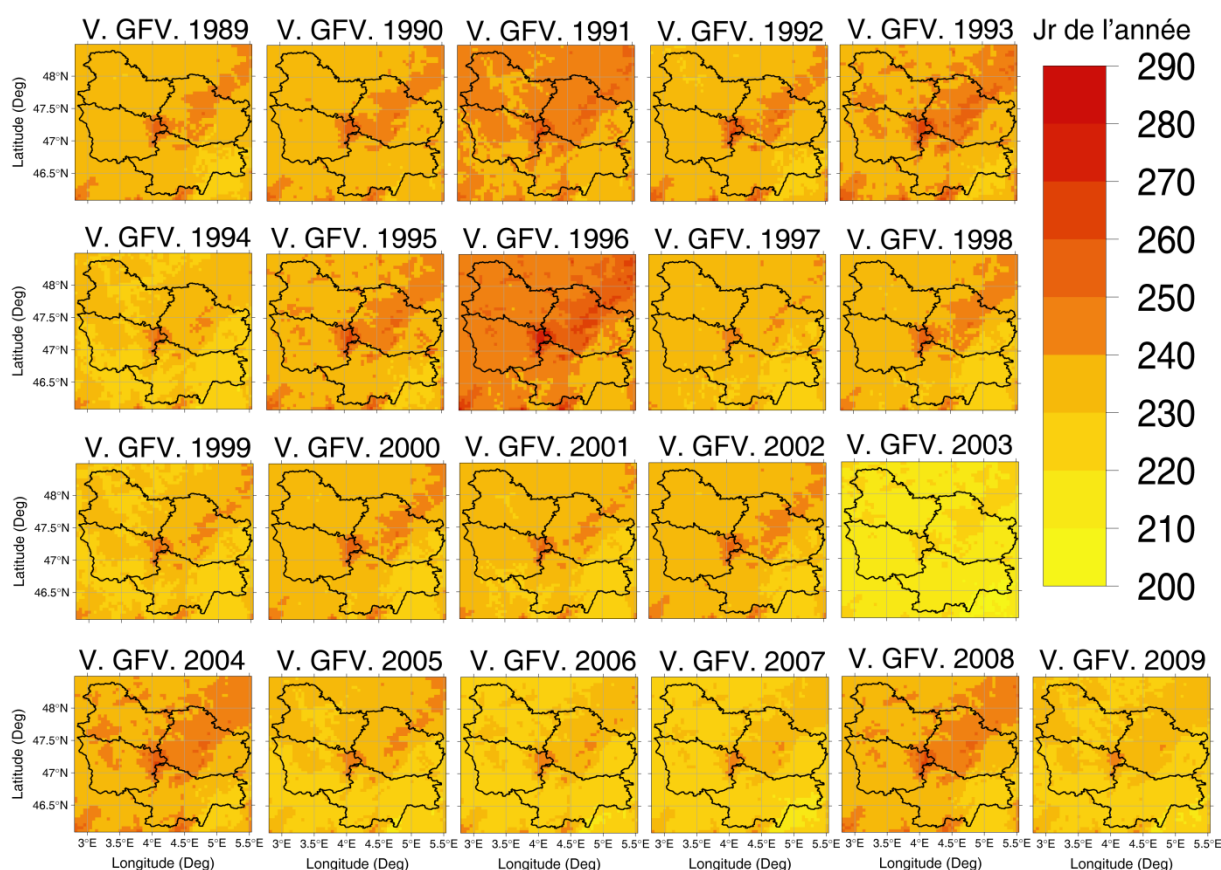


Figure C.33. Dates de floraison simulées par application du modèle GFV aux données de températures spatialisées (1989-2009).

Cette sous-partie C.III. a donc mis en évidence plusieurs points importants :

- les performances des trois modèles pour la simulation des dates d'occurrences des stades du Pinot noir en Bourgogne montrent qu'ils se complètent. Que ce soit pour la floraison ou la véraison, le modèle de Chuine est performant en termes de variabilité interannuelle mais présente un biais important. Au contraire, le modèle GFV a un biais faible mais décrit la variabilité interannuelle de façon moins satisfaisante que le modèle de Chuine. Le modèle WE, sur la simulation de la véraison, présente un biais et une RMSE plus faibles que ceux du modèle de Chuine, mais plus forts que ceux du modèle GFV. Il décrit la variabilité temporelle des dates de façon plus satisfaisante que les deux autres modèles (r^2 plus fort) ;
- pour la floraison, le modèle de Chuine simule une plus forte variabilité spatiale que le modèle GFV (quatorze – vingt-cinq jours pour GFV contre quinze – trente-six jours pour Chuine). Les deux modèles simulent des dates plus tardives avant 1998 qu'après 1999 ;

-
- pour la véraison, les écarts maxima de dates phénologiques sont très larges : d'une vingtaine de jours pour les plus faibles (les trois modèles) à soixante-dix jours pour le modèle WE. L'écart interquartile est compris entre trois et quatorze jours pour le modèle de Chuine, contre quatre à huit-neuf jours pour les deux autres modèles. Enfin, comme pour la floraison, avant l'année 1998, les dates de véraison sont généralement plus tardives qu'après 1998.

Maintenant que les performances des modèles phénologiques ont été évaluées, la prochaine étape va être d'estimer l'apport du modèle WRF dans l'étude d'impacts du changement climatique futur sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne.





CHAPITRE D

Impact du changement climatique projeté sur le Pinot noir en Bourgogne.

'On ne peut prévoir les choses qu'après qu'elles sont arrivées.'

Rhinocéros, Eugène Ionesco



CHAPITRE D

Sommaire

D.I. Introduction	215
D.I.1. Contexte et démarche de régionalisation.....	215
D.I.2. Principales étapes du travail	216
D.I.2.a. Évaluation de la désagrégation dynamique du climat par ARW/WRF.....	216
D.I.2.b. Régionalisation du réchauffement en Bourgogne	218
D.I.2.c. Effets du réchauffement sur le Pinot noir en Bourgogne	219
D.II. Évaluation de la désagrégation dynamique du climat pour la Bourgogne	221
D.II.1. Capacité à reproduire la variabilité temporelle des températures en Bourgogne.....	221
D.II.2. Variabilité spatiale de la température	224
D.II.3. Une évaluation spatiotemporelle	231
D.II.3.a. Géographie de la variabilité temporelle	231
D.II.3.b. Découpage temporel de la répartition spatiale : utilisation des classes de températures.....	233
D.III. Régionalisation des températures par WRF sur la période 1970-1987, en désagrégant les sorties du modèle ARPEGE/SRES A2	241
D.III.1. Climatologie des températures pour la Bourgogne.....	241
D.III.2. WRF est-il suffisamment réaliste pour reproduire correctement le cycle phénologique ?	246
D.III.2.a. Comparaison de la phénologie observée et simulée à partir des données WRF	246
D.III.2.b. Comparaison sur l'ensemble du territoire bourguignon	247
D.III.2.c. Répartition spatiale des dates d'occurrences des stades de floraison et de véraison simulées à partir des désagréments de WRF.....	248
D.IV. Régionalisation du réchauffement et de ses impacts sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne	251
D.IV.1. Régionalisation du réchauffement	251
D.IV.1.a. Quantification et régionalisation du réchauffement.....	251
D.IV.1.b. Caractéristiques du réchauffement.....	255
D.IV.2. Impact du réchauffement sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne.....	257
D.IV.2.a. Effets sur le déroulement du cycle	257
D.IV.2.b. Analyse <i>via</i> les caractéristiques du réchauffement.....	261
Conclusions sur le Chapitre D.....	263



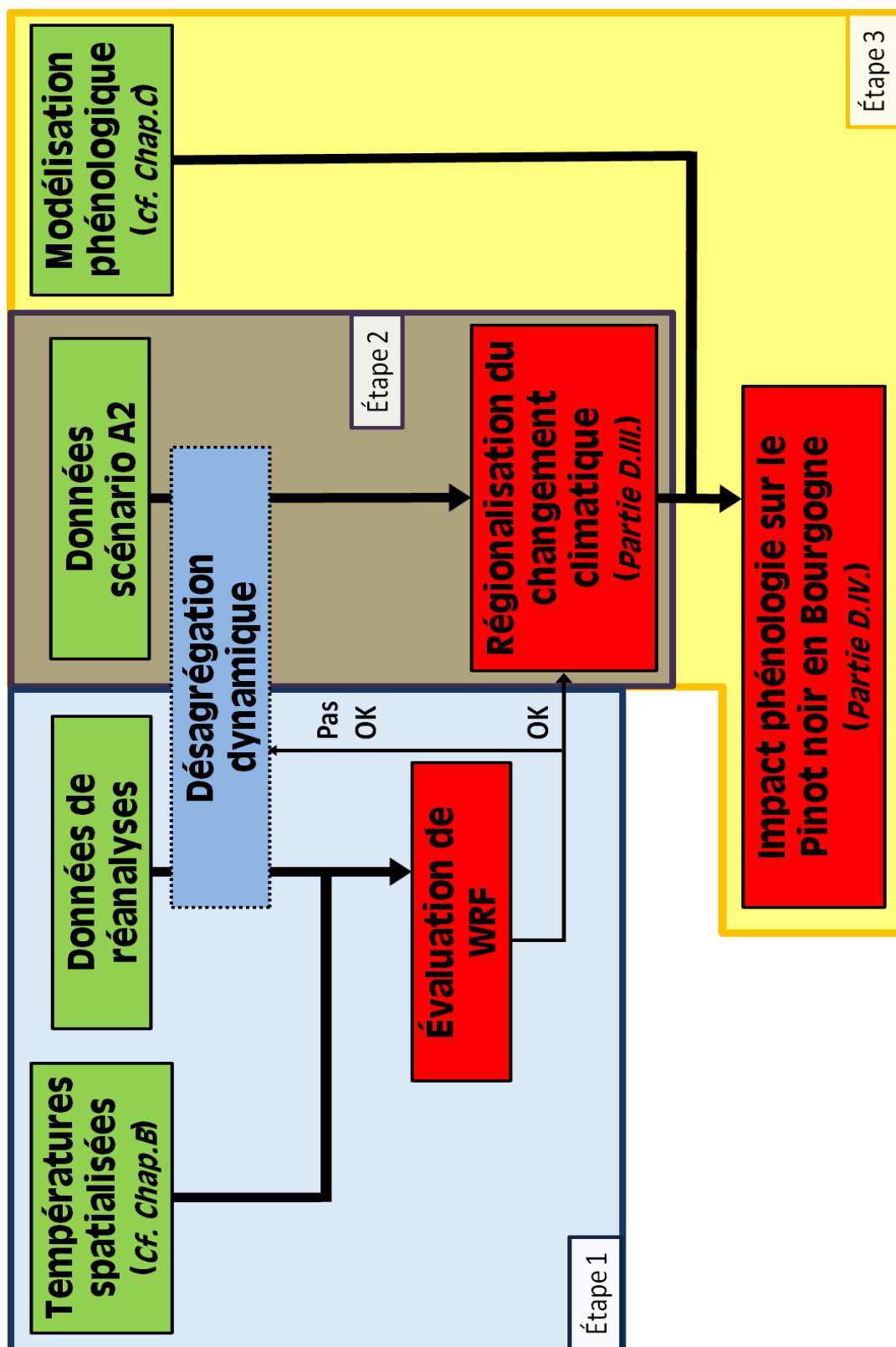


Figure D.1. Approche méthodologique mise en œuvre pour évaluer l'impact régionalisé du réchauffement associé au changement climatique projeté sur la phénologie du Pinot noir.



D.I. Introduction

D.I.1. Contexte et démarche de régionalisation

Le réchauffement observé en Bourgogne et ses effets constatés et modélisés sur la phénologie du Pinot noir interrogent dans la perspective des différents scénarios de réchauffement projetés pour le XXI^e siècle. Si la « trajectoire climatique » qui sera suivie reste en grande partie une inconnue, documenter pour un scénario donné les possibles conséquences directes et indirectes du réchauffement climatique est important dans une optique d'adaptation. Cela est d'autant plus vrai, notamment pour des cultures pérennes qui sont soumises, comme la vigne en Bourgogne, à un cahier des charges strict en termes par exemple de modalités de production (environnement et pratiques culturelles, exposition, etc.). Comme cela a été montré précédemment (*cf.* chapitre C), l'augmentation des températures depuis 1987 s'est traduite pour le Pinot noir par une contraction significative du cycle phénologique. Cette tendance, qui devrait se poursuivre quelle que soit l'amplitude du réchauffement à venir, doit être précisée. C'est l'objet de ce chapitre qui cherchera à documenter dans le cadre du scénario SRES/A2 les modalités (géographie, amplitude, forme) du réchauffement projeté et ses effets possibles sur la phénologie du Pinot noir.

La figure D.1. présente la démarche globale qui a été adoptée pour la régionalisation du climat actuel, du climat projeté et des impacts potentiels sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne. Cette approche s'appuie principalement sur l'utilisation d'une méthode de désagrégation dynamique numérique utilisant un modèle climatique régional [Giorgi, 2006]. De plus, elle remobilise les champs de températures spatialisées et les modèles phénologiques du Pinot noir validés sur la région. Contrairement à la désagrégation statistique – reposant sur l'établissement de fonctions de transferts entre la large échelle (données GCM) et l'échelle stationnelle – plus souple à mettre en œuvre, la désagrégation dynamique 'résout le climat' pour des domaines emboîtés de résolution croissante. Entre autres avantages, cette approche ne présuppose pas de stationnarité du climat dans le contexte du changement climatique et permet d'obtenir une information spatiotemporelle continue pour l'ensemble d'une région. La cohérence du climat simulé repose à la fois sur 1) la résolution numérique des équations non-hydrostatiques du mouvement de l'atmosphère et 2) les paramétrisations physiques adaptées des principales composantes et processus atmosphériques (nuages, convection, couche limite) et de surface (orographie, échanges d'énergie).

Pour ce travail, nous avons utilisé le modèle climatique régional WRF [Weather Research and Forecasting – Skamarock, 2008] développé au National Center of Atmospheric Research à Boulder au Colorado. Ce modèle qui implémente l'état de l'art de la recherche météorologique et climatique est largement utilisé tant pour la prévision régionale opérationnelle que pour l'étude du changement climatique observé [Liang *et al.*, 2006 ; Prabha et Hoogenboom, 2008 ; Salathé *et al.* 2008] et projeté [Zhang *et al.*, 2009 ; Xu *et al.*, 2012]. Il bénéficie également d'une large communauté d'utilisateurs et d'un support technique performant. Enfin, la parallélisation massive du code informatique permet son utilisation à partir des ressources de méso-centres de calcul scientifique comme celui de l'université de Bourgogne (CCUB).

La configuration de simulation (descente d'échelle par domaines emboîtés et choix des paramétrisations physiques appropriées) adoptée dans ce travail est directement issue des résultats de travaux récents qui ont été conduits au CRC [Castel *et al.*, 2010 ; Crétat *et al.*, 2010 ; Richard *et al.*, 2012 ; Xu *et al.*, 2012 ; Marteau *et al.*, 2013]. En particulier, le choix des domaines est repris de Castel *et al.* [2010], la paramétrisation physique et la méthode de désagrégation en continue sont celles utilisées dans Xu *et al.* [2012]. La mise en œuvre de la démarche s'est déroulée selon trois étapes principales (Figure D.1.) :

- évaluation, par comparaison avec des données observées interpolées, du climat régional produit par ARW/WRF pour la période 1989-2009 à partir de la désagrégation des données réanalysées ERA-INTERIM ;
- projection climatique régionale pour la période 2030-2050 dans le cadre du scénario SRES-A2 (CMIP3) des simulations du modèle de circulation générale couplé Arpège-Climat du CNRM (Centre de Recherche Météorologique de Météo-France) [Déqué *et al.*, 1994 ; Déqué, 1999];
- estimation de l'effet du réchauffement climatique projeté sur le cycle phénologique du Pinot noir en Bourgogne.

D.I.2. Principales étapes du travail

D.I.2.A. ÉVALUATION DE LA DÉSAGRÉGATION DYNAMIQUE DU CLIMAT PAR ARW/WRF

Cette étape clé de la démarche consiste à évaluer la capacité du modèle à reproduire le climat de la Bourgogne à la résolution de cinq kilomètres. Une évaluation fine ne peut pas être conduite directement à partir des données produites pour les scénarios de changement climatique. En effet, pour ces derniers, seule la

trajectoire d'évolution d'un climat moyen d'une région est cohérente. Pour le reste, il s'agit d'un climat « virtuel » ne reflétant aucunement la dynamique et la variabilité temporelle observée sur la région. Pour cela, un premier jeu de simulation a consisté à désagréger les données de réanalyses ERA-INTERIM (Figure D.2.) pour la période 1989-2009. Ces données de réanalyses assimilent des données d'observation et sont produites toutes les six heures à la résolution de 1,5° pour l'ensemble du Globe par le Centre Européen de prévision à moyen terme (ECMWF). Ces données sont préférées aux données ERA-40 ou NNRP-1 car elles reproduisent les données observées de façon plus réaliste [Mooney *et al.*, 2010].

Trois domaines d'une résolution de cent vingt, trente et sept kilomètres et demi sont utilisés par WRF pour la descente d'échelle. Le premier domaine de WRF est forcé toutes les six heures à ses bornes par les données de réanalyses et ce pour toute la période considérée (1989-2009). Le climat produit dans ce premier domaine est ensuite utilisé pour forcer le domaine 2 dont le climat sert enfin à forcer le troisième domaine. Notons que 1) si les domaines parents forcent aux bornes les domaines enfants, ceux-ci fournissent en retour des informations aux domaines parents. On parle dans ce cas de 'two way nesting' ; 2) le troisième domaine a été ré-échantillonné à la maille régulière de cinq kilomètres à des fins de comparaison avec les spatialisations issues de la méthode « régression-krigeage » des températures quotidiennes mesurées par le réseau de Météo-France (*cf.* Chapitre B).

Objectif	Données	1970 1987 1989 2009 2031 2048					
Validation de la désagrégation (ARW/WRF)	Observations Spatialisations températures (Chapitre B.)			Étape 1			
	Simulations Désagrégation d'ERA-Interim			Étape 1			
Régionalisation du changement climatique	Observations Stations Météo-France	Étape 2					
	Simulations Désagrégation d'ARPEGE	Étape 2 et 3				Étape 2 et 3	

Figure D.2. Tableau récapitulatif des données observées et simulées utilisées pour les objectifs principaux de ce chapitre.

La comparaison entre climat simulé et climat observé est conduite maille à maille (afin de réduire les biais d'échelle) et au pas de temps journalier, mensuel et interannuel. Les deux métriques classiques de la statistique que sont le coefficient de détermination (r^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sont utilisées pour quantifier les performances du modèle. Seules les températures sont ici évaluées. Xu *et al.* [2012] et, plus récemment, Marteau *et al.* [2013] ont présenté des résultats pour

les précipitations. L'analyse des performances a également été conduite selon le découpage que propose la classification introduite au chapitre B. Cette évaluation novatrice peut permettre de mieux cerner la « non-stationnarité » des performances du modèle. En d'autres termes, pour quelles situations (*i.e.* classes) le modèle est-il le plus, ou le moins, apte à reproduire correctement les températures de surface ? Ce n'est qu'à l'issue de cette étape indispensable que nous pourrons, par extension, évaluer le degré de confiance à accorder à la désagrégation dynamique du climat en Bourgogne par WRF.

D.I.2.B. RÉGIONALISATION DU RÉCHAUFFEMENT EN BOURGOGNE

La deuxième étape a pour but d'estimer (aux données de forçage près), dans le cadre du scénario SRES-A2/CMIP3 [Mheel *et al.*, 2007], le changement climatique à l'échelle de la Bourgogne. À des fins de comparaison, deux jeux de simulations ont été produits. Un jeu pour le climat passé récent (1970-1987) et un jeu pour le climat de la moitié du XXI^e siècle (2031-2048). Pour des raisons de disponibilité, nous n'avons pas pu, pour le climat du passé récent, avoir les données correspondant à la période des données ERA-INTERIM. Ici, les données d'entrées sont produites par le modèle couplé Arpège-Climat (AOGCM) à la résolution de 2,8°. D'autre part, le pas de temps du forçage aux bornes du premier domaine est de douze heures. Les caractéristiques détaillées des simulations produites par le modèle Arpège-Climat sont présentées dans Xu *et al.* [2012].

Deux niveaux de comparaisons sont proposés pour évaluer le climat produit sur la Bourgogne pour ce scénario :

- une comparaison sommaire et directe est réalisée entre le climat moyen observé (indice station) et simulé (indice modèle) pour la période 1970-1987 ;
- une comparaison indirecte basée sur les dates — calculées à partir des indices station et modèle — d'occurrence des stades phénologiques (floraison, véraison) pour le Pinot noir.

Par la suite, nous avons cherché à quantifier et qualifier le réchauffement projeté. La climatologie produite a été analysée par comparaison des différences moyennes et des distributions entre les températures du climat passé et projeté. La distribution spatiale de ces quantités permet de caractériser la géographie du changement. Cette analyse a été complétée par le calcul de métriques climatiques plus fines [sur le modèle de White *et al.*, 2006 ; Xu *et al.*, 2012] pour essayer de mieux qualifier le réchauffement, par exemple en termes de dépassement de « températures seuil » et au travers notamment de la modification des amplitudes diurnes. En effet, un

réchauffement moyen peut prendre, suivant les territoires, des formes variées modulant ainsi les conséquences sur l'environnement. Par exemple, moins de températures fraîches (*e.g.* < 0°C) et/ou plus de températures chaudes (*e.g.* > 30°C) auront pour la vigne des effets sur le risque de gel végétatif [Hendrickson *et al.*, 2004] ou sur la modification des échanges gazeux et, au-delà, sur la croissance et la qualité du vin [Keller *et al.*, 2010]. Pour la vigne, les modèles phénologiques (*cf.* chapitre C.) permettent d'avoir une évaluation intégrée et utile de l'impact du réchauffement.

D.I.2.C. EFFETS DU RÉCHAUFFEMENT SUR LE PINOT NOIR EN BOURGOGNE

Cette dernière étape combine les données du climat projeté régionalisé avec les trois types de modèles phénologiques utilisés pour le Pinot noir. Cette régionalisation de l'impact est nécessaire pour décliner les effets à l'échelle notamment des terroirs viticoles. Cette étape repose à la fois sur la qualité des données climatiques et des modèles phénologiques. Elle permet également de mesurer les potentialités (intérêt et limites) des méthodes et outils de régionalisation proposés dans cette thèse.

Les résultats sont produits sous la forme d'un indice annuel (moyenne spatiale entre les mailles), ce pour chacune des mailles de cinq kilomètres. Le principe est similaire à l'étape précédente. Les indices sont calculés pour le climat du passé récent et projetés. Ce sont les différences entre les dates de floraison et de véraison obtenues pour chaque période qui sont ensuite présentées et analysées.



D.II. Évaluation de la désagrégation dynamique du climat pour la Bourgogne

Pour nous informer sur les biais et incertitudes des désagrégations du modèle WRF, notre recherche s'est basée sur les différentes métriques présentées auparavant. Bien que WRF simule de nombreuses variables climatiques, nous faisons le choix de nous focaliser sur les températures puisque c'est ce dont ont besoin les modèles phénologiques qui vont être utilisés. Notons que les précipitations font également l'objet d'un travail au CRC [Marteau *et al.*, 2013].

D.II.1. Capacité à reproduire la variabilité temporelle des températures en Bourgogne

En première approche, la confrontation observations spatialisées / simulations est effectuée au pas de temps annuel. Pour chaque année, la moyenne spatiale (moyenne de toutes les mailles) est calculée et lui est retranchée la moyenne de la période 1989-2009. La figure D.3 présente les anomalies annuelles ainsi calculées. La variabilité interannuelle est bien reproduite par WRF. Les signes des anomalies sont respectés, excepté pour les années 1989 (Tn, Tm), 2001 (Tn) et 2007 (Tn, Tm, Tx). Les r^2 sont de 0,69, 0,66 et 0,58 pour respectivement les Tn, les Tm et les Tx, ce qui signifie que le modèle reproduit au moins 60 % de la variabilité interannuelle observée. L'amplitude des anomalies semble bien simulée.

La figure D.4. présente les moyennes spatiales annuelles de températures des deux jeux de données, exprimées en °C. Il ne s'agit plus d'anomalies. Un biais froid est observé sur les températures maximales simulées par WRF. Le biais moyen est de -0,75°C. Selon les années, il oscille entre -1,1 et -0,5°C. Sur les températures minimales, c'est un biais chaud qui est mis en évidence. Il est en moyenne égal à +0,75°C. Sa variabilité interannuelle, comprise entre +0,6 et +0,9°C, est plus faible. Les travaux de Xu *et al.* [2012] montraient, sur les années 1991 et 2003, de très faibles biais froids sur les Tn et des biais froids sur les Tx de l'ordre de 2-3°C. Ici, le fait d'avoir élargi la fenêtre temporelle pour l'estimation des performances du modèle a permis d'approfondir ces résultats pour, entre autres, confirmer le biais froid sur les Tx et observer un biais chaud sur les températures minimales. Zhang *et al.* [2009] montraient des biais chauds sur les Tn de +3,98°C et des biais froids de -0,95°C sur les Tx sur la période 2003-2007 sur l'Oregon et l'Idaho (États-Unis), ce qui est cohérent avec nos résultats. Saltathé *et al.* [2008] ont montré qu'il existait un biais froid pour les Tn et les Tx respectivement de l'ordre de -1,25°C et de -1,86°C pour son étude sur le nord ouest des États-Unis pour la période 1989-1999. Si, dans notre étude, le biais froid sur les températures maximales est cohérent avec l'étude de

Salathé [2008], les différences concernant les températures minimales peuvent se situer dans les causes de ce biais.

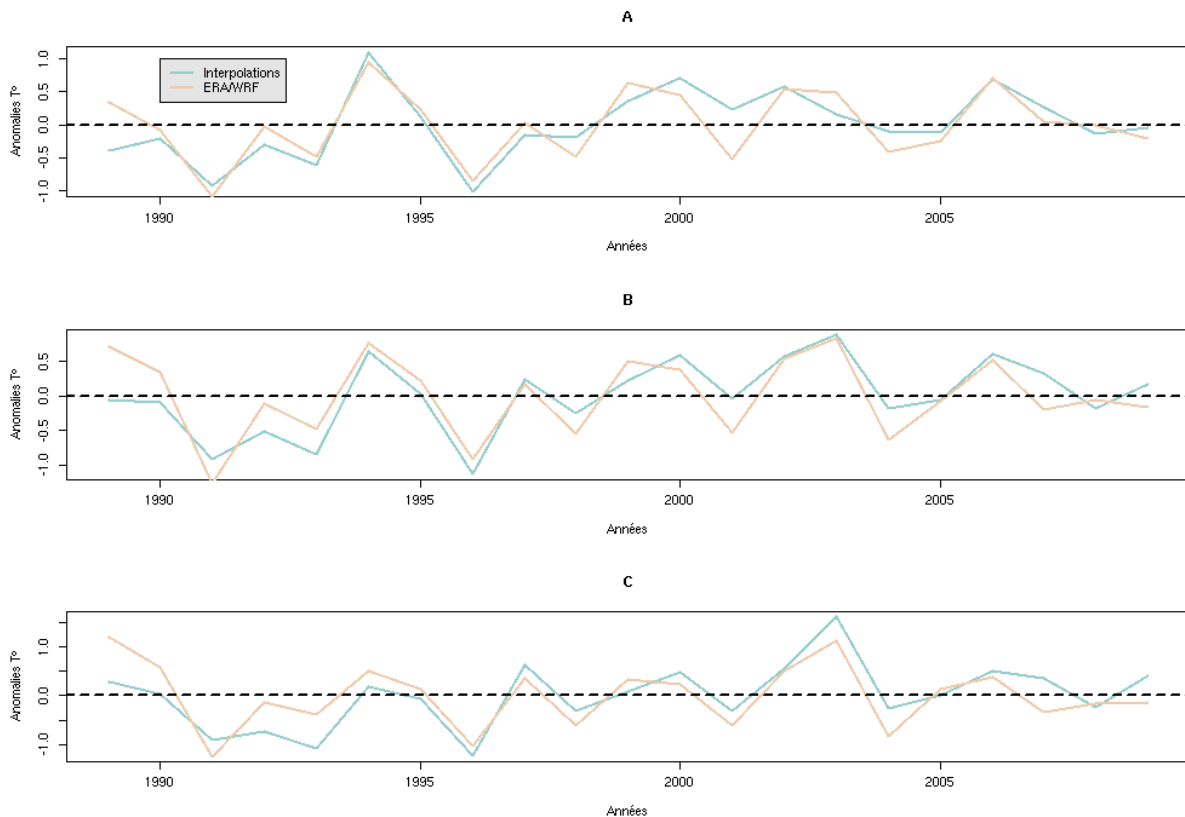


Figure D.3. Anomalies des moyennes annuelles des températures (1989-2009). (A) températures minimales, (B) moyennes et (C) maximales. Bleu : observation ; beige : simulations.

En effet, le biais chaud sur les T_n peut être dû à la difficulté qu'a le modèle WRF à interpréter les flux de chaleur entre le sol et l'atmosphère (couche de surface trop stable la nuit) [Zhang *et al.*, 2009]. Le biais froid sur les T_x peut être dû au forçage par ERA-Interim. En effet, les températures maximales des réanalyses présentent un biais froid d'environ 3-4°C en comparaison avec les données d'observations [Xu *et al.*, 2012].

Pour les températures moyennes, les résultats sont satisfaisants puisque la médiane est très proche de 0°C et que les différences n'excèdent pas $\pm 0,5^\circ\text{C}$, sauf pour l'année 1989. La forte différence entre les observations et les simulations pour l'année 1989, observée pour les trois variables, peut s'expliquer par le fait que le modèle a besoin d'une période pendant laquelle il trouve un équilibre, appelée période de 'spin-up'.

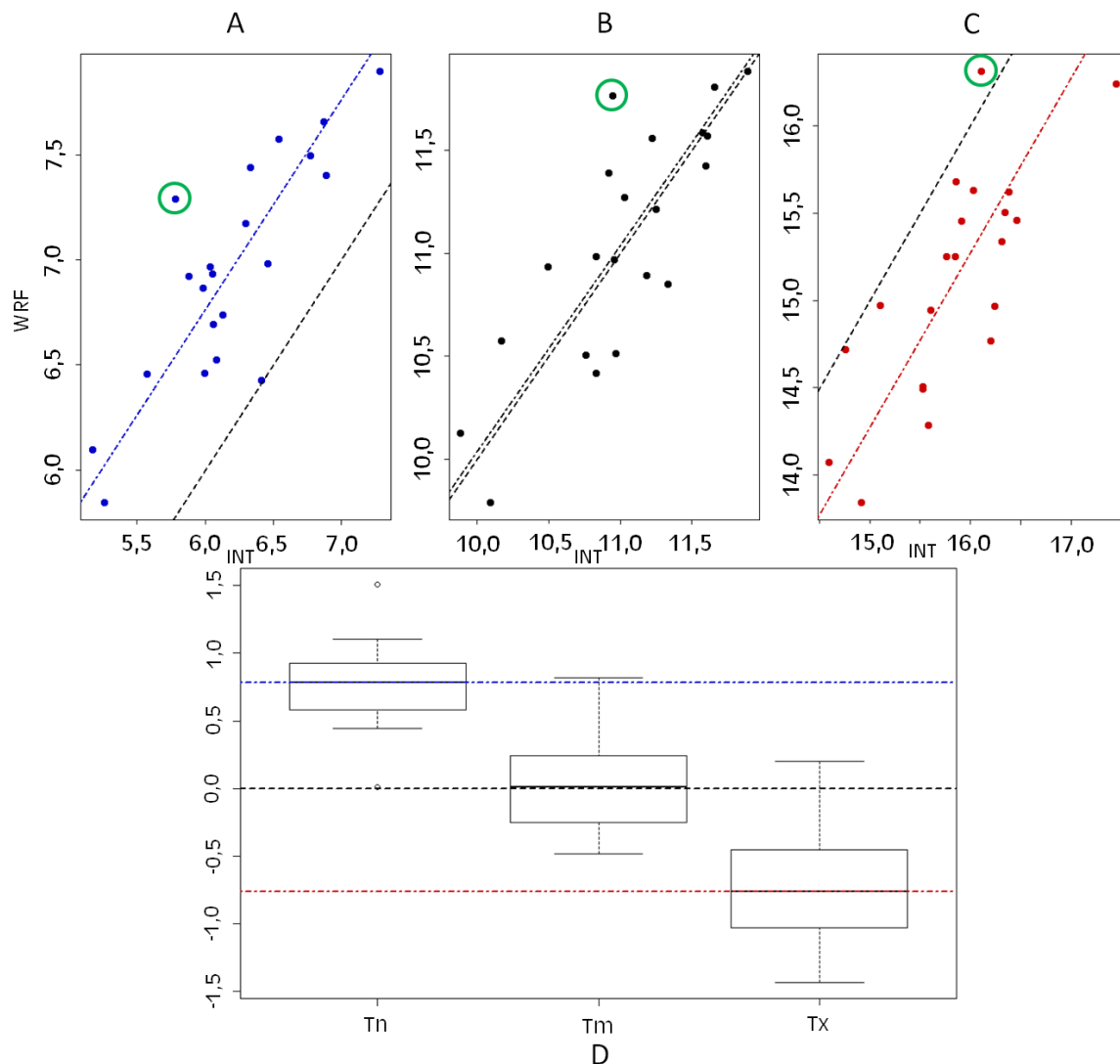


Figure D.4. Températures annuelles observées et simulées. (A) température minimale, (B) température moyenne et (C) température maximale. Les pointillés de couleurs représentent le biais moyen pour chacune des variables, les pointillés noirs représentent la bissectrice. Le graphique D représente les distributions statistiques des différences annuelles entre les séries observées et simulées. Les pointillés horizontaux correspondent à la médiane des différences. Le cercle vert des graphiques A, B et C représente l'année 1989.

Afin d'évaluer si le cycle annuel est simulé de façon satisfaisante, la moyenne spatiale de chaque jour (tous les 1^{er} janvier de la période 1989-2009, puis tous les 2 janvier et ainsi de suite) est calculée pour les deux séries. La figure D.5. montre que le cycle annuel est très bien simulé ($r^2 = 0.99$) par WRF, c'est-à-dire que le modèle reproduit quasi parfaitement l'amplitude intrasaisonnière des variations des températures, sans biais temporel.

De même, la variabilité mensuelle des valeurs de températures moyennes est identique quel que soit le mois, sauf pour les mois de mars et avril pour lesquels les séries diffèrent, les températures simulées par WRF étant plus basses que celles interpolées à partir des observations. Nous le verrons plus tard dans ce chapitre, mais

cet écart pendant les mois de mars et avril influence la simulation de la date de floraison.

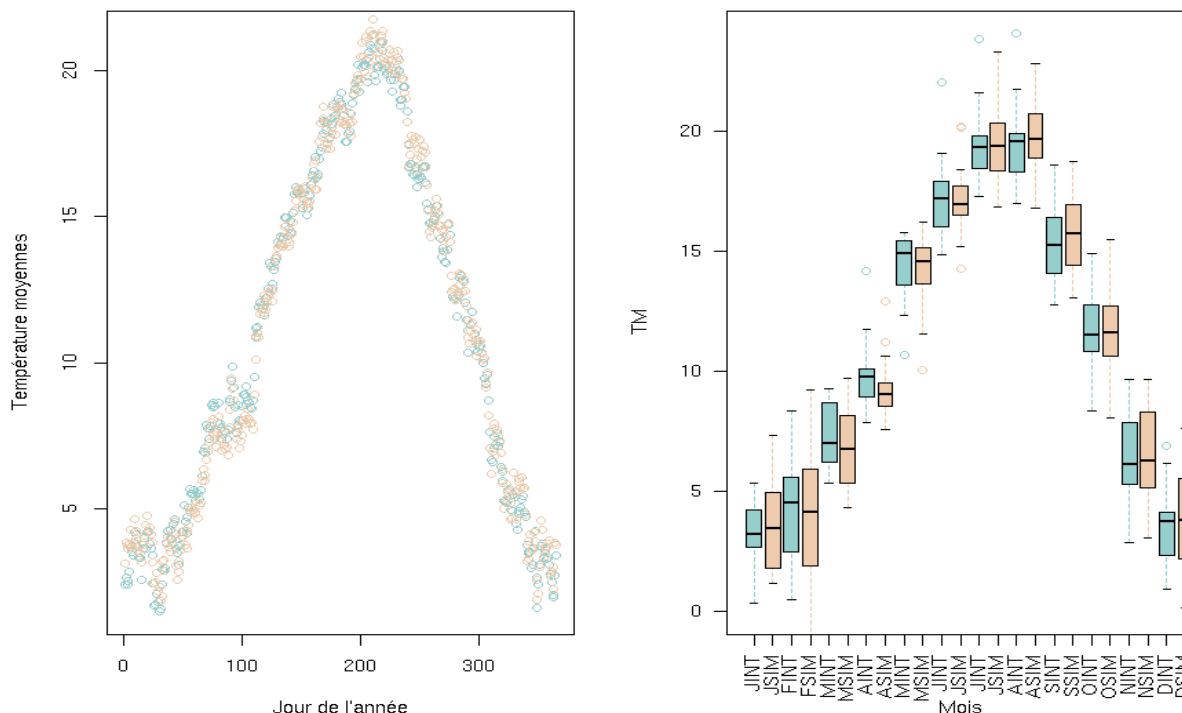


Figure D.5. Moyennes quotidiennes des températures moyennes calculées sur l'ensemble des pixels des mailles et sur l'ensemble des vingt-et-un ans et distribution statistique des valeurs mensuelles de ces moyennes. En bleu, les interpolations ; en beige, les simulations.

