



HAL
open science

Changement climatique dans le vignoble de Champagne : Modélisation thermique à plusieurs échelles spatio-temporelles (1950-2100)

Elodie Briche

► **To cite this version:**

Elodie Briche. Changement climatique dans le vignoble de Champagne : Modélisation thermique à plusieurs échelles spatio-temporelles (1950-2100). Géographie. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2011. Français. NNT : . tel-00653635v2

HAL Id: tel-00653635

<https://theses.hal.science/tel-00653635v2>

Submitted on 5 Jan 2012

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.

THÈSE DE DOCTORAT
en GÉOGRAPHIE
Dynamique des Milieux et Risques

*Changement climatique
dans le vignoble de Champagne :
Modélisation thermique
à plusieurs échelles spatio-temporelles
(1950-2100)*

Présentée par
Élodie Briche

Thèse dirigée par Gérard Beltrando et Hervé Quénol,
réalisée au sein de l'UMR PRODIG
et dans le cadre de l'ANR TERVICLIM

Soutenance le 11 Octobre 2011

BELTRANDO Gérard	Professeur	Université Paris Diderot	Directeur
CARREGA Pierre	Professeur	Université Nice - Sophia Antipolis	Rapporteur
CAUTENET Sylvie	Professeur	Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand)	Examineur
ENDLICHER Wilfried	Professeur	Université Humboldt (Berlin)	Président
KERGOMARD Claude	Professeur	ENS-ULM (Paris)	Rapporteur
LANGELLIER François	Ingénieur agronome	CIVC (Epernay)	Examineur
QUÉNOL Hervé	Chargé de recherche	CNRS Laboratoire COSTEL (Rennes)	Directeur

UNIVERSITÉ PARIS DIDEROT - Paris 7
École doctorale : E.E.S.C.
"Économie, Espaces, Sociétés, Civilisations"

THÈSE DE DOCTORAT
en GÉOGRAPHIE
Dynamique des Milieux et Risques

*Changement climatique
dans le vignoble de Champagne :
Modélisation thermique
à plusieurs échelles spatio-temporelles
(1950-2100)*

Présentée par
Élodie Briche

Thèse dirigée par Gérard Beltrando et Hervé Quénol,
réalisée au sein de l'UMR PRODIG
et dans le cadre de l'ANR TERVICLIM

Soutenance le 11 Octobre 2011

BELTRANDO Gérard	Professeur	Université Paris Diderot	Directeur
CARREGA Pierre	Professeur	Université Nice - Sophia Antipolis	Rapporteur
CAUTENET Sylvie	Professeur	Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand)	Examineur
ENDLICHER Wilfried	Professeur	Université Humboldt (Berlin)	Président
KERGOMARD Claude	Professeur	ENS-ULM (Paris)	Rapporteur
LANGELLIER François	Ingénieur agronome	CIVC (Epernay)	Examineur
QUÉNOL Hervé	Chargé de recherche	CNRS Laboratoire COSTEL (Rennes)	Directeur

*A mes Parents,
Mes Grands Parents
et Clothilde.*

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements, autant chaleureux que professionnels sont pour Gérard Beltrando, mon directeur de thèse. Merci pour sa patience, son écoute, sa confiance et son soutien depuis le master 2.

Je souhaite également vivement remercier Hervé Quéno, mon co-directeur, sans qui je ne me serais pas lancée dans cette aventure et qui m'a permis d'obtenir un financement dans le cadre de l'ANR TERVICLIM.

Je remercie les membres du jury, Pierre Carrega et Claude Kergomard d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse, Wilfried Endlicher d'être président du jury ainsi que Sylvie Cautenet et François Langellier d'être examinateurs de cette thèse.

Dans la chronologie de mon parcours de géographe-climatologue, j'adresse mes chaleureuses pensées à Caroline qui m'a fait découvrir la géographie en CPGE, Sylvain Bigot qui a provoqué ma curiosité pour la climatologie et Séb., toujours présent depuis le début de l'aventure.

Une pensée amicale aussi pour Tic et Tac..., mes coachs de thèse ;).

Je tiens à remercier les membres de l'ANR TERVICLIM, du Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne, Samuel Somot de Météo-France pour leurs disponibilités, et de m'avoir permis d'accéder à une base de données conséquente. Cette thèse est un parcours enrichissant de rencontres humaines tout aussi chaleureuses qu'improbables. Un grand merci à l'équipe de l'INRA d'Angers (Séverine Roger et Gérard Barbeau), à Olivier Garcia, François Langellier, Laurent Panigai, Valérie Bonnardot, Olivier Planchon, Sylvie et Guy Cautenet (doté d'un humour qui déstresse tout thésard).

Un merci aux climatologues pour leur écoute, conseils : je pense notamment à la grande sœur des doctorants (Malika), à Josyane, Ronchail, Romain G. et aussi aux doctorants (Ariane, Lucile, Mélanie, Coura, Sako, Romain et tous les autres). Une bise toute chaleureuse à mes deux perles africaines Sako et Coura.

Je veux maintenant adresser mes pensées et remerciements les plus sincères à mes amis qui ont fait preuve d'un soutien sans failles :

- Mes couples préférés Joan & Boule, Noré & Diane, Virginie et Benoît,*
- Mes amis d'enfance, mes vieux potes toujours là...Audrey, Tony, Astrid, Noémie, Jéjé, je pense bien à vous,*

Merci aussi à Anais, Mériem, Yann, Solène, Lise, Yves, Antoine, Aurél., Olivier, Claire, Cyrillou, Zoé ;)...pour leurs conseils, pour les soirées...pour les bons moments de détente.

Enfin, une pensée et un énorme merci à Popinoute (Pauline T.) pour le chemin parcouru...

Plein de bisous à mes deux compagnons de doctorat avec qui tout a commencé il y a quatre ans et sans qui l'aventure n'aurait pas été aussi dynamique : Guilhaem et Divya...

Un dernier remerciement à ma famille, présente à chaque instant...Je n'ai pas assez de mots pour exprimer ma gratitude pour votre soutien. Je vous aime fort.

Changement climatique dans le vignoble de Champagne : Modélisation thermique à plusieurs échelles spatio-temporelles (1950-2100)

Les effets du changement climatique à l'échelle planétaire ont déjà des répercussions sur la viticulture et ces changements engendrent des interrogations sur son fonctionnement futur. L'évaluation des modifications possibles sur le vignoble de Champagne, notamment en termes d'extrêmes thermiques dommageables pour la vigne tels que l'aléa gélif printanier et les canicules, présente donc un intérêt pour la profession. Les températures influencent en effet le bon déroulement du cycle végétatif de la vigne et une avancée des stades phénologiques est déjà observée en Champagne. Ce vignoble présente un intérêt particulier du fait de sa position septentrionale mais aussi parce que les analyses y sont facilitées par la densité du réseau météorologique en place depuis près de 20 ans.

Pour établir une prospective des conditions thermiques possibles, des sorties des modèles du climat français LMD et ARPEGE-Climat (RETIC) respectivement, à 300 km et 50 km de résolution sont validées et analysées sur une période de contrôle (1950 à 2000). Ils permettent ensuite de donner un aperçu des conditions thermiques et bioclimatiques futures (2001 à 2100) selon trois scénarios de changement climatique, les plus couramment utilisés : A1B, B1 et A2. La période de contrôle permet de mettre en évidence les biais froids des distributions statistiques des sorties de modèles au printemps et en été en termes d'estimation de fréquences d'extrêmes et de choisir le modèle ARPEGE-Climat (RETIC). Les sorties thermiques de ce modèle sont alors utilisées pour évaluer l'évolution jusqu'à 2100 des conditions bioclimatiques et thermiques futures. La fréquence des extrêmes gélifs printaniers au moment du débourrement devrait diminuer en avril mais dans l'hypothèse d'un débournement plus précoce, ces extrêmes devraient, d'après les modèles, rester importants en mars et provoqueraient un gel accru des bourgeons. Celle des extrêmes chauds estivaux devrait augmenter dans le futur.

L'analyse à échelle régionale est complétée par une analyse topoclimatique grâce au modèle à méso-échelle RAMS, qui permet d'obtenir une modélisation spatiale des températures. Incluant les facteurs locaux, ce modèle produit des résultats à résolution de 200 m. Les simulations de validation sont réalisées sur les événements extrêmes gélifs printaniers (du 4 au 9 avril) et caniculaires estivaux (du 4 au 8 août) de l'année 2003, qui a provoqué le gel des bourgeons et l'échaudage des baies et qui est considérée ici comme exceptionnelle et représentative « du climat futur ». Les températures simulées (200 m) sur la Champagne sont comparées aux températures enregistrées par des stations sur les coteaux. Le modèle reproduit bien le cycle journalier des températures avec des biais plus ou moins bien marqués notamment sur les minimas et maximas journaliers.

Mots-clés : aléa gélif printanier, canicule, températures extrêmes, changement climatique, vignoble de Champagne, modèles du climat.

Abstract

Climate change in Champagne vineyard: Thermal modeling at several spatio-temporal scales (1950-2100)

Global climatic change has already consequences on viticulture worldwide and these modifications imply some questions about future. Evaluation of possible modifications in Champagne vineyard is necessary in terms of thermal extremes for vineyard as spring frost during budbreak and heat-waves. Indeed temperature influences phenological cycle and earlier phenological stages have already been observed. This vineyard is particularly interesting to study because of its northern location and thanks to a large network of weather stations since 20 years.

To establish a prospective of thermal possible conditions, data of French climate models LMD and ARPEGE-Climate model, respectively at 300 km and 50 km of resolution, are validated and analyzed on a control period (1950 to 2000). They are also used to give an overview of bioclimatic and thermal future conditions (2001 to 2100) with three scenarios, currently used (A1B, B1 and A2). The control period shows cold biases within statistical distributions of climate models data in spring and summer, in terms of extremes frequencies estimation and better results with ARPEGE climate model. Data of this model are used to assess thermal and bioclimatic futures conditions. Summer extremes could increase in the future while cold spring extremes could decrease during budbreak. Budbreak could be earlier and spring cold extremes in March could cause more severe frost of buds.

Regional analysis is completed by a local analysis with RAMS meso-scale model, which downscales simulations at a resolution of 200 m, taking into account local factors. The validation modeling is proceeded during the 2003 extreme climatic events (late spring frost and summer heat wave), this year is considered as exceptional and representative of the "future climate" which caused buds frost and berries warming. Simulated temperatures (200 m) for the Champagne vineyard were compared to recorded temperatures by weather stations located within the vineyards. The model reproduced the diurnal cycle of temperatures correctly with biases more or less marked depending dates.

Key-words: Champagne vineyard, climate change, climate model, extreme temperature, heat-wave, spring frost.

Sommaire

Introduction Générale	1
<i>Première partie : Etat de l'art</i>	9
Chapitre 1 : Du changement climatique à la modélisation numérique	11
Chapitre 2 : Impacts du changement climatique sur la viticulture	31
Chapitre 3 : Le changement climatique dans le vignoble champenois.....	55
<i>Deuxième partie : Données et méthodes</i>	77
Chapitre 4 : Les données de températures observées et simulées	79
Chapitre 5 : Les données environnementales et agronomiques.....	101
Chapitre 6 : Approches méthodologiques.....	107
<i>Troisième partie : Les sorties régionales de modèles du climat : Du climat passé à la prospective climatique et bioclimatique future au sein du vignoble champenois</i>	125
Chapitre 7 : Comparaison thermique entre les observations et les simulations de 1950 à 2100 pour les modèles numériques LMD et ARPEGE-Climat (RETIC)	127
Chapitre 8 : Comparaison entre ARPEGE-Climat (RETIC) et la station sur la période de contrôle (1950-2000) : Aspects thermiques et bioclimatiques	141
Chapitre 9 : Analyse prospective climatique et bioclimatique avec ARPEGE-Climat (RETIC) de 2001 à 2100	157
<i>Quatrième partie : Modélisation spatiale à méso-échelle RAMS en 2003</i>	173
Chapitre 10 : Observation, validation et simulation de l'aléa gélif printanier.....	175
Chapitre 11 : Observation, validation et simulation de la canicule estivale.....	203
Conclusion	223
Bibliographie	229
Table des Figures	245
Table des Tableaux	255
Table des Matières	257
Liste des Acronymes	263
Table des Annexes	I

Introduction Générale

Avec l'explosion démographique à l'échelle du globe, la consommation d'énergie a très largement augmenté, notamment en raison de l'utilisation de combustibles fossiles. Les émissions annuelles de dioxyde de carbone fossile ont augmenté de 6,4 (de 6,0 à 6,8) gigatonnes de Carbone (GtC) par an pour la période 1990-1999 à 7,2 (de 6,9 à 7,5) GtC par an pour la période 2000-2005 (GIEC, 2007) ce qui explique en partie l'effet de serre additionnel à l'origine du changement climatique. Ce dernier, selon les modèles de circulation générale (MCG), pourrait contribuer à l'augmentation des températures au sein d'une fourchette allant de 1,5°C à 4,5°C en considérant un doublement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Le lien entre l'augmentation de la température et la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre (GES) est conforté dans le dernier rapport du GIEC (2007).