La validation temporelle des simulations de températures par WRF sur la période 1989-2009 et pour la Bourgogne montre que le modèle WRF reproduit correctement la variabilité interannuelle des températures en Bourgogne mais sous-estime l'amplitude diurne d'environ 1.5°C (aucun biais systématique pour les Tm). Le cycle annuel est également très bien reproduit. Il s'agit désormais d'évaluer l'aptitude du modèle WRF à reproduire la répartition spatiale des températures.

D.II.2. Variabilité spatiale de la température

L'estimation de la capacité du modèle à reproduire la géographie des températures en Bourgogne est basée sur une confrontation observations spatialisées/simulations sur les trois mille trois cent trente-neuf mailles qui couvrent la Bourgogne. Les cartes moyennes sont présentées en figure D.6. Elles sont calculées sur la période 1989-2009 en moyennant la température sur les sept mille six cent soixante-cinq jours (vingt-et-un ans) pour chacune des trois mille trois cent trente-neuf mailles.

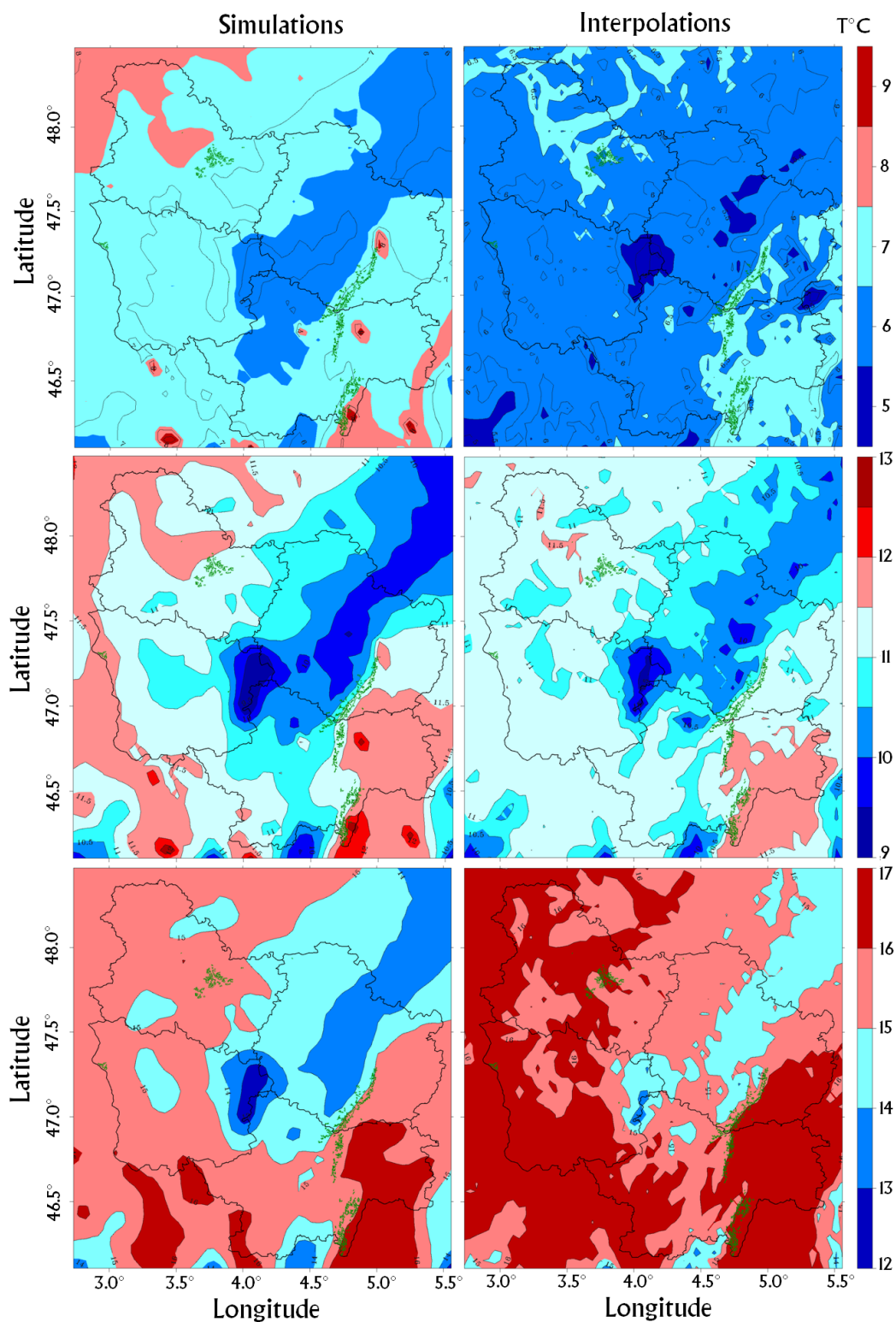


Figure D.6. Cartes moyennes des températures, de haut en bas, minimales, moyennes et maximales pour les simulations (à gauche) et les interpolations (à droite). En vert, les vignobles actuels.

Globalement, le modèle décrit bien la variabilité spatiale des températures (Figure D.6.). La géographie est cohérente, notamment *via* l'effet refroidissant du relief. Ainsi, le Morvan et le Seuil de Bourgogne sont-ils plus froids tandis que les

températures sont plus élevées en plaine de Saône et dans la vallée de l'Yonne. Les biais chauds (froids) pour les Tn (Tx) n'affectent pas la répartition spatiale des températures. Les structures spatiales sont mieux reproduites pour les Tm et les Tx que pour les Tn. Ceci peut s'interpréter par le fait que les températures minimales sont plus souvent déterminées par l'environnement local et micro-local, ce qui est difficilement reproduit par un RCM ou plus délicat à interpoler.

Hormis le biais chaud, le pattern des températures minimales simulées par WRF montre des différences ponctuelles avec le pattern interpolé. Ces différences représentent des zones, de faible surface, plus chaudes, qui sont dues à la prise en compte de l'inertie thermique des villes par le modèle WRF. Ainsi, la nuit, les températures dans les villes baissent-elles généralement moins qu'en dehors des villes. De ce point de vue, le modèle climatique régional apporte une plus-value pour la représentation spatiale, locale, des températures minimales.

La comparaison maille à maille peut se réaliser en utilisant les moyennes annuelles de chacune des mailles. Ainsi, les vingt-et-une moyennes annuelles de la période 1989-2009 ont été calculées pour chacun des trois mille trois cent trente-neuf pixels de la zone étudiée, et ce pour chacune des températures minimales, moyennes et maximales (soit 70119×3 points). Le graphique de la figure D.7. présente ces valeurs en traçant les températures simulées en fonction des températures interpolées.

Dans ce graphique (Figure D.7.), nous retrouvons les biais identifiés plus tôt dans le chapitre : plus chauds pour les Tn et plus froid pour les Tx. Les points sont globalement alignés à la bissectrice, en particulier pour les Tm et les Tx (pentes respectivement égales à 1.04 et 0,95). Pour les Tn, la pente est plus éloignée de 1 : 0,81. Un coefficient directeur inférieur à 1 signifie que le modèle WRF a tendance à sous-estimer les contrastes spatiaux ou/et temporels (quotidiens) de températures.

Afin d'approfondir le précédent résultat, les différences maille à maille entre les simulations de WRF et les données spatialisées sont calculées pour chaque jour, pour chaque pixel de la grille et pour chacune des variables Tn, Tm et Tx ($25\ 593\ 425 \times 3$ valeurs). La distribution des valeurs des différences est représentée par des histogrammes (Figure D.8.). Pour les trois variables, les différences sont centrées sur 0°C. Pour la température moyenne, la médiane est égale à 0,065°C et 50 % des valeurs de différences pour les températures moyennes sont comprises entre -1,31°C et 1,34°C.

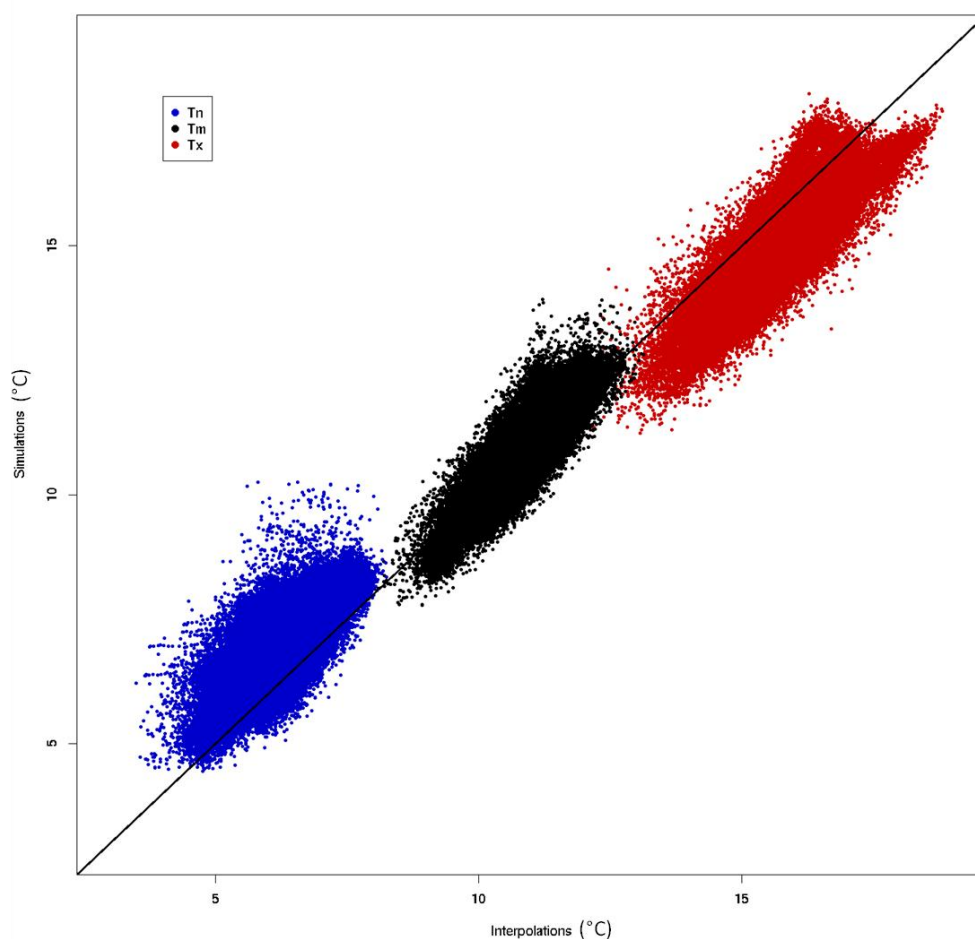


Figure D.7. Températures simulées versus observées pour les Tn (points bleus), les Tm (points noirs) et les Tx (points rouges). Chaque point représente un couple « pixel simulé/pixel observé » pour une année. Ainsi, pour chaque variable, nous obtenons vingt-et-un points par pixel.

Pour les Tn, la médiane est située à $-0,6^{\circ}\text{C}$ et 50 % des valeurs sont comprises entre $-2,5$ et $1,2^{\circ}\text{C}$. Ceci confirme qu'il existe un biais chaud quasi systématique pour les températures minimales simulées par WRF. Inversement, pour les températures maximales, la médiane est de $0,8^{\circ}\text{C}$ (premier quartile : $-0,83$; troisième quartile : $2,4^{\circ}\text{C}$) et confirme le biais froid pour les températures maximales simulées par WRF.

La question qui se pose désormais est de savoir si ces performances globales masquent un comportement en lien avec les caractéristiques de la climatologie d'échelles large et régionale. Pour répondre à cela, nous nous sommes appuyés sur la classification proposée au chapitre B sur la période 1989-2009.

Les résultats du chapitre B ont montré que les répartitions spatiales des températures sont modulées par les situations d'échelle synoptique. Ce comportement peut également influencer sur la capacité du modèle à reproduire la répartition des températures. Pour cela, nous avons analysé les différences entre les

observations et les simulations du modèle en fonction des classes définies au chapitre B.

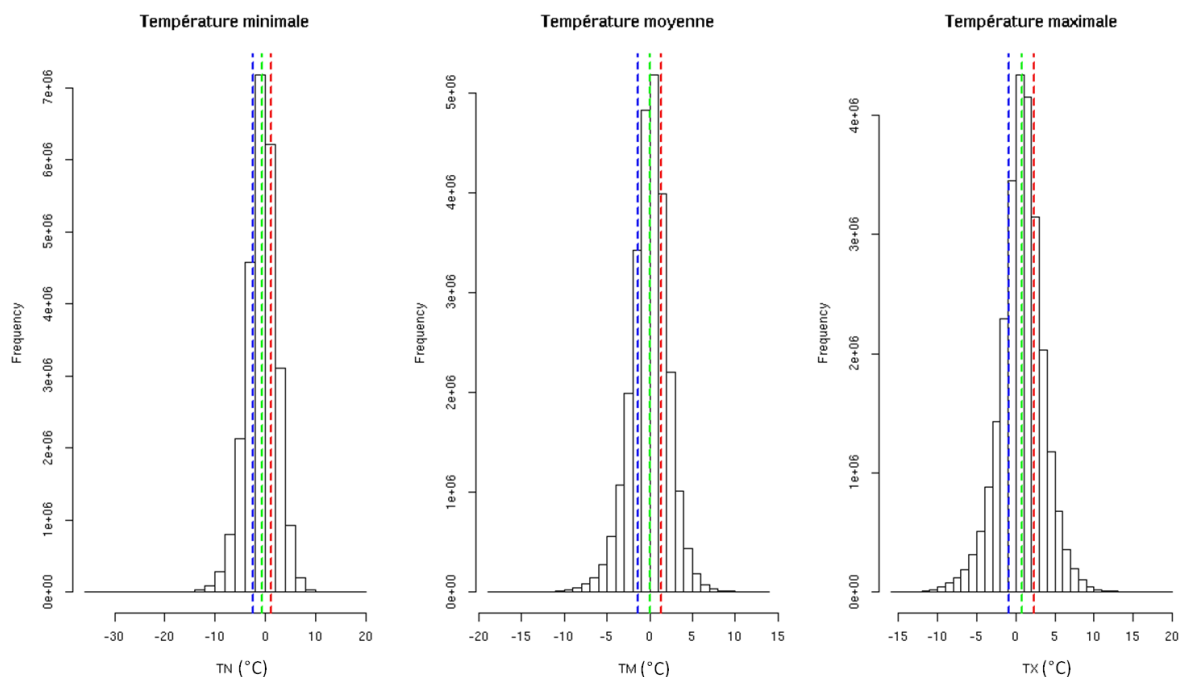


Figure D.8. Histogrammes des différences entre les données interpolées et les données simulées par le modèle WRF. Pour chaque jour et chaque pixel, une valeur est calculée. Les trois histogrammes correspondent (de gauche à droite) aux températures minimales, moyennes et maximales. Les droites verticales représentent le premier quartile (bleu), la médiane (vert) et le troisième quartile (rouge).

Nous avons choisi de réaliser un nuage de points par classe, de la même façon qu’avaient été réalisés ceux de la figure D.7. Nous obtenons ainsi onze nuages de points (Figure D.9. pour les Tn et D.9bis. pour les Tx) sur lesquels sont calculées des régressions linéaires simples. Les coefficients directeurs oscillent entre 0,86 et 0,97 (Tableau D.1.), sauf pour la classe TX2 (0,60). Ils sont tous inférieures à 1, ce qui signifie que le modèle WRF surestime les basses températures et sous-estime les plus hautes températures, sous-estimant ainsi les contrastes spatiaux ou/et temporels. Ceci peut avoir au moins deux causes : (i) la résolution à laquelle le climat est simulé et (ii) une cause intrinsèque au modèle, comme la paramétrisation imparfaite ou la simplification des processus physiques entre autres.

La classe TX2, signalée pour le coefficient directeur très éloigné de 1 (0,60) associé à la régression, se distingue également par la valeur de r^2 la plus faible (0,55) et une des valeurs de RMSE les plus élevées (3,75°C). Pour cette classe, assimilée à un gradient est-ouest, on observe de très fortes valeurs de RMSE lors de la validation croisée des interpolations (*cf.* Chapitre B). De même que pour les classes TN3 et TN6, les valeurs de RMSE sont très élevées. Le modèle a du mal à reproduire la répartition

spatiale (inversion thermique) de la classe TN3 et celle de la classe TN6 (avec une zone très froide en plaine de Saône).

Classes	TN1	TN2	TN3	TN4	TN5	TN6
Pente	0,91	0,97	0,87	0,86	0,92	0,91
RMSE	2,7	2,46	3,88	2,89	3,06	3,34
R²	0,83	0,86	0,81	0,77	0,79	0,83
Classes	TX1	TX2	TX3	TX4	TX5	
Pente	0,91	0,6	0,94	0,93	0,93	
RMSE	2,91	3,75	2,73	2,81	3,09	
R²	0,85	0,55	0,92	0,88	0,85	

Tableau D.1. Le tableau donne des informations sur le coefficient de détermination, la RMSE et la pente issue de la régression linéaire calculée entre les séries quotidiennes de températures simulées et spatialisées, maille par maille (voir figure D.9).

La classe TN2 présente les résultats le plus satisfaisants. Si le r^2 n'est pas le plus élevé, la RMSE est la plus basse (2,46°C) et la pente est la plus proche de 1 (0,97). Ceci signifie que le modèle WRF reproduit de façon très satisfaisante les situations pour lesquelles les températures minimales ont un gradient altitudinal négatif à échelle fine surimposé d'un gradient nord-ouest – sud-est. Il n'est donc pas étonnant de voir que le modèle WRF simule des champs thermiques cohérents avec ceux produits par spatialisation pour les classes TN1 (gradient altitudinal négatif à large échelle), TX3 (gradient altitudinal négatif à échelle fine) et TX4 (gradient altitudinal négatif et faible gradient nord-sud).

Pour les classes TN4, TN5, TX1 et TX5, les valeurs de RMSE et de r^2 sont proches les unes des autres et respectivement comprises entre 2,9°C et 3,1°C et entre 0,77 et 0,85. La différence intervient au niveau de la pente qui est plus proche de 1 pour les classes TX5, TX1 et TN5 (respectivement 0,93, 0,91 et 0,92) et plus éloignée pour la classe TN4 (0,86). Le modèle WRF lisse plus fortement les données de températures pour la classe à gradient sud-est – nord-ouest que pour les autres classes.

La performance de WRF diffère donc pour les différentes classes de structure spatiale des températures mesurées, notamment pour les Tx. Spatialement, mis à part pour les cas de gradient est-ouest pour les Tx et, à moindre mesure, pour les cas d'inversions thermiques et de zone froide de faible étendue en plaine de Saône pour les Tn, le modèle WRF simule les températures de façon cohérente avec les

interpolations. La dernière étape de la validation étudie les performances du modèle WRF à décrire spatialement le climat dans le temps.

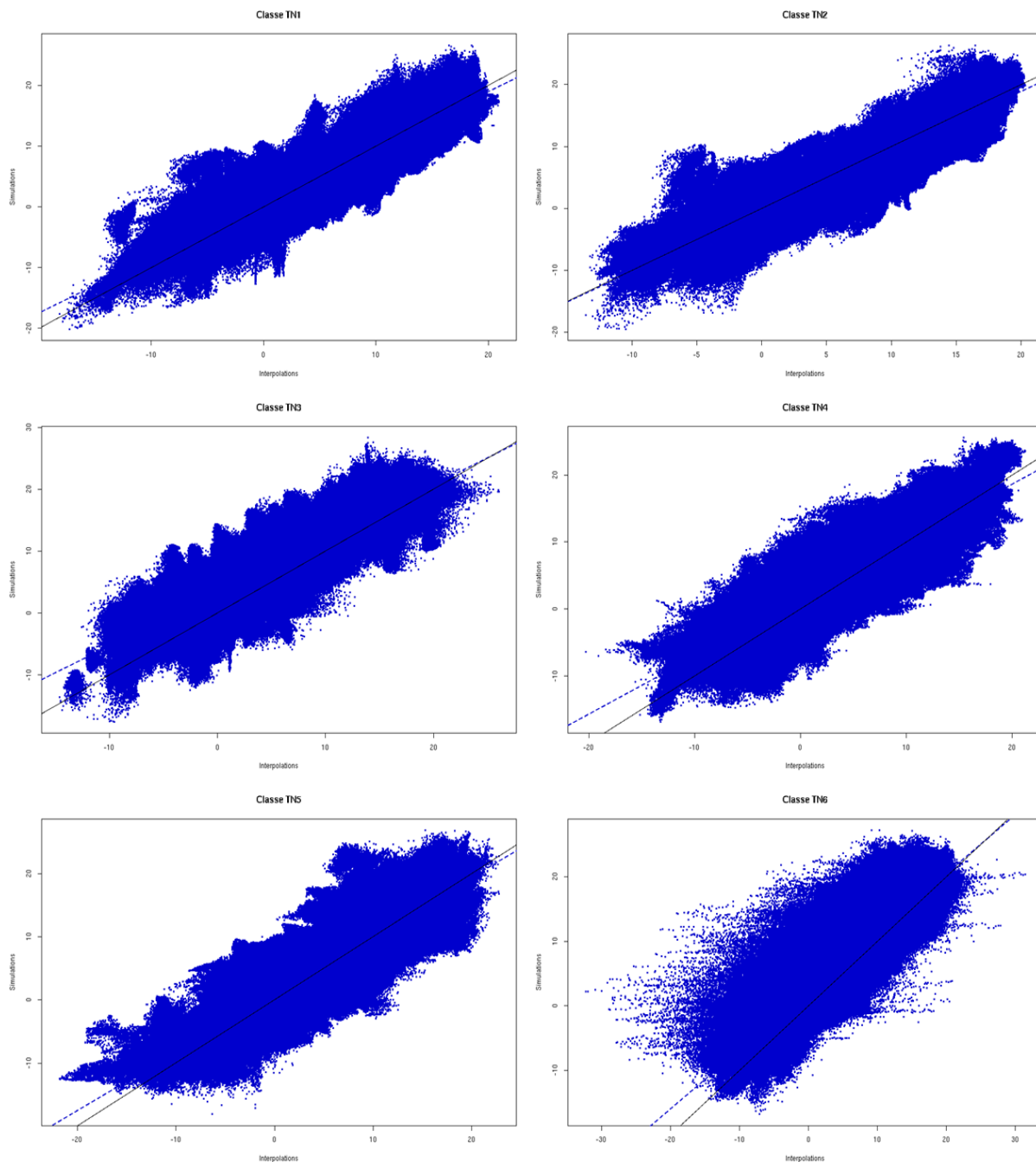


Figure D.9. Températures simulées versus températures interpolées pour les six classes de Tn. Chaque point représente un couple « pixel simulé/pixel interpolé » pour un jour donné. Ainsi, pour chaque variable, nous obtenons 7 665 points par pixel.

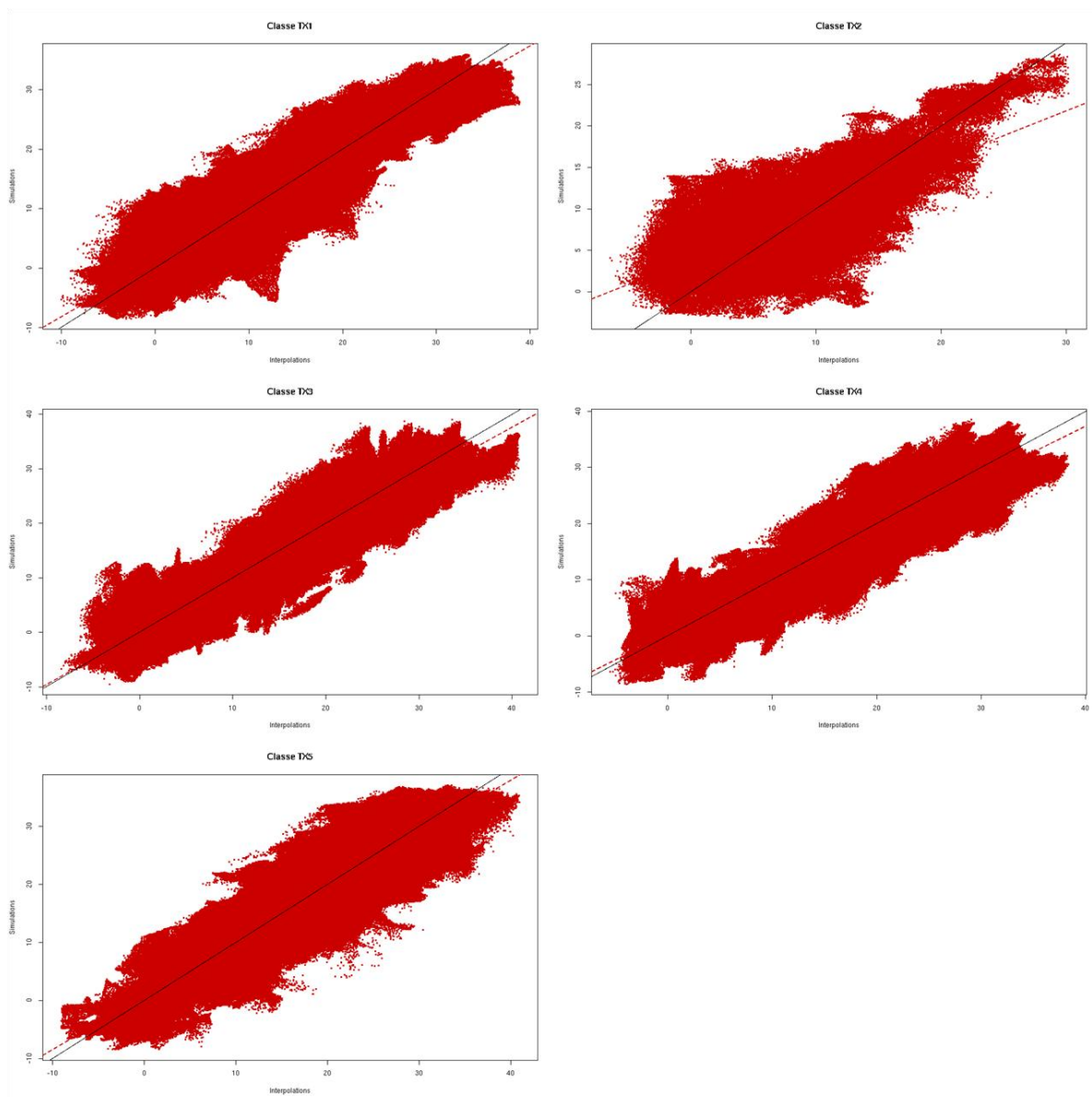


Figure D.9bis. Températures simulées versus températures interpolées pour les cinq classes de Tx. Chaque point représente un couple « pixel simulé/pixel interpolé » pour un jour donné. Ainsi, pour chaque variable, nous obtenons 7 665 points par pixel.

D.II.3. Une évaluation spatiotemporelle

D.II.3.A. GÉOGRAPHIE DE LA VARIABILITÉ TEMPORELLE

Afin de déterminer les différences spatiotemporelles entre les deux jeux de données et d'évaluer la qualité des simulations du modèle WRF, une valeur de RMSE et un coefficient de corrélation sont calculés pour chacun des pixels pour les trois variables. Ensuite, une variante est étudiée en isolant les jours contenus dans les classes définies au chapitre B.

Sur l'ensemble du territoire (Figure D.10.), la RMSE est comprise entre 2°C et 3°C. Les valeurs le plus faibles sont calculées pour les températures moyennes. En effet,

on observe des zones de faible étendue pour lesquels la RMSE est très élevée. Ces zones correspondent à des zones de basses températures associées à la classe TN6 (cf. figure B.30., chapitre B). Ces zones froides sont probablement induites par des phénomènes d'échelle locale non reproduits par WRF. On retrouve ces zones sur la carte des RMSE liées aux champs thermiques moyens (conséquence intrinsèque du calcul de la température moyenne à partir des minima et des maxima thermiques quotidiens).

Pour les températures minimales, mises à part les zones de faible étendue de fortes valeurs vues précédemment ($RMSE > 4^{\circ}C$), les valeurs sur l'ensemble du territoire sont inférieures à $3,5^{\circ}C$. Les valeurs le plus faibles sont obtenues pour la Côte-d'Or et pour l'ouest de la Saône-et-Loire. Les RMSE calculées pour les températures maximales sont majoritairement comprises entre $2,6^{\circ}C$ et $3^{\circ}C$ sur l'ensemble du territoire bourguignon. Pour les zones les plus hautes du Morvan et du Seuil de Bourgogne, les valeurs atteignent $3,8^{\circ}C$.

Sur la Côte viticole, les valeurs sont les plus faibles quelle que soit la variable étudiée : entre 2° et $3^{\circ}C$ pour les T_n , entre 2° et $2,4^{\circ}C$ pour les T_m et entre $2,6^{\circ}$ et $3^{\circ}C$ pour les T_x . Pour les vignobles de l'Yonne (région de Chablis), comme dans le Mâconnais, les valeurs de RMSE sont également faibles (inférieures à $3^{\circ}C$), en comparaison de celles observées sur l'ensemble du territoire.

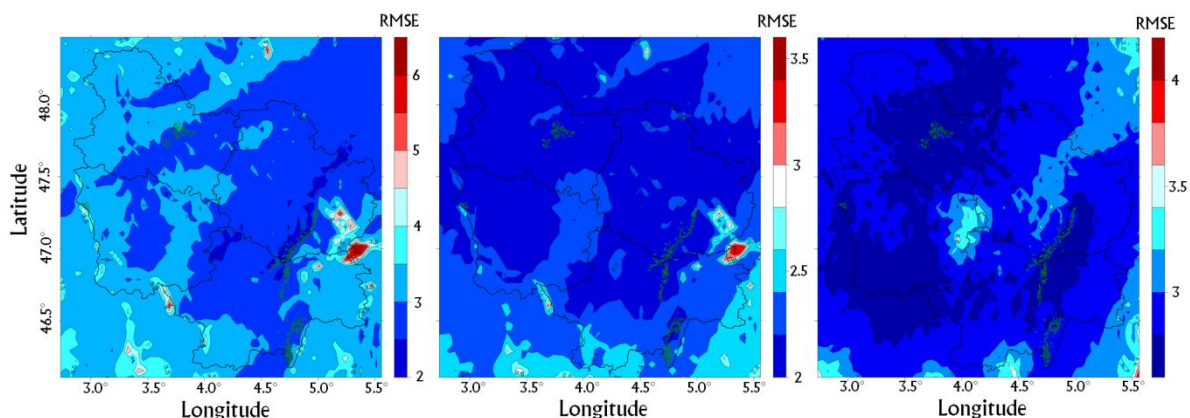


Figure D.10. Répartitions spatiales des RMSE calculées pixel par pixel sur l'ensemble des 7 665 jours de chaque série. De gauche à droite : températures minimales, températures moyennes, températures maximales.

Le coefficient de détermination permet d'estimer la cohérence temporelle des deux séries. Ainsi, pour chaque pixel, une valeur de r^2 est calculée puis représentée sur les cartes de la figure D.11. Pour les trois variables et sur l'ensemble de la zone étudiée, les valeurs de r^2 sont comprises entre 0,46 et 0,95.

Les valeurs pour les températures maximales sont homogènes sur l'ensemble du territoire et comprises entre 0,88 et 0,90. Sur le Morvan et le centre de la Côte-d'Or,

les valeurs descendent jusqu'à 0,85. Les valeurs de r^2 sur la Côte viticole sont aussi comprises entre 0,88 et 0,90.

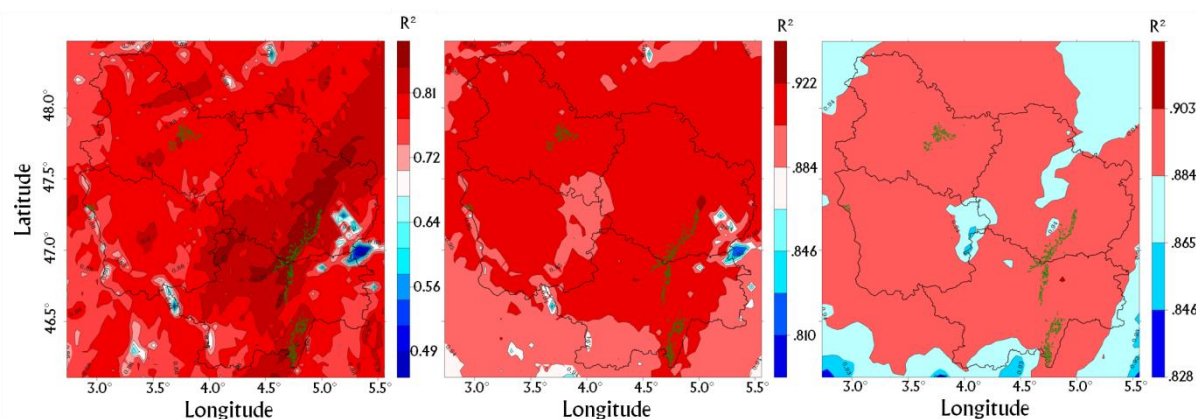


Figure D.11. Répartitions spatiales des coefficients de détermination (r^2) calculées pixel par pixel sur l'ensemble des 7 665 jours de chaque série. De gauche à droite : températures minimales, températures moyennes, températures maximales.

Pour les températures minimales, les valeurs sont globalement supérieures à 0,70. Les r^2 le plus forts sont situés sur la Côte viticole et le plateau qui la surplombe ($r > 0,85$). Les zones de faibles étendues sont également présentes mais les valeurs de r^2 ne sont jamais inférieures à 0,47. En moyenne, le r^2 est supérieur à 0,88 sur tout le territoire (hormis les zones de faible étendue de valeurs faibles). Ainsi, mises à part les zones de faible étendue de valeurs faibles, la cohérence temporelle des deux séries est élevée.

D.II.3.B. DÉCOUPAGE TEMPOREL DE LA REPARTITION SPATIALE : UTILISATION DES CLASSES DE TEMPÉRATURES

Le même travail est réalisé pour chacune des classes de jours étudiées dans le chapitre B. Ainsi, il est possible d'évaluer l'acuité du modèle climatique à reproduire ou pas les patterns spatiaux de températures retenus grâce à l'observation. Les figures D.12. et D.12. bis représentent les cartes de RMSE et de r^2 pour les six classes des températures minimales. Les figures D.13. et D.13.bis représentent les cartes de RMSE et de r^2 pour les cinq classes des températures maximales.

Les valeurs de RMSE et de r^2 sont différentes en fonction des classes. Cela signifie que les champs thermiques reproduits par le modèle WRF s'accordent mieux avec les observations interpolées pour certaines structures spatiales de la température. Pour les températures minimales, les classes 1 et 2 sont celles qui présentent les RMSE le plus faibles et les r^2 le plus élevés. Les valeurs interpolées pour la classe TN1 sont plus chaudes à l'ouest de la Saône-et-Loire et de la Côte-d'Or et à l'extrême est de la Bourgogne, alors qu'elles sont plus chaudes que les simulations WRF pour la classe TN2, et ce sur l'ensemble du territoire bourguignon.