Cette augmentation de températures n'est pas sans conséquences sur les écosystèmes notamment sur l'agriculture et les premières répercussions des changements imputables au changement climatique sont déjà perceptibles tels que l'avancée des stades phénologiques d'espèces végétales comme la vigne (Delecolle *et al.*, 1999 ; Ganichot, 2002 ; Lebon, 2002 ; Seguin et Stengel, 2002 ; Stock *et al.*, 2003 ; Duchêne et Schneider, 2004 ; Tondut *et al.*, 2006 ; White *et al.*, 2006 ; Duchêne et Schneider, 2007 ; Seguin *et al.*, 2007 ; Storchmann, 2007 ; Seguin, 2010). La vigne est un bio-indicateur du changement climatique : son développement est fortement influencé par la température et généralement il existe des archives de données de plus de 30 ans permettant de détecter le signal du changement climatique. Concernant la viticulture, cette avancée des stades phénologiques implique des vendanges plus précoces ainsi qu'une augmentation du taux de sucre et donc d'alcool (Agenis-Nevers, 2006 ; Seguin, 2010) engendrant des vins de très haute qualité depuis une vingtaine d'années (Seguin, 2010). Cependant, la température pourrait devenir un facteur limitant et dommageable pour le développement végétatif de la vigne en cas d'extrêmes tels que les vagues de chaleur. Les possibles répercussions économiques qui découleraient de ces événements extrêmes suscitent de nombreuses interrogations à l'échelle des vignobles.

Étudier le changement climatique d'une région viticole nécessite donc la prise en compte des échelles climatiques spatiales et temporelles de la zone d'étude mais également des modèles du climat pouvant donner une prospective thermique. De nombreuses classifications existent et fournissent une typologie des échelles de climat (Orlanski, 1975 ; Yoshino, 1977 ; Beltrando et Chéméry, 1995 ; Planchon, 1997 et 1998 ; Hufty, 2001 ; Quénot, 2002). Les échelles varient du macroclimat, impliquant la circulation atmosphérique des grandes masses d'air et correspondant aux grands domaines climatiques au microclimat, s'établissant sur des espaces restreints de quelques mètres à quelques centimètres. Ces échelles spatiales et temporelles d'analyse varient bien entendu selon le but de l'étude et les

définitions spatiales et temporelles varient selon les auteurs. Orlanski (1975) développe essentiellement la notion de méso-climat avec des échelles différentes de méso-échelles dont deux nous intéressent particulièrement la méso-échelle « γ » correspondant à l'échelle locale et l'échelle « β » correspondant à l'échelle régionale. Dans un vignoble, il faut s'intéresser aux variations atmosphériques imbriquées dans un système à plusieurs échelles spatiales et temporelles (Figure 1) allant du mésoclimat ou climat régional au microclimat en passant par le topoclimat (d'une centaine de kilomètres à quelques mètres ; de quelques jours à quelques heures). Le microclimat en viticulture correspond au climat liant les interactions entre le végétal et son environnement, il caractérise les conditions par exemple thermiques à l'échelle d'un cep de vigne, au pas de temps de la minute à l'heure ; celle du topoclimat caractérise l'influence de la topographie sur les rangées de vigne, il s'agit du climat d'un coteau viticole généralement inférieur à 10 km où les observations sont d'horaire à quotidienne et enfin le climat régional qui caractérise la région viticole. Ces échelles spatio-temporelles sont emboîtées or les connaissances concernant l'emboîtement des échelles spatiales sont imparfaites à l'heure actuelle notamment en termes de modélisation climatique. En effet, plus l'échelle d'analyse s'affine, plus le nombre de facteurs influant sur les variables météorologiques et climatiques augmente ainsi que la compréhension requise (Beltrando et Chémery, 1995 ; Beltrando, 2004). Les modèles convergent à petite échelle mais à grande échelle - celles des géographes -, de nombreuses incertitudes subsistent quant à « *l'amplitude et à la localisation (dans le temps et dans l'espace) des effets attendus* » (Le Treut, 2010) : les phénomènes extrêmes souvent de courte durée, à des échelles topoclimatiques et microclimatiques, issus de combinaisons de variables climatiques complexes, sont extrêmement difficiles à modéliser. Ces phénomènes extrêmes tels que le gel ou les vagues de chaleur sont pourtant les premières inquiétudes des professionnels dans un contexte de changement climatique car ils pourraient s'intensifier et causer de nombreux dommages sur les potentielles vendanges (Briche *et al.*, 2011a). La puissance des calculateurs joue aussi un rôle important dans la désagrégation spatiale, la résolution géographique s'améliorant en fonction des progrès informatiques. La sensibilité des modèles dépend des échelles spatiales et temporelles considérées, d'où la difficulté de désagréger l'information à l'échelle de la « construction sociale » (Hinnewinkel, 2004) qu'est un terroir viticole sans prendre en considération ses enjeux et la réalité terrain. La qualité du raisin ou du vin est souvent en relation avec les caractéristiques locales (pente, sol, etc.) et microclimatiques (taille de la vigne, rosée, humidité du sol, etc.) : ces variations du milieu aux échelles fines déterminent les spécificités du terroir (Quénol, 2002 ; Barbeau, 2007). Il est donc encore à l'heure actuelle difficile d'obtenir une modélisation du climat à l'échelle locale sans marges d'incertitudes inhérentes initialement au seul fait qu'on ne peut pas prédire le futur et que si puissantes soient les machines, un modèle est une simplification d'une réalité extrêmement complexe. Néanmoins, les modèles du climat sont les seuls outils capables d'anticiper les conditions

thermiques futures à l'heure actuelle et à ce titre il paraît judicieux d'étudier le vignoble de Champagne.

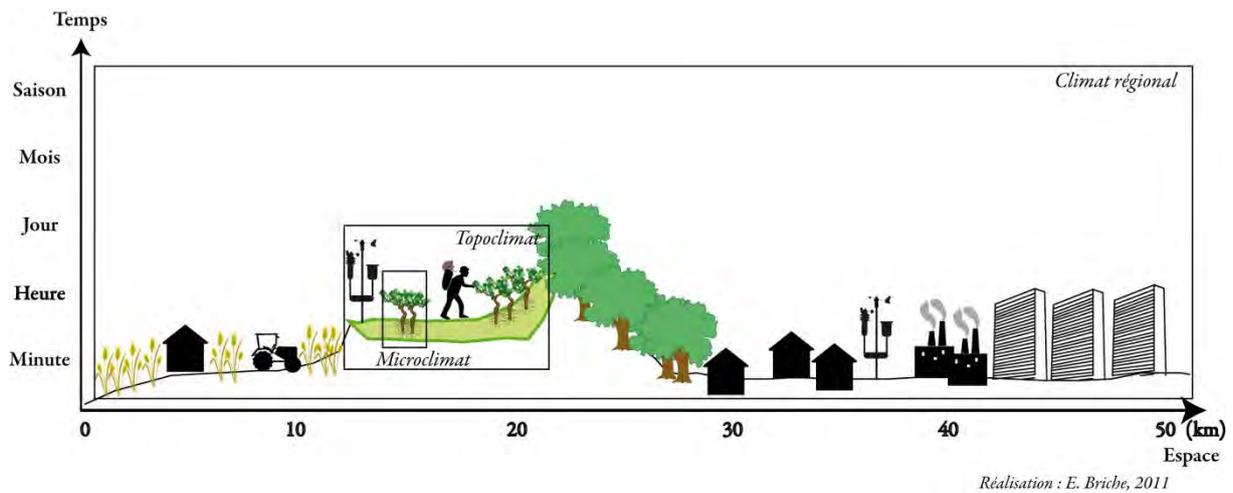


Figure 1 : Échelles spatiales et temporelles utilisées dans le cadre de cette recherche sur le vignoble champenois.

Ce vignoble est étudié dans le cadre de cette thèse, plus particulièrement le vignoble de la Marne qui représente les 2/3 de la surface cultivée soit environ 22 000 ha (Figure 2), dans un souci d'homogénéité spatiale. De nombreuses études ont été réalisées sur les interactions climat et vigne dans ce vignoble notamment parce qu'il dispose d'une base de données conséquente issue d'un réseau de stations implantées depuis une quinzaine d'années (Beltrando *et al.*, 1992 ; Sarmir, 1995 ; Beltrando, 1998). Les études ont été réalisées pour la plupart en partenariat avec le Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne (CIVC) et l'UMR PRODIG sur les questions de spatialisation du gel printanier, fortement présent dans ce vignoble septentrional et des impacts de la construction de la ligne TGV Est sur les écoulements d'air froid printanier (Beltrando *et al.*, 1992 ; Bridier *et al.*, 1995 ; Sarmir, 1995 ; Beltrando, 1997 ; Beltrando, 1998 ; Bridier *et al.*, 2000 ; Sarmir et Lecompte, 2000 ; Quénol, 2002 ; Quénol *et al.*, 2003 ; Madelin, 2004 ; Madelin et Beltrando, 2005).

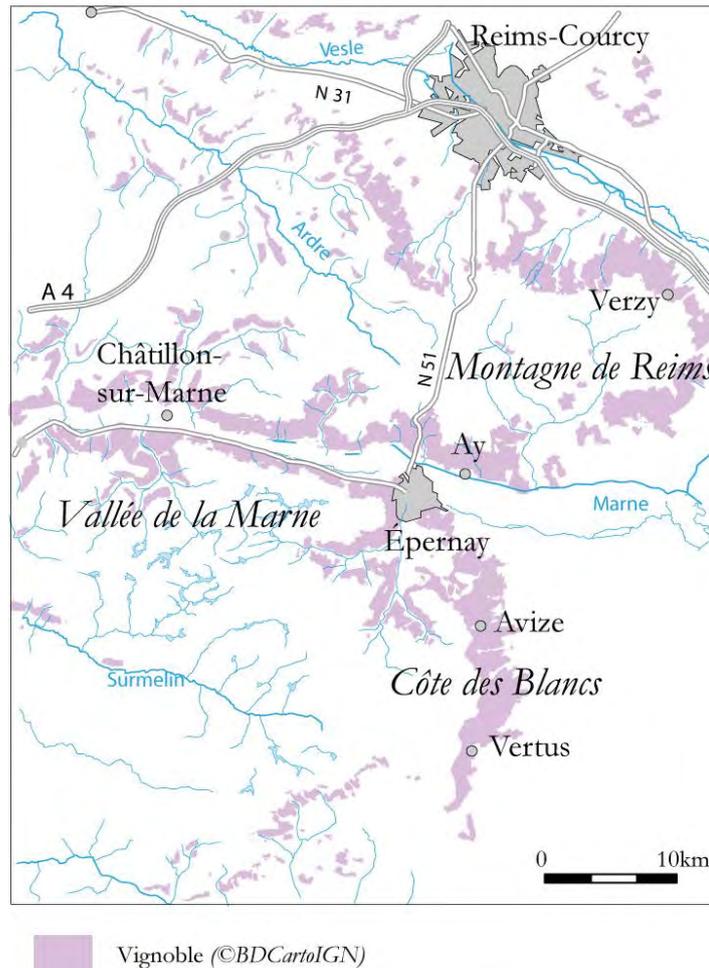


Figure 2 : Zone d'étude : le Vignoble de la Marne (Adapté du CIVC)

Cette thèse s'inscrit également dans le cadre de l'ANR-JC07-194103 TERVICLIM intitulée « observation et modélisation spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique ». Ce projet multidisciplinaire rassemble les compétences d'agronomes, de modélisateurs du climat et de géographes-climatologues spécialisés dans la mesure climatique, la spatialisation des données mais aussi dans l'analyse diagnostique de séries de données climatiques. Il vise à mettre en place une méthodologie reposant sur des observations climatiques et agronomiques et sur de la modélisation spatiale du climat, permettant d'évaluer la variabilité spatiale des paramètres atmosphériques à l'échelle d'un terroir viticole dans un contexte de changement climatique. Cette méthodologie est développée dans plusieurs vignobles caractéristiques où les conditions climatiques jouent un rôle important sur la qualité du vin et où des expérimentations scientifiques sont menées depuis plusieurs années : en France dans des vignobles tels que la Champagne et le Val de Loire et à l'étranger comme en Afrique du Sud et au Portugal (Carey, 2001 ; Bonnardot *et al.*, 2001 ; Conradie *et al.*, 2002 ; Bonnardot *et al.*, 2002 ; Planchon *et al.*, 2004 ; Bridier *et al.*, 2004 ; Madelin, 2004 ; Quénot *et al.*, 2004 ; Bonnardot *et al.*, 2005 ; Sturman et Tapper,

2005 ; Bonnardot et Carey, 2007 ; Briche *et al.*, 2007 ; Chabin *et al.*, 2007 ; Quénot *et al.*, 2007 ; Monteiro et Lopes, 2007 ; Bonnardot et Carey, 2008 ; Madelin *et al.*, 2008 ; Quénot *et al.*, 2008 ; Bonnardot et Cautenet, 2009 ; Bonnefoy *et al.*, 2009 ; Briche *et al.*, 2009a ; Briche *et al.*, 2009b ; Beltrando et Briche, 2010 ; Bonnardot *et al.*, 2010 ; Bonnefoy *et al.*, 2010 ; Briche *et al.*, 2010 ; Madelin *et al.*, 2010 ; Bonnardot *et al.*, 2011 ; Briche *et al.*, 2011a ; Briche *et al.*, 2011b). Les approches du changement climatique par les modélisateurs du climat sont aujourd'hui trop approximatives pour apporter des réponses à l'échelle d'un terroir¹ viticole. Les résolutions spatiales des sorties des modèles de circulation générale (MCG) sont de plusieurs dizaines kilomètres de côté : de ce fait, une modélisation à échelles fines est obtenue avec le modèle à méso-échelle RAMS en étroite collaboration avec Sylvie et Guy Cautenet, modélisateurs du Climat du Laboratoire de Météorologie et de Physique (LaMP) à Clermont-Ferrand. Ce modèle a déjà permis de réaliser des études en relation avec la viticulture. La région viticole de Stellenbosch (Western Cape, Afrique du Sud) a fait l'objet d'une modélisation atmosphérique. Les simulations (résolutions de 5 km, 1 km et 200 m) ont permis d'étudier le développement des circulations atmosphériques locales, notamment la brise de mer et d'évaluer son influence sur le vignoble. (Bonnardot *et al.*, 2001 ; Bonnardot *et al.*, 2002 ; Planchon *et al.*, 2004 ; Bonnardot et Cautenet, 2009). En effet, la présence de la brise de mer, caractérisée par un changement de direction et une accélération de la vitesse du vent, s'accompagnant d'un apport d'humidité et d'une baisse de la température est un aspect météorologique important car des vents persistants faibles à modérés peuvent limiter l'activité physiologique de la vigne, affectant la croissance et le rendement (Bonnardot *et al.*, 2005).