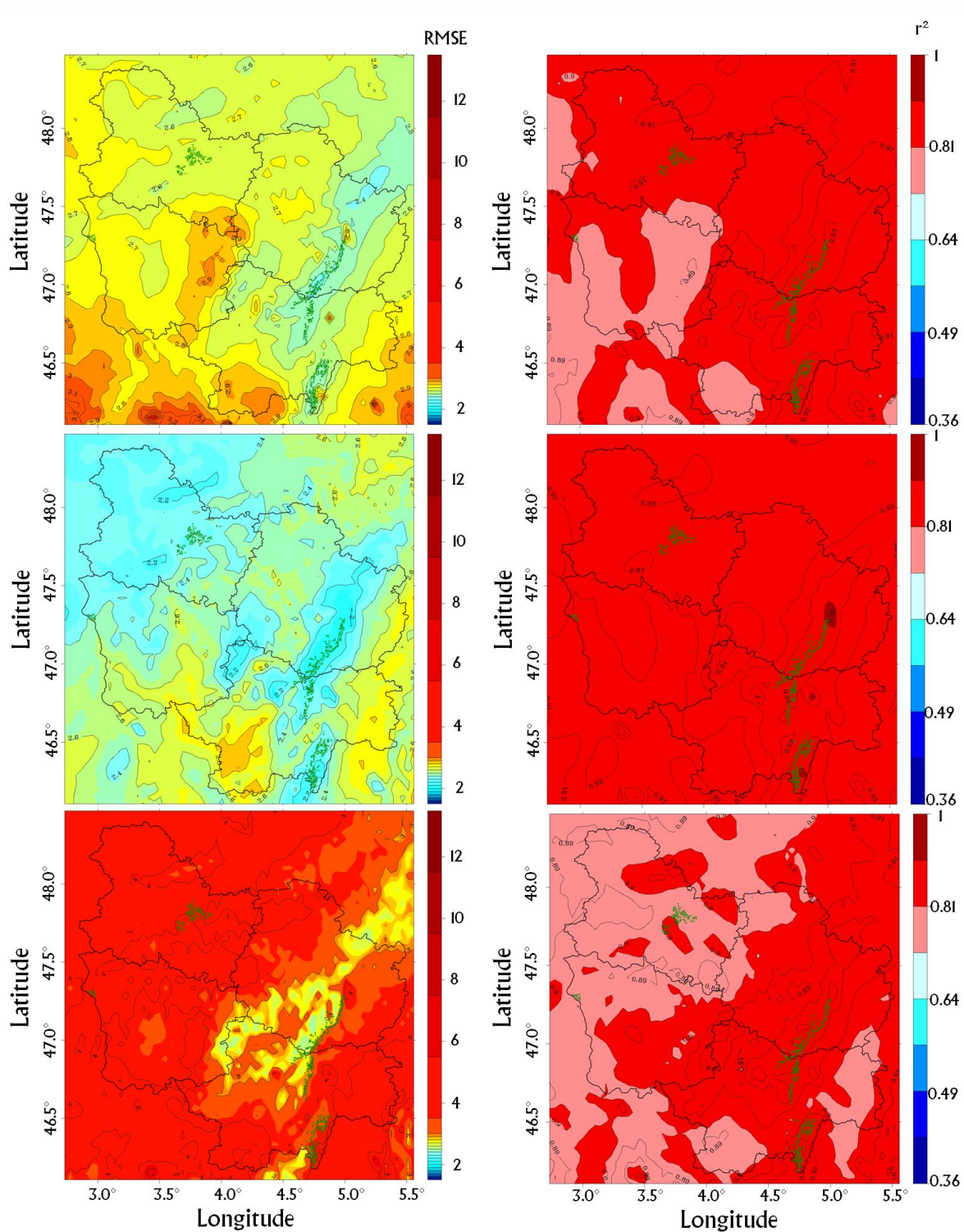


Figure D.12. Répartitions spatiales des RMSE (colonne de gauche) et des coefficients de détermination (r^2 , colonne de droite) calculées pixel par pixel sur l'ensemble des x jours de chaque classe définie dans le chapitre B. De haut en bas : les classes TN1, TN2 et TN3.

Les valeurs de RMSE de la classe TN1 sur la Bourgogne sont comprises entre $2,2^\circ$ et 3°C . Les coefficients de détermination sont compris entre 0,77 et 0,88. Ces résultats, associés à la très faible variabilité spatiale de ces coefficients, indiquent que

le modèle WRF réussit à reproduire correctement le gradient altitudinal négatif. Le pattern de la classe TN2 possède les mêmes caractéristiques que celui de la classe TN1 et s'organise également selon la longitude. Sur l'ensemble de la région, les valeurs de RMSE s'échelonnent de 1,8°C à 3°C. Les valeurs le plus élevées sont situées au sud-ouest de la Bourgogne et à son extrême est. Les valeurs de la différence brute moyenne sur cette zone indiquent que le modèle WRF produit une température plus basse que les interpolations.

Pour les classes TN4 et TN5, les performances sont comparables à celles obtenues pour les TN1 et TN2. Pour la classe TN4, il existe un gradient sud-nord de la différence moyenne des patterns des deux jeux de données avec des valeurs proches de 0°C au nord et inférieure à -2°C au sud. Cela signifie que les deux jeux de données sont en accord sur l'organisation spatiale mais pas sur l'intensité du gradient sud-est – nord-ouest de la température. Les interpolations ont globalement des températures plus chaudes au sud que les simulations WRF. La RMSE est assez faible sur la Bourgogne (entre 2,2°C et 3,5°C). Elle est plus forte sur le sud de la zone d'étude (hors Bourgogne), atteignant 5°C. Le r^2 est relativement élevé puisqu'il est compris entre 0,72 et 0,90 sur la Bourgogne.

Pour la classe TN5, le gradient des différences est inverse de celui de la classe TN4. Les valeurs de RMSE sont également assez faibles (entre 2,4°C et 3,2°C) sur la Bourgogne. Au nord-ouest de la zone d'étude, les valeurs de RMSE dépassent les 4°C. Les coefficients de détermination sont compris entre 0,74 et 0,88 sur la Bourgogne, ce qui est cohérent avec les résultats précédents.

Le pattern de la classe TN3 est caractérisé dans les interpolations par des valeurs globalement plus chaudes sur les hautes altitudes que sur le reste de la région (phénomène d'inversion thermique). Sur ces hauteurs, les interpolations sont plus chaudes que les simulations (entre 0° et 1°C). Sur le reste de la Bourgogne, les différences sont assez élevées, atteignant aisément les -2,5°C. Concrètement, le modèle WRF minimise l'intensité de l'inversion thermique observée. Les fortes valeurs de r^2 montrent que la cohérence temporelle est élevée (entre 0,76 et 0,88).

Pour la classe TN6, les températures interpolées sont caractérisées par des valeurs plus froides localisées notamment à la limite est, entre la Saône-et-Loire et la Côte-d'Or. Les différences avec les données simulées montrent clairement que le modèle WRF ne simule pas ces zones froides localisées. Les différences sont supérieures à 6°C. Globalement, pour le reste du territoire, les simulations WRF sont plus chaudes que les interpolations (différences comprises entre -2° et 0°C). Les RMSE sur l'ensemble de la zone sont faibles (<3°C) et les r^2 restent élevés (>0,81). Au niveau

des zones de faible étendue froides, les RMSE et les r^2 atteignent respectivement 12°C et 0,36.

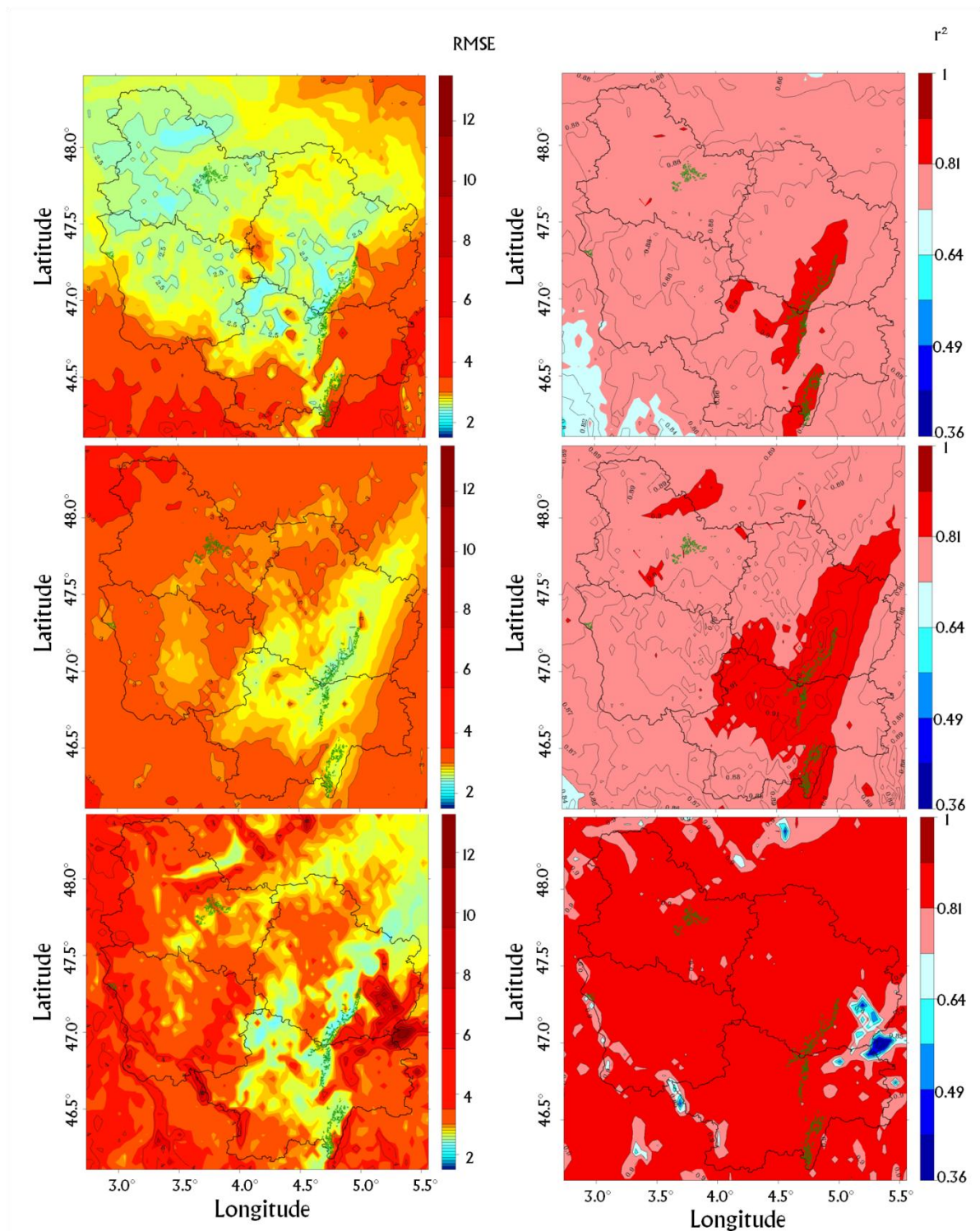


Figure D.12bis. Répartitions spatiales des RMSE (colonne de gauche) et des coefficients de détermination (r^2 , colonne de droite) calculées pixel par pixel sur l'ensemble des x jours de chaque classe définie dans le chapitre B. De haut en bas : les classes TN4, TN5 et TN6.

Les résultats montrent que les différences entre les deux jeux de données sont faibles sur la Côte viticole. C'est en effet sur cette zone que l'on retrouve les valeurs de RMSE le plus faibles et les r^2 le plus élevés quelle que soit la classe de T_n considérée.

Concernant les températures maximales, les valeurs de RMSE sont généralement inférieures à $3,5^\circ\text{C}$ pour toutes les classes, sauf la classe TX2. Pour la classe TX1, par exemple, le pattern spatial des températures est un gradient est-ouest avec un faible effet négatif de l'altitude. Les RMSE sont situées entre $2,6^\circ\text{C}$ et $3,4^\circ\text{C}$. Les r^2 sont compris entre 0,74 et 0,88, avec les valeurs les plus faibles sur le Morvan notamment. Les interpolations sont plus chaudes au nord-ouest et sur le Morvan, et plus faibles au sud-est, que les températures simulées. Cependant, les différences sont comprises entre -2° et $+2^\circ\text{C}$. Cela signifie que les simulations WRF ont tendance à minimiser le gradient est-ouest.

Pour la classe TX3, hormis sur le Morvan, l'ensemble des valeurs de RMSE est compris entre 2°C et 3°C . Les coefficients de détermination sont tous supérieurs à 0,90, ce qui montre la forte reproductibilité de ces configurations par le modèle WRF. Les interpolations sont globalement plus chaudes que les simulations, et ce sur l'ensemble du territoire. Elles sont un peu plus chaudes au nord-est qu'au sud de la région.

La classe TX4 est caractérisée par un pattern essentiellement régi par la relation négative entre l'altitude et la température affecté d'un gradient latitudinal négatif. Les valeurs de RMSE sont faibles et comprises entre $2,4^\circ$ et $3,2^\circ\text{C}$ sur la Bourgogne et supérieures à $3,2^\circ\text{C}$ sur le Morvan notamment. Les coefficients de détermination sont élevés et compris entre 0,83 et 0,88. Les interpolations sont plus chaudes que les simulations sur l'ensemble de la région ($>1^\circ\text{C}$).

La classe TX5 se caractérise par un gradient latitudinal nord-sud marqué et modulé par un gradient ouest-est. Ici aussi, les valeurs de RMSE sont faibles (entre $2,6^\circ\text{C}$ et $3,6^\circ\text{C}$) et les r^2 sont systématiquement supérieurs à 0,9 (sauf sur le Morvan). Les différences entre les deux séries montrent que les simulations sont plus chaudes au nord-ouest et plus froides au sud-est que les interpolations. Les modèles WRF minimisent le gradient nord-ouest – sud-est.

La classe TX2 est caractérisée par un gradient est-ouest. Les valeurs de RMSE sont plus fortes que pour toutes les autres classes ($>3^\circ\text{C}$) sur l'ensemble de la région. De très fortes valeurs sont identifiées au sud-est ($>5^\circ\text{C}$). Cela s'accompagne de valeurs de r^2 plus faibles (entre 0,44 et 0,64) comparées aux autres classes.

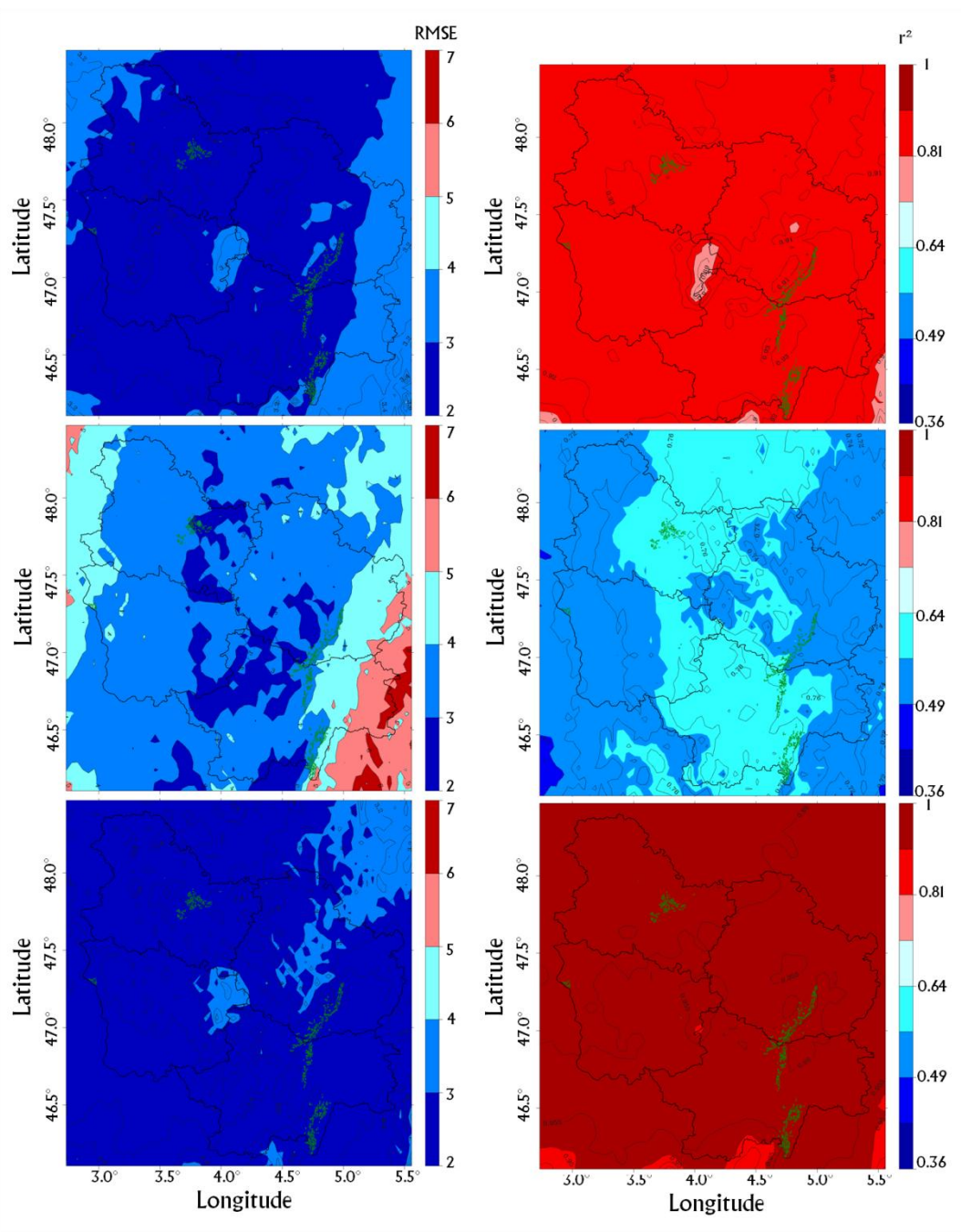


Figure D.13. Répartitions spatiales des RMSE (colonne de gauche) et des coefficients de détermination (r^2 , colonne de droite) calculées pixel par pixel sur l'ensemble des x jours de chaque classe définie dans le chapitre B. De haut en bas : les classes TX1, TX2 et TX3.

Comme pour les températures minimales, la Côte viticole, représentée par un polygone vert, est généralement située dans les territoires où les performances du modèle à reproduire les climats sont le plus importantes.

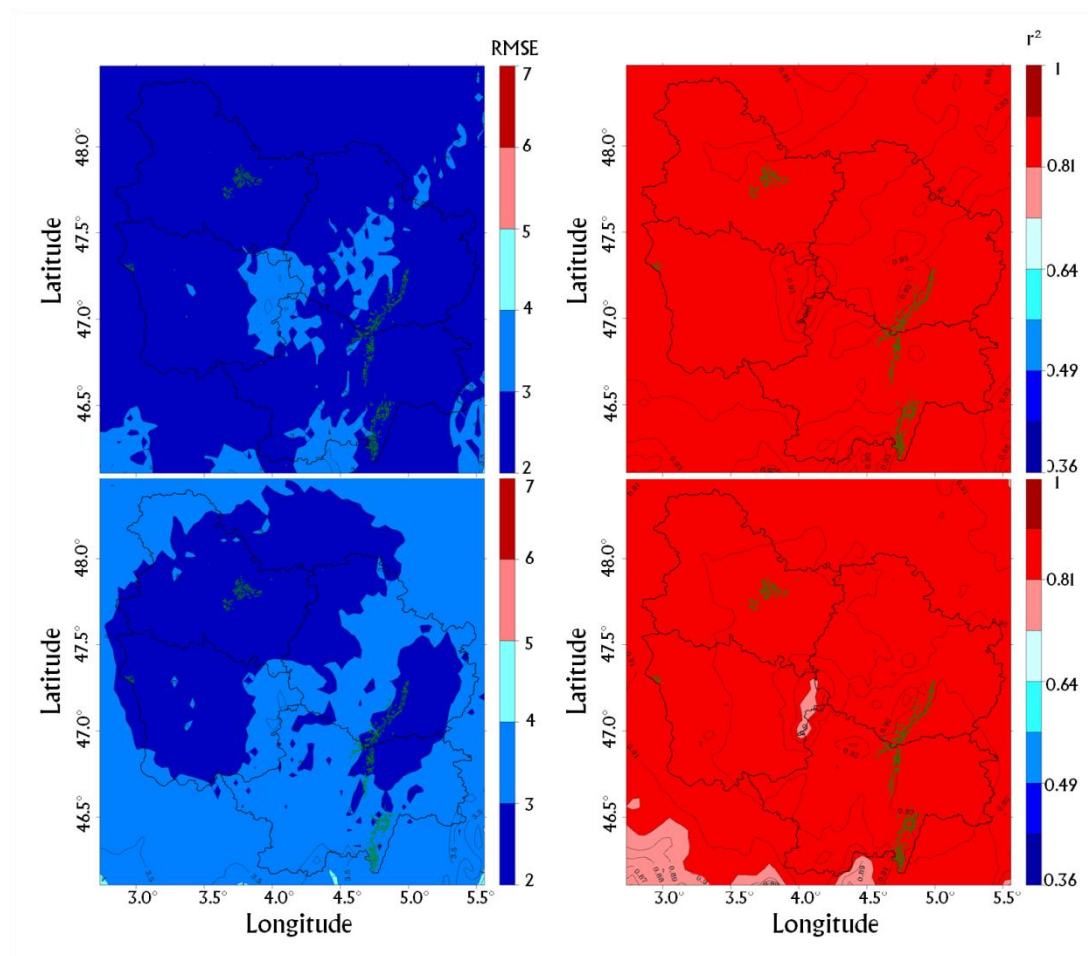


Figure D.13bis. Répartitions spatiales des RMSE (colonne de gauche) et des coefficients de détermination (r^2 , colonne de droite) calculées pixel par pixel sur l'ensemble des x jours de chaque classe définie dans le chapitre B. De haut en bas : les classes TN4 et TN5.

La désagrégation des réanalyses ERA-INTERIM par le modèle WRF produit des champs thermiques globalement proches des observations spatialisées. Cette partie a permis de soulever les points suivants :

- Hormis les biais de températures simulées (froid sur les T_x et chaud sur les T_n , de l'ordre de $0,5^\circ$ à 1°C), WRF décrit de façon satisfaisante la variabilité interannuelle et le cycle saisonnier ;
- La variabilité spatiale climatique globale est représentée de façon cohérente avec l'observation, aux biais près ;
- Certaines configurations de répartition des températures sont mal représentées par le modèle, notamment les inversions thermiques. Au contraire, les conditions de gradients altitudinaux négatif sont reproduites de façon satisfaisante ;

-
- Les performances spatiotemporelles sont également satisfaisantes puisque les valeurs de r^2 sont élevées ($>0,64$) et de RMSE sont faibles ($<3^\circ\text{C}$).

D.III. Régionalisation des températures par WRF sur la période 1970-1987, en désagrégant les sorties du modèle ARPEGE/SRES A2

Les résultats précédents ont montré que la configuration d'utilisation du modèle WRF permet d'obtenir des champs de températures cohérents spatialement et temporellement en Bourgogne. Il convient maintenant de s'assurer que la désagrégation des données ARPEGE permet de produire des températures réalistes. Comme les désagrégations des données du modèle ARPEGE impliquent que, contrairement aux désagrégations d'ERA-INTERIM, la chronique des températures simulées n'est pas comparable à la chronique des températures observées, les comparaisons jour par jour, ou année par année, sont impossibles. Seules les distributions statistiques peuvent être comparées.

Ces désagrégations vont s'effectuer sur les périodes 1970-1987 et 2031-2048, et, afin d'évaluer le réchauffement projeté et ses impacts, les différences entre ces deux périodes seront proposées en partie D.IV. Nous avons fait ce choix au préalable, et c'est **le premier objet de cette partie D.III., de valider la climatologie des températures simulées par WRF sur la période 1970-1987 (D.III.1.)**. Nous répondrons également aux questions concernant **la qualité de la reproduction du cycle phénologique du Pinot noir sur la période 1970-1987 à partir de ces désagrégations (D.III.2.)**.

D.III.1. Climatologie des températures pour la Bourgogne

La première visualisation des performances du modèle WRF en ce qui concerne la répartition géographique des températures (Figure D.14.) montre qu'il met bien en évidence des zones plus fraîches sur le Morvan et le Seuil de Bourgogne et des zones plus chaudes dans la plaine de Saône.

Sur la période 1970-1987, trente-deux stations de notre base de données ont enregistré la température de façon continue. Ici, la comparaison se fait directement entre les stations (non spatialisé) et les simulations. Notons que le jeu de stations représente mal les altitudes entre 300 et 500 m (Figure D.15.). Dans cette partie, les distributions et caractéristiques des températures observées sont comparées à celles simulées.

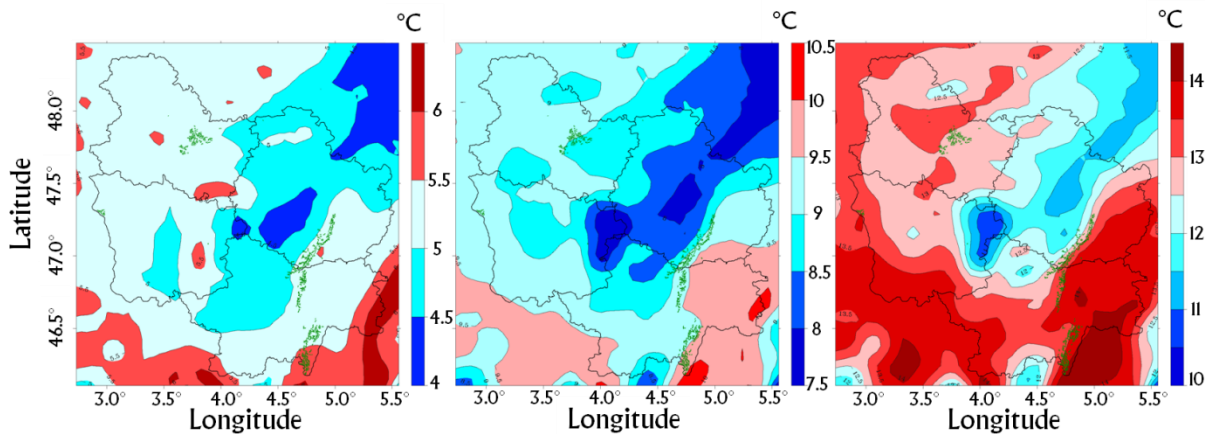


Figure D.14. Cartes de la répartition moyenne des températures minimales, moyennes et maximales pour les simulations de WRF sur la période 1970-1987.

Les amplitudes des températures minimales et maximales sont très proches (Figure D.16.). Les maxima des Tx simulées sont 3,4°C moins chauds que les observations. De même, le troisième quartile des observations (Tx) est plus chaud que celui des simulations (21,2°C contre 19,9°C), alors que les premiers quartiles sont très proches (8,4°C pour les observations et 8,2°C pour les simulations). Nous retrouvons ici le biais froid observé précédemment. La distribution des deux séries indique que les simulations sont plus centrées sur le mode que les observations, avec une gamme de températures (entre 7° et 14°C) plus fortement représentée pour les simulations que pour les observations, et un étalement moins important pour les simulations.

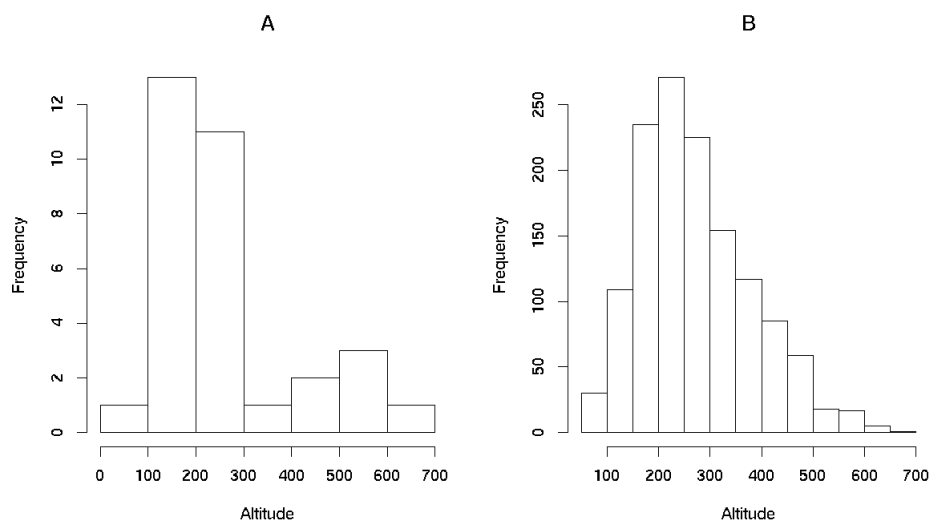


Figure D.15. Distributions des altitudes (en mètres) des trente-deux stations (à gauche) et des pixels de la maille à cinq kilomètres (à droite).

Pour les températures minimales, l'ensemble de la distribution est décalé vers la droite pour les simulations (Figure D.16.), ce qui signifie que les températures

minimales simulées par le modèle sont plus chaudes que celles observées (médiane : 6,3°C pour le modèle et 5,5°C pour les observations). Cependant, les modes des deux distributions sont très proches de 5°C. Les boxplots montrent que la gamme de valeurs de températures est similaire pour les deux jeux de données avec toujours ce décalage plus chaud pour les simulations ; de même, pour les écarts interquartiles qui sont similaires (4,5°C pour les observations et 4,8°C pour le modèle). Nous retrouvons ici les biais constatés observés dans d'autres travaux [Salathé *et al.*, 2008 ; Xu *et al.*, 2012].

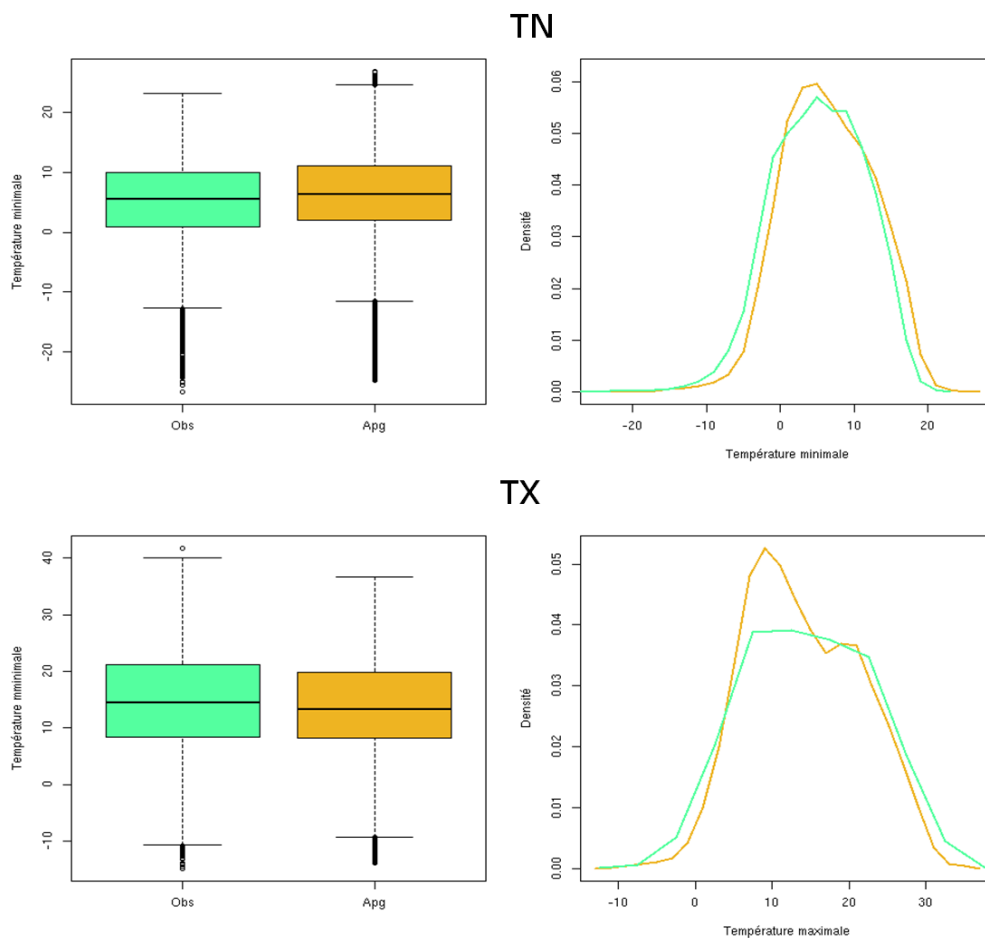


Figure D.16. Comparaison des simulations à partir d'ARPEGE (orange) et des observations (vert) pour la période 1970-1987 pour les températures minimales (en haut) et maximales (en bas). Les distributions de chaque série sont représentées de deux façons différentes : à gauche un boxplot, à droite des courbes de densité.

L'ampleur de variabilité intrasaisonniers est également bien reproduite par le modèle (Figure D.17.). Si les biais chaud pour les Tn et froid pour les Tx sont retrouvés sur le graphique, la variabilité intrasaisonniers est très proche ($r^2_{(Tn)} = 0.93$, $r^2_{(Tx)} = 0.96$). En ce qui concerne les Tn, le biais chaud est plus fort pendant les mois d'été et d'hiver. Pour les températures maximales, nous pouvons faire le constat inverse : la différence est plus forte pendant les saisons intermédiaires.

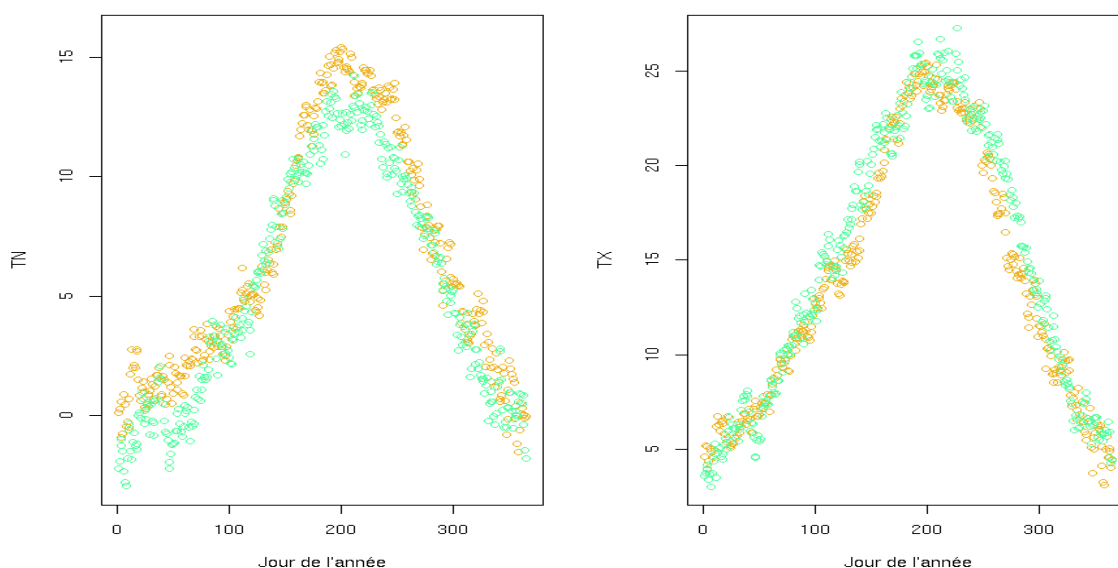


Figure D.17. Cycle saisonnier des deux jeux de données, pour la période 1970-1987, et pour les Tn (à gauche) et les Tx (à droite). En orange, les données WRF ; en vert, les données observées.

Les stations du réseau ont mesuré entre 16 et 28 % de jours pour lesquels la température était inférieure à 0°C (Figure D.18., A). Pour le modèle (Figure D.19., gauche), l'amplitude de variation des valeurs va de 10 % à 22 %, ce qui est plus faible mais cohérent avec le fait que les températures minimales simulées aient un biais chaud. Pour les simulations, les zones pour lesquelles le nombre de jours de gel est le plus important sont situées sur les reliefs (Morvan...) ; environ 15 % de jours de gel sont simulés pour la Côte viticole.

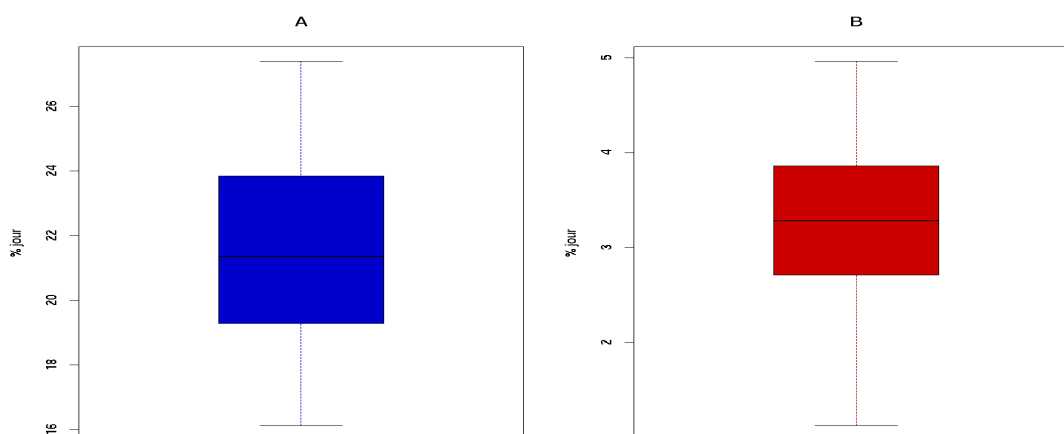


Figure D.18. Pourcentage, sur la période 1970-1987, du nombre total de jours pour lesquels les stations du réseau Météo-France ont mesuré une température minimale inférieure à 0°C (A) et une température maximale supérieure à 30°C (B).

Le nombre de jours pour lesquels la température maximale excède 30°C est faible pour les deux jeux de données. Il est cependant plus faible pour les températures

simulées (entre 0 et 3 %) que pour les températures observées (entre 1 et 5 %). Là encore, ce résultat confirme le biais plus froid des températures maximales. La Côte viticole subit entre 0 et 2 % de jours pour lesquels la température maximale dépasse les 30°C, d'après les données simulées par WRF.