Cette thèse au carrefour de l'agronomie et de la modélisation numérique du climat met en avant les compétences du géographe-climatologue afin de mettre en évidence l'évolution probable des températures au sein du vignoble dans un contexte de changement climatique, notamment en termes de fréquences d'extrêmes dommageables pour la vigne pouvant avoir d'importantes conséquences économiques et sociales.

Le principal objectif de cette thèse est d'établir une prospective thermique sur le changement climatique en Champagne jusqu'à la fin du XXI^{ème} siècle à partir de l'analyse de sorties thermiques de modèles du climat à des échelles spatio-temporelles différentes dites « globale », « régionale » et « locale ». Trois modèles sont utilisés dans le cadre de cette recherche : les modèles français de Météo-France (ARPEGE-Climat) et de l'Institut Pierre Simon Laplace (LMD) notamment utilisés pour la rédaction du 4^{ème} rapport du GIEC (2007) et le modèle à méso-échelle RAMS dont les sorties sont obtenues auprès de Sylvie et Guy Cautenet. Ce travail se doit de montrer l'apport des modélisations numériques du climat de différents types, à trois échelles d'analyse dans une étude sur l'objet géographique que

¹ OIV, 2010 : « Le « terroir » vitivinicole est un concept qui se réfère à un espace sur lequel se développe un savoir collectif des interactions entre un milieu physique et biologique identifiable et les pratiques vitivinicoles appliquées, qui confèrent des caractéristiques distinctives aux produits originaires de cet espace. »

représente le vignoble de Champagne qui bénéficie pour le moment de conditions thermiques plus favorables (Briche, 2007 ; Briche *et al.*, 2007). Elle se doit d'insister sur la fiabilité des modèles quant à la reproduction des phénomènes extrêmes défavorables à la viticulture comme le gel printanier et les vagues de chaleur estivale et de proposer un diagnostic de la fréquence de ces événements dans le futur.

Cette thèse s'organise en quatre parties afin de montrer les conséquences possibles du changement climatique sur les températures, notamment sur les extrêmes défavorables à la vigne en adoptant une démarche de validation et de critique de sorties de modèles du climat à plusieurs échelles spatio-temporelles.

Dans une première partie, un état de l'art de la bibliographie traitant du changement climatique est dressé en partant de l'échelle globale pour définir le phénomène étudié et ses enjeux, puis à l'échelle des vignobles du monde entier pour établir un bilan des travaux réalisés, des changements observés dans les agrosystèmes viticoles. Enfin un constat du changement climatique observé en Champagne et les particularités de ce vignoble sont développées afin d'insister sur les spécificités et les enjeux du choix de cette zone d'étude.

Dans une deuxième partie, les données thermiques observées et simulées seront développées afin de montrer les échelles temporelles et spatiales d'analyse de cette étude. En effet, différents modèles à capacité temporelle et spatiale différente sont utilisés afin de dresser un bilan des perspectives possibles au niveau thermique au sein du vignoble champenois et surtout de pouvoir prendre en compte pas à pas les caractéristiques locales du vignoble champenois. Les données environnementales utilisées dans le cadre de la calibration du modèle RAMS sont également présentées. Enfin, nous développerons les approches méthodologiques pour valider les sorties des modèles du climat sur une période dite « de contrôle » de 1950 à 2000 et pour les utiliser dans une démarche prospective sur les simulations futures de 2001 à 2100.

Les résultats de ce travail de recherche sont présentés en deux temps. Les trois modèles utilisés dans cette thèse présentent des caractéristiques spatiales et temporelles ce qui permet d'obtenir des degrés d'information et d'analyse prospective différents.

Une troisième partie présente les résultats issus de sorties de modèles du climat global dont celles du modèle LMD (IPSL) d'environ 300 km de résolution et celles du modèle dit à « maille variable » du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. Ces modèles sont comparés, validés sur une période de contrôle (avec des bases de données journalières) puis on réalise une prospective sur les conditions thermiques et bioclimatiques futures au sein du vignoble de la Marne pour le XXI^{ème} siècle selon des scénarios de changement climatique futur (A1B, B1 et A2). Le modèle ARPEGE-Climat est choisi du fait de sa résolution régionale plus appropriée à dresser une prospective des conditions thermiques futures et permet d'obtenir des simulations sur un temps long, à résolution spatiale régionale.

La quatrième partie montre les résultats obtenus à partir du modèle RAMS à grilles imbriquées permettant d'obtenir des simulations sur la période de contrôle, plus courtes, se limitant à quelques dates clés des événements extrêmes de 2003 mais avec une résolution spatiale de 200 m. La critique de ces sorties, au pas de temps horaire est établie sur les phases gélive printanière et caniculaire estivale afin d'en déduire les biais à corriger pour les perspectives de recherche de ce travail de thèse avec une modélisation locale future avec le scénario A2.

Première partie

État de l'art

Cette partie de synthèse bibliographique annonce les clés de lecture de ce travail de thèse. Dans un premier chapitre, le changement climatique sera abordé de manière générale afin d'être défini, de montrer que les modèles du climat sont les seuls outils capables à l'heure actuelle de l'anticiper et enfin l'évolution actuelle et future probable des températures en France. Un deuxième chapitre montre les enjeux des agrosystèmes viticoles, les constats au sein des vignobles du monde mais aussi les impacts déjà observés et possibles futurs sur la vigne, tout en considérant les exigences de cette plante de l'échelle régionale à locale. Le dernier chapitre aborde le vignoble champenois au sein duquel des répercussions du changement climatique sont déjà visibles. Ce vignoble présente un attrait original du fait de sa position septentrionale qui bénéficie pour le moment des conditions thermiques qui ont tendance à être plus favorables que dans les décennies passées.

Chapitre 1

Du changement climatique à la modélisation numérique

Traiter du changement climatique nécessite de rappeler la naissance du terme, de définir les mécanismes à l'origine de ce phénomène. Il s'agit aussi de montrer que les modèles du climat sont les seuls outils capables de reproduire l'évolution du climat et d'appréhender le futur grâce à des scénarios socio-économiques à l'origine de simulations climatiques. Nous montrerons enfin l'évolution des températures sur la France reproduite par les modèles du climat ainsi que les températures probables pour le futur.

1.1 Le changement climatique

Le terme de changement climatique est défini et développé dans cette partie afin d'en comprendre les mécanismes, responsables des modifications observées à l'échelle du globe.

1.1.1 Origine du phénomène et du débat

La question du changement climatique mondial est sans cesse évoquée dans l'actualité internationale. Le GIEC est chargé de résumer et de synthétiser les informations scientifiques à ce sujet. Il est cependant nécessaire d'en préciser brièvement les interrogations et la mise en place du débat scientifique qui anime la question du changement climatique.

1.1.1.1 Les premières interrogations

Dès 1826, Joseph Fourier met en place les premières lois physiques à l'origine du bilan radiatif : « *il établit que la température de surface s'ajuste pour équilibrer le bilan d'énergie à la surface et que ce bilan est dominé par deux phénomènes : l'absorption du rayonnement solaire – qui apporte de l'énergie – et des échanges par rayonnement infrarouge – qui contrôlent les pertes d'énergie vers l'espace* » (Dufresne *et al.*, 2006). Arrhénius (1896) montre que les émissions de CO₂, issues de l'industrie qui repose sur l'utilisation du charbon, se répandent dans l'atmosphère et s'y accumulent (Folberth *et al.*, 2005). Après la Seconde Guerre Mondiale, l'apparition de nouveaux outils tels que les systèmes d'observations à l'échelle du globe et le développement des ordinateurs a permis le lancement de recherches sur l'augmentation de la température due aux émissions notamment

de CO₂. Dès 1979, le professeur Charney démontre, au moyen de premiers modèles du climat sommaires, qu'il existe un réchauffement planétaire et envisage une hausse de la température au sein d'une fourchette allant de 1,5°C à 4,5°C en considérant un doublement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère.

1.1.1.2 Une prise de conscience concrète ?

Tous ces résultats ont permis une prise de conscience d'une partie de la communauté scientifique. Ainsi, établi en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, le GIEC est chargé d'évaluer les recherches scientifiques sur le changement climatique, de mesurer les conséquences environnementales et socioéconomiques de ce changement et de formuler des stratégies d'adaptation possibles. Le GIEC a publié plusieurs évaluations (2001 et 2007) qui ont aidé les gouvernements à élaborer et à mettre en place des politiques et qui ont permis à la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), adoptée en 1992, et à son Protocole de Kyoto², adopté en 1997, de disposer de conclusions scientifiques. En effet, l'adoption par le sommet des chefs d'état à Rio en 1992 d'une convention dans laquelle les signataires s'engagent à stabiliser les émissions de GES est une étape majeure dans le débat sur le changement climatique. Néanmoins, même si la quasi-totalité des pays du globe la ratifie, aucune mesure n'est réellement prise.

1.1.1.3 Définitions

Cette Convention-Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, adoptée à Rio de Janeiro et entrée en vigueur en mars 1994, définit les « *changements climatiques* » comme « *les changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables* ».

La CCNUCC essaie d'évaluer la différence entre « *les changements climatiques* » attribués aux activités humaines et la variabilité attribuée à des événements naturels. La notion de « *changements climatiques* » peut également prendre en considération les modifications déjà observées à la surface du globe telles que des changements phénologiques pour certaines espèces végétales, le recul de certains glaciers... Dans le glossaire du troisième rapport du GIEC (2001), « *les changements climatiques désignent une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité persistant pendant de longues périodes (généralement pendant des décennies ou plus). Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou*

²A Kyoto, lors de la conférence sur le climat, 159 pays s'accordent sur la réduction de 5,2% pour 2010 de leurs émissions de GES par rapport aux émissions de 1990 ; tous ne ratifient pas le protocole. La Russie ratifie ce protocole en 2004 en garantissant son entrée en vigueur en 2005. A ce moment, le taux de CO₂ dans l'atmosphère est de 379 ppm. Ce protocole a été mis en vigueur le 16 février 2005 et la mise en place d'un Kyoto 2 a été négociée en 2005 et est en vigueur actuellement.

à des changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou de l'affectation des terres ».

Le terme de réchauffement climatique ou réchauffement global est utilisé lorsqu'il s'agit de prendre en compte l'augmentation de la température moyenne des océans et de l'atmosphère à la surface du globe. Le GIEC propose un consensus en précisant qu'il « *est hautement probable* » - soit à 90% - que le réchauffement prononcé depuis 1950 soit d'origine anthropique : il s'agit de l'effet de serre additionnel. Le forçage radiatif mesure la variation de la quantité de rayonnement solaire piégée sur Terre. Dans un contexte de changement climatique, une augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère conduit à une augmentation du rayonnement solaire piégé sur Terre et donc à un forçage radiatif dont le bilan est positif, résultante de l'effet de serre additionnel (Rabourdin, 2005 ; Beltrando, 2010).

1.1.2 Effet de serre naturel et effet de serre additionnel

1.1.2.1 *Mécanisme de l'effet de serre*

L'effet de serre est un processus naturel intervenant dans le bilan radiatif de la Terre (Figure 1.1), il s'agit d'un « processus d'échauffement des basses couches de l'atmosphère dû à l'absorption différentielle des rayonnements solaires et terrestres par les gaz à effet de serre » (Beltrando et Chémery, 1995 ; Beltrando, 2004). L'effet de serre naturel maintient une température moyenne à la surface du globe d'environ 15°C.