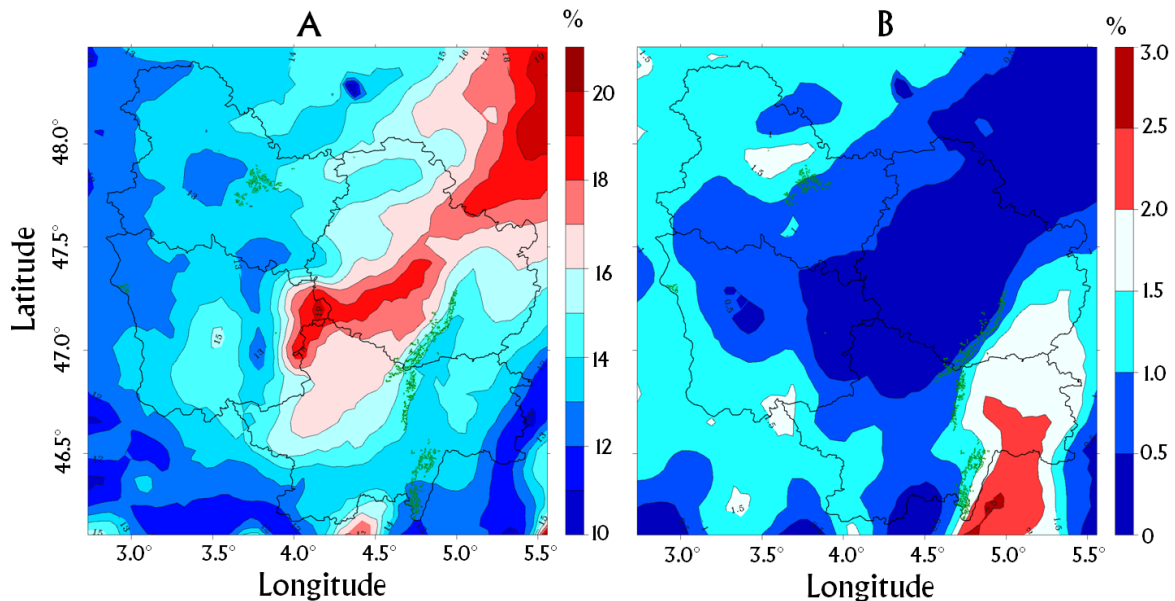


Figure D.19. Cartes du pourcentage du nombre total de jours pour lesquels la température minimale est inférieure à 0°C (A) et la température maximale supérieure à 30°C (B), sur la période 1970-1987.

Sur la période 1970-1987, le modèle WRF, forcé par les données ARPEGE-Climat, décrit globalement bien la variabilité spatiotemporelle des températures. Cependant, il tend à produire des valeurs de températures minimales plus chaudes, comme pour la période 1989-2009 (avec un forçage par ERA-INTERIM). Le biais froid présent pour les températures maximales durant la période 1989-2009 est ici plus faible et trouverait son explication dans le fait que le modèle lisse les extrêmes de températures (*cf.* Chapitre D.II.2.). Ce constat est confirmé par les études des nombres de jours où la température a été extrêmement froide ou chaude, qui montre que si le modèle décrit bien la variabilité des valeurs d'extrêmes, il tend à systématiquement les minimiser (moins de jours froids et chauds dans les simulations). La reproduction du cycle annuel est satisfaisante lorsque l'on travaille sur les moyennes de la période. Il s'agit désormais de vérifier que le climat produit par WRF est suffisamment réaliste en Bourgogne dans le cadre du scénario A2 pour reproduire correctement le cycle phénologique du Pinot noir. Pour cela, nous utilisons une comparaison indirecte.

D.III.2. WRF est-il suffisamment réaliste pour reproduire correctement le cycle phénologique ?

Dans cette partie, les trois modèles phénologiques présentés et étudiés au chapitre C (Chuine, GFV et WE) sont appliqués aux données désagrégées par WRF et aux stations disponibles sur cette période. Dans un premier temps, est étudié le pixel de la maille WRF correspondant à la position de la parcelle de Pinot noir de Savigny-lès-Beaune. Les dates d'occurrences des stades de floraison et de véraison simulées sont comparées à celles observées à la parcelle. Ensuite, les données simulées par application des modèles phénologiques aux mailles de WRF sont comparées aux simulations aux stations disponibles sur la période 1970-1987. Enfin, nous donnons un aperçu de la répartition spatiale des dates de floraison et de véraison simulées par les modèles phénologiques par applications aux sorties du modèle WRF.

D.III.2.A. COMPARAISON DE LA PHÉNOLOGIE OBSERVÉE ET SIMULÉE À PARTIR DES DONNÉES WRF

La figure D.20. révèle que, pour la floraison, les données WRF à la maille de cinq kilomètres incluant la parcelle de Savigny-lès-Beaune induisent, avec les deux modèles phénologiques (Chuine et GFV), des dates d'occurrence plus tardives que celles observées. Globalement, les dates observées sont comprises entre les 17 et 22 juin, alors que pour le modèle de Chuine et GFV, les dates de floraison simulées sont respectivement comprises entre le 30 juin et le 8 juillet et entre les 23 et 29 juin. Le retard moyen (biais) est de 15,4 et de 7,7 jours pour les modèles de Chuine et GFV respectivement. Le modèle de Chuine tend à simuler des dates de floraison du Pinot noir plus tardives (Figure C.18.). De plus, comme indiqué précédemment, le modèle WRF tend à sous-estimer les températures des mois de mars et avril qui entrent en compte dans le calcul des cumuls de températures. Ce biais froid induit une réponse tardive des modèles phénologiques. Enfin, ce retard simulé par rapport à l'observation peut également être expliqué par un effet d'échelle : la maille de cinq kilomètres moyenne des conditions autour de la parcelle qui ne sont pas forcément représentatives des conditions à la parcelle. A la parcelle de Savigny, la maille de 5 km affiche ainsi un biais froid, induisant une plus grande tardiveté des dates prédites (*cf.* section C.III.3.a.).

En ce qui concerne la véraison, le modèle de Chuine simule une date d'occurrence du stade qui est plus proche de l'observation que les autres modèles (Figure D.20.). Malgré tout, les différences restent assez faibles (biais tardifs par rapport à l'observation : Chuine, 1,2 jour ; GFV, 1,1 jour ; WE, 4,4 jours) et cohérentes avec les différences observées pour la période 1973-1987 (Figure C.18.).

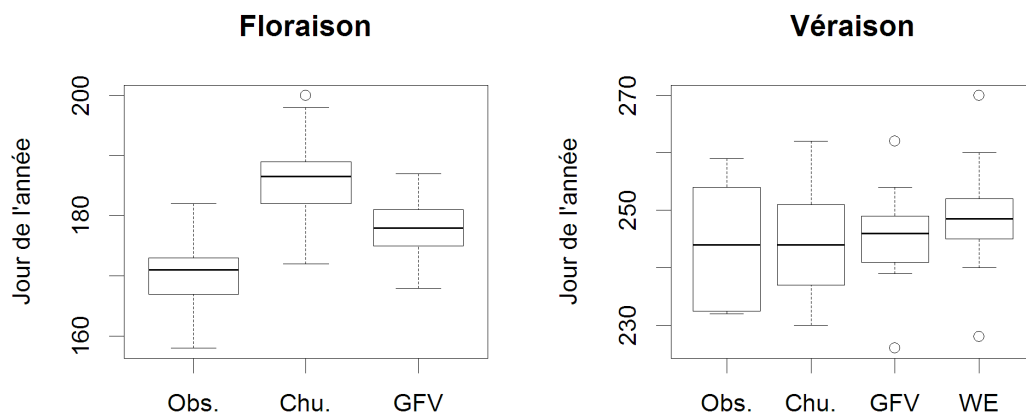


Figure D.20. Distributions statistiques des dates de floraison et véraison observées à Savigny-lès-Beaune et simulées par les trois modèles sur le pixel de la maille à cinq kilomètres correspondant au point d'observation (période 1970-1987).

D.III.2.B. COMPARAISON SUR L'ENSEMBLE DU TERRITOIRE BOURGUIGNON

Pour toutes les stations disponibles sur la période 1970-1987, les trois modèles sont appliqués. Nous faisons de même pour l'ensemble des mailles des sorties de WRF sur la même période. La comparaison se fait en deux parties : la première réalise des moyennes spatiales pour chaque année afin d'observer la cohérence temporelle et la seconde effectue des moyennes temporelles sur les stations et les mailles dans le but d'observer la cohérence spatiale.

Comme vu dans l'analyse de la figure D.20., l'utilisation des températures simulées par WRF induit, avec le modèle de Chuine, des dates de floraison plus tardives que le modèle GFV, et ce que ce soit pour les moyennes spatiales ou temporelles (Figure D.21.). De même, les différences entre les modèles concernant la véraison sont en accord avec les différences observées dans la partie précédente (Figure D.20.).

Globalement, les dates produites à partir des désagrégations de WRF sont plus tardives que celles issues des observations aux stations, quel que soit le stade étudié. Les différences sont en moyenne inférieures à cinq jours. Elles sont également plus fortes pour les moyennes spatiales que pour les moyennes temporelles. Ceci peut s'expliquer par le fait que la sous-représentativité, voire la non-prise en compte, de certaines gammes d'altitude induit des moyennes plus tardives pour le modèle WRF que pour les stations.

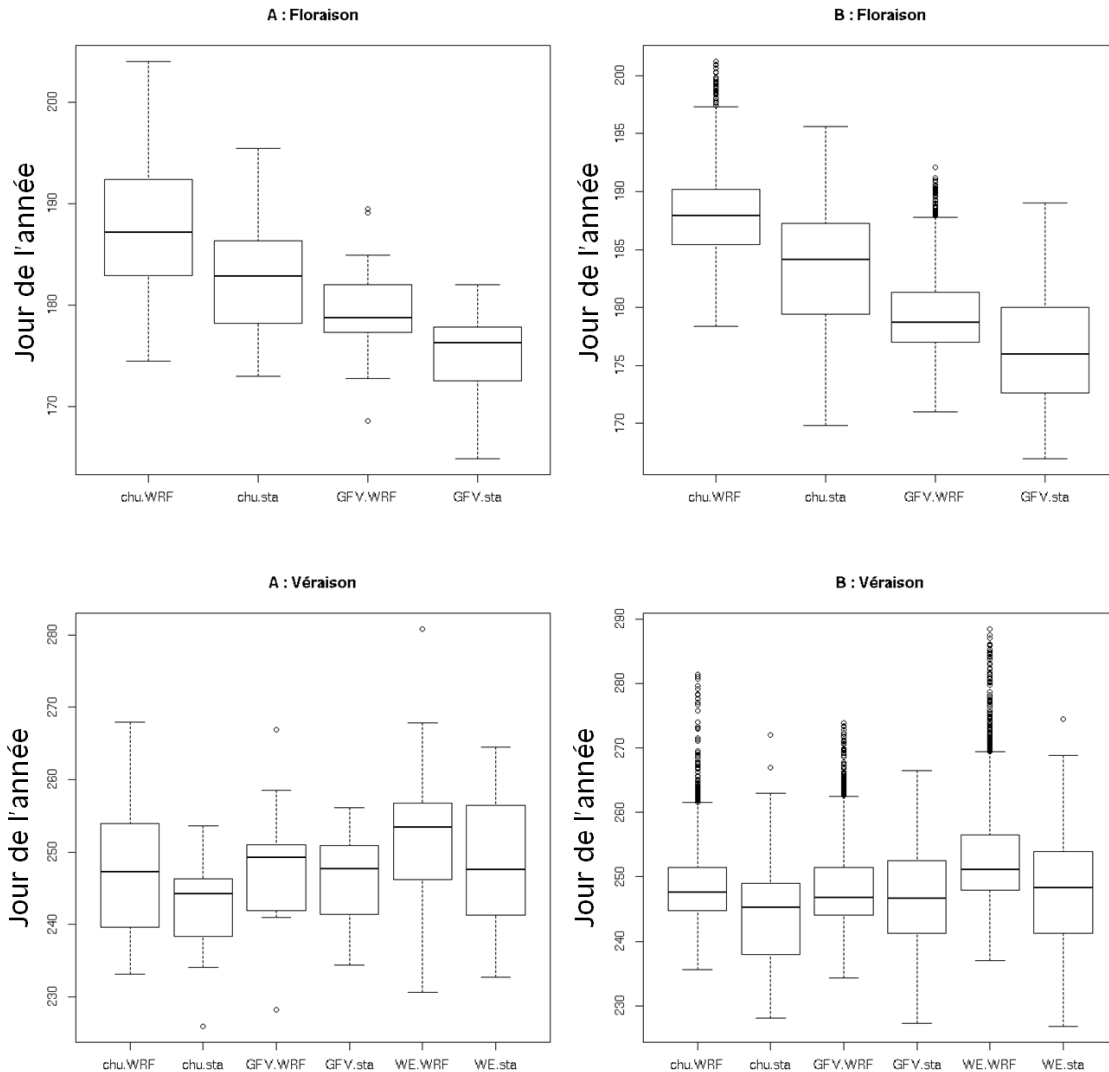


Figure D.21. Distributions statistiques des dates de floraison et véraison pour les simulations WRF et les dates estimées par les modèles phénologiques appliqués aux stations du réseau Météo-France disponibles sur la période 1970-1987. Les graphiques A représentent les moyennes spatiales et B les moyennes temporelles.

D.III.2.C. REPARTITION SPATIALE DES DATES D'OCURRENCES DES STADES DE FLORAISON ET DE VÉRAISON SIMULÉES À PARTIR DES DÉSAGRÉGATIONS DE WRF

Finalement, la répartition spatiale en Bourgogne des dates d'occurrences des stades de floraison et de véraison du Pinot noir calculées avec différents modèles phénologiques appliqués aux données de températures quotidiennes simulées par le modèle WRF est analysée. Pour cela, nous avons produit des cartes de dates de moyennes de ces dates sur les dix-huit ans de la période étudiée.

En ce qui concerne la floraison (Figure D.22.), les deux modèles produisent la même structure spatiale de dates d'occurrences du stade phénologique. Ce pattern est essentiellement impacté par l'altitude. Sur les zones d'altitude, les dates de floraison

sont très tardives (entre le 14 et le 19 juillet pour Chuine, et entre le 4 et le 14 juillet pour GFV), et inversement pour les zones de plaine (avant le 4 juillet pour Chuine et avant le 24 juin pour GFV).

La différence est d'environ neuf jours sur l'ensemble de la région. Cette différence est un peu plus élevée que celle observée au chapitre C.III.1., entre les simulations des deux modèles phénologiques à partir des observations (stations) de la période 1973-2007 (~6,31 jours).

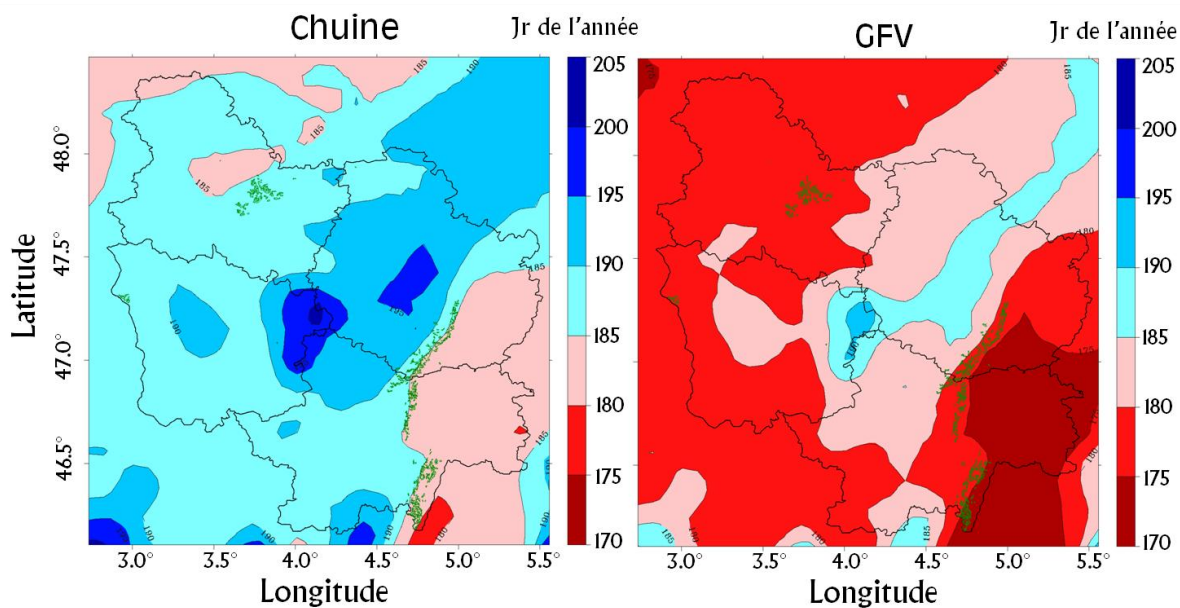


Figure D.22. Dates de floraison simulées par les modèles de Chuine (à gauche) et GFV (à droite) à partir des données de températures simulées par WRF sur la période 1970-1987.

Les patterns des dates d'occurrences du stade de véraison sont également très proches pour les trois modèles (Figure D.23.) et dépendent également en grande partie de l'altitude. Le modèle WE est plus éloigné des autres modèles. La différence entre le modèle WE et les autres modèles est dépendante de l'altitude : elle est plus faible en plaine de Saône que sur le Morvan. Les modèles GFV et de Chuine sont très proches, ce qui confirme ici spatialement les résultats obtenus dans la partie précédente.

Les dates d'occurrences moyennes du stade de floraison simulées par les modèles sur la Côte viticole sont comprises entre le 24 et le 29 juin pour le modèle GFV et le 29 juin et le 9 juillet pour le modèle de Chuine, soit une différence comprise entre cinq et onze jours. L'observation à Savigny-lès-Beaune pour la même période (1973-1987) indique une floraison autour du 20 juin (jour 171, cf. Figure D.20), indiquant clairement que les cartes de dates d'occurrence des dates de floraison produites sur la base d'un couplage WRF/modèle de Chuine sont incohérentes.

Les dates d'occurrences moyennes du stade de véraison sur la Côte sont comprises entre le 30 août et le 13 septembre pour le modèle WE et entre le 28 août et 9 septembre pour les modèles GFV et de Chuine. Pour la même période, la date de mi-véraison observée a lieu en moyenne au 28 août (jour 240), correspondant aux zones les plus précoces de la Côte, dont on peut penser que Savigny-lès-Beaune fait partie [Respaud, 2009], simulées par les modèles GFV et Chuine. Tant pour les dates de mi-floraison que pour les dates de mi-véraison, le modèle GFV reproduit de manière relativement fidèle les périodes d'occurrence moyenne des stades phénologiques observées.

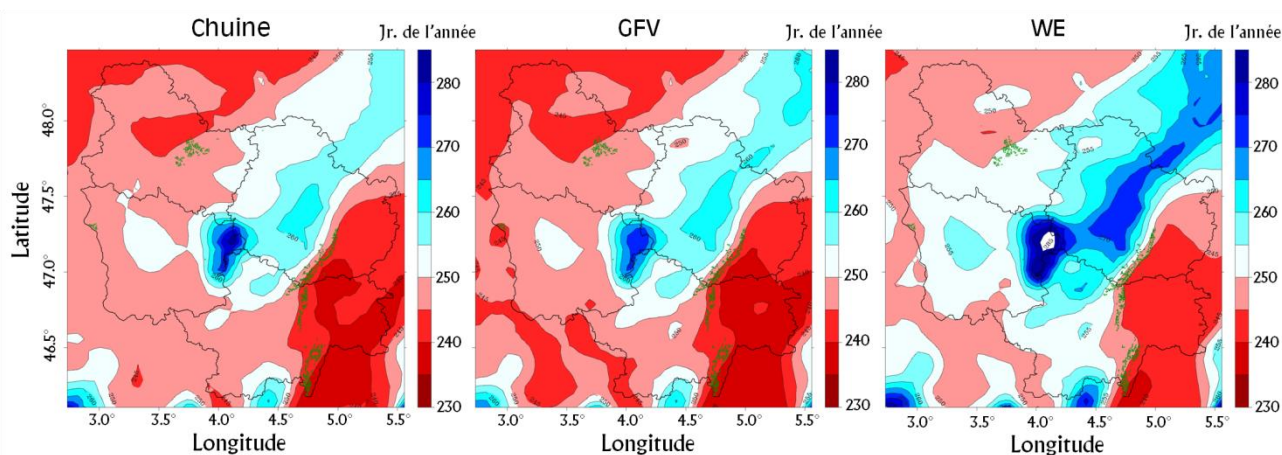


Figure D.23. Dates de véraison simulées par les modèles de Chuine (à gauche), GFV (au centre) et WE (à droite) à partir des données de températures simulées par WRF sur la période 1970-1987.

Dans cette partie D.III., le modèle WRF forcé par les données ARPEGE décrit convenablement la variabilité spatio-temporelle des températures (distributions statistiques des températures, cycle saisonnier, zones géographiques chaudes/froides bien situées). On constate toujours un biais chaud sur les Tn qui confirme l'effet modèle présenté dans la partie D.II.1. Le biais froid sur les Tx est plus faible que pour la période 1989-2009.

L'utilisation de WRF pour produire des dates de floraison induit une tardiveté des dates simulées, notamment pour le modèle de Chuine. Le biais moyen est plus faible en ce qui concerne la véraison. Ces biais sont cohérents avec ceux observés dans la partie C.III.3.a.

D.IV. Régionalisation du réchauffement et de ses impacts sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne

La partie précédente a permis de mettre en évidence que, dans le cadre du scénario A2, le modèle WRF produit des champs thermiques cohérents et proches en moyenne de ceux observés sur la même période, bien qu'il tende à réduire l'amplitude thermique quotidienne. La phénologie simulée à partir des données de températures produites par le modèle WRF forcé avec les données ARPEGE-Climat est plus tardive pour la floraison et présente des dates de véraison similaires à celles observées, mais reste proche des observations. Ceci montre que les désagrégations des données de larges échelles par WRF sur une longue période (vingt ans) permettent de produire des dates d'occurrences des stades phénologiques du Pinot noir de façon satisfaisante. Cette partie a pour but de quantifier et d'analyser le réchauffement projeté à l'horizon 2031-2048 d'après le scénario SRES/A2 (D.IV.1.) et d'étudier ses impacts sur les dates d'occurrences des stades phénologiques du Pinot noir en Bourgogne (D.IV.2.).

D.IV.1. Régionalisation du réchauffement

Afin d'évaluer le réchauffement projeté, nous disposons des données ARPEGE (scénario SRES/A2) désagrégées par WRF sur la période 1970-1987 étudiée dans la partie précédente. Nous disposons également du même type de données sur la période 2031-2048. La quantification et la régionalisation du réchauffement sont donc basées ici sur les différences entre les deux périodes de données : des différences *classiques*, brutes, concernant les distributions temporelles et spatiales entre les deux jeux (D.IV.1.a.) et des différences étudiées à l'aide de métriques plus fines, comme l'amplitude diurne, le nombre de jours chauds/froids, entre autres (D.IV.1.b.).

D.IV.1.A. QUANTIFICATION ET REGIONALISATION DU RÉCHAUFFEMENT

Les comparaisons entre les deux périodes fournissent des informations sur le réchauffement (Figure D.24.). Les moyennes annuelles, pour la période 1970-1987, sont majoritairement comprises entre 9,9° et 10,6°C (Figure D.24., gauche). Pour la période 2031-2048, elles sont comprises entre 11,2° et 12,1°C. L'augmentation moyenne projetée des températures est donc de l'ordre de 1,5°C. L'amplitude maximale des températures moyennes est de l'ordre de 2,2°C pour les deux périodes (Figure D.24., gauche).

Des modifications de distributions des températures minimales et maximales sont également projetées (Figure D.24., centre et droite). Pour la période passée (1970-1987), la distribution des températures minimales est unimodale, faiblement décalée

vers la droite, centrée autour de 4-5°C. La distribution montre une proportion non négligeable de valeurs inférieures à -8°C. Pour les températures maximales, la distribution est bimodale avec un premier mode à 10°C et un deuxième mode à 20°C. Les températures inférieures à 0°C et supérieures à 30°C sont rares.

Globalement, la distribution de la période future (2031-2048) est décalée vers la droite, sauf pour quelques gammes de températures (10° et 15°C pour les Tn et 18° à 26°C pour les Tx). Ceci indique premièrement un réchauffement global sur la région ; deuxièmement, ce réchauffement a pour effet de renforcer la bimodalité de la distribution des températures maximales. La proportion de températures maximales supérieures à 30°C augmente fortement. Nous constatons enfin la diminution des fortes gelées pour les Tn. Le nombre de jours pour lesquels la température est descendue en dessous des -10°C est faible, voire nul pour la période future. La différence est plus marquée pour les extrêmes froids que pour les extrêmes chauds.

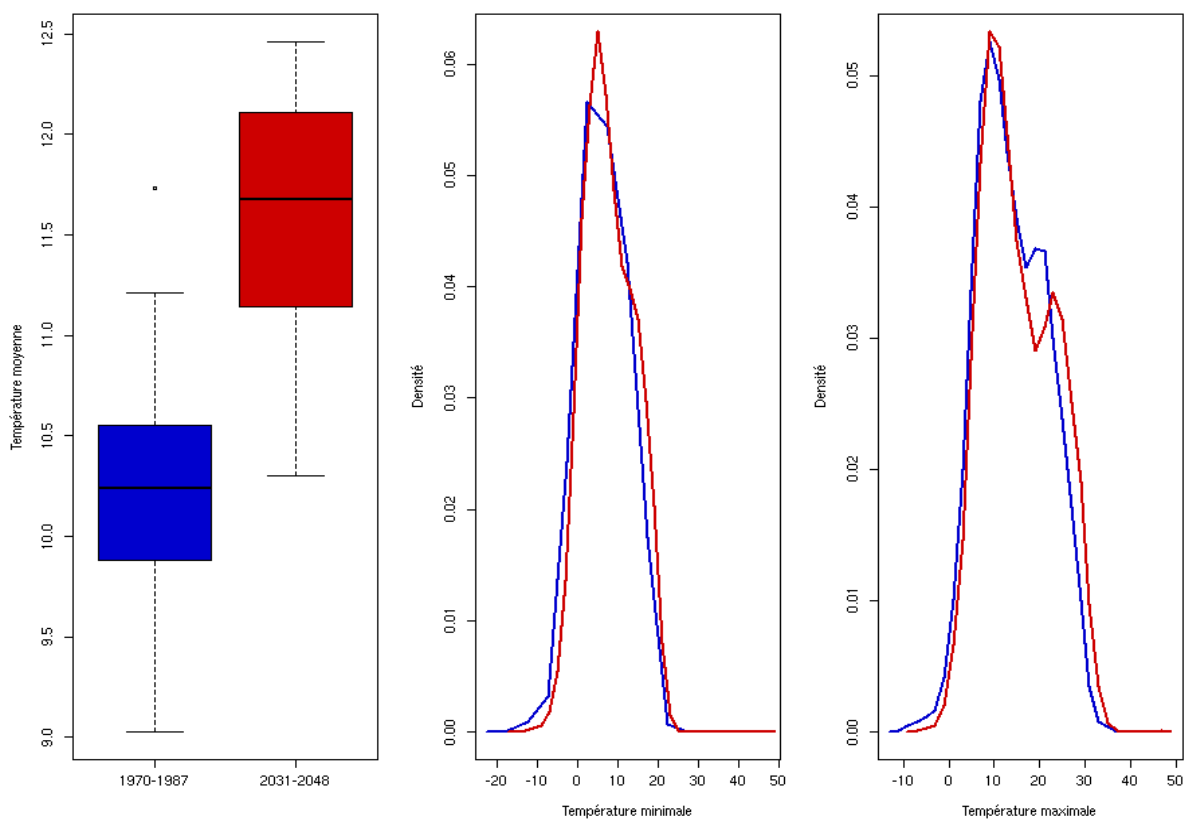


Figure D.24. Comparaison des simulations à partir d'ARPEGE pour les périodes 1970-1987 (bleu) et 2031-2048 (rouge), et ce pour les températures moyennes (à gauche), minimales (au centre) et maximales (à droite).

La variabilité spatiale du réchauffement est présentée par la figure D.25. Ainsi, pour chaque maille, nous avons calculé une valeur de réchauffement à partir des différences des moyennes annuelles des périodes 1970-1987 et 2031-2048. Les

températures minimales augmentent plus faiblement que les températures maximales. La différence reste malgré tout très faible (de l'ordre de 0,1°C).

Pour les températures minimales, le réchauffement est plus fort sur l'est de la Bourgogne et plus particulièrement en plaine de Saône (Figure D.25.). Les valeurs d'augmentation en plaine de Saône atteignent 1,35°C. Les valeurs les plus faibles de réchauffement sont situées sur les hauteurs du Morvan et le Seuil de Bourgogne. Sur la Côte viticole, le réchauffement des températures minimales est d'environ 1,3°C.

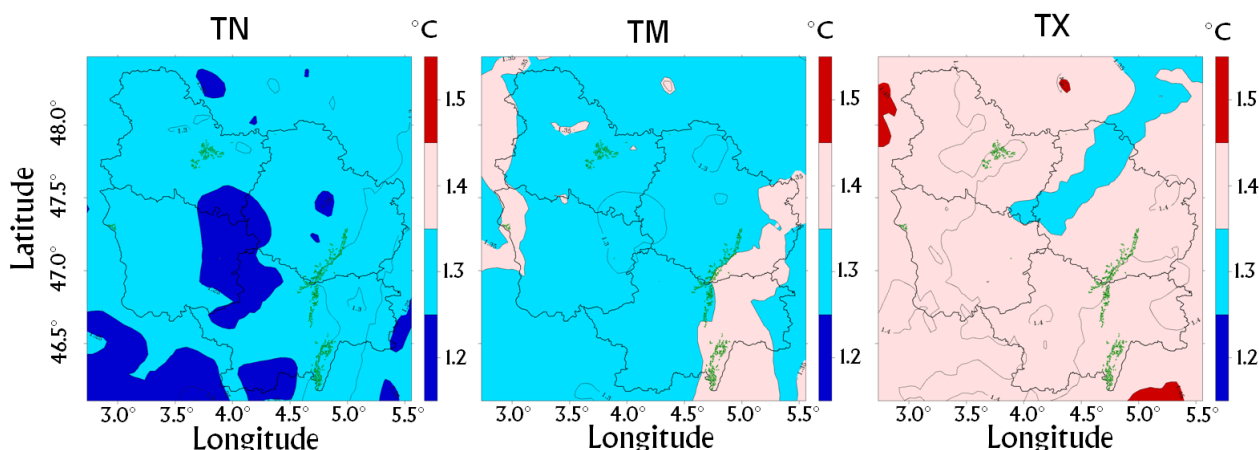


Figure D.25. Différences de températures entre les deux périodes de simulations pour les températures minimales (à gauche), moyennes (centre) et maximales (à droite).

Le pattern des augmentations des températures maximales est sensiblement différent de celui des températures minimales. Les valeurs le plus faibles de réchauffement sont situées sur le Morvan et le Seuil de Bourgogne (~+1,35°C). Les valeurs le plus élevées sont situées à l'extrême sud de la plaine de Saône. Le réchauffement de la Côte viticole s'échelonne entre 1,4° et 1,45 °C.

Ainsi, en moyenne, sur l'ensemble du territoire bourguignon, la température simulée augmente d'au moins 1,25°C et jusqu'à 1,4°C en certains endroits. Sur la Côte viticole, la température augmente d'environ 1,35°C. Les augmentations le plus faibles sont situées sur les zones d'altitudes et le plus élevées en plaine.

Le réchauffement projeté sera équivalent à celui observé depuis la fin des années 1980 en Bourgogne. Cela signifie que le réchauffement déjà observé entre la période 1970-1987 et la période 1988-2009 est proche de celui simulé par le modèle WRF (SRES/A2). Le réchauffement à prévoir entre la période actuelle (1988-2009) et la période future (2030-2048) est donc relativement faible.

Le fait que les températures maximales se réchauffent plus fortement que les températures minimales est en accord avec le réchauffement observé sur les périodes 1961-2009 (cf. Chapitre B). De même, la répartition spatiale du réchauffement des

températures maximales montre un réchauffement plus faible sur le nord-est de la Bourgogne, en accord avec les résultats présentés dans la figure B.11.

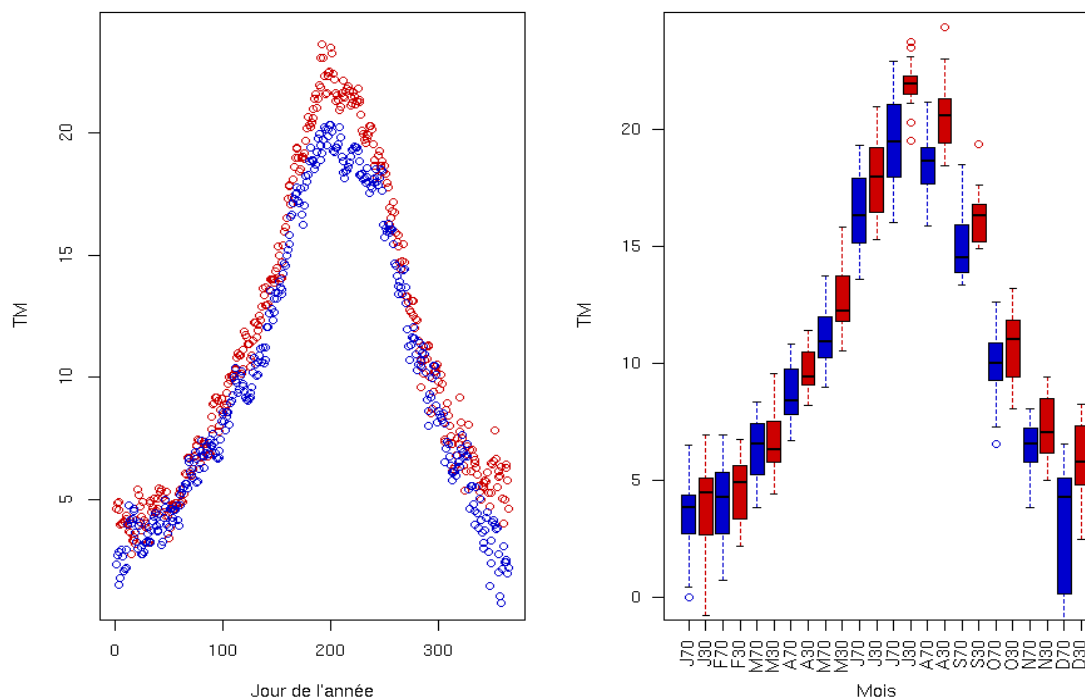


Figure D.26. Moyennes quotidiennes des températures moyennes calculées sur l'ensemble des pixels des mailles et sur l'ensemble des dix-huit ans, et boxplot des valeurs mensuelles de ces moyennes. En bleu, la période 1970-1987 ; en rouge, la période 2031-2048.

En ce qui concerne le cycle annuel, la figure D.26. (gauche) nous montre qu'il est cohérent pour la période future, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de décalage temporel des saisons. Il est cependant clair que l'écart entre les valeurs de la période future (points rouges) et celles de la période passée (points bleus) montre une variabilité saisonnière : le réchauffement est plus important en été qu'en hiver (sauf décembre) (Tableau D.2. et figure D.26., droite). Le mois de juillet est celui qui se réchauffe le plus (+2,5°C), alors que le mois de mars se réchauffe très faiblement. Ces constats sont similaires à ceux présentés dans le papier de Xu *et al.* [2012], ce qui n'est pas étonnant puisque le modèle WRF est utilisé dans les mêmes conditions.

Le réchauffement passé (entre les périodes 1988-2009 et 1961-1987) a été plus fort au printemps qu'en été. Pour le réchauffement simulé, cette tendance s'inverse. Il est donc probable que les températures printanières n'augmentent que très peu d'ici à 2030-2048, au contraire des températures d'été qui vont encore augmenter.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Minimum	-1.22	1.45	0.59	1.49	1.56	1.67	5.1	2.61	1.54	0.79	1.16	3.59
1er Quartile	-0.06	0.62	0.53	1.29	1.53	1.34	3.58	1.76	1.32	0.16	0.4	4.66
Moyenne	0.62	0.66	-0.25	1.02	1.32	1.63	2.49	1.91	1.8	1.04	0.49	1.5
3ème Quartile	0.72	0.31	0.12	0.74	1.72	1.29	1.23	2.04	0.9	0.96	1.25	2.25
Maximum	0.43	-0.18	1.24	0.56	2.11	1.67	0.22	1.81	-0.88	0.61	1.37	1.71

Tableau D.2. Tableau des différences entre les périodes 2031-2048 et 1970-1987 pour les températures moyennes.

D.IV.1.B. CARACTÉRISTIQUES DU RÉCHAUFFEMENT

Les températures minimales augmentent moins fortement que les températures maximales (Figure D.25. et Xu *et al.*, 2012). Ainsi, l'amplitude diurne peut être modifiée par le fait que les Tn et les Tx n'augmentent pas de façon équivalente. Les amplitudes diurnes sont calculées pour chacune des mailles et pour les deux périodes considérées. Les distributions des amplitudes diurnes sur l'ensemble de l'année sont présentées dans la figure D.27. (droite). Pour les deux périodes, la distribution est unimodale, centrée sur 8°C. Pour la période passée, la gamme d'amplitudes diurnes situées entre 5° et 8°C est la plus représentée. Pour la période future, cette gamme d'amplitudes reste la plus représentée mais à une fréquence moindre.

Les amplitudes diurnes supérieures à 8°C sont plus représentées pour la période future que pour la période passée. L'augmentation des amplitudes diurnes est plus forte pour les mois de juillet à septembre (entre 0,5°C et 1°C). Notons que pour les mois de novembre et décembre, l'amplitude diurne diminue par rapport à la période 1970-1987.

Les variations des valeurs extrêmes simulées par le modèle ont été étudiées. Le nombre de jours pour lesquels la température minimale a été inférieure à 0°C montre, pour les deux périodes considérées et sur l'ensemble du territoire bourguignon (Figure D.25., gauche), une diminution par rapport au nombre de jours initial (période 1970-1987). Ce nombre de jours a diminué sur l'ensemble du territoire, mais cette diminution présente une variabilité spatiale. Le pourcentage de diminution va de 20 à 42 %. La diminution est plus forte au nord-est où les valeurs de diminution dépassent les 30 %. En revanche, elle est plus faible dans le sud de la région où cette diminution est systématiquement inférieure à 30 %. Sur le Morvan et le Seuil de Bourgogne, les diminutions du nombre de jours où la température minimale est descendue en dessous de 0°C sont plus faibles (entre 20 et 25 %). Sur la Côte viticole, cette diminution est d'environ 30 %.

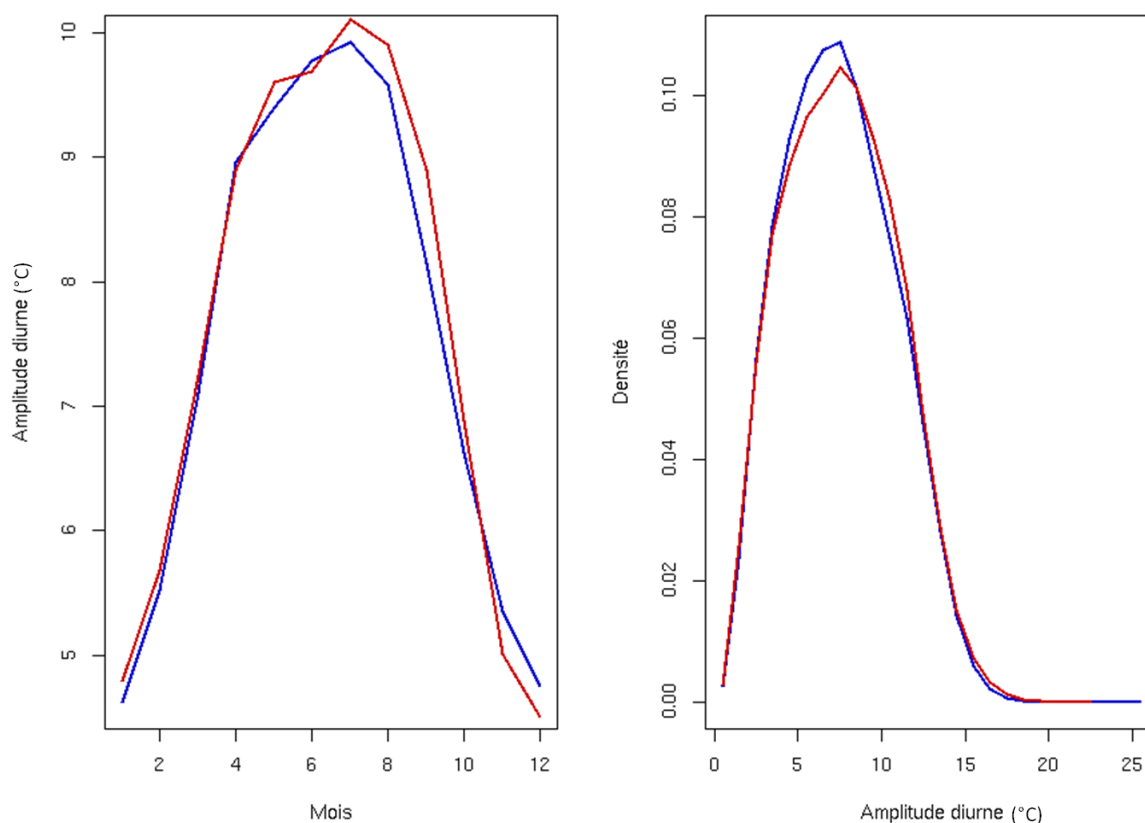


Figure D.27. Variations mensuelles de l'amplitude diurne et densité des amplitudes diurnes pour les périodes 1970-1987 (bleu) et 2031-2048 (rouge).

Comme attendu, le nombre de jours pour lesquels la température maximale dépasse 30°C augmente sur la période 2031-2048, comparativement à la période 1970-1987. L'augmentation est forte sur l'ensemble de la région et multiplie de deux à six le nombre initial de jours pour lesquels la température excédait 30°C (Figure D.28.). En plaine de Saône, le nombre de jours double pour la période 2031-2048. Les valeurs d'augmentation les plus fortes sont situées sur le Seuil de Bourgogne et à l'extrême nord-est de la Bourgogne où le nombre de jours est multiplié par six. Sur la Côte viticole, les facteurs d'augmentation vont de trois à cinq pour les zones plus impactées.

La diminution du nombre de jours de gel peut s'avérer bénéfique, d'autant plus qu'elle est associée à une diminution de l'aléa gélif tardif (*cf.* Annexe D.1.). En revanche, l'augmentation du nombre de jours chauds (essentiellement en période estivale) peut impliquer des problèmes d'efficacité de la photosynthèse, en raison de la plus grande transpiration de la vigne, et de rendement [Kliwer, 1977 ; Schultz, 2000].

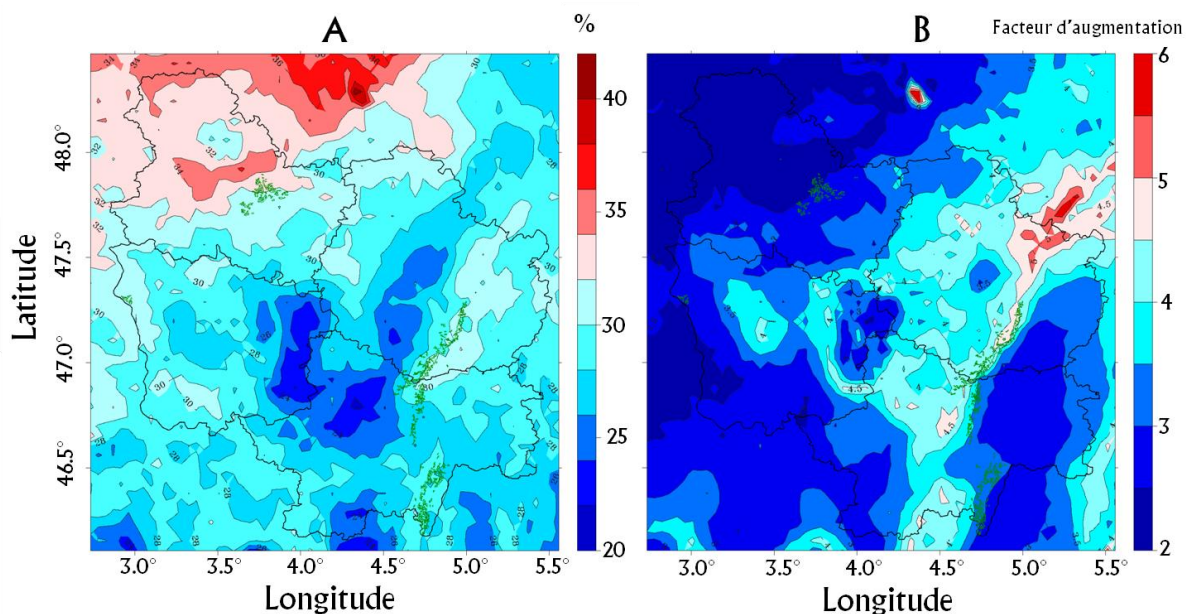


Figure D.28. Variations, entre les deux périodes, des nombres de jours pour lesquels la température minimale est inférieure à 0°C (à gauche) et la température maximale supérieure à 30°C.

D.IV.2. Impact du réchauffement sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne

Les températures simulées pour les périodes 1970-1987 et 2031-2048 sont utilisées en entrée dans les modèles phénologiques. L'augmentation des températures projetée par le modèle et le scénario SRES/A2 est de l'ordre de 1,5°C. L'impact de cette augmentation sur la phénologie du Pinot noir est identifié en analysant les différences entre les dates d'occurrences des stades principaux (floraison et véraison) par les modèles de Chuine, GFV et WE (D.IV.2.a). Le lien entre ces différences et les caractéristiques du réchauffement est développé dans la partie D.IV.2.b.

D.IV.2.A. EFFETS SUR LE DÉROULEMENT DU CYCLE

Les modèles phénologiques sont appliqués aux désagréments sur la période 2031-2048. Dans un premier temps, une étude des différences entre les résultats de cette période et la période 1970-1987 est réalisée pour évaluer l'impact du réchauffement sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne.

Les différences des moyennes spatiales des dates d'occurrences des stades de floraison et de véraison (une valeur par an) entre les deux périodes (Figure D.29.) montrent que tous les stades apparaissent avec des dates plus précoces pour la période future. Pour la floraison, les modèles de Chuine et GFV sont toujours en désaccord. Les dates de floraison simulées par le modèle de Chuine pour la période 2031-2048 sont très proches de celles simulées par le modèle GFV pour la période 1970-1987. L'avancement est de 10,3 jours pour le modèle de Chuine et de 6,8

jours pour le modèle GFV. La précocité de la floraison simulée est donc plus forte pour le modèle de Chuine que pour le modèle GFV. Garcia de Cortazar-Atauri [2006] a simulé une précocité de la floraison de dix-neuf jours à l'horizon 2070-2099 pour le Pinot noir en Bourgogne.

Pour la véraison, les trois modèles simulent la même gamme de dates d'occurrences (entre le deux cent vingtième [8 août] et le deux cent quarante-troisième [31 août] jour de l'année). Ces valeurs qui sont moyennées sur l'espace bourguignon, comprenant le Morvan entre autres, sont un peu plus tardives, d'environ huit jours, que celles observées sur la parcelle de Savigny-lès-Beaune pour la période 1988-2007 (*cf.* Chapitre C.II.2.). Notons également que la véraison observée à Savigny-lès-Beaune pour l'année 2003, exceptionnellement chaude pour la période 1988-2009, a eu lieu le 28 juillet, soit seulement onze jours plus tôt que la moyenne spatiale la plus précoce de la période 2031-2048 (8 août). Une forte précocité de l'occurrence de ce stade est également simulée, de 14,9 jours, 14,7 jours et 17,4 jours respectivement pour les modèles de Chuine, GFV et WE. Webb *et al.*, en 2007, avaient montré qu'une précocité de la véraison d'environ quinze à vingt-trois jours était simulée pour l'année 2030 sur une région au climat frais d'Australie, ce qui est très proche des valeurs obtenues pour la véraison dans notre étude. De même, Garcia de Cortazar-Atauri [2006] a simulé une précocité de la véraison d'au moins quarante jours à l'horizon 2070-2099 pour le Pinot noir en Bourgogne.

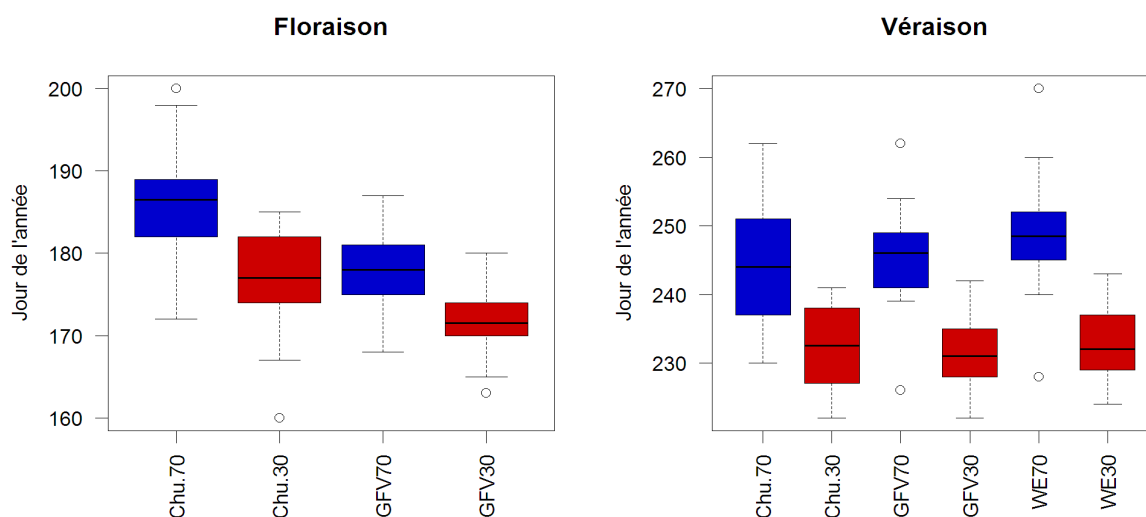


Figure D.29. Boxplot des dates de floraison et de véraison simulées par les trois modèles, moyennées sur l'ensemble de la grille à cinq kilomètres (une valeur par an), pour les périodes 1970-1987 (bleu) et 2031-2048 (rouge).

Le réchauffement agit clairement sur la date d'occurrence des stades phénologiques du Pinot noir en Bourgogne et modifie le cycle végétatif : un raccourcissement de la durée interstade de plus de cinq jours pour le modèle de

Chuine et de huit jours pour le modèle GFV en moyenne est simulé. Webb *et al.* [2007] avaient simulé un raccourcissement du cycle d'au moins dix jours pour l'année 2030 en Australie, ce qui est un peu plus fort que nos résultats. Garcia de Cortazar-Atauri [2006] a montré que la durée interstade (floraison-véraison) diminuera de vingt-et-un jours à l'horizon 2070-2099 pour le Pinot noir à Dijon.

Quelle est la variabilité de cette précocité des stades phénologiques ? Pour répondre à cette question, nous avons tout d'abord étudié la variabilité spatiale des dates simulées pour la période 2031-2048. Les répartitions spatiales des dates de floraison sont sensiblement les mêmes pour les deux modèles phénologiques (Figure D.30.). Les dates le plus tardives sont situées sur le Morvan et sur les régions plus en altitude au nord-est, sur le plateau de Langres et le Châtillonnais. Inversement, les dates les plus précoces se situent dans les zones de faible altitude. Les dates de floraison du modèle de Chuine sont plus tardives d'environ cinq jours par rapport aux dates de floraison simulées par le modèle GFV. Pour la véraison également (Figure D.31.), les patterns sont similaires et fortement liés à l'altitude.

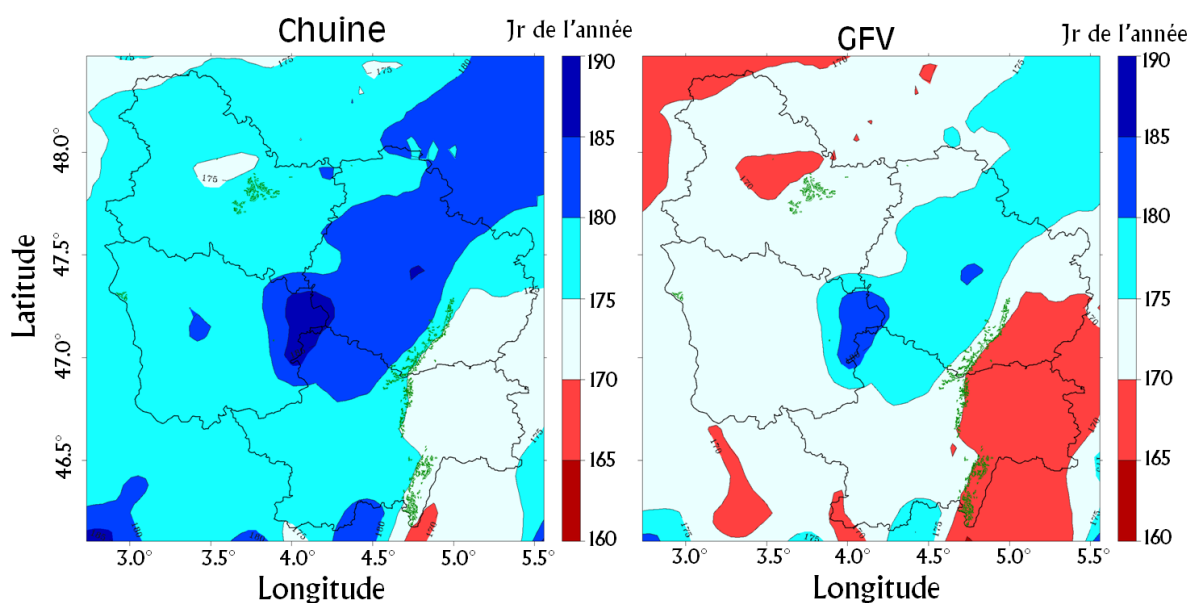


Figure D.30. Cartes des dates de floraison simulées par les modèles de Chuine (à droite) et GFV (à gauche) à partir des données de températures simulées par WRF sur la période 2031-2048.

Notons que les dates obtenues, pour les deux stades, sur le Morvan et le Seuil de Bourgogne sont équivalentes aux conditions de la Côte viticole de la période 1970-1987 (Figure D.22.). Il y a eu une migration altitudinale et latitudinale des conditions thermiques qui permettent d'avoir, sur les zones d'altitudes et au nord, des conditions similaires à celles de la période 1970-1987 pour des régions plus méridionales et d'une altitude plus faible.

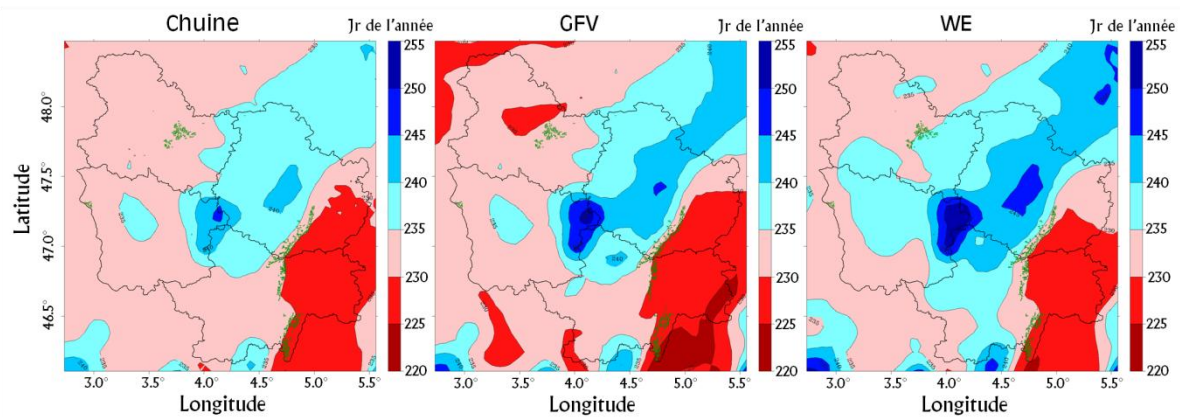


Figure D.31. Cartes des dates de véraison simulées par les modèles de Chuine (à gauche), GFV (au centre) et WE (à droite) à partir des données de températures simulées par WRF sur la période 2031-2048.

La structure spatiale de l'impact est également très marquée. Pour la floraison (Figure D.32.), le modèle de Chuine simule une précocité plus forte que le modèle GFV. La gamme de différences s'échelonne de huit à douze jours pour le modèle de Chuine et de cinq jours et demi à huit jours pour le modèle GFV. La répartition spatiale de ces différences montre que, pour les deux modèles, l'avancement du stade de floraison est plus fort, paradoxalement, sur le Morvan et le Seuil de Bourgogne, et plus faible en plaine de Saône. Ceci peut s'expliquer par le fait que les dates théoriques simulées sur le Morvan pour la période passée étaient très tardives et irréalistes d'un point de vue phénologique.

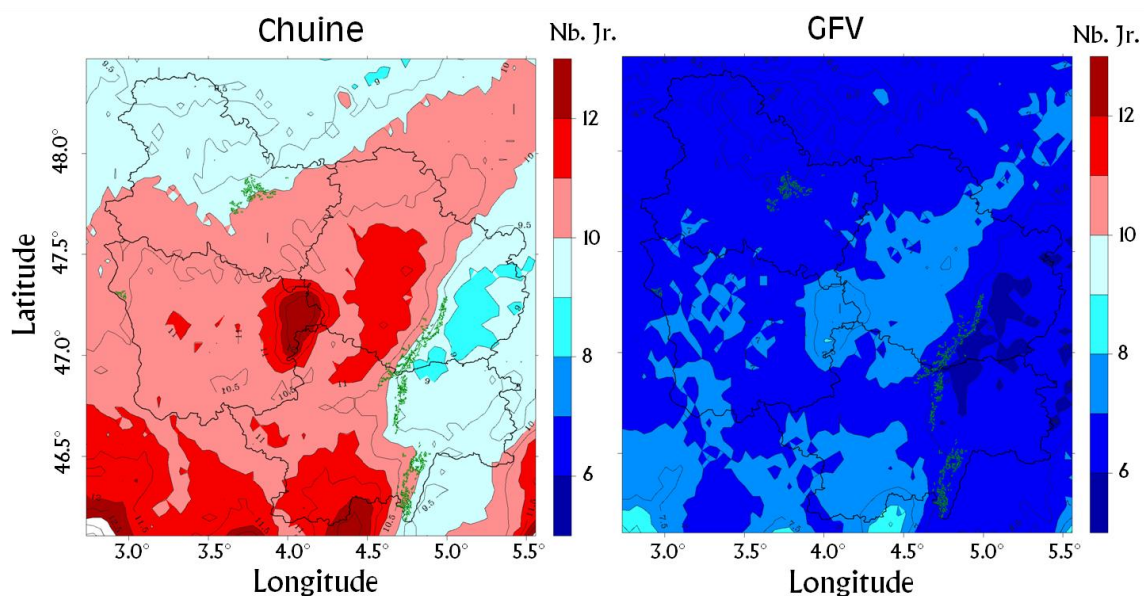


Figure D.32. Cartes des différences de dates de floraison simulées pour les périodes 1970-1987 et 2031-2048 par les modèles de Chuine (à gauche) et GFV (à droite) à partir des données de températures simulées par WRF.

En ce qui concerne la véraison (Figure D.33.), les trois modèles offrent des gammes de variations similaires : de dix jours à quarante jours de précocité selon le

lieu. Là encore, la variabilité spatiale est fortement liée à l'orographie avec des valeurs d'avancement plus fortes sur les régions d'altitudes et plus faibles en plaine de Saône.

Sur la Côte viticole, les dates de floraison sont comprises entre le cent soixante-neuvième (18 juin) et le cent soixante-quinzième (24 juin) jour de l'année pour le modèle GFV, et entre le cent soixante-treizième (22 juin) et le cent quatre-vingtième (29 juin) jour de l'année pour le modèle de Chuine. Les valeurs (véraison), en ce qui concerne la Côte viticole, s'échelonnent du deux cent trentième (18 août) au deux cent trente-huitième (26 août) jour de l'année pour les trois modèles.

La précocité simulée est comprise entre neuf et onze jours pour le modèle de Chuine et six ou sept jours pour le modèle GFV. Sur la Côte, les variations des dates de véraison simulées vont de dix à quinze jours pour le modèle de Chuine, autour de quatorze jours pour le modèle GFV et autour de seize jours pour le modèle WE. Ceci montre que les modèles convergent vers une précocité d'environ quinze jours.

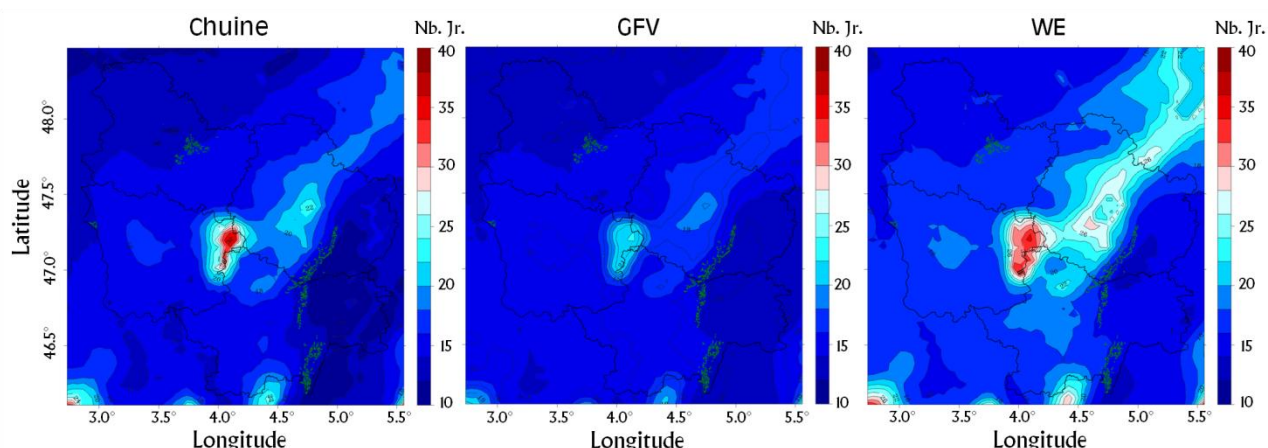


Figure D.33. Cartes des différences de dates de véraison simulées pour les périodes 1970-1987 et 2031-2048 par les modèles de Chuine (à gauche), GFV (au centre) et WE (à droite) à partir des données de températures simulées par WRF.

Les gammes de variations des dates de floraison et de véraison du modèle GFV montrent qu'en plus d'une précocité globale du cycle végétatif de la vigne, il existe un raccourcissement de la durée interstade (de la floraison à la véraison). De plus, les conditions sur la Côte viticole en 1980-1987 se retrouvent déplacées en altitude et en latitude pour la période 2031-2048.

D.IV.2.B. ANALYSE VIA LES CARACTÉRISTIQUES DU RÉCHAUFFEMENT

Sur la Côte viticole, la contraction du cycle va exposer la plante à des températures plus chaudes pendant la période de maturation. De plus, les caractéristiques du réchauffement, et plus particulièrement la multiplication par trois, au moins, du nombre de jours chauds ($>30^{\circ}\text{C}$), expose la vigne notamment à une demande évaporative accrue et donc à un stress hydrique plus important. Les modifications du

cycle de l'eau liées à ce réchauffement pourraient accroître ce stress hydrique et altérer la qualité des baies [Mc Carthy, 1997].

Au contraire, la diminution importante (~30 %) du nombre de jours pour lesquels la température est devenue inférieure à 0°C induit un aléa gélif plus faible, notamment en période de débourrement, si tant est que le débourrement ne soit pas anticipé en réponse au radoucissement de l'hiver.

La très forte précocité théorique simulée sur le Morvan, là où le réchauffement est *a priori* plus faible, peut s'expliquer par le fait que la température devient de moins en moins limitante, c'est-à-dire que la température de base (ou zéro de végétation) des modèles est atteinte beaucoup plus souvent que sur la période 1970-1987.

Dans cette partie D.IV., nous constatons une augmentation des températures moyennes supérieures à 1,2°C (1,35°C sur la Côte viticole). Cette augmentation est très proche de celle observée en comparant les périodes 1961-1987 et 1988-2009 (*cf.* Chapitre B.II.). De plus, ce réchauffement simulé estime que les températures estivales se réchaufferont plus fortement que les températures printanières ce qui l'inverse des conclusions du chapitre B.II.3. Il est donc fort probable que le réchauffement d'ici à la période 2031-2048 soit relativement plus fort pour les températures estivales et relativement faible pour les températures printanières.

Le nombre de jours de gel ($T_n < 0^\circ\text{C}$) diminue d'au moins 20 % sur toute la région. Au nord de la région, les valeurs de diminution dépassent les 30 %. Sur la Côte viticole, ces valeurs sont comprises entre 25 et 30 %. A l'inverse, le nombre de jours de fortes chaleurs ($T_x > 30^\circ\text{C}$) augmente de façon importante, supérieure à un facteur 2 sur l'ensemble de la Bourgogne. Sur la Côte, le facteur d'augmentation est compris entre 3 et 5.

A l'horizon 2031-2048, la floraison simulée est plus précoce de 10,3 jours selon le modèle de Chuine et de 6,8 jours selon le modèle GFV par rapport à la période 1970-1987. Cette précocité est très proche de celle observée entre les périodes 1961-1987 et 1988-2009 (*cf.* C.II.2.). Il en est de même pour la véraison, dont la précocité simulée est comprise entre 15 et 18 jours. La précocité observée entre les périodes 1961-1987 et 1988-2009 sont d'environ 15 jours.

Notons que la durée interstade simulée diminue également : de cinq jours pour le modèle de Chuine et de huit jours pour les modèles GFV et WE

Conclusions sur le Chapitre D

Classiquement, les impacts régionalisés du changement climatique sont conduits à partir de méthodes plus ou moins raffinées de désagrégation statistique du climat. Peu de travaux, à notre connaissance, sont basés sur des données climatiques issues d'une désagrégation dynamique longue et continue. Ce travail, par les résultats présentés, documente la faisabilité et la pertinence d'une telle approche.

De plus, ce travail a mobilisé des éléments produits précédemment dans la thèse, comme le jeu de données spatialisées utilisées pour l'évaluation du modèle WRF. Ce jeu de données a été lui-même élaboré à partir d'une méthode originale de travail. De même, les classifications issues des travaux du chapitre B ont ici été réutilisées au travers du jeu de données spatialisées.

L'évaluation des désagrégations climatiques du modèle WRF a révélé que ce dernier est apte à reproduire la variabilité interannuelle, le cycle annuel et la majorité de la variabilité spatiale des températures, en particulier pour les gradients altitudinaux négatifs.

Il produit cependant des biais froids sur les températures maximales et des biais chauds sur les températures minimales. Ces biais sont particulièrement dus à un lissage des valeurs extrêmes par WRF. Ces biais, quasi nuls sur les températures moyennes, n'altèrent pas la qualité de la simulation des dates d'occurrences des stades phénologiques qui restent cohérents avec ce qui a été étudié dans le chapitre C.

L'utilisation du modèle WRF pour quantifier et qualifier le réchauffement et son impact sur le Pinot noir en Bourgogne est pleinement justifiée. Sur le territoire bourguignon, les simulations pour la moitié du XXI^e siècle montrent ainsi un réchauffement moyen situé entre 1,2° et 1,5°C, très proche de celui observé entre les périodes 1961-1987 et 1988-2009. La principale différence se situe dans le fait que le réchauffement simulé est plus fort pendant les mois d'été alors qu'il était plus fort au printemps pour les observations. Ceci sous-entend que les températures maximales pourrait continuer d'augmenter d'ici à 2031-2048 alors que les températures printanières ne vont que très faiblement varier.

Le nombre de jours de gel ($T_n < 0^\circ\text{C}$) diminue d'au moins 20 % sur le territoire, alors que le nombre de jours chauds ($T_x > 30^\circ\text{C}$) est au moins multiplié par deux sur l'ensemble du territoire.

Sur la Côte viticole, le réchauffement est compris entre 1,3° et 1,4°C. La diminution du nombre de jours de gel est comprise entre 25 et 30 % et le nombre de jours chauds est multiplié par trois à cinq.

Nous simulons une précocité pour tous les stades phénologiques. Ainsi, à l'horizon 2031-2048, le stade de floraison sera plus précoce d'au moins sept jours (jusqu'à dix jours) et le stade de véraison sera plus précoce d'au moins quinze jours. La durée interstade (floraison-véraison) sera raccourcie d'au moins cinq jours, ce qui signifie que la plante aura cinq jours de moins pour produire des fruits équilibrés. Sur la Côte viticole, la précocité des stades de floraison et de véraison sera respectivement d'au moins six et quinze jours. Ces précocités simulées sont relativement proches de celles observées précédemment, ce qui laisse penser que l'impact du changement futur du réchauffement climatique, à l'horizon 2031-2048 sera relativement faible.

Enfin, la précocité des stades à l'horizon 2031-2048 et la perspective d'un nombre de jours chauds accru, permet de se poser les questions, entre autres, de la disponibilité en eau du sol par modification du cycle de l'eau et de la demande évaporative de la plante.





CONCLUSIONS

'En toute chose, il faut considérer la fin.'

J. de La Fontaine



CONCLUSIONS



'A propos de chaque désir, il faut se poser cette question : quel avantage en résultera-t-il si je ne le satisfais pas ?'

Extrait des Maximes, Epicure



L'objectif principal de cette thèse est de produire des informations sur les impacts du réchauffement climatique sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne. L'ambition est également que cette thèse soit une aide à la décision pour les professionnels de la filière viticole. Cette conclusion générale revient sur les principaux résultats, puis propose une synthèse et s'attachera à brosser des perspectives de ce travail.

CC.1. Principaux résultats des chapitres B, C et D

Cette thèse a permis : 1/ de documenter le changement climatique observé en Bourgogne (1961-2009) et de produire une base de données de températures quotidiennes (minimales et maximales) à une échelle fine de l'ordre de cinq kilomètres sur la période 1989-2009 (Chapitre B) ; 2/ de décrire et de préciser la relation entre la température et le Pinot noir en Bourgogne. Pour ce faire, trois types de modèles phénologiques ont été validés et leur sensibilité à l'augmentation de la température a été évaluée (Chapitre C) ; 3/ de projeter suivant le scénario A2 le changement climatique à l'échelle de la Bourgogne pour l'échéance 2031-2048. Ce climat, combiné aux modèles phénologiques, a permis de brosser une première image des impacts régionalisés sur le Pinot noir (Chapitre D).

CC.1.a. Le réchauffement climatique et la relation entre la température et le Pinot noir en Bourgogne

L'étude du changement climatique en Bourgogne a montré que la température actuelle est en moyenne supérieure d'un degré à un degré et demi à celle observée dans les années 1960. Cette étude a également abouti à la mise en évidence d'une rupture dans l'évolution temporelle des températures depuis 1961. Ce résultat montre clairement que le réchauffement n'a pas été constant sur la période. Cette rupture, statistiquement significative, se situe sur 1987 et 1988. La période avant 1987 est caractérisée par une stabilité des températures. Après cette rupture, une augmentation de la température est observée. Notons que le réchauffement est plus important pour les températures maximales que pour les températures minimales et pour les saisons printemps (MAM) et été (JJA).

Ce réchauffement s'accompagne logiquement d'une diminution du nombre de jours pour lesquels la température minimale est inférieure à 0°C (jours de gelées) et d'une augmentation du nombre de jours pour lesquels la température maximale dépasse les 30°C (jours de forte chaleur). Notons également que le nombre de jours pour lesquels la température minimale est descendue en dessous de -15°C, seuil

présentant potentiellement un risque de gel hivernal pour la vigne, est devenu quasi nul.

Spatialement, des variations de gradients de températures sont également mises en évidence. Pour les températures minimales, le gradient nord-ouest – sud-est (*sud-est – nord-ouest*) devient plus (*moins*) fréquent pour la période 1988-2009. Pour les températures maximales, les variations indiquent que le gradient sud-est – nord-ouest (*nord-ouest – sud-est*) est devenu moins (*plus*) fréquent.

Ce réchauffement a eu un impact sur la phénologie observée du Pinot noir. À Savigny-lès-Beaune, les stades de mi-débourrement (stade « pointe verte ») mi-floraison et mi-véraison montrent un gain de précocité de respectivement sept, neuf et vingt jours en moyenne (différences entre les sous périodes 1973-1987 et 1988-2008). La date de début des vendanges est également avancée d'environ quatorze jours. Par ailleurs, la variabilité interannuelle des principaux stades phénologiques et de la date de récolte a diminué après 1987.

CC.1.b. Élaboration d'une base de données de températures spatialisée à échelle fine sur la Bourgogne

Obtenir des champs de températures quotidiennes à haute résolution est essentiel afin d'analyser la géographie régionale du climat. À cette fin, la démarche développée dans ce travail s'est articulée en deux étapes principales: 1/ un regroupement des jours ayant des similitudes dans la répartition spatiale des températures minimales et maximales (par Classification Hiérarchique Ascendante) et 2/ une spatialisation des données de températures, elle-même réalisée en deux phases : a/ une régression linéaire multiple basée sur des paramètres morphométriques issus du MNT ré-échantillonné à cinquante mètres et b/ un krigeage des résidus de cette régression.