L'effet de serre additionnel renforce l'effet de serre naturel : il est dû aux gaz produits par l'homme qui s'accumulent dans l'atmosphère ; notamment le CO₂ issu de la combustion des énergies fossiles. Ce forçage radiatif³ d'origine anthropique (Annexe I) renforce l'effet de serre naturel d'environ 1,6 W/m² (Figure 1.1, (7)) dans une fourchette de +0,6 à +2,4 W/m² (GIEC, 2007) depuis 1750 et contribue à l'augmentation de la température de surface. La Terre intercepte une partie du rayonnement en provenance du soleil (ondes courtes). Le flux solaire (1) est à la fois absorbé (4) et réfléchi (2 et 3) par l'atmosphère ou la surface. Le flux solaire entrant vaut 342 W/m² en moyenne globale. L'absorption par la surface de la Terre et par l'atmosphère (4) permet à la Terre de se réchauffer. Le système planétaire Terre-Océans-Atmosphère réémet ce qu'il reçoit (5) sous forme de grandes longueurs d'onde ou rayonnement infrarouge (ou tellurique) à l'origine de l'effet de serre (7). La planète se réchauffe en absorbant 240 W/m² et se refroidit en émettant une quantité égale vers

³ « Le forçage radiatif est une mesure de l'influence d'un facteur dans la modification de l'équilibre entre l'énergie qui entre dans l'atmosphère terrestre et celle qui en sort, et constitue un indice de l'importance de ce facteur en tant que mécanisme potentiel du changement climatique. Un forçage positif tend à réchauffer la surface et un forçage négatif à la refroidir » (GIEC, 2007). La valeur du forçage radiatif anthropique est donnée pour l'année 2005 par rapport aux conditions préindustrielles définies comme celles de 1750 et est exprimée en watt par mètre carré. Sur la Figure 1.1, en rouge, le « +1,6 W/m² correspond bien au forçage radiatif, il n'y a pas création d'énergie, on l'exprime en W/m² car les gaz permettent à la Terre de se réchauffer.

l'atmosphère et l'espace (6). Le rayonnement infra-rouge tellurique (5) est absorbé en partie par les GES (7) ce qui permet à la Terre d'avoir l'équilibre énergétique connu, et par conséquent la vie. Les flux de chaleur sensible et latente⁴ (8), non radiatifs, permettent le transfert vers l'atmosphère d'une partie de l'énergie absorbée par la Terre.

L'évaluation du changement climatique futur, sous l'action des GES additionnels ou de phénomènes naturels, présente des incertitudes du fait d'interactions entre les composantes du système climatique encore peu quantifiables. Ainsi, les aérosols forment des nuages pouvant avoir un effet de refroidissement (Annexe I) : le bilan du forçage radiatif dû aux aérosols et à leur effet sur les nuages est évalué à un peu plus de -1 W/m^2 ; ils contribuent donc à réduire les températures de l'air en surface.

⁴ Chaleur latente : « Énergie ou absorbée ou dégagée lors d'un changement de phase par une substance. » (Beltrando et Chémery, 1995) et chaleur sensible : « Chaleur qui modifie la température des corps, à l'exclusion de toute quantité d'énergie correspondant à un changement de phase. » (Beltrando et Chémery, 1995).

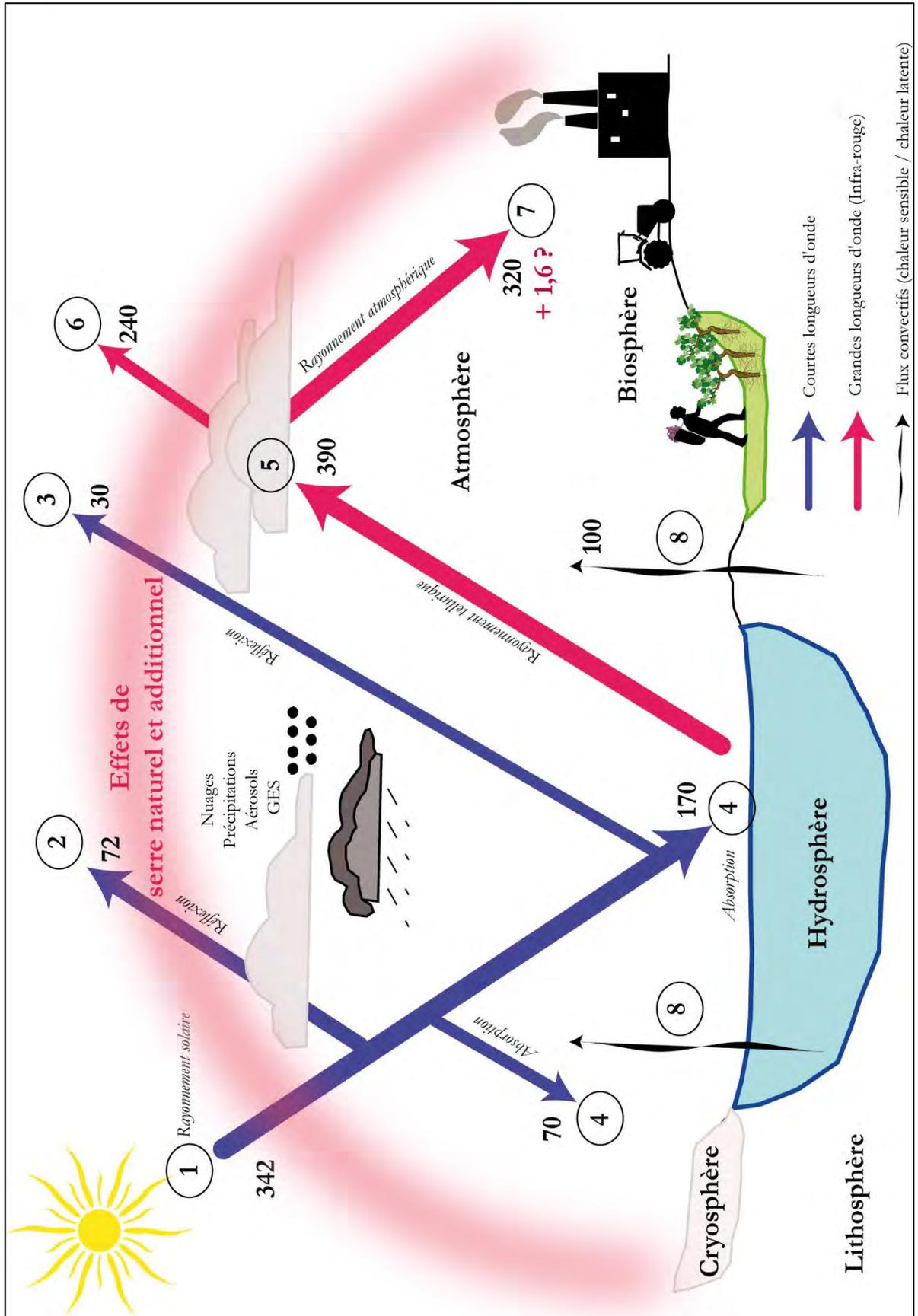


Figure 1.1 : Schéma simplifié du bilan énergétique en W/m² pour le système climatique dans un contexte de changement climatique (les étapes numérotées ont des références dans le texte).

1.1.2.2 *Les gaz à effet de serre dans l'atmosphère*

Les gaz atmosphériques à structure triatomique, transparents à la lumière, absorbent largement le rayonnement tellurique infrarouge. Ces gaz sont la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'ozone troposphérique (O₃), l'oxyde nitreux (N₂O). Les activités humaines renforcent les concentrations de ces gaz dans l'atmosphère mais des gaz artificiels sont dus également à ces activités telles que les chlorofluorocarbures (CFC), les hydro-chlorofluorocarbures (HCFC) et les hydrofluorocarbures (HFC) issus des systèmes de réfrigération et des aérosols. Les émissions mondiales de GES (Figure 1.2) dues aux activités anthropiques ont augmenté d'environ 70% entre 1970 et 2004. La plupart des gaz ont une évolution croissante de leur concentration notamment le méthane et l'oxyde nitreux. Le quart de ces émissions est issu de l'approvisionnement énergétique : l'agriculture dégage essentiellement du méthane, la foresterie et l'industrie utilisant les combustibles fossiles le dioxyde de carbone. Le dernier rapport du GIEC précise que : « l'élévation de la température moyenne du globe observée depuis le milieu du XX^{ème} siècle est très probablement attribuable à la hausse des concentrations de GES anthropiques » (GIEC, 2008)

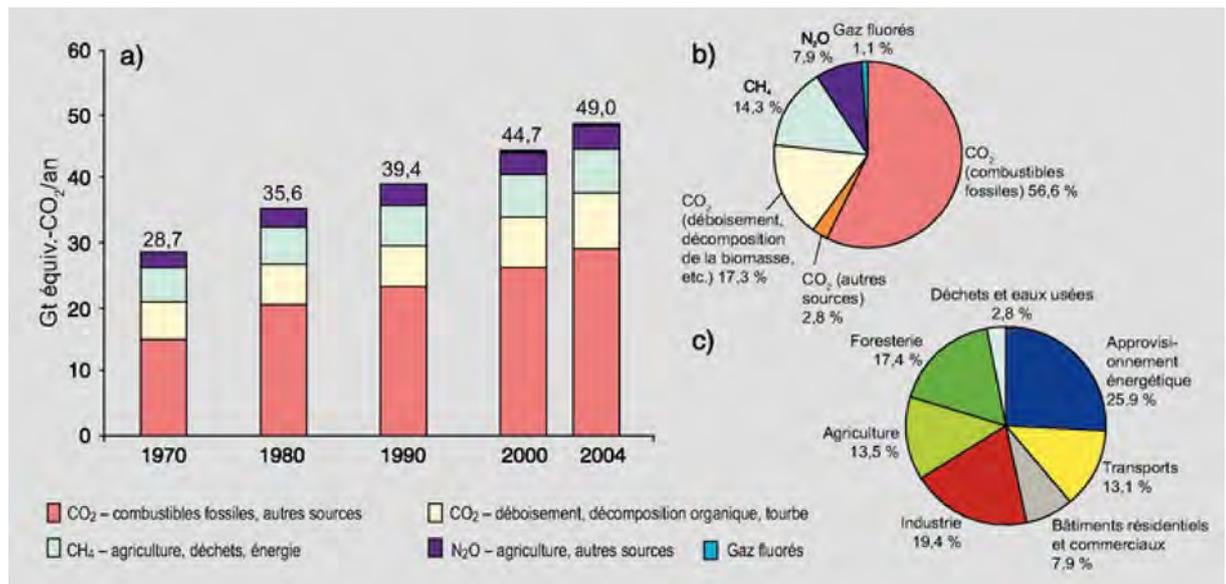


Figure 1.2 : a) Émissions annuelles de GES anthropiques dans le monde, 1970–2004. b) Parts respectives des différents GES anthropiques dans les émissions totales de 2004, en équivalent - CO₂⁵. c) Contribution des différents secteurs aux émissions totales de GES anthropiques en 2004, en équivalent - CO₂ (Source : GIEC, 2008).

⁵ « Équivalent - CO₂ ou équivalent carbone: Concentration de *dioxyde de carbone* qui entraînerait un *forçage radiatif* de même importance qu'un mélange donné de dioxyde de carbone et d'autres *gaz à effet de serre* » (GIEC, 2008).

D'après le GIEC (2008), la concentration du CO₂ dans l'atmosphère a augmenté depuis la révolution industrielle entraînant une augmentation de la température à la surface du globe depuis les années 80 d'environ 0,6°C. Le réchauffement climatique des 50 dernières années est considéré anthropique du fait d'un effet de serre additionnel s'ajoutant à l'effet de serre naturel : en effet, la comparaison entre les observations et les simulations du climat permet d'attribuer l'essentiel du réchauffement climatique aux gaz à effet de serre d'origine humaine. Les simulations qui ne tiennent pas compte de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre liées aux activités humaines ne reproduisent pas complètement le climat des 100 dernières années. Le GIEC (2007) prévoit que la croissance mondiale et le développement économique associé auront pour effet la poursuite des rejets massifs de gaz à effet de serre. Le réchauffement climatique dans le futur sera donc amplifié par leur stockage dans l'atmosphère avec les conséquences socio-économiques, environnementales qui en résulteront. Les modèles du climat sont les outils capables, à l'heure actuelle, de donner une prospective des conditions climatiques futures.

1.2 La modélisation numérique du climat

Dans le cadre de ce travail de thèse, il s'agit de tester et valider les sorties de modèles du climat à différentes échelles sur une période de contrôle (1950-2000) afin de donner ensuite une prospective du climat en Champagne viticole. La définition de ce qu'est un modèle numérique du climat permet d'en montrer les différents types mais aussi les limites. La précision des modèles s'est renforcée depuis les dernières conclusions du GIEC annoncées en 2001 ainsi que le couplage entre les différentes composantes (océaniques, atmosphériques).