Globalement, la méthode de spatialisation produit des résultats plus satisfaisants que l'ensemble des autres méthodes, comme la régression linéaire multiple seule, ou le krigeage ordinaire seul. Pour certaines classes, notre méthode produit des résultats moins satisfaisants que, par exemple, la méthode des splines en plaques minces. La régression linéaire multiple identifie des paramètres morphométriques qui sont interprétables par la suite, ce que ne permet pas la méthode des splines.

Ainsi, les températures sont interpolées sur l'ensemble de la Bourgogne à maille de cinquante mètres. Ces données de haute résolution sont ensuite agrégées pour obtenir la base de données spatialisées à cinq kilomètres, directement exploitable pour l'évaluation du modèle climatique régional WRF.

CC.1.c. Validation et sensibilité des modèles phénologiques

Trois modèles phénologiques paramétrés pour le Pinot noir, basés sur les cumuls d'actions de la température, ont été évalués : 1/ le modèle de Chuine est une combinaison de trois modèles (un proposant une réponse linéaire de la vitesse de végétation de la vigne à la température pour le calcul de la date de mi-floraison, et deux proposant des réponses curvilignes pour la mi-véraison) ; 2/ le modèle GFV qui estime les dates de mi-floraison et de mi-véraison sur la base d'une relation linéaire entre cinétique de développement de la vigne et température de l'air ; 3/ le modèle WE qui décrit la relation vitesse de développement de la vigne/température par une courbe en cloche présentant un optimum thermique et deux bornes limitantes.

Les résultats des comparaisons intermodèles ont montré que le modèle de Chuine donne des dates systématiquement plus tardives que le modèle GFV pour la floraison (>6 jours). Pour la véraison, les deux modèles présentent des différences de l'ordre de cinq jours mais pas de biais systématique. Le modèle de Chuine est plus proche du modèle WE que du modèle GFV en ce qui concerne la véraison. Enfin, les dates produites par les modèles WE et GFV sont relativement proches (RMSE < 3 jours et $r^2 = 0,95$) les unes des autres.

La comparaison entre les dates d'occurrences des stades phénologiques produites par les modèles et celles observées à la parcelle de Savigny-lès-Beaune montrent que le modèle de Chuine présente un biais tardif de 5,7 jours mais explique de façon cohérente la variabilité interannuelle ($r^2 = 0,89$). Le modèle GFV explique de façon moins satisfaisante la variabilité interannuelle ($r^2 = 0,77$), mais n'a pas de biais systématique (0,7 jours).

Concernant la véraison, le modèle de Chuine est celui qui reproduit de la façon la moins satisfaisante la variabilité interannuelle ($r^2 = 0,71$, contre 0,81 pour GFV et 0,84 pour WE). En revanche, il présente un biais quasi nul (-0,3 jour), alors que les autres modèles ont un biais plus fort (-1,5 jours pour GFV et -2,9 jours pour WE). Notons que les trois modèles reproduisent correctement le saut de 1987-1988, que ce soit pour les dates absolues d'occurrences des stades phénologiques ou la variabilité interannuelle, qui, comme observé à la parcelle, tend à diminuer après 1987.

En conditions plus chaudes, le modèle de Chuine tend à se rapprocher du modèle GFV en ce qui concerne la prévision des dates de mi-floraison, mais s'en éloigne en termes de variabilité interannuelle. Il s'éloigne de façon importante des modèles GFV et WE pour la véraison. Cependant, ces différences augmentent lorsque la température moyenne augmente de 3°C, voire 5°C, ce qui reste inférieur au réchauffement prévu pour la période 2031-2048. De même, les modèles WE et GFV

produisent des dates d'occurrences des stades phénologiques de plus en plus éloignées les unes des autres. L'accroissement de la température tend mécaniquement à réduire la variabilité interannuelle des dates de mi-floraison et de mi-véraison pour l'ensemble des modèles, en raison d'un cumul plus rapide des actions de températures quotidiennes.

CC.1.d. Régionalisation du climat par le modèle climatique régional WRF

La validation des simulations réalisées avec le modèle WRF sur la période 1989-2009 a été effectuée (Chapitre D) à partir des données observées préalablement interpolées à maille de cinquante mètres par régression-krigeage, puis agrégées à cinq kilomètres (Chapitre B). La variabilité interannuelle des températures (minimales, moyennes et maximales) est reproduite de façon satisfaisante : les r^2 sont compris entre 0,58 et 0,69. Mais il existe un double biais de WRF : froid pour les températures maximales (de l'ordre de $-0,75^\circ\text{C}$) et chaud pour les températures minimales (de l'ordre de $+0,75^\circ\text{C}$). Le biais chaud pourrait être imputable à la difficulté qu'a WRF à simuler certaines situations nocturnes. Le biais froid est probablement dû aux données d'entrées du modèle, les réanalyses ERA-INTERIM. Ces biais s'annulent pour les températures moyennes.

La variabilité intrasaisonnière, portée essentiellement par le cycle annuel, est bien reproduite par le modèle ($r^2 = 0,99$). Il existe malgré tout un léger biais froid pour les mois de mars et avril.

Géographiquement et aux biais près, le modèle simule de façon satisfaisante la répartition des températures minimales, moyennes et maximales. Il apparaît également que WRF lisse les extrêmes de températures en les sous-évaluant. Le cas des inversions thermiques est assez mal reproduit par le modèle WRF. Les autres types de répartitions spatiales des températures minimales et maximales sont reproduits de façon convenable, en particulier les cas de gradient altitudinaux négatifs.

La cohérence spatiotemporelle entre le modèle WRF et les données spatialisées, c'est-à-dire la façon dont le modèle WRF reproduit la répartition spatiale des températures dans le temps, est satisfaisante, hormis dans ces situations d'inversion thermique.

Nous avons également montré que les simulations produites permettent de reproduire les dates de mi-floraison et de mi-véraison lorsqu'on utilise les températures produites par WRF dans les modèles phénologiques de Chuine, GFV et

WE (période 1970-1987). Malgré le biais tardif du modèle de Chuine pour la prévision de la date de mi-floraison, accentué par le fait que la maille à cinq kilomètres moyenne les conditions topographiques locales sur la Côte viticole qui ne sont pas forcément représentatives des conditions à la parcelle, les dates issues des trois modèles phénologiques sont relativement proches des observations. La variabilité interannuelle des dates d'occurrence des principaux stades phénologiques est également bien reproduite.

CC.2. Impact projeté du réchauffement climatique en Bourgogne à l'horizon 2031-2048

L'augmentation de la température en Bourgogne a été caractérisée sur la base de simulations climatiques du modèle Arpège-Climat du scénario SRES/A2 désagrégées dynamiquement par le modèle WRF.

Sur l'ensemble du territoire, pour la période future 2031-2048, la température moyenne augmenterait de 1,2°C à 1,5°C. Globalement, cette augmentation serait plus forte sur la plaine de Saône et plus faible sur le Morvan et le Seuil de Bourgogne. Sur la Côte viticole, l'augmentation des températures serait comprise entre 1,3°C et 1,4°C. Ce réchauffement est très proche du réchauffement observé entre les périodes 1961-1987 et 1988-2009. Il est probable que le réchauffement des températures en Bourgogne se matérialise par des paliers successifs et que nous sommes potentiellement sur un palier qui va de 1988 au milieu du XXI^e siècle, le prochain palier se situant probablement après 2050. De ce point de vue, la majeure partie du réchauffement du palier actuel a eu lieu entre les années 1988 et 2009.

De plus, ce réchauffement serait plus fort pendant les mois de juin à septembre (>1,5°C), ce qui est différent du changement observé. En effet, entre la période 1961-1987 et la période 1988-2009, c'est le printemps qui se réchauffait plus fortement que l'été. Ceci sous-entend que le réchauffement futur sera moindre pour le printemps, puisqu'il a *a priori* déjà eu lieu en grande partie, et plus important pour l'été.

De même, l'amplitude diurne augmenterait de façon plus importante sur ces mêmes mois (>0,5°C). Le nombre de jours pour lesquels la température minimale est inférieure à 0°C diminuerait d'au moins 20 % sur l'ensemble du territoire (25-30 % pour la Côte viticole). De même, le nombre de jours pour lesquels la température maximale est supérieure à 30°C augmenterait d'au moins 200 % sur l'ensemble du territoire (300 à 500 % sur la Côte viticole).

Finalement, la phénologie du Pinot noir est d'ores et déjà fortement impactée par le réchauffement simulé pour l'horizon 2031-2048. La précocité de la floraison est

simulée entre 10,3 et 6,8 jours selon le modèle, ce qui sous-entend une floraison autour du 20 juin. Cette valeur de précocité est très proche de celle déjà observée sur les variations actuelles et passées de la phénologie, ce qui reste cohérent avec le fait que le réchauffement des vingt dernières années, plus fort au printemps, a déjà impacté fortement ce stade. Sur la Côte, l'ordre de grandeur de la précocité est la même que sur le reste de la Bourgogne (entre six et dix jours selon le modèle).

En ce qui concerne la véraison, les modèles de Chuine et WE s'accordent pour estimer la précocité à quinze jours. Le modèle GFV prévoit une précocité plus forte, de 17,4 jours. Cette précocité sous-entend une date de véraison avancée à la mi-août. Ici aussi, cette précocité simulée est proche de celle observée entre les périodes 1961-1987 et 1988-2009. Sur la Côte viticole, les modèles diffèrent : entre dix et quinze jours de précocité simulée par le modèle de Chuine, environ quatorze jours selon le modèle GFV et jusqu'à seize jours pour le modèle WE. De plus, notons que la durée interstade diminue de cinq à huit jours selon les modèles soit environ 10 % de moins que la durée actuelle. Ceci ouvre la voie à divers questionnements.

CC.3. Perspectives de recherches

Ce travail de thèse a permis d'ouvrir la voie sur diverses thématiques dont l'intérêt grandit au Centre de Recherches de Climatologie et plus largement dans les communautés de géographes, d'agroclimatologues et de climatologues.

1/ Approfondir la méthode de spatialisation de données de températures à échelle fine

La méthode de spatialisation mise en place lors de ce travail de thèse mériterait d'être appliquée à d'autres régions. De plus, il serait intéressant d'améliorer la résolution spatiale du jeu de données initiales en mettant en place des capteurs de températures sur des espaces restreints et d'en intégrer les données dans le choix des régresseurs et de leurs coefficients.

De même, il aurait été intéressant de tester, pour chaque jour de chaque classe, si le choix des régresseurs était le même que celui fait sur la moyenne de la classe. La liste des régresseurs pourrait être étendue (*i.e.* couvert végétal).

2/ Implication du réchauffement climatique dans le choix des variables d'intérêt prises en compte par la modélisation phénologique

Les modèles phénologiques utilisés s'appuient sur un cumul dont la date de début a été ajustée statistiquement (minimisation de l'erreur de prédiction lors du paramétrage). L'emploi d'une date fixe éloigne le modèle de la réalité physiologique :

l'effet positif des températures a lieu dès la levée de dormance des bourgeons latents de la vigne, cette dernière étant probablement déclenchée par une séquence de températures basses en période de repos végétatif de la vigne. Il est fort probable que la performance des modèles phénologiques employée pourrait être à l'avenir améliorée en intégrant une estimation de la date de levée de dormance à partir de laquelle le cumul des actions thermiques (telles que définies dans les modèles phénologiques employés dans le cadre de cette thèse) pourrait débiter. Notons toutefois qu'à l'heure actuelle, la connaissance scientifique concernant les mécanismes de levée de dormance reste encore incomplète.

De plus, la réduction de la période interstade va induire un temps plus court pour le développement de la plante et des baies. Par ailleurs, l'avancée de la date de mi-véraison entraîne nécessairement une maturation en période plus chaude, et probablement plus sèche, non sans conséquences pour les caractéristiques physico-chimiques du raisin. La recherche après cette thèse devra tenir compte de ces aspects.

Le fait de traiter uniquement de la relation entre la température et la plante est assez réducteur. Si actuellement les précipitations en Bourgogne ne sont pas un facteur limitant pour la vigne, à l'horizon 2031-2048 l'augmentation du nombre de jours pour lesquels la température dépasse 30°C pose la question de l'augmentation des besoins en eau de la plante et du stress hydrique associé. En outre, l'évolution de la pression phytosanitaire, dépendant des conditions thermiques et hydriques (pluviométrie et hygrométrie) est un problème agronomique, environnemental et sanitaire majeur pour la vitiviniculture septentrionale, dont le devenir sera sensible à l'évolution climatique projetée.

Les pratiques culturales et le matériel végétal (porte-greffe, clones, cépages) peuvent limiter l'impact de ce réchauffement prévu. Si cet aspect est au-delà des objectifs fixés par la présente thèse, il sera intéressant à l'avenir de quantifier dans quelle mesure ces pratiques peuvent limiter l'effet du changement climatique sur la production viticole.

3/ Modélisation climatique à long terme à une maille plus fine que cinq kilomètres

Les perspectives concernant la modélisation climatique concernent avant tout la période climatique mise en avant. Dans cette thèse, nous avons choisi la période 2031-2048. À cette échéance, les différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre n'impactent que très peu les conditions climatiques projetées. Si nous avons fait le choix du scénario A2, il est probable que d'autres scénarios eussent induit une simulation par WRF de conditions thermiques semblables. Cette période de moyen terme est scrutée avec attention par les agronomes et les acteurs sociétaux de la

profession vitivinicole tout particulièrement, car les plantations actuelles seront en pleine production à la fin de la première moitié du XXI^e siècle.

Néanmoins, la perspective de l'étude de l'évolution du climat à plus long terme n'est pas sans intérêt : elle permettrait notamment d'identifier de manière probablement plus nette les tendances futures des structures climatiques sur la région d'étude et de révéler l'impact de l'évolution socioéconomique mondiale sur le climat à méso-échelle. La recherche portant sur l'adaptation du système vitivinicole à l'élévation de la température nécessite une perspective climatique sur le long terme pour identifier les modalités d'adaptation possible à des conditions thermiques modifiées.

La perspective d'évaluer l'impact du changement climatique sur le Pinot noir à l'horizon 2100 obligerait toutefois à 1/ établir différentes simulations en fonction des scénarios d'émission de gaz à effet de serre et 2/ prendre en considération les différences grandissantes entre les modèles en fonction de la valeur d'augmentation de la température.

En dépit de la résolution spatiale relativement haute pour la simulation dynamique du climat futur atteinte dans le cadre de la présente thèse, la maille de cinq kilomètres peine à reproduire de manière satisfaisante la phénologie de la vigne, en raison de la position topographique du vignoble bourguignon. Au regard de la technologie actuelle (puissance de calcul et capacité de stockage informatiques) il est difficile de simuler le climat sur de longues périodes à une résolution spatiale satisfaisante pour intégrer les effets topoclimatiques auxquels est soumis la viticulture en Bourgogne. D'autres approches, basées sur des méthodes statistiques, permettraient à l'avenir de désagréger le climat simulé par le modèle WRF dans le cadre de la présente thèse à des échelles plus fines.





Bibliographie



-
- ALEXANDERSSON H. and MOBERG A., 1997. Homogenisation of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends, *Int. J. Clim.*, **17**, 25–34.
- ALLEWELDT G., 1963, In : COSTACURTA A. et ROSELLI G., 1980. Critères climatiques et édaphiques pour l'établissement des vignobles, *Bulletin de l'O.I.V.*, **596**, pp. 773-786.
- AMERINE M. A. and WINKLER A. J., 1944. Composition and quality of musts and wines of California grapes, *Hilgardia*, **15**, n°6.
- ANGOT A., 1919. Régime pluviométrique de la France, *Annales de Géographie*, **151**, pp. 1-27.
- 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)**, pp. 4-6.
- BAILLOD M. et BAGGIOLINI M., 1993. Les stades repères de la vigne, *Revue Suisse de Viticulture, d'Arboriculture et d'Horticulture*, **25(1)**, pp. 7-9.
- BELLIA S., DOUGUEDROIT A. et SEGUIN B., 2007. Impact du réchauffement sur les étapes phénologiques du développement du Grenache et de la Syrah dans les Côtes du Rhône et les Côtes de Provence (1976-2000), Colloque *Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ?*, Dijon-Beaune.
- BÉNICHOU P., 1985. *Classification automatique de configurations météorologiques sur l'Europe occidentale*, Météotologie Nationale, Paris, 87 p.
- BERGQVIST J., DOKOOZLIAN N. and EBISUDA N., 2001. Sunlight exposure and temperature effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the central San Joaquin Valley of California, *Am. J. Enol. Vitic.*, **52(1)**, 1-7.
- BOER E. P. J., DE BEURS K. M. and HARTKAMP A. D., 2001. Kriging and thin plate splines for mapping climate variables, *JAG*, **3(2)**, 146-154.
- BONNARDOT V., 1996. *Le climat et la vigne en Bourgogne orientale*, thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 239 p.
- BONNEFOY C., 2008. *Apport du modèle climatologique méso-échelle WRF à l'étude des relations climat-vigne en Bourgogne*, Mémoire de MASTER, Université de Bourgogne, 54 p.
- BUTTROSE M. S., 1969, In : GALET P., 2000. *Précis de viticulture*, 7e édition, 400 p.
- BUTTROSE M. S., 1970, In : GALET P., 2000. *Précis de viticulture*, 7e édition, 400 p.
- BUTTROSE M. S. and HALE C. R., 1973. Effect of temperature on development of the grapevine inflorescence after bud burst, *Am. J. Enol. Vitic.*, **24(1)**, 14-16.
- BUTTROSE M. S., HALE C.R. and KLIOWER W. M., 1971. Effect of temperature on the composition of 'Cabernet sauvignon' berries, *Am. J. Enol. and Vitic.*, **22(2)**, 71-75
- CASSOU C., TERRAY L., HURRELL J. W. and DESER C., 2003. North Atlantic winter climate regimes: spatial asymmetry, stationarity with time and oceanic forcing, *Journal of Climate*, **17**, 1 055-1 068.
-

CASTEL T., XU Y., RICHARD Y., POHL B., CRETAT J., THEVENIN D., CUCCIA C., BOIS B., and ROUCOU P. 2010. Assessment of dynamic downscaling of the continental East French regional climate at high resolution using the ARW/WRF model, *Actes du colloque de l'AIC*, Rennes, pp. 107-112.

CAUSSINUS H., and MESTRE O., 2004. Detection and correction of artificial shifts in climate series, *Appl. Statist.*, **53(3)**, 405–425.

CHABIN J.-P. *et al.*, 1984, In : POCCARD I., CHABIN J.-P., RICHARD Y., 2001. Une nouvelle approche de la forêt bourguignonne : intérêt et limites de l'utilisation des satellites, La forêt dans tous ses états : de la Préhistoire à nos jours, *Actes du colloque de l'Association interuniversitaire de l'Est*, Presses universitaires de Franche-Comté, pp. 155-172.

CHABIN J.-P., 1985, In : POCCARD I., CHABIN J.-P., RICHARD Y., 2001. Une nouvelle approche de la forêt bourguignonne : intérêt et limites de l'utilisation des satellites, La forêt dans tous ses états : de la Préhistoire à nos jours, *Actes du colloque de l'Association interuniversitaire de l'Est*, Presses universitaires de Franche-Comté, pp. 155-172.

CHABIN J.-P., MADELIN M. et BONNEFOY C., 2007. Les vignobles beaunois face au réchauffement climatique, *Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ?*, Dijon et Beaune, 28-30 mars 2007, pdf.

CHUINE I. and BEAUBIEN E. G., 2001. Phenology is a major determinant of tree species range, *Ecology Letters*, **4**, 500-510.

CHUINE I., YIOU P., VIOVY N., SEGUIN B., DAUX V. and LE ROY LADURIE E., 2004. Grape ripening as a past climate indicator, *Nature*, **432**, 289-290.

COLIN J., 2011. *Étude des événements précipitants intenses en Méditerranée : approche par la modélisation climatique régionale*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, 303 p.

COSTACURTA A. et ROSELLI G., 1980. Critères climatiques et édaphiques pour l'établissement des vignobles, *Bulletin de l'O.I.V.*, **596**, pp. 773-786.

CRETAT J., RICHARD Y., POHL B., ROUAULT M., REASON C. and FAUCHEREAU N., 2010. Recurrent daily rainfall patterns over South Africa and associated dynamics during the core of the austral summer, *Int. J. Climatol.*, DOI: 10.1002/joc.2266.

CUCCIA C., 2008. *Changements climatiques observés en Bourgogne depuis 1961 : étude des variations de températures et de précipitations*, Mémoire de MASTER, 52 p.

CUCCIA C. et BOIS B., 2010. Agrégation des données de températures en Bourgogne, *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, juin 2010, pp. 261-273.

DALY C., 2006. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets, *Int. J. Climatol.*, **26**, 707-721

-
- DAUX V., YIOU P., LE ROY LADURIE E., MESTRE O., CHEVET J.-M. et l'équipe d'OPHELIE, 2007. Température et dates de vendanges en France, Colloque *Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ?*, Dijon-Beaune, 10 p.
- DÉQUÉ M., 1999. *Documentation ARPEGE-CLIMAT, Tech. report*, Centre National de Recherche Météorologiques, Météo-France, Toulouse, France.
- DÉQUÉ M., DEVRETON C., BRAUN A. and CARIOLLE D., 1994. The climate version of the ARPEGE-IFS: a contribution of French community climate modeling, *Clim Dyn*, **10**, 249-266.
- DIAZ-NIETO J., and WILBY R. L., 2005. A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom, *Climatic Change*, **69**, 245-268.
- DUCHENE E., HUARD F., DUMAS V., SCHNEIDER C. and MERDINOGLU D, 2010. The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Clim Res*, **41**, 193-204
- DUCHÊNE E. and SCHNEIDER C., 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace, *Agron. Sustain. Dev.*, **25**, 93-99.
- DUHAMEL DU MONCEAU H., 1758, In : GALET P., 2000. *Précis de viticulture*, 7e édition, 400 p.
- EFRON B., 1979. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife, *Ann. Statist.*, **7(1)**, 1-26.
- EICHHORN K. W. and LORENZ D.H., 1977. Phönologische entwicklungsstadien der rebe, *Nachrichtenbl. Dtsch. Pflanzenschutzd. Braunschweig*, **29**, 119-120.
- FOWLER H.J., BLENKINSOP S. and TEBALDI C., 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling, *Int. J. Climatol.*, **27**, 1 547-1 578.
- FREGONI M., 1973, In : FREGONI C. et PEZZUTTO S., 2000. Principes et premières approches de l'indice bioclimatique de qualité de Fregoni, *Progrès Agricole et Viticole*, **117(18)**, pp. 390-396.
- FREGONI C. et PEZZUTO S., 2000. Principes et premières approches de l'indice bioclimatique de qualité de Fregoni, *Progrès Agricole et Viticole*, **117(18)**, pp. 390-396.
- GADILLE R., 1967. *Le vignoble de la Côte bourguignonne : fondements physiques et humains d'une viticulture de haute qualité*, thèse de Doctorat d'État, Publications de l'Université de Dijon, Les Belles Lettres, Paris, 652 p.
- GALET P., 2000. *Précis de viticulture*, 7e édition, 400 p.
- GARCIA DE CORTAZAR-ATAURI I., 2006. *Adaptation du modèle STICS à la vigne (Vitis vinifera L.). Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France*, Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 349 p.
- GARCIA DE CORTAZAR-ATAURI I., DAUX V., GARNIER E., RIOU P., VIOVY N., SEGUIN B., BOURSQUOT J. M., PARKER A. K., VAN LEEUWEN C. and CHUINE I., 2010. Climate reconstructions from grape harvest dates: methodology and uncertainties, *The Holocene*, **20(4)**, 599-608
-

-
- GERSTENGARBE F. W. and WERNER P. C., 2008. A short update on Koeppen climate shifts in Europe between 1901 and 2003, *Climatic Change*, **92**, 99-107.
- GIEC, 2001. *Climate Change, 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of the Working Group II to the third assessment report of IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, 273-313.
- GIEC, 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, GIEC, Genève, Suisse, 103 p.
- GIORGI F., 1990. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *Journal of climate*, **3**, 941-963.
- GIORGI F., 2006. Regional climate modeling: status and perspectives, *J. Phys.*, **139**, 101-118.
- GLADSTONES J., 1992. *Viticulture and Environment*, Winetitles, Adelaide, 310 p.
- GONG X. and RICHMAN M. B., 1995. On the application of cluster analysis to growing season precipitation data in North America East of the Rockies. *Journal of Climate*, **8**, 897-931.
- HALL A. and JONES G. V., 2009. Effect of potential atmospheric warming on temperature-based indices describing Australian winegrape growing conditions, *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **15**, 97-119.
- HAMED K. H., 2008. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis, *Journal of Hydrology*, **349**, 350-363.
- HANSEN J., SATO M., RUEDY R., LO K., LEA D. W. and MEDINA-ELIZADE M., 2006. Global temperature change, *PNAS*, **103(39)**, 14 288-14 293.
- HARTKAMP A. D., DE BEURS K., STEIN A. and WHITE J. W., 1999. Interpolation techniques for climate variable, *NRG-GIS Series 99-01*, Mexico, D.F.: CIMMYT, 26 p.
- HASHMI M. Z., SHAMSELDIN A. Y. and MELVILLE B. W., 2011. Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed, *Stoch Environ Res Risk Assess*, **25**, 475-484.
- HENDRICKSON J., BALL M. C., WOOD J. T., CHOW W. S. and FURBANK R. T., 2004. Low temperature effects on photosynthesis and growth of grapevine, *Plant Cell Environ*, **27**, 795-809.
- HENGL T., HEUVELINK G. and ROSSITER D., 2007. About regression-kriging: From equations to case studies, *Computer & Geosciences*, **33**, 1 301-1 315.
- HENGL T., HEUVELINK G., PERCEC TADIC M. and PEBESMA E., 2012. Spatio-temporal prediction of daily temperatures using time-series of MODIS LST images, *Theor. Appl Clim*, **107**, 265-277.
- HIJMANS R. J., CAMERON S. E., PARRA J. L., JONES P. G. and JARVIS A., 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas, *Int J Climatol*, **25**, 1 965-1 978.

-
- HOUZÉ M.-L., 2006. *Prévision et spatialisation des concentrations en ozone troposphérique en Bourgogne*, Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 293 p.
- HUGLIN M. P., 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole, *C. R. Aca. Agric.*, **1** 117-1 126.
- HUGLIN P. and SCHNEIDER C., 1998. *Biologie et écologie de la vigne*, Tec & Doc-Lavoisier, Paris, 370 p.
- IGOUNET O., BALDY C., ROBIN J. P., BOULET J. C., SANON M. et SUARD B., 1995. Effets de revêtements artificiels du sol sur la température à l'intérieur des grappes de raisins au cours de la maturation, *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **29**, 131-142.
- JACKSON D. I. and CHERRY N. J., 1988. Prediction of a district's grape-ripening capacity using a Latitude-Température Index (LTI), *Am. J. Enol. Vitic.*, **39**, (1), 19-28.
- JOLY D., BOIS B. et ZAKSEK K., 2009. Hiérarchie des facteurs topographiques qui commandent la variation spatiale des températures, *Journée de Climatologie Climat et société : climat et relief*, Besançon, mars 2009.
- JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVAILHES J., HILAL M. and WAVRESKY P., 2010. Temperature interpolation based on local information: the example of France, *Int. J. Climatol.*, **31**, 2 141-2 153.
- JOLY D., CARDOT H. and SCHAUMBERGER A., 2012. Improving spatial temperature estimates by resort to time autoregressive processes, *Int. J. Climatol.*, DOI: 10.1002/joc.3601.
- JONES G. V., 2003. Climate and Terroir: Impacts of Climate Variability and Change on Wine, *Geoscience Canada*, November 2, 14 p.
- JONES G. V., 2004. Making wine in a changing climate, *Geotimes*, August 2004, 24-28.
- JONES G. V., 2006. Climate change and wine: observations, impacts and future implications, *Wine Industry Journal*, **21(4)**, 21-26.
- JONES G. V., 2007. Climate Change: observations, projections and general implications for viticulture and wine production, *Economics Department Working paper*, n°7, 17 p.
- JONES G. V. and DAVIS R E, 2000. Climate influences on Grapewine phenology, Grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France, *Am. J. Enol. Vitic.*, **51(3)**, 249-261.
- JONES G. V., DUCHÊNE E., TOMASI D., YUSTE J., BRASLAVSKA O., SCHULTZ H., MARTINEZ C, BOSO S., LANGELLIER F., PERRUCHOT C. and GUIMBERTEAU G., 2005a. Changes in European winegrape phenology and relationships with climate. XIV *International GESCO Viticulture Congress*, Geisenheim, Germany, 23-27 August, 54-61.
- JONES G. V., MORIONDO M., BOIS B., HALL A. and DUFF A, 2009. Analysis of the spatial climate structure in viticulture regions worldwide, OIV, 8 p.
- JONES G. V., WHITE M. A., COOPER O. R. and STORCHMANN K., 2005b. Climate change and global wine quality, *Climatic Change*, **73**, 319-343.
-

-
- KALKSTEIN L. S., TAN G. and SKINDLOV J. A., 1987. An evaluation of three clustering procedures for use in synoptic climatological classification, *Journal of climate and applied meteorology*, **26**, 718-730.
- KELLER M., TARARA J. M. and MILLS L. J., 2010. Spring temperatures alter reproductive development in grapevines, *Aust J Grape Wine Res*, **16**, 445-454.
- KEMP P. R., CORNELIUS J. M. and REYNOLDS J. F., 1994. Temporal discontinuities in precipitation in the central north American prairie, *Int. Jour. Of Climatology*, **14**, 539-557.
- KENDALL M., 1975. *Multivariate Analysis*, Charles Griffin & Company, London.
- KINGUMBI A., BERGAOUI Z., BOURGES J., HUBERT P. et KALLEL R., 2000, In : SERVAT E. et ALBERGEL J., 2001. Hydrologie des régions méditerranéennes, UNESCO ; IRD, *Séminaire International, Montpellier (FRA)*, pp. 341-350.
- KLIEWER W. M., 1977. Effect of High Temperatures during the Bloom-Set Period on Fruit-Set, Ovule Fertility, and Berry Growth of Several Grape Cultivars, *Am. J. Enol. Vitic.*, **28**, 215-222.
- KLIEWER W. M. and LIDER L. A., 1970. Effects of day temperature and light intensity on growth and composition of *Vitis vinifera* L. fruits, *Journal of the American Society of Horticultural Science*, **95**, 766-769.
- KÖPPEN W., 1936. *Das geographische System der Klimate*. In: KÖPPEN W, Geiger R (eds) *Handbuch der Klimatologie*, Bd. Gebr Bornträger I. Berlin, pp. C1-C44.
- KRIEDEMANN P. E., 1968. Photosynthesis in vine leaves as a function of light intensity, temperature, and leaf age, *Vitis*, **7**, 213-220.
- LAGET F., TONDUT J. L., DELOIRE A. and KELLY M. T., 2008. Climate trends in a specific mediterranean viticultural area between 1950 and 2006, *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, **42(3)**, 113-123.
- LE ROY LADURIE E., DAUX V. et LUTHERBACHER J., 2006. Le climat de Bourgogne et d'ailleurs, xiv-xx^e siècle, *Hist Eco Soc*, **4(26 16)**, pp. 421-436.
- LEBOURGEOIS F., GRANIER A. et BREDA N., 2001. Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. Réflexions en termes de conséquences pour les écosystèmes forestiers, *Ann. For. Sci*, **58**, pp. 733-754.
- LI J. and HEAP H., 2011. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors, *Ecological Informatics*, **6**, 228-241.
- LIANG X., PAN J., ZHU J., KUNKEL K., WANG J. and DAI A., 2006. Regional climate model downscaling of the US summer climate and future change, *J Geophys Res*, 111:D10108. doi:10.1029/2005JD006685.
- LLYOD C. D., 2010. Nonstationary models for exploring and mapping monthly precipitation in the United Kingdom, *Int. J. Climatol.*, **30**, 390-405.
-

-
- LORENZ D. H., EICHHORN K. W., BLEI-HOLDER H., KLOSE R., MEIER U. and WEBER E., 1994. In : BBCH, 2001. *Stades phénologiques des mono- et dicotylédones cultivées*, Monographie, 2e édition, 166 p.
- LUISETTI J., GAINARD J. L. and DEVAUX M., 1991. Pseudomonas syringae pv. syringae as One of the Factors Affecting the Ice Nucleation of Grapevine Buds in Controlled Conditions, *Journal of Phytopathology*, **133**, 334-344.
- LUO H. B., MA L., XI H. F., DUAN W. and LI S. H., 2011. Photosynthetic Responses to Heat Treatments at Different Temperatures and following Recovery in Grapevine (*Vitis amurensis* L.) Leaves, *PLoS ONE*, **6(8)**, e23033. doi:10.1371/journal.pone.0023033
- MADÉLIN M., BOIS B. et CHABIN J.-P., 2010. Modification des conditions de maturation du raisin en Bourgogne viticole liée au réchauffement climatique, *Écho Géo*, **14**, pp. 1-12.
- MARTEAU R., RICHARD Y., CASTEL T. and KLEIN G., soumis le 04 février 2013. Does WRF model is relevant to high-resolution rainfall downscaling over Burgundy ?, *Climate Dynamics*.
- MC CARTHY M. G., 1997. The effect of transient water deficit on berry development of cv. Shiraz (*Vitis vinifera* L.), *Australian journal of grape and wine research*, **3**, 2-8.
- MEARNS L. O., ARRITT R., BINER S., BUKOVSKY M. S., MC GINNIS S., SAIN S., CAYA. D., CORREIA JR. J., FLORY D., GUTOWSKI W., TAKLE E. S., JONES R., LEUNG R., MOUFOUMA-OKIA W., MC DANIEL L., NUNES A. M. B., QIAN Y., ROADS J., SLOAN L and SNYDER M, 2012. The North American regional climate change assessment program, *BAMS*, **93**, 1 337-1 362.
- MEEHL G., COVEY C., DELWORTH T., LATIF M., MCAVANEY B., MITCHELL J. F. B., STOUFFER R. J. and TAYLOR K. E., 2007. The WCRP CMIP3 MULTIMODEL DATASET. A new era in climate change research, *Bull Am Meteorol Soc*, **88**, 1 383-1 394.
- MESTRE O., 2000. *Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques*, Université Paul Sabatier, Toulouse, 233 p.
- MICHELANGELI P.-A., VAUTARD R. and LEGRAS B., 1995. Weather Regimes: Recurrence and quasi stationarity, *Journal of atmospheric sciences*, **52 (8)**, 1 237-1 256.
- MIRA DE ORDUNA R., 2010. Climate change associated effects on grape and wine quality and production, *Food Research International*, **43**, 1 844-1 855.
- MOBERG A. and ALEXANDERSSON H., 1997. Homogenisation of Swedish temperature data. Part II: Homogenized gridded air temperature compared with a subset of global gridded air temperature since 1861, *Int. J. Clim.*, **17**, 35-54.
- MOISSELIN J. M., SCHNEIDER M., CANELLAS C. et MESTRE O., 2002. Les changements climatiques en France au XX^e siècle, Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations, *La Météorologie*, **38**, pp. 45-56.
- MONCUR M. W., RATTIGAN K., MACKENZIE D. H. and INTYRE G. N. M., 1989. Base Temperatures for Budbreak and Leaf Appearance of Grapevines, *Am. J. Enol. Vitic.*, **40**, 21-26.
-

-
- MOONEY P. A., MULLIGAN F. J. and FEALY R., 2010. Comparison of ERA-40, ERA-Interim and NCEP/NCAR reanalysis data with observed surface air temperatures over Ireland, *Int. J. Climatol.*, doi.10.1002/joc.2098.
- MORI K., SAITO H., GOTO-YAMAMOTO N., KITAYAMA M., KOBAYASHI S., SUGAYA S., GEMMA H. and HASHIZUME K., 2005. Effects of abscisic acid treatment and night temperatures on anthocyanin composition in Pinot noir grapes, *Vitis*, **44(4)**, 161-165.
- MORON V., 1994. *Variabilité des précipitations en Afrique tropicale au Nord de l'Equateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface océanique et la dynamique de l'atmosphère*, Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 218 p.
- MOTORINA M. B., 1958. In : GALET P., 2000. *Précis de viticulture*, 7e édition, 400 p..
- MUNOZ-DIAZ D. and RODRIGO F. S., 2006. Seasonal rainfall variations in Spain (1912-2000) and their links to atmospheric circulation? *Atmospheric Research*, **81**, 94-110.
- NEMANI R. R., WHITE M. A., CAYAN D. R., JONES G. V., RUNNING S. W., COUGHLAN J. C. and PETERSON D. L., 2001. Asymmetric warming over coastal California and its impact on the premium wine industry, *Climate Research*, **19**, 25-34.
- NIGOND J., DURAND R. et TABARD P., 1968. Quelques aspects de l'action du microclimat sur la vigne et les arbres fruitiers, IV. Observations d'ordre méthodologique relatives à l'étude de l'action du microclimat, *Phytoma*, **20**, pp. 26-30.
- OIV, 2012. Lignes directrices OIV des méthodologies du zonage vitivinicole au niveau du sol et au niveau du climat, *Résolution OIV-VITI 423-2012 REV1*, 19 p.
- ÖNÖZ B. and BAYAZIT M., 2003. The Power of Statistical Tests for Trend Detection, *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, **27**, 247-251.
- OSSWALD C. and MARTIN A., 2005. Hierarchical Classification for Seabed Characterization, *ASMDA*, Brest, France, 17-20 mai 2005, pp. 414-423.
- PARKER A. K., GARCIA DE CORTAZAR-ATAURI I., VAN LEEUWEN C. and CHUINE I., 2011. General phenological model to characterize the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera*, *Aust. J. Grape Wine Res.*, **17(2)**, 206-216.
- PATUREL J. E., SERVAT E. et DELATTRE M. O., 1998. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, **43(6)**, pp. 937-946.
- POUGET R., 1972. Considérations générales sur le rythme végétatif et la dormance des bourgeons de la vigne, *Vitis*, **11**, pp. 198-217.
- POUGET R., 1988. Le débourrement des bourgeons de la vigne : méthode de prévision et principes d'établissement d'une échelle de précocité de débourrement, *Connaissance Vigne Vin*, **22(2)**, pp. 105-123.

PRABHA T. and HOOGENBOOM G., 2008. Evaluation of the Weather Research and Forecasting model for two frost events, *Computers and electronics in agriculture*, **64**, 234-247.

RESPAUD C., 2009. *Variabilité spatio-temporelle de la phénologie du Pinot noir et du Chardonnay en Bourgogne viticole*, Mémoire de MASTER, 84 p.

RICHARD Y., ROUAULT M., POHL B., CRETAT J., DUCLOT I., TABOULOT S., REASON C. J. C., MACRON C. and BUIRON D., 2012. Temperature changes in the mid- and high-latitudes of the Southern Hemisphere, *Int. J. Climatol.*, DOI: 10.1002/joc.3563.

ROCHARD J., CLÉMENT J. R. et SRHIYERI A., 2007. Evolution des dates de vendanges en liaison avec les changements climatiques, Colloque *Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ?*, Dijon-Beaune, 7 p.

SALATHE E. P., STEED R., MASS C. F. and ZAHN P. H., 2008. A high-resolution climate model for the United States Pacific Northwest: mesoscale feedbacks and local responses to climate change, *J Climate*, **21**, 5 708-5 726.

SCHÄR C., VIDALE P. L., LÜTHI D., FREI C., HÄBERLI C., LINIGER M. A. and APPENZELLER C., 2004. The role of increasing temperature variability for European summer heat waves, *Nature*, **427**, 332-336.

SCHULTZ H. R., 2000. Climate change and viticulture: A European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effect, *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **6**, 2-12.

SEGUIN B., 2007. Le réchauffement climatique et ses conséquences pour la viticulture, Colloque *Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ?*, Dijon-Beaune, 9 p.

SEMENOV M. A. and BARROW E. M., 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios, *Climatic Change*, **35**, 397-414.

SEMENOV M. A. and BARROW E. M., 2002. *LARS-WG: A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies*, Version 3.0, User Manual, 28 p.

SEMENOV M. A., BROOKS R. J., BARROW E. M. and RICHARDSON C. W., 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates, *Climate Research*, **10**, 95-107.

SKAMAROCK W. C. and KLEMP J. B., 2008. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *Journal of Computational Physics*, **227**, 3 465-3 485.

SPAGNOLI B., PLANTON S., DÉQUÉ M., MESTRE O. and MOISSELIN J.-M., 2002. Detecting climate change at a regional scale: the case of France, *Geo. Res. Let.*, **29(10)**, 90-1 – 90-4.

SPAYD S. E., TARARA J. M., MEE D. L. and FERGUSON J. C., 2002. Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot berries, *Am. J. Enol. Vitic.*, **53(3)**, 171-182.

SRES (Special Report on Emissions Scenario), 2000. *Rapport spécial du Groupe de travail III du GIEC*, GIEC, 27 p.

-
- STAUDT G., 1982. Pollen germination and pollen tube growth in vivo and the dependence on temperature, *Vitis*, **21**, 205-216.
- SUTTON R. and DONG B., 2012. Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s, *Nature Geoscience*, **5**, 788-792.
- TONIETTO J., 1999. *Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mésoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France*, Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 234 p.
- TONIETTO J. and CARBONNEAU A., 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide, *Agricultural and Forest Meteorology*, **124**, 81-97.
- TRENBERTH, K.E., JONES P.D., AMBENJE P., BOJARIU R., EARSTERLING D., KLEIN TANK A., PARKER D., RAHIMZADEH F., RENWICK J.A., RUSTICUCCI M., SODEN B. and ZHAI P., 2007. *Observations: Surface and Atmospheric Climate Change*. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SOLOMON, S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K.B., TIGNIR M. and MILLER H.L. (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
- ULLMANN A. and MORON V., 2008. Weather regimes and sea surge variations over the Gulf of Lions (French Mediterranean coast) during the 20th century, *Int. J. Climatol.*, **28**, 159-171.
- VERBRUGGHE M., GUYOT G., HANOCQ J. F. et RIPOCHE D., 1991. Influence de différents types de sol de la basse vallée du Rhône sur les températures de surface de raisins et de feuilles de *Vitis vinifera*, *R. F. Oe.*, **128**, 14-20.
- WANG E. L. and ENGEL T., 1998. Simulation of phenological development of wheat crops, *Agricultural System*, **58**, 1-24.
- WEBB L., WHETTON P. and BARLOW E., 2007. Futur climate change impacts on Australian viticulture, Colloque *Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ?*, Dijon et Beaune, 10 p.
- WHITE M. A., DIFFENBAUGH N. S., JONES G. V., PAL J. S. and GIOGI F., 2006. Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century, *PNAS*, **103(30)**, 11 217-11 222.
- WINKLER A. J., COOK J. A., KLIOWER W. M. and LIDER L. A., 1974. *General Viticulture*, University of California, Berkeley, 710 p.
- ZHANG Y., DULIERE V., PHILIP W. M. and SALATHE E. P., 2009. Evaluation of WRF and HadRM mesoscale climate simulations over the US Pacific Northwest, *J Climate*, **22**, 5 511-5 526.
- XU Y., CASTEL T., RICHARD Y., CUCCIA C. and BOIS B., 2012. Burgundy regional climate change and its potential impact on grapevines, *Clim. Dyn.*, **39**, 1 613-1 626.

Site Internet :

www.vins-bourgogne.fr, janvier 2012 ;

<http://srtm.csi.cgiar.org/>, janvier 2013.



Listes Figures



Figure A.1. Graphique de la variation de la température moyenne à l'échelle du globe [Trenberth <i>et al.</i> , 2007].....	38
Figure A.2. Variations de températures à l'échelle du globe. A gauche : période 1901-2005 ; à droite : période 1979-2005 [Trenberth <i>et al.</i> , 2007].	39
Figure A.3. Réchauffement en France métropolitaine (tendance sur 1901-2000). A : températures moyennes ; B : températures minimales ; C : températures maximales [Moisselin <i>et al.</i> , 2002].	39
Figure A.4. Variabilité spatiale de l'amplitude thermique quotidienne (tendance sur 1901-2000) [Moisselin <i>et al.</i> , 2002].	40
Figure A.5. A : Températures moyennes annuelles (°C) à Paris-Montsouris (trait plein noir) entre 1950 et 2000. En pointillés, la tendance 1901-2000. En gris, la moyenne glissante sur quinze ans [adapté de Moisselin <i>et al.</i> , 2002]. B : Températures annuelles (en °C) dans l'Hérault entre 1950 et 2006 [adapté de Laget <i>et al.</i> , 2008].	41
Figure A.6. Moyennes des tendances sur 30 ans sur le territoire français pour les Tn (températures minimales) et les Tx (températures maximales) pour l'hiver (a) et l'été (b). L'unité de l'axe des ordonnées est le degré par décade [Spagnoli <i>et al.</i> , 2002].	42
iii) Évolution thermique de la Bourgogne viticole	42
Figure A.7. Relief bourguignon ; A) relief du vignoble chablisien, B) relief du vignoble de la Côte, [d'après Houzé, 2006].	43
Figure A.8. Évolution des températures moyennes pendant la période phénologique pour trois sites côte-d'oriens [Chabin <i>et al.</i> , 2007].	44
Figure A.9. Comparaison des variations de la température en surface observées à l'échelle du globe et des continents avec les résultats simulés par des modèles climatiques intégrant les forçages naturels seuls ou les forçages naturels et anthropiques. Les moyennes décennales des observations effectuées de 1906 à 2005 (ligne en noir) sont reportées au milieu de chaque décennie en comparaison de la moyenne correspondante pour la période 1901-1950. Les lignes en pointillés signalent une couverture spatiale inférieure à 50 %. Les bandes ombrées en bleu indiquent la fourchette comprise entre 5 et 95 % de dix-neuf simulations issues de cinq modèles climatiques qui ne considèrent que les forçages naturels produits par l'activité solaire et volcanique. Les bandes ombrées en rouge représentent la fourchette comprise entre 5 et 95 % de cinquante-huit simulations obtenues avec quatorze modèles climatiques tenant compte des forçages naturels et anthropiques [GIEC, 2007].	46
Figure A.10. À gauche : Les courbes en trait plein correspondent aux moyennes multimodèles du réchauffement en surface (par rapport à la période 1980-1999) pour les scénarios A2, A1B et B1 du SRES, dans la continuité des simulations relatives au xx ^e siècle. La courbe orange correspond au cas où les concentrations se maintiendraient aux niveaux de 2000. Les barres au milieu de la figure indiquent les valeurs les plus probables (zone foncée) et les fourchettes probables selon les six scénarios SRES de référence pour la période 2090-2099 par rapport à 1980-1999. Ces valeurs et ces fourchettes tiennent compte des projections établies à l'aide des modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO) (partie gauche de la figure), ainsi que des résultats d'une hiérarchie de modèles indépendants et des contraintes liées à l'observation. À droite	

: Évolution projetée de la température en surface pour le début et la fin du xxi^e siècle par rapport à la période 1980-1999, selon les projections moyennes obtenues à l'aide de plusieurs modèles MGCAO pour les scénarios A2 (en haut), A1B (au milieu) et B1 (en bas) du SRES, pour les décennies 2020-2029 (à gauche) et 2090-2099 (à droite) [GIEC, 2007].	47
Figure A.11. Avantages et inconvénients de désagréments statistique et dynamique [adapté de Diaz-Nieto et Wilby, 2005 et Fowler <i>et al.</i> , 2007].	49
Figure A.12. Échelles phénologiques de la vigne. A : Échelle de Baillod et Baggiolini [1993]. B : Échelle d'Eichhorn et Lorenz [1977].	52
Figure A.13. Cycle phénologique de la vigne [adapté de Galet, 2000, et notation des stades de Baillod et Baggiolini, 1993].	55
Figure A.14. Le vignoble bourguignon et ses appellations [www.vins-bourgogne.fr, janvier 2012].	56
Figure A.15. Les principaux cépages en Bourgogne.	57
Figure A.16. Échelles d'influence du climat sur la vigne [adapté de Nigond <i>et al.</i> , 1968].	58
Figure A.17. Amplitudes de température optimale en période végétative en fonction des cépages [Jones, 2006].	59
Figure A.18. Hiérarchisation des appellations au sein du vignoble bourguignon [http://www.vins-bourgogne.fr, août 2012].	60
Figure A.19. Séries de dates de vendanges pour différents vignobles en France et série de températures moyennes diurnes d'avril à août [Daux <i>et al.</i> , 2007].	65
Figure A.20. Variabilité interannuelle de la qualité des vins et du nombre de jours de gel [Nemani <i>et al.</i> , 2001].	66
Figure A.21. Comparaison de la proportion de la superficie des vignobles, de l'exportation de vin, de la consommation et de la production de vins mondiales par continent. Les courbes en pointillés noirs indiquent les variations mondiales annuelles des variables étudiées. Les courbes continues marron représentent la proportion du vignoble français [source OIV, 2012].	68
Figure A.22. Évolution des surfaces des vignobles, des ventes, des exportations et des récoltes en Bourgogne [source [www.vins-bourgogne.fr, août 2012].	70
Figure A.23. Années appropriées (sur vingt-quatre possibles) pour la production de vins pour le climat actuel (Daymet) et le climat futur (Δ Daymet) pour quatre catégories de tolérances aux températures extrêmes (sept ou quatorze jours de froids pendant l'hiver ($<-12,2^{\circ}C$), le printemps et l'automne ($<-6,7^{\circ}C$) et chauds ($>35^{\circ}C$) pendant la période végétative et de récolte) : tolérance au chaud/tolérance au froid (HTCT), tolérance au chaud/intolérance au froid (HTCI), intolérance au chaud/tolérance au froid (HICT), intolérance au chaud/intolérance au froid (HICI) [White <i>et al.</i> , 2006].	72
Figure A.24. Scénarios d'évolution de la température et des dates de vendanges au cours du xxi^e siècle [Rochard <i>et al.</i> , 2007].	73
Figure B.1. Objectifs et étapes du chapitre B.	81
Figure B.2. A. Répartitions des stations météorologiques et leurs altitudes ; B. Distribution statistique de la distance minimale entre deux stations. La boîte principale représente les 50 %	

autour de la médiane (trait horizontal épais). Les points représentent les valeurs situées au-delà de $\pm 1,58 \cdot$ l'écart interquartile / par la racine carré du nombre de valeurs de la série ; C. Distribution des altitudes du MNT à cinquante mètres pour la région Bourgogne (gris foncé) et du réseau de stations (gris clair). 85

Figure B.3. Deux cas de valeurs aberrantes repérées dans la distribution des températures : en haut, la valeur détectée n'est pas spatialement aberrante ; en bas, les trois valeurs sont spatialement aberrantes. 86

Figure B.4. Distribution statistique des corrélations entre les quatre-vingt-cinq stations (~7 000 comparaisons). 88

Figure B.5. Anomalies (base 1961-2009) des températures (Tn et Tx) annuelles moyennes sur la Bourgogne (1961-2009). Les barres bleues indiquent que la température annuelle est en dessous de la moyenne de la période 1961-2009 (années « froides »), les barres rouges indiquent que la température annuelle est au-dessus de la période 1961-2009 (années « chaudes »). 91

Figure B.6. Variations de températures et longueurs de séries. A : distribution statistique de l'augmentation des températures annuelles calculées à partir des coefficients de régressions linéaires (°C) pour l'ensemble des quatre-vingt-cinq séries de Tn (bleu) et Tx (rouge) ; B : coefficient de détermination calculé entre les modèles de régressions linéaires et les valeurs mesurées pour les Tn (bleu) et les Tx (rouge) ; C : valeurs de la variation de la température (°C) en fonction de la longueur de la série. Les points bleus représentent les Tn et les rouges les Tx. 92

Figure B.7. Détection de ruptures dans les séries de températures annuelles. De haut en bas : a) anomalies de températures annuelles ; b) scores du test de la SMWDA pour les fenêtrages quatre (2 et 2), huit (4 et 4), douze (6 et 6) et seize (8 et 8) ans (significativité au test de Monte-Carlo) ; c) scores du test de Pettitt ; d) les scores du test de Mann-Kendall (trait plein : sens direct ; trait pointillés : sens rétrograde). De gauche à droite : températures minimales, moyennes et maximales. 93

Figure B.8. Anomalies des températures (Tn et Tx) moyennes saisonnières sur la Bourgogne (1961-2009). a) hiver (DJF), b) printemps (MAM), c) été (JJA) et d) automne (SON). Les barres bleues indiquent que la température annuelle est en dessous de la moyenne de la période 1961-2009 (années « froides »), les barres rouges indiquent que la température annuelle est au-dessus de la période 1961-2009 (années « chaudes »). 95

Figure B.9. Nombre de jours par an (courbes foncées) et tardifs (avril-mai, courbes claires) pour lesquels la température minimale est inférieure à 0°C, pour huit stations qui ont mesuré les températures sur l'ensemble de la période 1961-2009. En pointillés, la droite de régression correspondant à chaque courbe. Noms des stations correspondant au Code INSEE : Châtillon-sur-Seine (21154001), La Rochepot (21527001), Château-Chinon (58062001), Nevers-Marzy (58160001), Mâcon (71105001), Mont-Saint-Vincent (71320001), Saint-Yan (71491001) et Sens (89387002). Les couleurs différencient les graphiques en fonction du département d'appartenance de la station. 97

Figure B.10. Nombre de jours par an pour lesquels la température maximale est supérieure à 30°C, pour huit stations qui ont mesuré des températures sur l'ensemble de la période 1961-2009. En pointillés, la droite de régression correspondant à chaque courbe. Noms des stations correspondant au Code INSEE : Châtillon-sur-Seine (21154001), La Rochepot (21527001), Château-Chinon (58062001), Nevers-Marzy (58160001), Mâcon (71105001), Mont-Saint-Vincent (71320001), Saint-

Yan (71491001) et Sens (89387002). Les couleurs différencient les graphiques en fonction du département d'appartenance de la station.	98
Figure B.11. Moyennes glissantes (trois, cinq, onze ans) des coefficients annuels de Kurtosis et de Skewness pour les températures minimales (Tn) et maximales (Tx).....	99
Figure B.12. Différences de températures annuelles minimales (à g.) et maximales (à d.) entre les sous-périodes 1988-2009 et 1961-1987. Chaque carré représente une valeur de différence pour une station. Les différences non significatives (Student, 95 %) sont représentées par des carrés grisés.	100
Figure B.13. Différences de températures saisonnières minimales (à g.) et maximales (à d.) entre les sous-périodes 1988-2009 et 1961-1987. Chaque carré représente une valeur de différence pour une station. Les différences non significatives (Student, 95 %) sont représentées par des carrés grisés.	102
Figure B.14. Répartition des stations utilisées. A : pour la période 1973-2009 ; B : pour la période 1989-2009.	104
Figure B.15. Validation croisée relative aux interpolations au pas de temps annuel pour les années 1991 (Tn, A ; Tx, C) et 2003 (Tn, B ; Tx, D) [Cuccia et Bois, 2010]. Les droites matérialisent les situations pour lesquelles les estimations des températures par les modèles d'interpolation sont optimales.....	105
Figure B.16. Construction d'un dendrogramme. La CHA regroupe d'abord les jours 1 et 3 puis 2 et 4. Le jour 5 est regroupé avec la classe « 1 et 3 », puis la classe « 1, 3 et 5 » est regroupée avec la classe « 2 et 4 » [Cuccia et Bois, 2010].	107
Figure B.17. Exemple de semi-variogramme. À chaque point est associé le nombre de couples utilisés pour calculer la semi-variance. La double flèche verte indique l'effet pépité ; la courbe bleue indique le seuil ; la courbe rouge indique la forme du graphique. Ici, la distance (abscisses) est en degrés.	109
Figure B.18. Dendrogrammes construits par la CHA à partir des répartitions quotidiennes des températures minimales (en h.) et maximales (en b.). La ligne horizontale représente la valeur de seuil retenue pour l'obtention des classes. Les numéros, présents à chaque intersection entre la ligne horizontale et une branche du dendrogramme, identifient chacune des classes.....	113
Figure B.19. Fréquence d'occurrence des classes de Tn (A) et des Tx (B) parmi les jours de la période 1973-2009.	114
Figure B.20. Structures spatiales moyennes interpolées par classe. a) Tx, b) Tn.	115
Figure B.21. Variabilité spatiale des écarts-types calculés aux stations pour chacune des classes de Tn et de Tx puis interpolés.	116
Figure B.22. Fréquences mensuelles d'occurrences des classes de Tn (histogrammes bleus) et Tx (histogrammes rouges) pour les jours de la période 1973-2009.	118
Figure B.23. Fréquences d'occurrences des classes pour les Tn (A et B) et les Tx (C et D) et pour les sous-périodes 1973-1987 (A et C) et 1988-2009 (B et D).....	119
Figure B.24. Fréquences d'occurrences mensuelles des classes pour les Tn (A et B) et les Tx (C et D) et pour les sous-périodes 1973-1987 (A et C) et 1988-2009 (B et D).....	120
Figure B.25. Mailles d'interpolations des températures en Bourgogne sur la période 1989-2009. Initialement, la spatialisation se fait sur la maille à cinquante mètres de résolution, puis est agrégée à	

la maille de cinq kilomètres de résolution qui correspond à la résolution du modèle régional WRF. La résolution de cinquante mètres n'est utilisée que pour les zones à proximité d'un vignoble.	121
Figure B.26. Les dendrogrammes sont construits par la CHA à partir des répartitions quotidiennes des températures minimales (en h.) et maximales (en b.). La ligne horizontale représente la valeur de seuil retenue pour l'obtention des classes. Les numéros, présents à chaque intersection entre la ligne horizontale et une branche du dendrogramme, identifient chacune des classes.	122
Figure B.27. Fréquence d'occurrences des classes de Tn (A) et des Tx (B) parmi les jours de la période 1989-2009.	123
Figure B.28. Part de la variance expliquée apporté par chaque paramètre pour les classes de Tn (à g.) et Tx (à d.). En abscisses, le nombre de paramètres. En ordonnées, la valeur de r^2 . La ligne horizontale noire indique la limite à partir de laquelle un paramètre est considéré comme utile à la régression.	124
Figure B.29. Distributions statistiques des valeurs des coefficients de chaque paramètre en fonction de la classe.	126
Figure B.30 Deux exemples de semi-variogrammes produits lors du krigeage pour le 20 novembre 1989 (Tx) et le 21 novembre 1989 (Tn). Les nombres sur les graphiques représentent le nombre de couples utilisés pour calculer la semi-variance à chaque point. Notons la stationnarité (présence d'un plateau) autorisant l'utilisation du krigeage ordinaire.	132
Figure B.31. Cartes moyennes des classes de Tn et Tx après la méthode RLM+KR.	134
Figure B.32. Quatre exemples d'interpolations (jours A, B, C et D) pour les trois classes TN3, TN6 et TX2.	135
Figure B.33. Variabilité des coefficients de détermination et écarts-types associés obtenus pour chacune des classes de températures minimales (A, C) et maximales (B, D) pour la méthode de régression linéaire multiple + krigeage (RLM + KR).	137
Figure B.34. Différences entre les coefficients de détermination obtenus pour les températures minimales par la méthode de régression linéaire multiple + krigeage (RLM + KR) et ceux obtenus par les cinq autres méthodes. Les valeurs positives (rectangles verts) montrent que la méthode RLM + KR est meilleure que la méthode comparée et inversement pour les valeurs négatives (rectangles rouges).	138
Figure B.35. Différences entre les coefficients de détermination obtenus pour les températures maximales par la méthode de régression linéaire multiple + krigeage (RLM + KR) et ceux obtenus par les cinq autres méthodes. Les valeurs positives (rectangles verts) montrent que la méthode RLM + KR est meilleure que la méthode comparée et inversement pour les valeurs négatives (rectangles rouges).	139
Figure B.36. Fréquences mensuelles des classes de régimes de temps pour la période 1989-2009.	140
Figure B.37. Tableaux de contingence observés et théoriques pour les TN (tons bleues) et les Tx (tons rouges) et histogramme des différences entre les valeurs observées et les valeurs théoriques.	141
Figure C.1. Approche méthodologique mise en œuvre pour évaluer la relation température/Pinot noir en Bourgogne et estimer les performances des modèles phénologiques à décrire cette relation.	149

Figure C.2. Répartition des vignobles bourguignons et des parcelles d'observations phénologiques.	153
Figure C.3. Réponse des modèles phénologiques à la température. A gauche, le modèle GFV produit une réponse linéaire, proportionnelle à la valeur propre de la température. A droite, le modèle de Wang and Engel produit une réponse en cloche à la température, bornée par une température minimale (0°C) et maximale (40°C) et pour laquelle le sommet est obtenu pour une température optimale de 27,4°C.	156
Figure C.4. Réponse des trois étapes du modèle de Chuine à la température. A : modèle de floraison ; B : première partie du modèle de véraison ; C : seconde partie du modèle de véraison.....	161
Figure C.5. Dates d'occurrences des stades phénologiques du Pinot noir à Savigny-lès-Beaune (1988-2008).....	164
Figure C.6. Moyennes annuelles des températures en Bourgogne et dates d'occurrences des stades de débourrement, de floraison, de véraison et de maturité du Pinot noir à Savigny-lès-Beaune. Les barres verticales en pointillés identifient les années 1990 (bleu) et 2003 (rouge). La barre en trait plein noir indique la date de la rupture climatique.....	165
Figure C.7. Boxplots (1961-1987 et 1988-2007) des dates de débourrement (A), de floraison (B), de véraison (C) et de maturité (D) du Pinot noir à Savigny-lès-Beaune.....	166
Figure C.8. Dates de maturité observées à Savigny-lès-Beaune et indice de Huglin (°C.J).....	168
Figure C.9. Stations utilisées dans l'analyse de la variabilité temporelle des indices agroclimatiques. La gamme de couleurs représente l'altitude des stations (en mètres).	168
Figure C.10. Boxplot (1961-1987 et 1988-2009) des indices de Winkler (jaune) et de Huglin (marron) pour sept stations de Bourgogne. Les valeurs des indices (en ordonnée) sont en degrés-jours (°C.J).	169
Figure C.11. Boxplot (1961-1987 et 1988-2009) des indices de fraîcheur des nuits pour sept stations de Bourgogne.	170
Figure C.12. Indice de Winkler (°C.J) appliqué aux données de températures spatialisées à une maille de cinq kilomètres.	171
Figure C.13. Indice de Huglin interpolé. Variable dépendante : altitude, maille : un kilomètre. A) Période 1968-1987 ; B) Période 1988-2007. C) Différences 1988-2007 / 1968-1987. En vert, les parcelles de vignes. L'acronyme DD (de l'anglais <i>degrees days</i>) signifie degrés-jours.	172
Figure C.14. Indice de Huglin (°C.J) appliqué aux données de températures spatialisées à une maille de cinq kilomètres.	173
Figure C.15. Indice de fraîcheur des nuits (°C) aux données de températures spatialisées à une maille de cinq kilomètres.	174
Figure C.16. Dates de floraison et de véraison observées et simulées par les modèles.	178
Figure C.17. Dates de véraison et de floraison simulées par les trois modèles phénologiques (Chuine, WE et GFV).	180
Figure C.18. Boxplots (1973-1987 et 1988-2007) des dates (simulées et observées) de floraison et de véraison.	181

Figure C.19. Dates de floraison et de véraison simulées par les trois modèles et appliquées aux séries LARS WG. La période actuelle / 1976-2005 est représentée par des points bleus, la période 2011-2030 par des points verts, la période 2046-2065 par des points jaunes et la période 2080-2099 par des points rouges. Les données observées (1976-2005) sont représentées par des points noirs.	184
Figure C.20. Boxplots des dates de floraison et de véraison simulées par les applications des trois modèles aux séries climatiques mesurées (période 1976-2005) et simulées par LARS WG. LARS act. prend en compte les données simulées par LARS pour la période 1976-2005.	185
Figure C.21. Dates de floraison et de véraison simulées par les trois modèles, appliquées aux séries observées (période 1976-2005, points noirs) et de données des deltas +3° (points bleus), +5° (points verts) et +10°C (points rouges).....	187
Figure C.22. Boxplots des dates de floraison et de véraison simulées par les applications des trois modèles aux séries observées (période 1976-2005) et issues des deltas +3°, +5° et +10°C.	188
Figure C.23. Impacts cumulés de la température pour les modèles de floraison de Chuine et GFV pour toutes les années du jeu de données original (période 1976-2005), courbes bleues, et pour le delta +10°C, courbes rouges. L'axe des abscisses représente le jour après t0, la date de début du modèle (GFV = 60 ^e jour ; Chuine = 92 ^e jour de l'année). L'axe des ordonnées correspond aux impacts cumulés par la plante. La ligne horizontale représente le seuil d'impact nécessaire pour atteindre le stade de floraison.....	189
Figure C.24. Impacts cumulés de la température utilisés dans l'estimation de la date de mi-véraison dans les deux phases (élongation cellulaire et accumulation de photosynthétats) du modèle de Chuine (A et B) et pour les modèles GFV (C) et WE (D), pour toutes les années du jeu de données original (courbes bleues) et pour le delta +10°C (courbes rouges). L'axe des abscisses représente le jour après t0, la date de début du modèle (GFV = 60 ^e jour ; WE = 74 ^e jour ; Chuine = 92 ^e jour de l'année). L'axe des ordonnées correspond aux impacts cumulés. La ligne horizontale représente le seuil nécessaire pour atteindre le stade de véraison. La droite oblique en pointillés sur la figure D est la courbe d'impacts cumulés correspondant à un impact quotidien de 1 (Topt = 27,4°C). La droite verticale indique la date de véraison théorique le plus précoce que peut simuler le modèle WE. ...	190
Figure C.25. Boxplot de l'impact quotidien de la température pour le modèle WE sur la période 1973-2005. L'axe des abscisses représente le jour de l'année. L'axe des ordonnées représente les valeurs de l'impact quotidien de la température, de 0 (aucun impact) à 1 (impact optimal), comme décrit dans le chapitre C.I.3.B. Les boxplots bleus représentent les valeurs d'impacts calculées pour les séries de températures originales. Les boxplots rouges représentent celles calculées pour le delta +10°C. Les lignes verticales en pointillés (bleus pour les données originales, rouges pour le delta +10°C) indiquent la date après laquelle l'impact de la température devient optimal (> 0,8). Les lignes verticales pleines (bleues pour les données originales, rouges pour le delta +10°C) indiquent les dates de véraison moyennes pour la période 1973-2005.	191
Figure C.26. Dates de floraison et de véraison observées à Savigny-lès-Beaune et simulées par les modèles phénologiques à partir des données de températures du pixel à cinquante mètres le plus proche de la parcelle (période 1989-2007).....	195
Figure C.27. Dates de floraison et de véraison observées aux trente-six parcelles de Pinot noir et simulées par les modèles phénologiques à partir des données de températures des pixels à cinquante mètres le plus proches des parcelles (période 1997-2008).	198

Figure C.28. Dates de floraison et de véraison observées à Savigny-lès-Beaune et dates simulées par les modèles phénologiques à partir des données de températures du pixel à cinq kilomètres dans lequel se situe la parcelle. Le r^2 , la RMSE et le biais [r^2 ; RMSE ; biais] sont pour le modèle de Chuine, pour la floraison : [0,85 ; 8,5 jours ; 8 jours] et pour la véraison : [0,59 ; 9,11 jours ; 8 jours] ; pour le modèle GFV, pour la floraison : [0,84 ; 4,47 jours ; 2,56 jours] et pour la véraison : [0,55 ; 6,36 jours ; 4,92 jours] ; et pour le modèle WE, pour la véraison : [0,63 ; 5,24 jours ; 3,75 jours] (période 1989-2007).....	199
Figure C.29. Dates de floraison simulées par application du modèle de Chuine aux données de températures spatialisées (1989-2009).	201
Figure C.30. Dates de floraison simulées par application du modèle GFV aux données de températures spatialisées (1989-2009).	202
Figure C.31. Dates de véraison simulées par application du modèle de Chuine aux données de températures spatialisées (1989-2009).	203
Figure C.32. Dates de véraison simulées par application du modèle WE aux données de températures spatialisées (1989-2009).....	204
Figure C.33. Dates de floraison simulées par application du modèle GFV aux données de températures spatialisées (1989-2009).	205
Figure D.1. Approche méthodologique mise en œuvre pour évaluer l'impact régionalisé du réchauffement associé au changement climatique projeté sur la phénologie du Pinot noir.....	213
Figure D.2. Tableau récapitulatif des données observées et simulées utilisées pour les objectifs principaux de ce chapitre.	217
Figure D.3. Anomalies des moyennes annuelles des températures (1989-2009). (A) températures minimales, (B) moyennes et (C) maximales. Bleu : observation ; beige : simulations.....	222
Figure D.4. Températures annuelles observées et simulées. (A) température minimale, (B) température moyenne et (C) température maximale. Les pointillés de couleurs représentent le biais moyen pour chacune des variables, les pointillés noirs représentent la bissectrice. Le graphique D représente les distributions statistiques des différences annuelles entre les séries observées et simulées. Les pointillés horizontaux correspondent à la médiane des différences. Le cercle vert des graphiques A, B et C représente l'année 1989.....	223
Figure D.5. Moyennes quotidiennes des températures moyennes calculées sur l'ensemble des pixels des mailles et sur l'ensemble des vingt-et-un ans et distribution statistique des valeurs mensuelles de ces moyennes. En bleu, les interpolations ; en beige, les simulations.	224
Figure D.6. Cartes moyennes des températures, de haut en bas, minimales, moyennes et maximales pour les simulations (à gauche) et les interpolations (à droite). En vert, les vignobles actuels.	225
Figure D.7. Températures simulées versus observées pour les Tn (points bleus), les Tm (points noirs) et les Tx (points rouges). Chaque point représente un couple « pixel simulé/pixel observé » pour une année. Ainsi, pour chaque variable, nous obtenons vingt-et-un points par pixel.	227
Figure D.8. Histogrammes des différences entre les données interpolées et les données simulées par le modèle WRF. Pour chaque jour et chaque pixel, une valeur est calculée. Les trois histogrammes correspondent (de gauche à droite) aux températures minimales, moyennes et maximales. Les	

droites verticales représentent le premier quartile (bleu), la médiane (vert) et le troisième quartile (rouge).....	228
Figure D.9. Températures simulées versus températures interpolées pour les six classes de Tn. Chaque point représente un couple « pixel simulé/pixel interpolé » pour un jour donné. Ainsi, pour chaque variable, nous obtenons 7 665 points par pixel.	230
Figure D.9bis. Températures simulées versus températures interpolées pour les cinq classes de Tx. Chaque point représente un couple « pixel simulé/pixel interpolé » pour un jour donné. Ainsi, pour chaque variable, nous obtenons 7 665 points par pixel.	231
Figure D.10. Répartitions spatiales des RMSE calculées pixel par pixel sur l'ensemble des 7 665 jours de chaque série. De gauche à droite : températures minimales, températures moyennes, températures maximales.	232
Figure D.11. Répartitions spatiales des coefficients de détermination (r^2) calculées pixel par pixel sur l'ensemble des 7 665 jours de chaque série. De gauche à droite : températures minimales, températures moyennes, températures maximales.....	233
Figure D.12. Répartitions spatiales des RMSE (colonne de gauche) et des coefficients de détermination (r^2 , colonne de droite) calculées pixel par pixel sur l'ensemble des x jours de chaque classe définie dans le chapitre B. De haut en bas : les classes TN1, TN2 et TN3.	234
Figure D.12bis. Répartitions spatiales des RMSE (colonne de gauche) et des coefficients de détermination (r^2 , colonne de droite) calculées pixel par pixel sur l'ensemble des x jours de chaque classe définie dans le chapitre B. De haut en bas : les classes TN4, TN5 et TN6.	236
Figure D.13. Répartitions spatiales des RMSE (colonne de gauche) et des coefficients de détermination (r^2 , colonne de droite) calculées pixel par pixel sur l'ensemble des x jours de chaque classe définie dans le chapitre B. De haut en bas : les classes TX1, TX2 et TX3.	238
Figure D.13bis. Répartitions spatiales des RMSE (colonne de gauche) et des coefficients de détermination (r^2 , colonne de droite) calculées pixel par pixel sur l'ensemble des x jours de chaque classe définie dans le chapitre B. De haut en bas : les classes TN4 et TN5.....	239
Figure D.14. Cartes de la répartition moyenne des températures minimales, moyennes et maximales pour les simulations de WRF sur la période 1970-1987.....	242
Figure D.15. Distributions des altitudes (en mètres) des trente-deux stations (à gauche) et des pixels de la maille à cinq kilomètres (à droite).....	242
Figure D.16. Comparaison des simulations à partir d'ARPEGE (orange) et des observations (vert) pour la période 1970-1987 pour les températures minimales (en haut) et maximales (en bas). Les distributions de chaque série sont représentées de deux façons différentes : à gauche un boxplot, à droite des courbes de densité.....	243
Figure D.17. Cycle saisonnier des deux jeux de données, pour la période 1970-1987, et pour les Tn (à gauche) et les Tx (à droite). En orange, les données WRF ; en vert, les données observées.	244
Figure D.18. Pourcentage, sur la période 1970-1987, du nombre total de jours pour lesquels les stations du réseau Météo-France ont mesuré une température minimale inférieure à 0°C (A) et une température maximale supérieure à 30°C (B).	244