1.2.1 La modélisation numérique : des MCG aux modèles régionaux

Le dernier rapport du GIEC (2007) dresse le bilan des études réalisées sur les modèles afin d'obtenir les simulations les plus fiables possibles en limitant les degrés d'incertitude. Cependant, plus les paramètres pris en compte sont nombreux, plus les marges d'incertitudes augmentent car les interactions des phénomènes climatiques sont difficiles à reconstituer de manière réelle (Somot, 2005).

1.2.1.1 *Définition d'un modèle de circulation générale*

Les modélisateurs ont mis au point des modèles de climat pour simuler les conditions climatiques à la surface du globe. Ces outils mathématiques complexes sont capables de simuler, grâce à un ordinateur, l'évolution des éléments qui composent le système climatique. Un modèle climatique peut être défini comme « *une représentation numérique du système climatique basée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composants,*

leur processus d'interaction et de rétroaction, et représentant la totalité ou une partie de ses propriétés connues. Le système climatique peut-être représenté par des modèles présentant divers niveaux de complexité - une « hiérarchie » de modèles peut être identifiée pour un composant individuel ou un ensemble de composants, et ces modèles présentent des différences telles que le nombre de dimensions spatiales, l'étendue de la représentation explicite des processus physiques, chimiques ou biologiques ou le degré d'inclusion des paramétrages empiriques. (...) Les modèles climatiques sont des outils de recherche utilisés pour l'étude et la simulation du climat, mais également dans des buts opérationnels, notamment des prévisions climatiques mensuelles, saisonnières et interannuelles » (GIEC, 2001). Les modèles numériques de simulation du climat se basent sur des équations primitives de la mécanique, de la physique et de la thermodynamique des fluides (Le Treut, 2010 ; Jouzel, 2011). Ils ont été créés pour tenter de recréer la complexité du monde réel à partir des équations qui régissent la dynamique de l'atmosphère et de l'océan (Le Treut, 2010). Les modèles s'appuient sur des lois physiques pas sur les données observées, même si la confrontation aux données sur une période connue constitue une démarche permanente de validation des modèles. Les modèles n'utilisent aucune donnée historique, qu'il s'agisse du passé récent (les derniers siècles) ou plus ancien (le Quaternaire). Certains modèles sont plus complexes que d'autres ; par exemple ils intègrent les différentes composantes tels que les océans, la végétation, l'atmosphère : il s'agit de modèles couplés terre-océan-atmosphère. L'atmosphère et les océans sont découpés en « boîtes élémentaires » (Lauffenburger, 2007 ; GIEC, 2007 ; Beltrando, 2010 ; Jouzel, 2011) dont la dimension est d'environ 200 à 300 km pour les modèles globaux ; les moyennes des variables sont ensuite obtenues pour chacune des boîtes élémentaires à des pas de temps successifs.

1.2.1.2 Des modèles globaux de circulation générale aux modèles régionaux

Les modèles de circulation générale de l'atmosphère possèdent donc une maille grossière de l'ordre de quelques centaines de kilomètres. Ces modèles ne prennent pas correctement en compte au sein de ces boîtes les phénomènes interagissant à une échelle plus grande tels que les nuages, les mécanismes de convection, etc. Ils ne permettent pas non plus de répondre aux études d'impacts locales où certains phénomènes se produisent à des échelles plus fines incluant les variations météorologiques locales mais aussi les possibilités de réactions anthropiques face à une éventuelle menace climatique.

Dans le but de répondre aux interrogations que suscitent le changement climatique notamment en termes d'extrêmes climatiques à l'échelle régionale, voire locale, il existe différentes méthodes de « *downscaling* » ou « *désagrégation d'échelle* ». Météo-France utilise ARPEGE-Climat avec une résolution variable allant de 50 km sur la Méditerranée à 450 km dans le Pacifique (Déqué et Li, 2007). Afin de prévoir le climat pour une région donnée à échelles plus fines, l'emploi d'un Modèle de Circulation Régionale (MCR) est indispensable pour une meilleure prise en compte des phénomènes locaux et de la topographie, la

végétation, l'occupation des sols, le réseau hydrologique. Météo France utilise ainsi le modèle ALADIN avec une résolution de 10 km qui est un MCR appelé également modèle « à aire limitée ».

De nombreuses études et projets en cours visent donc à améliorer la coopération des scientifiques concernant les modèles du climat afin d'affiner les échelles d'analyse tels que :

- le projet ESCRIME (Terray et Braconnot, 2007) qui propose de réunir les analyses qui sont effectuées sur les simulations climatiques réalisées dans le cadre du 4^{ème} rapport du GIEC. Ce projet met surtout en relation les équipes de modélisateurs français avec la mise à disposition des données de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) et Météo-France, sachant que ces deux modèles diffèrent essentiellement par leur composante atmosphérique.
- le projet DRIAS qui vise à donner accès aux scénarios de changement climatique régionalisés français pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et environnement. Ce projet va permettre d'obtenir les scénarios du C NRM, du CERFACS et de l'IPSL. Des scénarios désagrégés à échelles fines (8 km) sont ainsi en cours de réalisation et de validation au CERFACS avec les scénarios SCRATCH08 (Pagé *et al.*, 2008) et désormais les scénarios SCRATCH2010 (Pagé et Terray, 2010). Ils visent à réaliser des inter-comparaisons de modèles couplés afin d'obtenir des simulations à échelles locales fiables sur la France rendues disponibles aux chercheurs qui travaillent sur des études d'impacts sur la France (Pagé *et al.*, 2009, Pagé et Terray, 2010 ; Terray *et al.*, 2010). Le projet DRIAS permet d'obtenir trois types d'informations climatiques correspondant à trois degrés d'intégration. Le premier type est la donnée climatique brute qui correspond aux sorties de modèles sous forme numérique, viennent ensuite les produits élaborés à partir des données brutes comme des indices, cartes, etc (Lémond *et al.*, 2011) et également des informations relatives à des mesures d'adaptation et des outils d'aide à la décision et de diffusion.

A l'heure actuelle, il existe donc différents types de modèles (Figure 1.3) :

- les MCG d'une résolution d'environ 300 km sur le globe tels que les modèles français ARPEGE-Climat de Météo-France et le modèle LMD de l'IPSL,
 - les MCG à haute résolution ayant une maille fine en tout point du globe,
 - les MCG à maille variable ou « zoomable » issus des deux modèles précédents avec notamment le zoom ARPEGE-Climat d'environ 50 km sur la France et celui de l'IPSL dans ce cas appelé LMDz,
 - les MCR appelés aussi modèles à méso-échelles tels que RAMS ou modèles à « aire limitée » tels qu'ALADIN (Météo-France).
-

Il existe plusieurs méthodes de désagrégation, développées ci-dessous, dont la plupart sont aussi des méthodes d'évaluation et de correction des incertitudes.

1.2.2 Désagrégation d'échelles, méthodologies et incertitudes

Les méthodes de désagrégation se divisent en deux grandes familles :

- la méthode de désagrégation dynamique qui consiste à « résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional » (Boé et Terray, 2008). Les MCR à aire limitée sont contraints par les MCG sur leurs frontières latérales et pour les conditions limites océaniques.
- la méthode de désagrégation statistique qui consiste à établir une relation entre les variables locales et les « prédicteurs » modèles.

Ces deux méthodes sont souvent combinées.

1.2.2.1 Les méthodes de désagrégation d'échelles

Les études d'impacts à échelles locales nécessitent la prise en compte des hétérogénéités spatiales non résolues par les équations des modèles du climat à petites échelles ou d'en corriger les principaux défauts. Les MCG ont généralement des résolutions de plus de 2° et cette résolution ne permet pas de rendre compte de l'évolution locale du climat d'où la nécessité d'utiliser des méthodes de désagrégation spatiale. Les échelles de temps et d'espace caractéristiques des processus à échelles fines diffèrent de celles résolues par les modèles climatiques. Il existe des techniques dynamique et/ou statistique qui ont été développées pour effectuer ce transfert d'échelle (Figure 1.3).

Parmi ces techniques, il existe des méthodologies de désagrégation d'échelle statistique basées sur :

- l'utilisation du concept de type de temps (Pagé *et al.*, 2008 ; Boé, 2007 ; Boé et Terray, 2008). « L'hypothèse principale s'énonce comme suit : chaque régime de temps particulier (représenté par une variable de circulation atmosphérique de [petite] échelle : le/les prédicteur(s)) est associé à une distribution spécifique des variables climatiques locales (par exemple la température et les précipitations à [grande] échelle : le/les prédictant(s)). Cette association est représentée par une fonction de transfert qui est construite statistiquement à partir des observations et réanalyses disponibles » (Pagé *et al.*, 2008 ; Pagé et Terray, 2010). Cette méthode de désagrégation statistique multivariée (Boé, 2007 ; Boé et Terray, 2008 ; Pagé et Terray, 2010) est d'abord réalisée sur des séries d'observations d'analyses météorologiques à méso-échelle de 1958 à 2008 regroupées dans la base de données SAFRAN générée par Météo-France (Quintana-Segui *et al.*, 2008 ; Pagé, 2008).

- la méthode quantile-quantile (Déqué, 2007) qui consiste à associer chaque centile du modèle aux centiles d'observations correspondantes est une autre méthode de désagrégation statistique possible. Ces deux méthodes sont utilisées pour régionaliser les données mises à disposition dans DRIAS.

Il est également possible de désagréger dynamiquement avec des modèles à méso-échelles tels que Méso-NH : ces modèles sont forcés à leurs frontières par des champs à basse résolution.

Ces méthodes de désagrégation impliquent bien entendu des incertitudes liées au processus même de régionalisation.

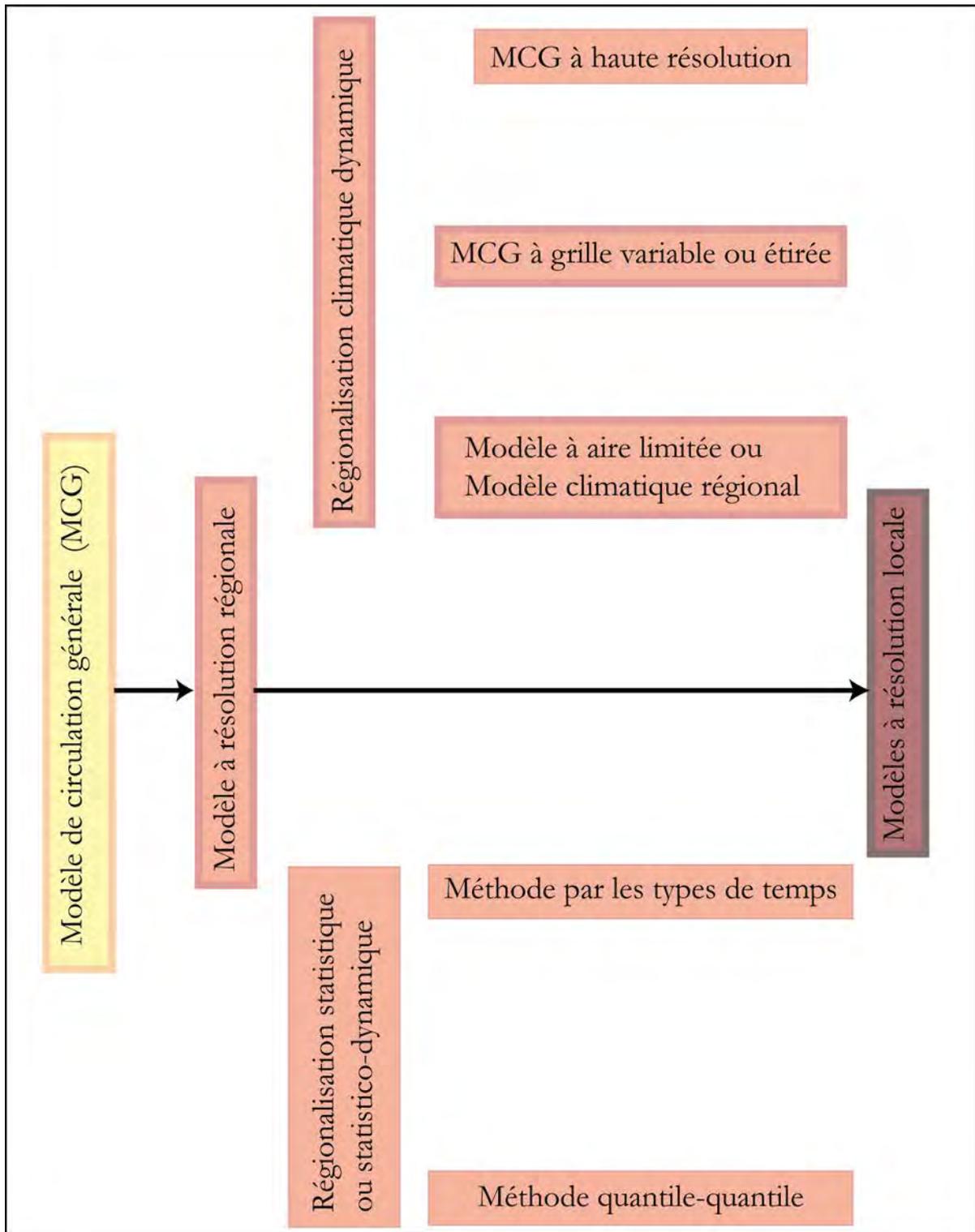


Figure 1.3 : Types de régionalisation : dynamique et statistique (les encadrés avec une bordure en gras sont utilisés dans ce travail de thèse).

1.2.2.2 Les incertitudes des sorties de modèles

La question des incertitudes est centrale par rapport à l'utilisation des scénarios climatiques pour les études d'impact. Des marges d'incertitudes sont inhérentes à l'utilisation des sorties de modèles et il est nécessaire d'en tenir compte. Pagé *et al.* (2008) propose une hiérarchisation des sources d'incertitude :

- « Les scénarios futurs sont appelés sources d'incertitude « réflexive » car la société fait partie à la fois du problème et de la solution.
- Les imprécisions des connaissances concernant les phénomènes climatiques tels que la modélisation des nuages et par conséquent de leur représentation approximative dans les modèles sont qualifiées d'incertitudes « épistémiques ».
- Les incertitudes liées à la variabilité du climat et qui englobent la problématique des conditions initiales du modèle sont appelées « stochastique ».
- La dernière source d'incertitudes étant résultante du *downscaling* ».

Il est difficile d'appréhender la question des incertitudes avec précision et il faut prendre les scénarios futurs comme des estimations et non la projection fiable du climat futur réel. De plus, les incertitudes des études d'impacts du changement climatique résultent « d'une cascade d'incertitudes » allant des incertitudes des simulations futures, jusqu'aux incertitudes de l'évaluation des impacts. Les modèles de circulation générale sont en effet d'abord testés et validés sur une période passée instrumentée et les premières incertitudes apparaissent quant à la comparaison de données relevées à des données simulées, quant à la fiabilité des données observées finalement homogènes que depuis 1970 (Puget *et al.*, 2010) et aux corrections à apporter sur les distributions statistiques des sorties de modèles (Boé *et al.*, 2006 ; Déqué, 2007 ; Déqué et Somot, 2010). Les études sur le changement climatique sont menées dans une dynamique prospective : le futur est impossible à prédire mais peut être anticipé. Les modèles de circulation générale (MCG) du climat permettent de donner un aperçu du climat futur en intégrant l'incertitude par la formulation de différents scénarios d'évolution du climat (Allard *et al.*, 2008) : un scénario est « une description cohérente, structurée et plausible d'un état futur du monde » et tous les scénarios ont la même probabilité. En proposant plusieurs futurs possibles, les scénarios permettent de tenir compte des incertitudes associées aux différentes voies que peut emprunter le développement social, économique et environnemental des sociétés à l'origine de l'effet de serre additionnel. Simuler le long terme engage des incertitudes fortes inhérentes à la méconnaissance de toutes les interactions au sein du système climatique et surtout à leur prise en compte de manière simplifiée dans la modélisation climatique (Carrega, 2008 ; Douguedroit, 2008). Les incertitudes proviennent de différentes sources telles que les nuages très difficiles à modéliser, les émissions de méthane mal évaluées, les mécanismes liés à la fonte des glaciers, les changements de circulation atmosphérique, *etc.* De plus, le changement climatique est considéré lui-même comme une source d'incertitude aux différentes échelles spatiales : les

échelles sont difficiles à articuler dans ce type d'étude en termes d'estimation de l'évolution des paramètres climatiques à des échelles de plus en plus fines. Le « *downscaling* » ou descente en échelles des modèles permet d'affiner la résolution spatiale des MCG mais cette désagrégation induit également des incertitudes de diverses origines telles que des déficiences de paramétrisations, de compréhension limitée des imbrications d'échelles et des phénomènes extrêmes. L'incertitude est plus importante lorsque les scénarios sont régionalisés : les modèles à maille variable proviennent des MCG et ne prennent pas en compte toutes les rétroactions complexes possibles au sein des écosystèmes ou même le comportement des sociétés locales qui tentent de s'adapter au changement climatique.

1.2.2.3 *Fiabilité de la régionalisation ?*

La régionalisation a pour but d'affiner spatialement les données climatiques en tenant compte des hétérogénéités spatiales mal résolues et de corriger les distributions spatio-temporelles des variables climatiques afin de rendre les études d'impacts aux échelles locales plus fiables. Le principe général des études d'impact est de permettre aux acteurs locaux d'anticiper les changements en produisant des données futures. Le *downscaling* dynamique permet notamment d'affiner la résolution spatiale du relief, beaucoup mieux pris en compte par les MCR que les MCG. Les données de sorties de MCR (environ 50 km) sont parfois corrigées et désagrégées dans le but d'obtenir une résolution encore plus localisée (8 km). Les données corrigées, notamment par méthodes statistiques et transfert d'échelles sont donc nécessaires pour répondre à des questionnements locaux car leur résolution est plus fine et correspond mieux aux modèles d'études d'impacts.

Les méthodes statistiques sont moins onéreuses que le *downscaling* dynamique : elles permettent de corriger la distribution statistique des séries simulées par les MCG à maille variable notamment en termes d'extrêmes climatiques ; ceux-ci étant les phénomènes les plus contraignants à l'échelle locale et dont l'agriculture est souvent tributaire : gel, grêle, canicule, inondation, etc. Cependant, ces corrections effectuées sur des périodes passées (dites de « *contrôle* ») – la confrontation aux données d'observations étant une démarche permanente de validation des modèles – sont souvent appliquées sur les scénarios futurs avec le postulat que le système climatique évolue vers la même tendance dans le futur, incluant de ce fait des marges d'incertitudes inéluctables. De surcroît, plus la résolution géographique s'affine, plus les phénomènes pris en compte sont complexes, difficilement modélisables car leurs mécanismes ne sont pas encore complètement compris ou les outils informatiques ne peuvent pas en tenir compte.

Les scénarios sont cependant des outils efficaces pour mesurer les impacts possibles du changement climatique à condition d'en mesurer les limites, d'en quantifier les incertitudes⁶ et d'en déterminer les biais⁷.

Dans ce travail de recherche, plusieurs sorties de modèles issues de downscaling dynamique sont étudiées afin de déterminer la qualité des modèles régionaux et locaux quant à une étude prospective du changement climatique en Champagne. Même si des biais sont inhérents et seront mis en exergue, plusieurs échelles seront utilisées afin de déterminer les apports de l'utilisation de modèles à échelle régionale sur des pas de temps longs et saisonniers. Ils permettront de déterminer une tendance générale dans le futur des conditions thermiques probables en fonction des scénarios mais aussi sur une simulation plus fine, à l'échelle locale, sur quelques événements de l'année 2003 afin d'établir si la prise en compte des facteurs locaux dans un modèle à haute résolution permet de reproduire les extrêmes thermiques avec précision. La combinaison de ces deux approches permettra d'énoncer une critique raisonnée de la modélisation climatique appliquée à une région viticole.

1.2.3 Les scénarios climatiques

Les études sur le changement climatique utilisant des sorties de modèles du climat s'organisent toujours en deux temps, utilisés également dans le cadre de la thèse :

- les sorties de modèles sont d'abord testées sur une période de référence, dite période de « *contrôle* »⁸. En effet, les données simulées sont confrontées aux données observées, cela fait partie de la démarche de validation des sorties de modèles. Les biais inhérents à la modélisation sont ainsi mis en évidence et parfois corrigés par les équipes de modélisateurs.
- des scénarios climatiques issus du forçage des modèles par les scénarios d'émissions des GES en fonction des évolutions socio-économiques du GIEC (2007) sont réalisés et analysés pour plusieurs scénarios comprenant une fourchette assez large d'évolution possible du climat.

⁶ Les incertitudes sont différentes des biais. L'incertitude se quantifie souvent par un « intervalle d'incertitude » à une valeur de référence ou alors elle est qualifiée selon son type : « réflexive », « épistémique », etc. ou selon sa provenance (liée au scénario d'émission, à la régionalisation).

⁷ Les biais sont les différences inévitables observés entre les données observées et les données simulées lors du changement d'échelles de temps et d'espace. Par exemple, la méthode quantile-quantile (Déqué, 2007) « ne se contente pas de corriger les biais des valeurs moyennes des variables climatiques de la simulation de référence, mais elle corrige également les biais de leurs distributions statistiques en « ramenant » les fonctions de distribution des variables simulées vers les fonctions de distribution des observations. Les statistiques des événements extrêmes calculées à partir des variables corrigées de la simulation de référence sont donc très proches des statistiques des événements observés. Les mêmes corrections sont aussi appliquées aux résultats des scénarios du climat futur en faisant l'hypothèse que les biais sur les distributions statistiques restent inchangés entre le climat actuel et le climat futur. » (Jouzel, 2011)

⁸Dans ce travail de recherche, la période de « contrôle » est de 1950 à 2000 pour les modèles ARPEGE-Climat et LMD, 2003 pour RAMS. De plus, les données simulées obtenues pour cette recherche sont brutes, elles n'ont donc pas été corrigées.

Afin de donner cette fourchette d'évolution possible du climat, il existe différentes familles de scénarios d'émissions de GES qui dépendent du contexte mondial (Figure 1.4) : évolution démographique, technologique et économique. Ces scénarios élaborés par le GIEC décrivent une évolution du monde avec des variations quantitatives de GES selon si les scénarios sont orientés vers une politique globale d'économie de marché ou si des mesures environnementales seront prises dans l'avenir.

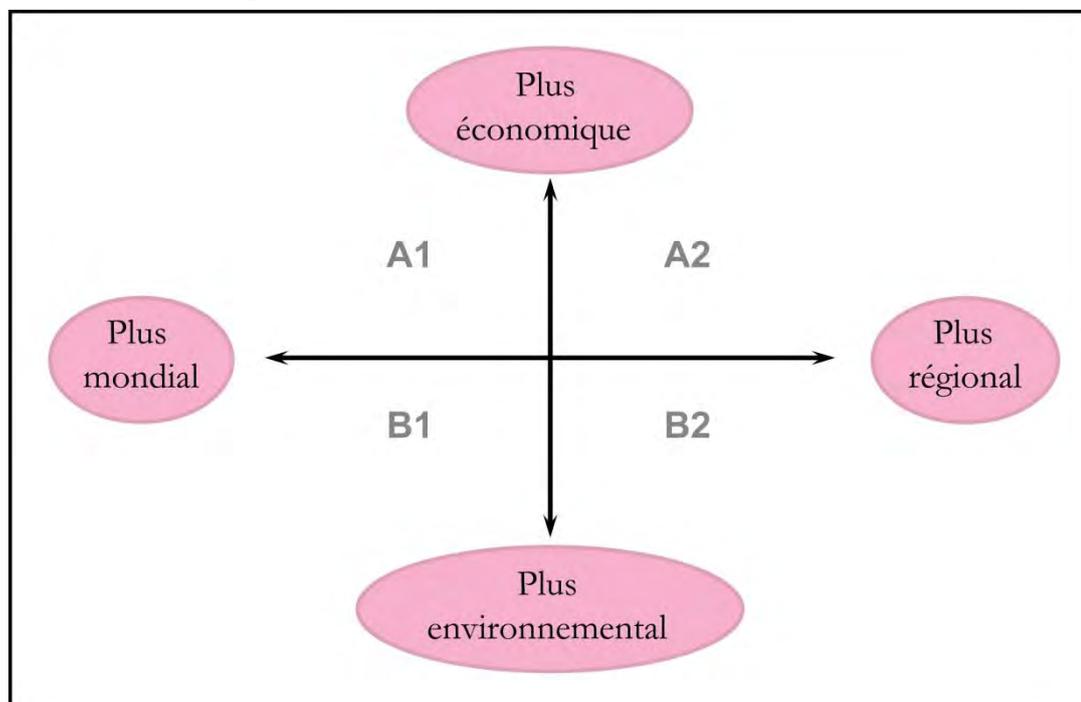


Figure 1.4 : Famille des scénarios selon leurs orientations majeures (Source : GIEC, 2007).

Nous montrerons désormais l'évolution des températures à l'échelle de la France observée et simulée par le modèle ARPEGE-Climat ainsi que les premières prospectives obtenues quant aux extrêmes dans le futur.

1.3 L'évolution possible des températures en France

La température a augmenté d'environ $0,74^{\circ}\text{C}$ en France de 1905 à 2007 ; cette augmentation est supérieure au réchauffement global des températures car la moyenne globale prend en compte les océans qui se réchauffent moins que les continents. Le réchauffement des températures est plus marqué dans le Sud de la France que dans le Nord et les températures minimales augmentent davantage que les maximales.

Nous présentons quelques résultats réalisés dans le cadre du projet européen PRUDENCE et du projet français GICC-IMFREX. Le modèle ARPEGE-Climat est utilisé pour des simulations sur la période de contrôle (1961-1990) et sur la période de simulation future (2070-2099) avec le scénario A2. Les données simulées de la période de contrôle ont

été recalibrées par rapport aux observations pour les résultats du « climat actuel » et les mêmes corrections ont été appliquées sous l'hypothèse A2 (www.imfrefx.mediasfrance.org).