Figure D.19. Cartes du pourcentage du nombre total de jours pour lesquels la température minimale est inférieure à 0°C (A) et la température maximale supérieure à 30°C (B), sur la période 1970-1987.	245
Figure D.20. Distributions statistiques des dates de floraison et véraison observées à Savigny-lès-Beaune et simulées par les trois modèles sur le pixel de la maille à cinq kilomètres correspondant au point d'observation (période 1970-1987).	247
Figure D.21. Distributions statistiques des dates de floraison et véraison pour les simulations WRF et les dates estimées par les modèles phénologiques appliqués aux stations du réseau Météo-France disponibles sur la période 1970-1987. Les graphiques A représentent les moyennes spatiales et B les moyennes temporelles.	248
Figure D.22. Dates de floraison simulées par les modèles de Chuine (à gauche) et GFV (à droite) à partir des données de températures simulées par WRF sur la période 1970-1987.	249
Figure D.23. Dates de véraison simulées par les modèles de Chuine (à gauche), GFV (au centre) et WE (à droite) à partir des données de températures simulées par WRF sur la période 1970-1987.	250
Figure D.24. Comparaison des simulations à partir d'ARPEGE pour les périodes 1970-1987 (bleu) et 2031-2048 (rouge), et ce pour les températures moyennes (à gauche), minimales (au centre) et maximales (à droite).	252
Figure D.25. Différences de températures entre les deux périodes de simulations pour les températures minimales (à gauche), moyennes (centre) et maximales (à droite).	253
Figure D.26. Moyennes quotidiennes des températures moyennes calculées sur l'ensemble des pixels des mailles et sur l'ensemble des dix-huit ans, et boxplot des valeurs mensuelles de ces moyennes. En bleu, la période 1970-1987 ; en rouge, la période 2031-2048.	254
Figure D.27. Variations mensuelles de l'amplitude diurne et densité des amplitudes diurnes pour les périodes 1970-1987 (bleu) et 2031-2048 (rouge).	256
Figure D.28. Variations, entre les deux périodes, des nombres de jours pour lesquels la température minimale est inférieure à 0°C (à gauche) et la température maximale supérieure à 30°C.	257
Figure D.29. Boxplot des dates de floraison et de véraison simulées par les trois modèles, moyennées sur l'ensemble de la grille à cinq kilomètres (une valeur par an), pour les périodes 1970-1987 (bleu) et 2031-2048 (rouge).	258
Figure D.30. Cartes des dates de floraison simulées par les modèles de Chuine (à droite) et GFV (à gauche) à partir des données de températures simulées par WRF sur la période 2031-2048.	259
Figure D.31. Cartes des dates de véraison simulées par les modèles de Chuine (à gauche), GFV (au centre) et WE (à droite) à partir des données de températures simulées par WRF sur la période 2031-2048.	260
Figure D.32. Cartes des différences de dates de floraison simulées pour les périodes 1970-1987 et 2031-2048 par les modèles de Chuine (à gauche) et GFV (à droite) à partir des données de températures simulées par WRF.	260
Figure D.33. Cartes des différences de dates de véraison simulées pour les périodes 1970-1987 et 2031-2048 par les modèles de Chuine (à gauche), GFV (au centre) et WE (à droite) à partir des données de températures simulées par WRF.	261

Listes Tableaux



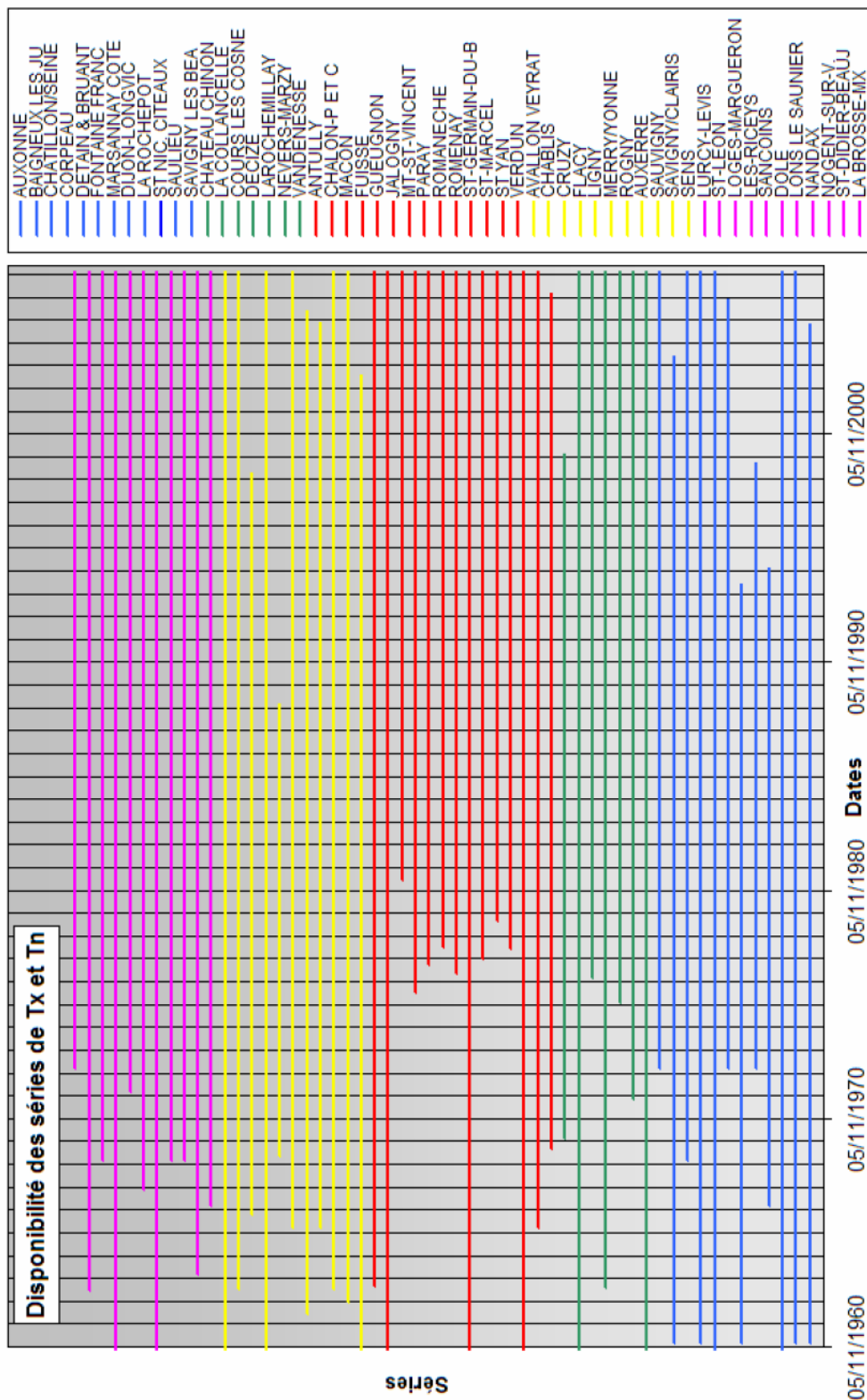
Tableau A.1. Tableau des impacts probables du changement climatique en fonction des régions du Monde [adapté du GIEC, 2007].	50
Tableau B.1. Erreur quadratique moyenne pour différentes méthodes de remplacements de données aberrantes. L'encadré explique la méthode utilisée pour estimer l'erreur de chaque méthode.....	87
Tableau B.2. Validation croisée pour les interpolations au pas de temps mensuel pour l'année 1991. Les parties gauche et droite du tableau présentent respectivement les résultats pour les Tn et les Tx. N : nombre de stations utilisées, RMSE : erreur moyenne quadratique de la validation croisée ; R ² : coefficient de détermination entre les températures mesurées et les températures estimées ; R (T/Z) : coefficient de corrélation (R de Pearson) entre l'altitude et la température mesurée.	106
Tableau B.3. Identification des paramètres environnementaux utilisés pour chacune des classes de Tn et de Tx.	125
Tableau B.4. Coefficients de détermination calculés à partir des moyennes de chaque classe pour les cinquante stations et les simulations issues de la régression linéaire en utilisant les paramètres sélectionnés.....	125
Tableau B.5. Synthèse des paramètres utilisés pour les régressions linéaires multiples et des fenêtrages concernés.	131
Tableau C.1. Classe d'indice de fraîcheur des nuits [Tonietto, 1999].	155
Tableau C.2. Performances des trois modèles phénologiques lors de la confrontation aux observations à la parcelle de Pinot noir de Savigny-lès-Beaune des dates d'occurrences de mi-floraison et mi-véraison. Tb / Tmin = température de base (zéro de végétation) des modèles de degrés-jours ou température minimale (modèles WE et Chuine véraison) ; Topt = température optimale (modèles WE et Chuine véraison) ; Tmax = température maximale (modèles WE et Chuine véraison). RMSE = Root Mean Squared Error.	179
Tableau C.3. Moyenne, écart maximal et écart-type des dates de floraison et de véraison simulées par les modèles de Chuine, WG et GFV. Les différences entre les modèles, la RMSE et le r ² sont également présentés. La différence entre les séries est testée par le test de Student (- non significatif, * significatif à 0.95 et ** significatif à 0.99).	186
Tableau C.4. Tableau des performances des modèles de Chuine (Chu.), GFV et WE, pour la floraison (F.) et la véraison (V.). Le tableau de gauche présente les résultats concernant la comparaison entre les observations à la parcelle de Savigny-lès-Beaune et les dates simulées par les modèles au pixel à cinquante mètres de maille correspondant. Le tableau de droite présente les résultats concernant la comparaison entre les observations aux trente-six parcelles de Pinot noir en Bourgogne et les pixels à cinquante mètres correspondants.	196
Tableau C.5. Performances annuelles des modèles de Chuine (Chu.) et GFV pour la floraison. Le tableau de gauche présente les résultats concernant la comparaison entre les observations aux trente-six parcelles de Pinot noir en Bourgogne et les dates simulées par le modèle de Chuine aux pixels à cinquante mètres de maille correspondants. Le tableau de droite présente les résultats concernant la comparaison entre les observations aux trente-six parcelles de Pinot noir en Bourgogne et les dates simulées par le modèle GFV aux pixels à cinquante mètres de maille correspondants.	197

Tableau D.1. Le tableau donne des informations sur le coefficient de détermination, la RMSE et la pente issue de la régression linéaire calculée entre les séries quotidiennes de températures simulées et spatialisées, maille par maille (voir figure D.9). 229

Tableau D.2. Tableau des différences entre les deux périodes pour les températures moyennes. ... 255

Annexes

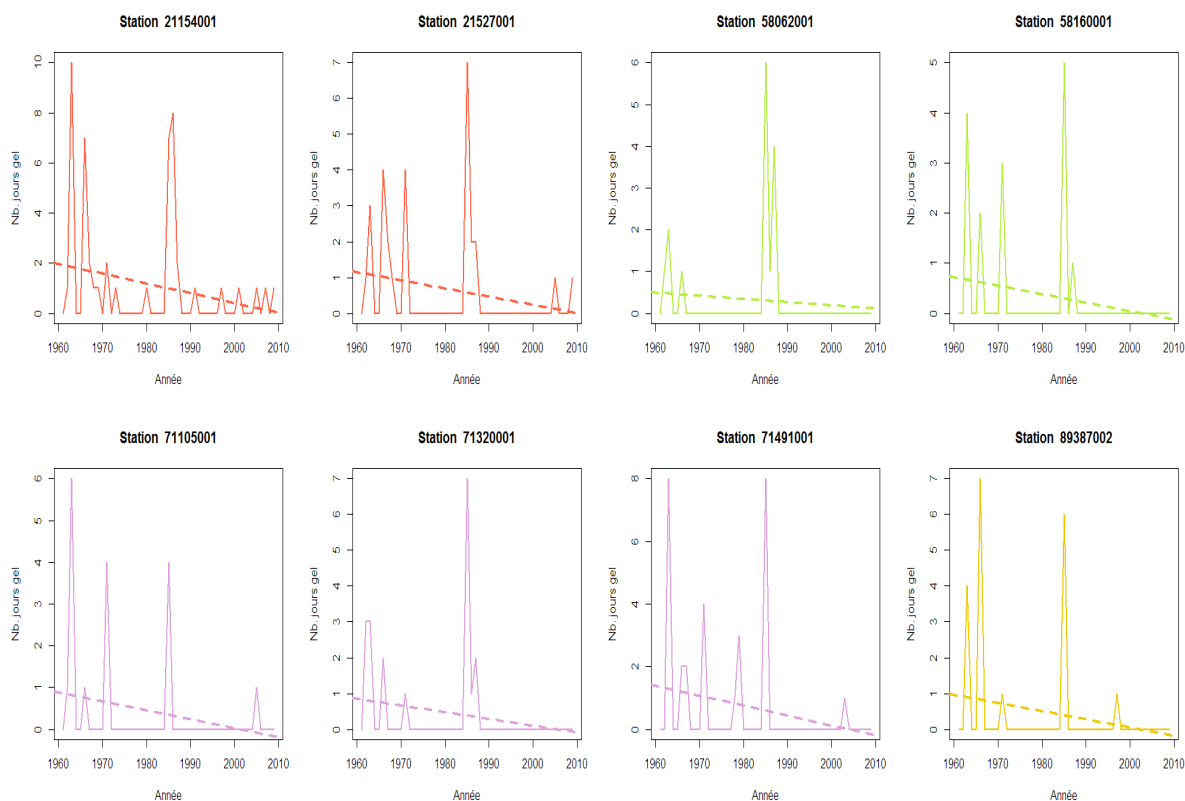




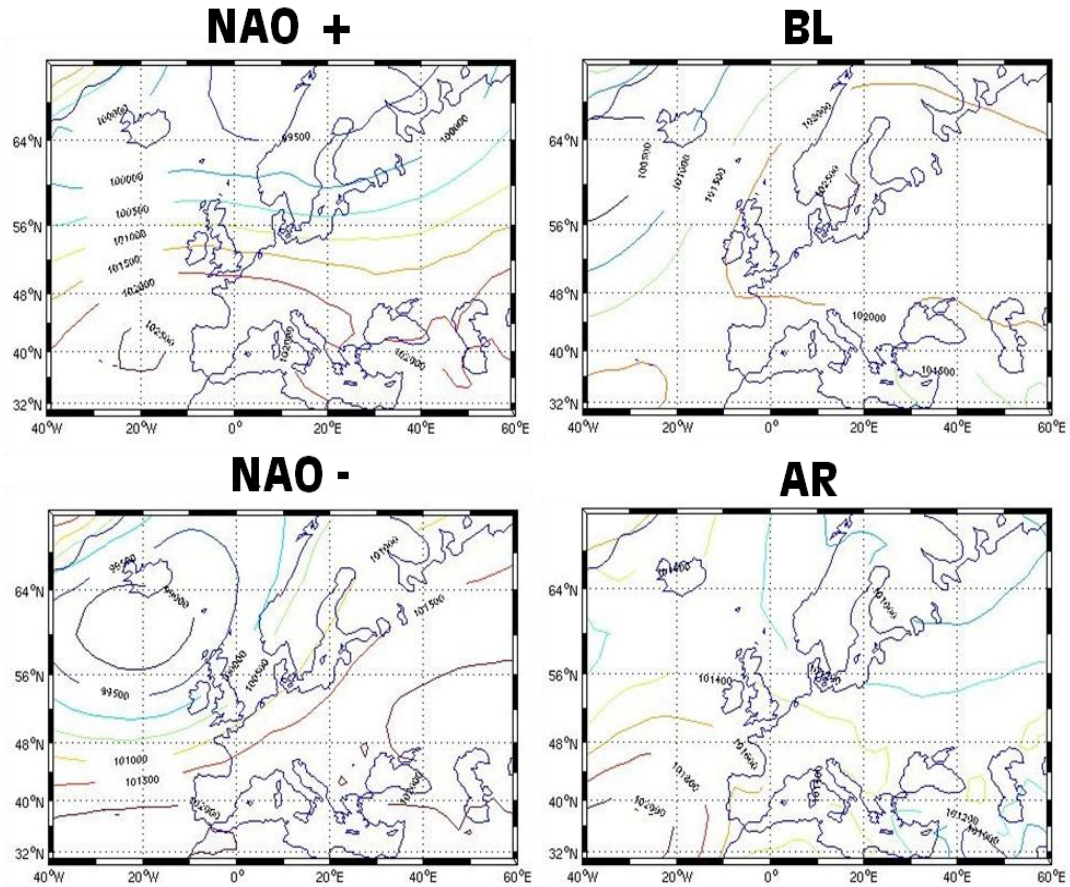
Annexe B.1. Profondeur temporelle des températures minimales et maximales.

Paramètre	Acrony.	Description	Ech. fine	Large éch.	Coef. Nég.	Coef. Pos.
Altitude	altit	Modèle Numérique de Terrain à 50m de résolution				
Pente	pen	Valeur d'inclinaison par rapport à l'horizontale (0°) du plan de régression des altitudes contenues dans les fenêtres				
Orientation	orien	Position du plan de régression par rapport au nord (0°)				
Indice Encais. et Surél.	enca	Renseigne sur le contexte topographique du pixel par rapport à l'aire d'étude. Négatif : encaissement (fortement négatif : fond de vallons étroits ; Positif : surélévation ; Nul : surface plane)				
Sinus	sinus	Variation O-E de l'orientation des versants, exprimé par son sinus.				
Cosinus	cosin	Variation N-S de l'orientation des versants, exprimé par son cosinus.				
Ampleur des Creux	Amplb	Différence entre la surface-plancher, englobant tous les thalwegs et la valeur d'altitude du pixel (MNT)				
Ampleur des Bosses	Amplc	Différence entre la surface-plafond, englobant tous les reliefs émergeants et la valeur d'altitude du pixel (MNT)				
Longueur de la partie aval	lgava	Mesure la distance qui sépare un pixel du thalweg le plus proche.				
Rugosité	rugos	Ecart type des altitudes résiduelles par rapport au plan de régression (Relief nul ou versant rectiligne => rugosité = 0)				

Annexe B.2. Description et interprétation des paramètres morphométriques utilisés pour la régression linéaire.



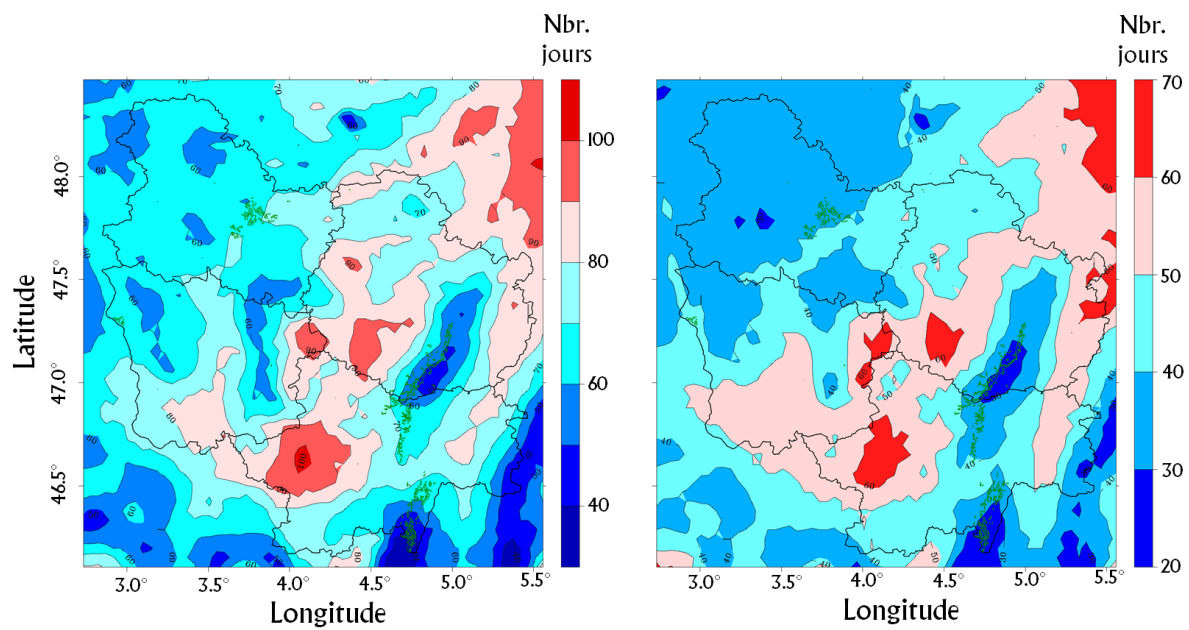
Annexe B.3. Nombre de jours par an (courbes foncées) pour lesquels la température minimale est inférieure à 15°C, pour huit stations qui ont mesuré les températures sur l'ensemble de la période 1961-2009. En pointillés, la droite de régression correspondant à chaque courbe. Noms des stations correspondant au Code INSEE : Châtillon-sur-Seine (21154001), La Rochepot (21527001), Château-Chinon (58062001), Nevers-Marzy (58160001), Mâcon (71105001), Mont-Saint-Vincent (71320001), Saint-Yan (71491001) et Sens (89387002). Les couleurs différencient les graphiques en fonction du département d'appartenance de la station.



Annexe B.4. Régimes de pressions récurrents sur l'Europe identifiés par la méthode de k-means : NAO positive (NAO+), Blocage (BL), NAO négative (NAO-) et Atlantic Ridge (AR).

	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Flo. Chu.	178	179	191	175	170	179	182	178	175	172	170	167	177	173	161	178	171	171	156	172	166
Flo. GFV	168	170	176	168	167	169	176	171	165	166	163	164	166	166	166	159	171	166	168	157	169
Ver. Chu.	240	243	251	238	239	235	238	245	244	238	233	237	239	239	239	215	241	229	227	218	233
Ver. GFV	234	237	242	235	238	231	237	246	233	234	231	234	233	235	235	218	238	231	229	228	237
Ver. WE	235	237	246	235	235	232	236	242	234	233	231	233	233	235	216	235	227	224	225	236	227
Flo. Chu.	179	180	191	175	171	179	182	177	176	172	172	167	177	173	161	179	171	171	156	172	166
Flo. GFV	168	170	177	169	167	170	176	172	165	167	164	164	166	166	166	159	171	166	169	158	169
Ver. Chu.	241	243	250	239	240	235	238	245	243	238	234	235	237	239	216	242	229	227	220	233	228
Ver. GFV	235	238	242	236	239	232	238	246	233	235	232	235	234	235	218	239	232	230	229	238	230
Ver. WE	236	238	246	236	237	232	237	243	235	234	232	233	234	236	216	236	227	224	227	237	227
Flo. Chu.	177	178	189	173	169	178	181	173	172	171	168	165	175	172	160	176	170	170	155	171	164
Flo. GFV	166	169	174	167	165	168	173	170	163	165	162	162	164	165	158	169	165	167	156	167	162
Ver. Chu.	239	240	246	237	235	233	236	243	241	234	231	227	233	232	213	239	227	226	215	228	223
Ver. GFV	233	235	239	233	232	229	235	242	231	232	229	232	231	232	216	236	228	227	226	234	228
Ver. WE	233	235	243	232	232	229	234	238	232	230	229	230	231	233	214	233	223	221	223	233	225
Flo. Chu.	181	181	193	178	173	181	184	181	179	174	175	169	179	174	163	181	173	173	158	174	169
Flo. GFV	169	171	178	170	169	171	178	174	166	169	166	165	169	168	160	173	168	170	159	171	166
Ver. Chu.	242	246	254	241	246	238	241	248	245	242	235	241	242	243	218	245	232	229	225	237	232
Ver. GFV	237	239	245	238	242	234	241	250	235	238	235	237	236	237	220	242	234	232	231	241	232
Ver. WE	238	239	249	237	241	235	240	247	237	238	235	236	236	238	218	240	230	227	229	240	230
Flo. Chu.	23	28	26	33	35	22	21	36	32	29	30	26	23	22	15	33	16	18	21	23	31
Flo. GFV	18	19	24	24	22	23	22	26	20	21	25	21	25	16	14	24	17	17	16	22	23
Ver. Chu.	34	26	36	31	51	25	27	45	29	43	33	49	44	46	24	35	30	20	49	50	42
Ver. GFV	31	33	34	39	43	38	42	54	28	39	33	34	42	35	21	37	30	32	34	44	33
Ver. WE	37	43	40	47	61	47	51	72	35	48	36	42	51	43	22	44	33	35	41	57	37
Flo. Chu.	169	170	178	164	161	171	172	163	163	160	160	157	166	167	155	165	162	165	145	161	151
Flo. GFV	162	163	166	161	160	161	167	163	157	159	155	156	157	160	153	162	158	163	150	160	153
Ver. Chu.	227	233	234	227	222	226	227	228	230	222	222	217	223	223	208	223	216	219	206	219	213
Ver. GFV	226	227	228	225	227	220	225	229	222	223	220	224	221	223	207	225	218	218	217	223	217
Ver. WE	224	225	230	224	223	219	223	224	222	220	219	221	220	223	205	221	213	214	221	221	213
Flo. Chu.	192	198	204	197	196	193	193	199	195	189	190	183	189	189	170	198	178	183	166	184	182
Flo. GFV	180	182	190	185	182	184	189	189	177	180	180	177	182	176	167	186	175	180	166	182	176
Ver. Chu.	261	259	270	258	273	251	254	273	259	265	255	266	267	269	232	258	246	239	255	269	255
Ver. GFV	257	260	262	264	270	258	267	283	250	262	253	258	263	258	228	262	248	250	251	267	250
Ver. WE	261	268	270	271	284	266	274	296	257	268	255	263	271	266	227	265	246	248	245	278	250

Annexe C.1. Distribution des dates de floraison et de véraison simulées par les modèles de Chuine, GFV et WE à partir des données spécialisées à 5 km.



Annexe D.1. Nombre de jours des mois de mars-avril-mai pour lesquels la température était inférieure à 0°C (gelées tardives) pour les périodes 1970-1987 (à gauche) et 2031-2048 (à droite).

Table des Matières

Liste des acronymes.....	13
Sommaire	17
INTRODUCTION	19
Contexte de l'étude	27
Problématique de la thèse	29
Plan de la thèse	29
CHAPITRE A : État de l'art	33
A.I. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	37
A.I.1. De l'observation... ..	37
A.I.1.a. À l'échelle mondiale	37
A.I.1.b. Les changements observés à l'échelle de la France.....	39
A.I.2. ... aux projections	45
A.II. LA VIGNE ET SA RELATION À LA TEMPÉRATURE	51
A.II.1. La vigne (<i>Vitis vinifera</i>)	51
A.II.1.a. Généralités et cycle végétatif.....	51
A.II.1.b. La vigne en Bourgogne	55
A.II.2. Influence de la température sur le développement de la vigne et la maturation du raisin.....	57
A.II.2.a. Généralités et échelle d'influence de la température	57
A.II.2.b. Influence stade par stade.....	60
A.III. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : QUELS IMPACTS SUR LA VIGNE ?	63
A.III.1. Les impacts observés sur la phénologie, la qualité du vin et l'économie vitivinicole mondiale.....	63
A.III.1.a. L'impact du point de vue phénologique	63
A.III.1.b. L'impact du point de vue de la qualité du vin	65
A.III.1.c. Impacts du point de vue économique : les nouveaux vignobles mondiaux	67
A.III.2. Les impacts probables dans le futur	71
Conclusion du Chapitre A	74
CHAPITRE B : Variabilité spatiotemporelle des températures en Bourgogne depuis 1961	75
B.I. BASE DE DONNÉES DE TEMPÉRATURES PONCTUELLES	83
B.I.1. Données initiales	84
B.I.2. Contrôles et traitements	85

B.I.2.a. Méthode de détection des valeurs aberrantes.....	85
B.I.2.b. Méthode de remplacement/suppression des données.....	87
B.II. ÉTUDE DES ÉVOLUTIONS DE TEMPÉRATURES EN BOURGOGNE	89
B.II.1. Recherche de ruptures ou/et de tendances : présentation des outils mobilisés	89
B.II.1.a. Test de Mann-Kendall (1945)	89
B.II.1.b. Test de Pettitt (1979)	89
B.II.1.c. Test de la Split Moving Window Dissimilarity Analysis (1973)	89
B.II.2. Évolutions observées.....	90
B.II.2.a. Évolutions des moyennes annuelles	90
B.II.2.b. Évolutions saisonnières	94
B.II.2.c. Évolutions des fréquences quotidiennes de métriques plus fines	96
B.II.3. Nuances infrarégionales.....	99
B.III. SPATIALISATION DES TEMPÉRATURES EN BOURGOGNE : DÉMARCHE ET MÉTHODOLOGIE .	103
B.III.1. Démarche : recherche préalable de structures spatiales récurrentes.....	104
B.III.1.a. Pourquoi une telle approche ?	104
B.III.1.b. L'outil de classification utilisé : la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)....	106
B.III.2. Méthodes d'interpolation	108
B.III.2.a. prise en compte de la morphométrie avec une régression linéaire multiple	108
B.III.2.b. Le krigeage	109
B.III.2.c. Les splines en plaques minces	110
B.IV. Résultats.....	111
B.IV.1. Étude climatique sur la période 1973-2009.....	111
B.IV.1.a Mise en évidence de structures spatiales de températures (1973-2009)	111
B.IV.1.b. Les structures spatiales.....	114
B.IV.1.c. Évolution des fréquences d'occurrence de ces structures.....	117
B.IV.2. Spatialisation des températures quotidiennes pour la période 1989-2009	121
B.IV.2.a. Similitudes dans les structures spatiales et élaboration de classes.....	122
B.IV.2.b. Spatialisation par régressions multiples basées sur la morphométrie	123
B.IV.2.c. Interprétation des régresseurs.....	126
B.IV.2.d. Interpolations géostatistiques (krigeage) des valeurs résiduelles et distributions spatiales moyennes des températures de chacune des classes	132
B.IV.3. Évaluation et comparaison des méthodes d'interpolations	136
B.IV.4. Relation entre les structures thermiques en Bourgogne et les structures d'échelle synoptique.....	140

Conclusions du chapitre B	142
CHAPITRE C : La relation entre la température et le Pinot noir : de l'observation à la modélisation	145
C.I. DONNÉES/MODÈLES PHÉNOLOGIQUES ET MÉTHODOLOGIE	151
C.I.1. Objectifs et organisation du chapitre	151
C.I.2. Données phénologiques	152
C.I.3. Indices et modèles phénologiques	153
C.I.3.a. Les indices	154
C.I.3.b. Les modèles phénologiques	155
C.II. RELATION TEMPERATURE/PHÉNOLOGIE DU PINOT NOIR EN BOURGOGNE	163
C.II.1. Variabilité temporelle de la phénologie de la vigne	163
C.II.2. Évolution temporelle de la phénologie du Pinot noir à Savigny-lès-Beaune	164
C.II.3. Variabilité temporelle des indices agroclimatiques	167
C.II.4. Variabilité spatiale des indices sur la Bourgogne	170
C.III. Modélisation de la phénologie de la vigne	177
C.III.1. Évaluation des modèles phénologiques	178
C.III.2. Sensibilité des modèles phénologiques aux changements de température	182
C.III.2.a. Réchauffement des températures simulé par un modèle stochastique (LARS-WG)	182
C.III.2.b. Changement climatique simulé par dérive (+3°C, +5°C et +10°C)	185
C.III.2.c. Discussion sur les divergences entre les modèles	188
C.III.3. Applications des modèles sur les données spatialisées	193
C.III.3.a. Évaluation de la spatialisation de la phénologie	194
C.III.3.b. Application des modèles sur les données spatialisées à 5 kilomètres	200
CHAPITRE D : Impact du changement climatique projeté sur le Pinot noir en Bourgogne	209
D.I. Introduction	215
D.I.1. Contexte et démarche de régionalisation	215
D.I.2. Principales étapes du travail	216
D.I.2.a. Évaluation de la désagrégation dynamique du climat par ARW/WRF	216
D.I.2.b. Régionalisation du réchauffement en Bourgogne	218
D.I.2.c. Effets du réchauffement sur le Pinot noir en Bourgogne	219
D.II. Évaluation de la désagrégation dynamique du climat pour la Bourgogne	221
D.II.1. Capacité à reproduire la variabilité temporelle des températures en Bourgogne	221
D.II.2. Variabilité spatiale de la température	224

D.II.3. Une évaluation spatiotemporelle	231
D.II.3.a. Géographie de la variabilité temporelle	231
D.II.3.b. Découpage temporel de la répartition spatiale : utilisation des classes de températures.....	233
D.III. Régionalisation des températures par WRF sur la période 1970-1987, en désagrégant les sorties du modèle ARPEGE/SRES A2	241
D.III.1. Climatologie des températures pour la Bourgogne.....	241
D.III.2. WRF est-il suffisamment réaliste pour reproduire correctement le cycle phénologique ?	246
D.III.2.a. Comparaison de la phénologie observée et simulée à partir des données WRF	246
D.III.2.b. Comparaison sur l'ensemble du territoire bourguignon	247
D.III.2.c. Répartition spatiale des dates d'occurrences des stades de floraison et de véraison simulées À partir des désagrégations de WRF	248
D.IV. Régionalisation du réchauffement et de ses impacts sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne	251
D.IV.1. Régionalisation du réchauffement	251
D.IV.1.a. Quantification et régionalisation du réchauffement.....	251
D.IV.1.b. Caractéristiques du réchauffement.....	255
D.IV.2. Impact du réchauffement sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne.....	257
D.IV.2.a. Effets sur le déroulement du cycle	257
D.IV.2.b. Analyse <i>via</i> les caractéristiques du réchauffement.....	261
Conclusions sur le Chapitre D.....	263
CONCLUSIONS	267
CC.1. Principaux résultats des chapitres B, C et D.....	273
CC.1.a. Le réchauffement climatique et la relation entre la température et le Pinot noir en Bourgogne	273
CC.1.b. Élaboration d'une base de données de températures spatialisée à échelle fine sur la Bourgogne	274
CC.1.c. Validation et sensibilité des modèles phénologiques	275
CC.1.d. Régionalisation du climat par le modèle climatique régional WRF	276
CC.2. Impact projeté du réchauffement climatique en Bourgogne à l'horizon 2031-2048	277
CC.3. Perspectives de recherches.....	278
Bibliographie	283
Listes Figures.....	297
Listes Tableaux	309

Annexes.....	313
Table des Matières	321
Résumé de la thèse	327
Thesis abstract.....	327



RESUME DE LA THESE

La vitiviniculture est un secteur économique et culturel important en Bourgogne. L'actuel changement climatique soulève diverses questions notamment sur son impact sur les cultures. Dans cette thèse, l'idée est d'élaborer une méthodologie afin de répondre à la problématique : quels seront les impacts possibles des changements de températures sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne à l'horizon 2031-2048 ?

L'évolution des températures en Bourgogne depuis 1961 est caractérisée par un saut positif de température à la fin des années 1980 suivi par une période où la température augmente d'environ 1,5°C.

L'un des intérêts de cette thèse réside dans l'élaboration, en suivant une stratégie élaborée durant la thèse, d'une base de données spatialisée réalisée sur la période 1989-2009 afin d'estimer la capacité du modèle WRF à reproduire le climat bourguignon en désagrégant des données climatiques de large échelle. Le modèle reproduit de façon satisfaisante le cycle saisonnier et la variabilité spatiale climatique globale aux biais près (froid sur les Tx et chauds sur les Tn).

Pour régionaliser le changement climatique, WRF a été utilisé pour désagréger des données issues du scénario SRES/A2 sur les périodes 1970-1987 et 2031-2048. Après avoir été évalués et intercomparés trois modèles phénologiques utilisant les données de températures moyennes pour simuler les dates d'occurrence des stades phénologiques du Pinot noir, ont été appliqués sur ces désagréments.

L'impact de l'augmentation des températures à l'horizon 2031-2048 (SRES/A2), estimée à 1,35°C en moyenne, se caractérise par une précocité de la floraison d'au moins 7 jours et une précocité de la véraison d'au moins 15 jours. La durée interstade est également diminuée de l'ordre de 5 jours.

Mots clés : changement climatique, température, Pinot noir, Bourgogne, phénologie, modèle climatique régional.

THESIS ABSTRACT

The viticulture is an important economic and cultural sector in Burgundy. The current climate change raises a number of issues including its impact on crops. In this thesis, the idea is to develop a methodology to address the problem: what are the potential impacts of changes in temperature on the phenology of Pinot noir in Burgundy for years 2031-2048?

The evolution of temperatures in Burgundy since 1961 is characterized by a positive temperature shift at the end of the 1980s followed by a period where the temperature increases of about 1.5 ° C.

One of the interests of this thesis is to develop, following a strategy developed during the thesis, a spatial database conducted over the period 1989-2009 to estimate the ability of the WRF model to reproduce the climate Burgundy by disaggregating large scale data. The model reproduces satisfactorily the seasonal and spatial variability in global climate despite bias (cold on the Tx and hot on the Tn).

To regionalize the climate change, WRF was used to disaggregate data from the scenario SRES/A2 on the periods 1970-1987 and 2031-2048. After being evaluated and inter-compared three phenological models, using average temperatures data to simulate the dates of occurrence of phenological stages of Pinot Noir, have been applied to these decompositions.

The impact of warming temperatures on the horizon 2031-2048 (SRES/A2), estimated at 1.35 ° C on average, is characterized by an earlier flowering and veraison of about 7 and 15 days respectively. The interstadial duration is also reduced of about 5 days.

Key words : climate change, temperature, Pinot noir, Burgundy, phenology, Regional Climate Model.