1.3.1 Les températures moyennes : comparaison modèle-observation

Les simulations du modèle ARPEGE-Climat sur la période de contrôle présentent des biais inévitables dus aux processus de modélisation. Par exemple, sur les températures moyennes en été (Figure 1.5), la simulation sous-estime les températures moyennes les plus basses. Le Massif Central, la Bretagne et le Pas-de-Calais présentent des températures moyennes estivales entre 14 et 16°C alors qu'en réalité, ces zones géographiques ont des températures estivales moyennes entre 16 et 18°C : le biais froid est d'environ 2°C. Ce biais est également observé pour les températures moyennes estivales les plus élevées : la température de la Corse est sous-estimée d'environ 2°C également. La répartition spatiale de la température en France est mieux reproduite dans le Nord de la France que dans le Sud, les isothermes du modèle sont très différents des isothermes observés au niveau de la Méditerranée, des Alpes et des Pyrénées, sans doute par le lissage de la topographie et du relief, encore mal représentés par les sorties de modèles régionalisés. « *La relative bonne adéquation du climat moyen simulé avec le climat observé n'est pas un gage suffisant* » (www.imfrefx.mediasfrance.org), des calibrations et corrections sont nécessaires afin de mieux représenter les extrêmes qui sont la principale interrogation des utilisateurs de sorties de modèles du climat. Les calibrations sont donc effectuées sur les fonctions de répartition des séries de données et non sur les moyennes car corriger le biais de 2°C sur la période future ne « *rendra pas les fréquences des phénomènes extrêmes du modèle plus réaliste* » (www.imfrefx.mediasfrance.org). Des simulations corrigées permettent de comparer le climat actuel au climat futur.

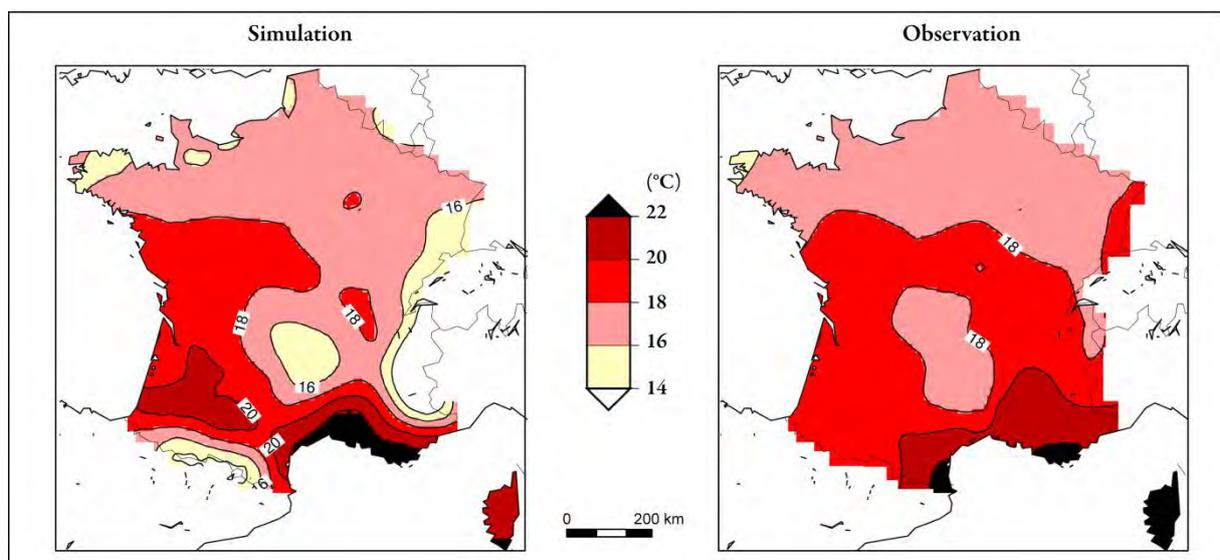


Figure 1.5 : Températures moyennes en été sur la période 1961-1990 simulées par le modèle ARPEGE-Climat à gauche et observées à droite (Adapté de Météo-France).

1.3.2 L'évolution des températures extrêmes

Concernant les extrêmes, les températures minimales inférieures à -5°C pourraient diminuer dans le futur (Figure 1.6) avec les conséquences possibles dans les régions de montagne où l'enneigement pourrait ne plus être assez conséquent pour les stations de ski par exemple.

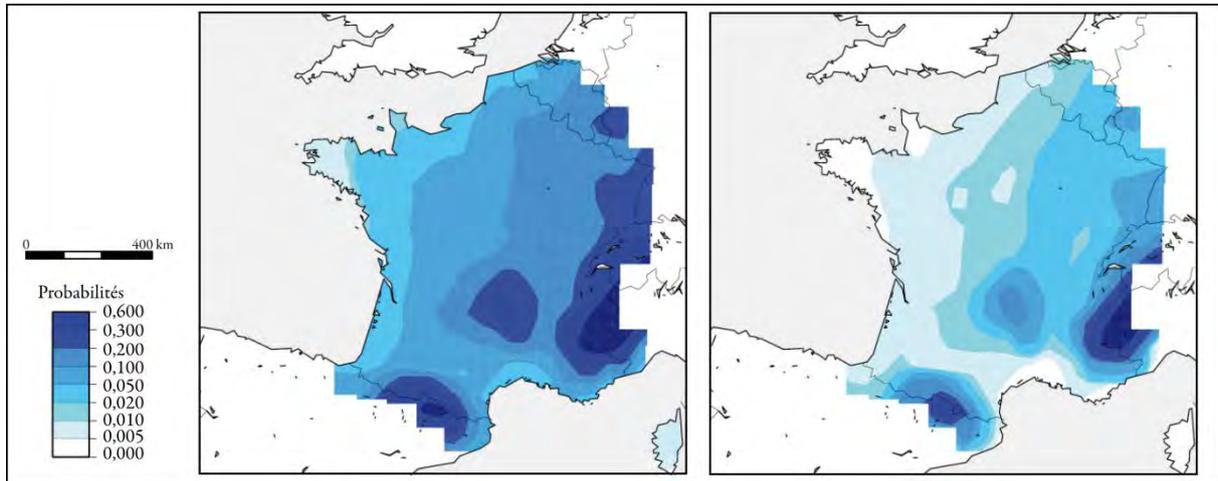


Figure 1.6 : Probabilités de températures minimales inférieures à -5°C en hiver, sur le climat actuel à droite, sur le climat futur (A2) à gauche (Adapté de www.imfrefx.mediasfrance.org)

En été, les extrêmes caniculaires pourraient être observés sur toute la France dans le futur avec un risque accru de sécheresse en Méditerranée (Figure 1.7).

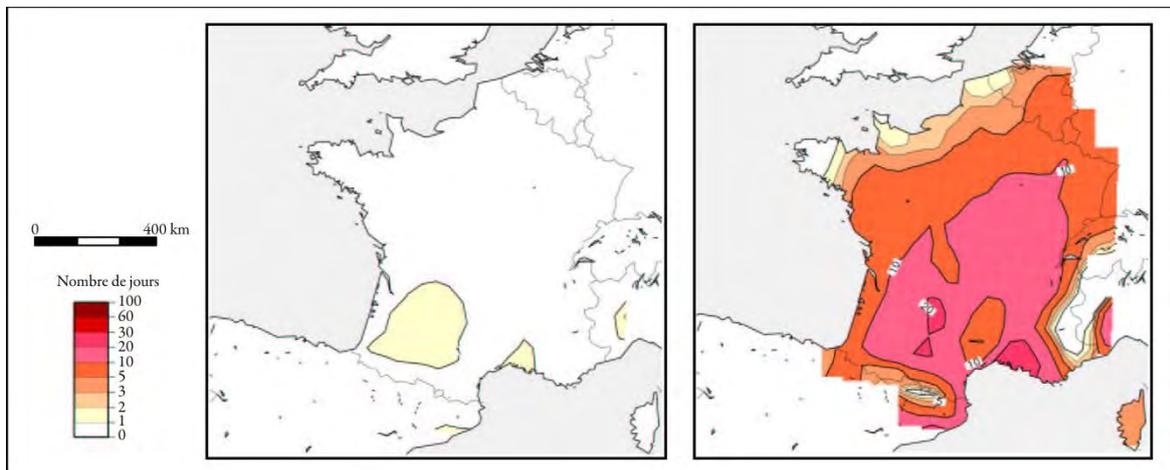


Figure 1.7 : Nombre de jours où la température maximale dépasse 35°C pour la période 1961-1990 à gauche et pour la période 2071-2100 (scénario A2) à droite (Adapté de www.imfrefx.mediasfrance.org)

CONCLUSION DU CHAPITRE 1

Ces quelques résultats montrent l'importance accordée aux extrêmes et la nécessité de régionaliser les scénarios climatiques afin de mieux les prendre en considération. Cependant, la régionalisation comporte des biais et des incertitudes inhérents aux processus de modélisation qui ne sont pas encore bien évalués d'où la multitude de projets axés sur cette thématique de recherche. Il faut également nuancer les résultats obtenus : ils diffèrent sensiblement selon la manière de les présenter. Ainsi, lorsqu'ils sont présentés en termes de probabilité de dépassement de certains seuils thermiques, l'impact du changement climatique apparaît comme plus impressionnant que lorsqu'ils sont présentés en termes d'accroissement ou de diminution de centiles (Déqué *in* www.imfrex.mediasfrance.org). En effet, par exemple le seuil des 35°C en France est peu représenté dans les températures estivales du climat actuel : il a donc une faible densité et la moindre augmentation de températures va entraîner une forte fréquence de ce seuil. Ces limites seront prises en compte dans le cadre de l'étude, où la présentation des résultats par fréquences de dépassement de seuils thermiques est très largement développée pour rendre compte des possibles répercussions sur la vigne.

Chapitre 2

Impacts du changement climatique sur la viticulture

Le changement climatique est observé pour de nombreux agrosystèmes (Delecolle et al., 1999 ; Seguin, 2002, 2003 et 2004) et des chercheurs s'interrogent depuis quelques années sur la viticulture, créneau économique majeur pour certaines régions dites viticoles telles que la Bourgogne, le Bordelais et la Champagne. Concernant ces écosystèmes viticoles, de nombreuses études sont réalisées tant agronomiques que climatiques : en effet, les communautés viticoles souhaitent anticiper les futurs impacts probables afin de pouvoir s'adapter à une nouvelle donne géographique des vignobles. Ce chapitre dresse un tableau des études réalisées sur le changement climatique et la viticulture en montrant les changements perceptibles au sein des écosystèmes viticoles mondiaux.

2.1 Evolutions observées à la surface du globe dans les régions viticoles

Pour se développer, la vigne a besoin d'un climat favorable avec notamment des exigences quant au rayonnement solaire, à la température et également à l'eau. Dans le contexte du changement climatique actuel, les paramètres nécessaires à la vigne pour son bon développement végétatif pourraient être modifiés avec une multiplication des événements extrêmes tels que les canicules, sécheresses, etc.

2.1.1 Principaux facteurs explicatifs de répartition spatiale de la vigne

2.1.1.1 La latitude : facteur limitant de la culture de la vigne

Comme en témoignent les indices bioclimatiques, la culture de la vigne est possible sur certaines bandes latitudinales et cela malgré le fait que les hommes ont le pouvoir de modeler le paysage viticole (Huglin, 1986 ; Galet, 2000). En effet, certaines températures s'avèrent trop extrêmes pour le bon déroulement du cycle végétatif de la vigne : les limites principales sont celles des températures trop faibles ne pouvant permettre le cumul des seuils thermiques permettant à la vigne de se développer et donc de laisser les raisins mûrir.

2.1.1.2 La lumière et le photopériodisme

La vigne est un végétal : elle entre donc dans le processus complet de la photosynthèse. Lors de la phase lumineuse de la photosynthèse, une partie de l'énergie fournie par les rayons lumineux est captée par les pigments des cellules chlorophylliennes appelées chloroplastes ; lors de la phase obscure, d'autres phases physico-chimiques ont lieu notamment pour la synthèse des sucres (Huglin, 1986).

La lumière est le facteur principal de la photosynthèse comme en témoigne la littérature foisonnante sur la vigne et la photosynthèse (Carbonneau, 1976 ; Kliewer, 1977). Les espèces sont plus ou moins sensibles au photopériodisme (Pérarnaud et Raynal, 1991). La vigne est une plante héliophile préférant les jours longs (Galet, 2000).

2.1.1.3 L'eau : nouvelle inquiétude de la communauté viticole ?

L'eau intervient dans la biochimie des ceps de vigne en éléments extraits du sol nécessaires à son développement (Pérarnaud et Raynal, 1991). Par son évaporation, elle protège les organes de la vigne contre l'échauffement. Sous forme pluvieuse, l'eau alimente les nappes phréatiques en hiver et permet ensuite le développement optimal des organes de la vigne lors de certaines phases végétatives comme la floraison (Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971). Bien que la vigne soit une liane robuste résistante à la sécheresse et qu'un léger déficit hydrique pendant la maturation augmente la qualité organoleptique des vins (Huglin, 1986), un manque d'approvisionnement des réserves utiles au déroulement du cycle végétatif pourrait engendrer des répercussions sur le végétal.

Le changement climatique devrait accentuer au cours du XXI^{ème} siècle les événements extrêmes (GIEC, 2007) tels que les vagues de chaleur (comme celle de 2003). Or les besoins en eau varient beaucoup d'un cépage à l'autre et d'une région viticole à l'autre. Tandis que les vignobles du Sud de la France pourraient subir des dommages importants dus à la sécheresse, ceux de Champagne bénéficient de sols calcaires permettant un stockage hydrique qui pallie le manque d'eau lors d'une sécheresse estivale. Ce point ne sera donc pas abordé dans la suite de l'étude.

2.1.1.4 La vigne tributaire des conditions thermiques

La température joue un rôle primordial : en effet, le développement optimal de la vigne est limité par des seuils thermiques aux différents stades du cycle végétatif, notamment d'avril à septembre quand la vigne est active. Dès la sortie de dormance, au moment du débournement, seules les températures dites actives sont prises en compte. Sont considérées comme « actives » les températures supérieures ou égales à 10°C considérées comme le zéro de végétation (Amerine et Winkler, 1944 ; Winkler, 1962 ; Winkler *et al.*, 1974 ; Huglin, 1986 ; Galet, 2000). La température joue un rôle également dans les échanges hydriques

(Pérarnaud et Raynal, 1991) et elle régule la photosynthèse (Huglin, 1986) du fait de sa grande variabilité saisonnière, journalière et spatiale.

Des fréquences plus élevées de dépassement des seuils thermiques défavorables à la vigne ?

Un optimum thermique (Figure 2.1) existe entre 25°C et 30°C (Winkler *et al.*, 1974) notamment durant la période estivale et l'effet de cumul des températures actives joue un rôle dans le bon développement de la vigne (Huglin, 1986).

Les deux *seuils thermiques* principaux et défavorables à la vigne sont :

- Au printemps, le seuil des températures inférieures à -2°C, au moment du débourrement, peut favoriser le gel des bourgeons et compromettre le développement de la vigne (Huglin, 1986 ; Crespy, 1987 ; Crespy, 1992 ; Galet, 2000 ; Madelin, 2004) : il s'agit du gel agronomique. Les gelées météorologiques sont radiatives ou advectives ; dans la réalité l'aléa gélif résulte de la combinaison des deux phénomènes associée à la vulnérabilité du végétal (Madelin, 2004).
- Le seuil estival des 35°C, retenu suite à la confrontation de la bibliographie, se situe à partir de 35°C jusqu'à 42°C (Champagnol, 1984 ; Huglin, 1986 ; Galet, 2000). Dans le cadre de cette thèse, le seuil des températures estivales supérieures à 35°C est choisi du fait du relevé des données à 2 m du sol⁹, les températures étant plus élevées au contact de la surface terrestre. Dans un contexte de réchauffement, de longues périodes de températures supérieures à 35°C sont défavorables à la bonne maturité des baies qui s'assèchent sous l'effet de cumuls thermiques trop élevés. Cela favorise l'échaudage des baies (Crespy, 1987). Pour Galet (2000), l'échaudage n'intervient qu'autour de 42°C. Dokoolzian et Bergqvist (2001) montrent en Californie pour le Grenache noir et le Cabernet Sauvignon que les températures supérieures à 37°C en milieu de journée sur des grappes exposées au soleil, bloquent l'accumulation des sucres, des anthocyanes et des polyphénols et des températures supérieures à 35°C pendant la phase de maturation perturbent également la synthèse des flavanoïdes qui contribuent à la bonne synthèse des tanins (Matus *et al.*, 2006).

Une tendance au réchauffement déjà observée dans les vignobles du Monde

Par définition, les extrêmes sont des phénomènes rares, intenses, à l'origine de pertes socio-économiques importantes. Les extrêmes thermiques défavorables à la vigne lors des périodes clés du cycle végétatif pourraient augmenter dans un contexte de changement climatique et des changements dans l'intensité et la fréquence des extrêmes climatiques pourraient avoir des conséquences environnementales et socio-économiques (Kharin et

⁹ En effet, les températures sont plus élevées au contact de la surface du sol en été en journée, du fait des interactions et des transferts de chaleur entre le sol et l'atmosphère qui constitue la couche limite ; la température relevée par le capteur thermique des stations météorologiques à 2 m du sol est donc moins élevée que celle à proximité des ceps de vignes.

Zwiers, 2000). Lorsque les températures sont trop élevées, la vitesse de croissance de la vigne n'est plus linéaire à l'augmentation de la température (Buttrose et Hale, 1973) ce qui poserait problème dans certaines régions viticoles. Par exemple, au Québec, des cépages résistants aux extrêmes thermiques sont mis en place dans les vignobles. Ces cépages supportent une saison végétative courte, assurent une maturation accélérée et résistent au froid hivernal (Lasserre, 2001).

La tendance au réchauffement est par exemple, asymétrique avec un réchauffement plus intense durant la nuit et le printemps (GIEC, 2001 ; Nemani *et al.*, 2001). Ainsi, en *Californie*, notamment pour la Napa Valley, le climat de la côte californienne se modifie en même temps que celui du Pacifique. Sur la période 1950-2000, toutes les régions viticoles observées dans l'étude de Jones (2005) présentent une augmentation de températures pendant la saison végétative mais également pendant la saison de dormance, les tendances au réchauffement conformément aux conclusions de l'IPCC (2001, 2007) sont plus intenses dans l'hémisphère nord que l'hémisphère sud, la qualité semble augmenter également et le réchauffement apparaît comme bénéfique pour les régions plus septentrionales comme la Champagne.

Les anomalies thermiques à anticiper dans un contexte de changement climatique ne sont pas les seules à prendre en considération. La vigne pourrait être vulnérable à des grêles plus fréquentes au moment du débourrement si ce dernier est plus précoce et à des pluies plus intenses lors de la floraison. Les mécanismes de vent pourraient changer dans le futur ainsi que la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur ou sécheresse estivale. Ces contraintes appelées « paroxystiques » (Choisnel, 2002) ou « calamités atmosphériques » (Pérarnaud et Raynal, 1991), pourraient s'avérer plus fréquentes dans le futur suite aux dérèglements atmosphériques qu'engendre le changement climatique.

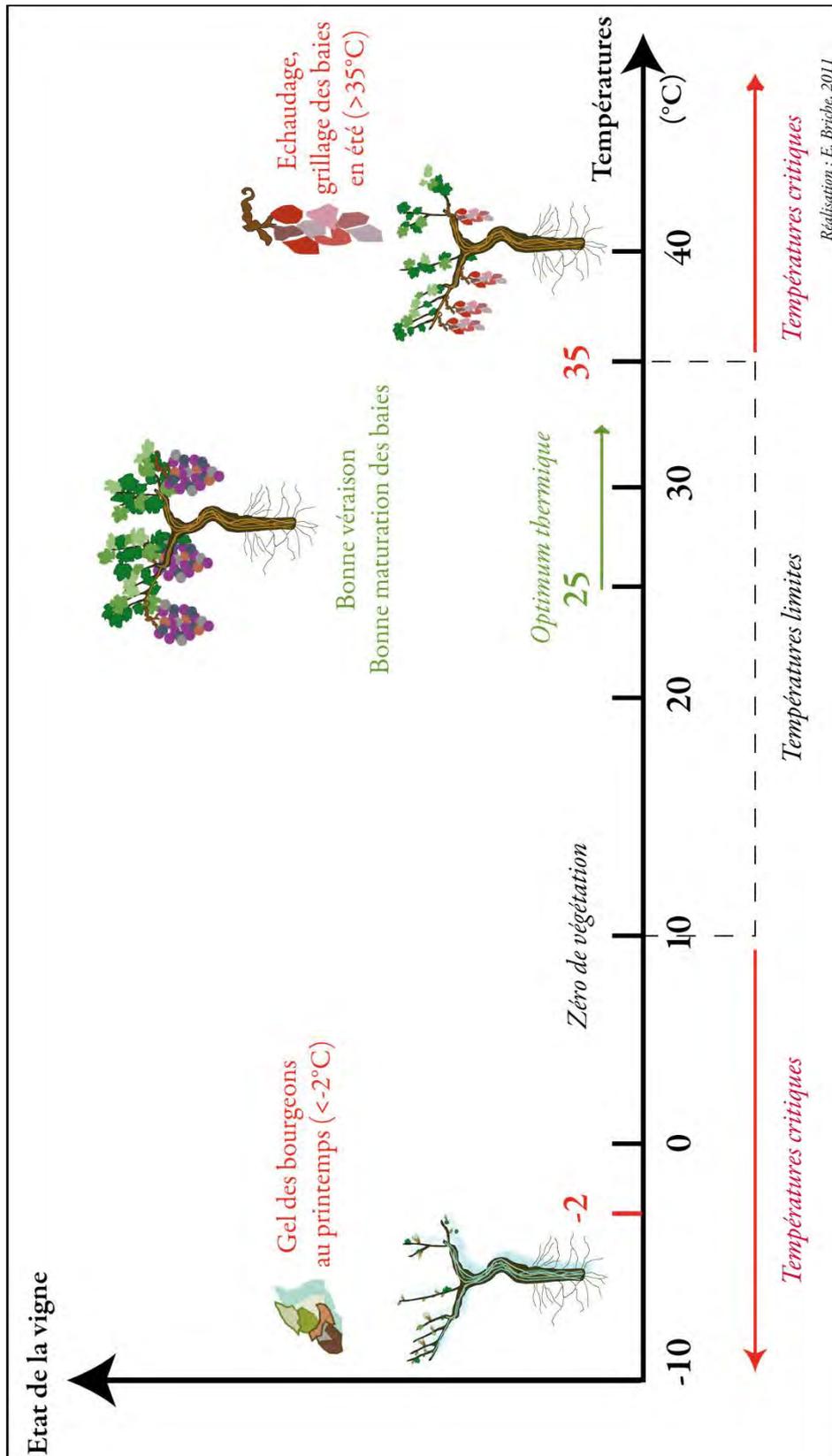


Figure 2.1 : Seuils thermiques de la vigne (Adapté et modifié de Madelin (2004) d'après Crespy (1987))

2.1.2 Évolution des indices bioclimatiques et du zonage macro-climatique viticole

Pour déterminer les conditions bioclimatiques optimales d'une région viticole (Constantinescu, 1967 ; Calame *et al.*, 1977 ; Jackson et Cherry, 1988 ; Kenny et Shao, 1992) et savoir si un cépage y est adapté, des indices bioclimatiques mettant en évidence les relations vigne-climat sont utilisés tels que l'indice bioclimatique de Huglin (1978 ; 1986), les degrés-jours de Winkler (1962) et le produit héliothermique de Branas (Branas *et al.*, 1946 ; Branas, 1974). Ces indices empiriques permettent de caractériser les potentialités climatiques d'une région viticole donnée selon les cépages en présence. Ces indices intègrent tous la température, facteur majeur du développement végétatif mais également la longueur du jour. Ils donnent donc une approximation climatique à échelle macroclimatique ou le type de climat d'une région viticole.

2.1.2.1 *Les indices utilisés en agroclimatologie*

L'indice de Huglin, exprimé en degrés-jours tient compte des températures maximales et inclut un coefficient de longueur de jour (Huglin, 1978) :

$$\sum_{01/04}^{30/09} \frac{(T_m - 10) + (T_x - 10)}{2} \cdot K$$

avec T_m la température moyenne journalière (en °C), T_x la température maximale journalière (en °C) et K le coefficient de longueur du jour (de 1,06 pour la latitude du vignoble marnais).

Seules les températures « actives » efficaces supérieures à 10°C sont prises en compte dans le calcul de l'indice car elles contribuent au développement de la plante (Huglin, 1986) et surtout un cumul est nécessaire au printemps pour amorcer le débourrement des ceps.

L'indice a permis de déterminer des types de climat selon les valeurs de l'indice de Huglin ainsi que la possibilité ou non d'intégrer un cépage dans une zone viticole déterminée (Tonietto et Carbonneau, 2004 ; Conceicao et Tonietto, 2005).

Les degrés-jours de Winkler (1962), utilisés pour définir à la base les types de régions viticoles en Californie, prennent en compte les températures moyennes journalières supérieures à 10°C d'avril à octobre. Cet indice nous donne également un zonage viticole mondial (Tableau II.I).

Tableau II.I : Zonage viticole mondial (D'après Winkler, 1962 in Huglin, 1986)

	Somme des températures actives (en °C) ²⁵	Exemples de stations
Zone 1	< 1390°	Geisenheim, Genève, Dijon, Bordeaux, Vienne...
Zone 2	[1390° ; 1670°[Odessa, Budapest, Santiago (Chili), Napa, Asti, Bucarest, Carcassonne...
Zone 3	[1670° ; 1950°[Oakville, Astrakhan, Milan, Montpellier...
Zone 4	[1950° ; 2220°[Venise, Mendoza, Le Cap, Sidney, Rivesaltes, Bandol...
Zone 5	≥ 2220°	Split, Palerme, Fresno, Alger...

Le produit héliothermique de Branas (1946) est fonction des températures actives et de la durée moyenne du jour : $XH \cdot 10^{-6}$ où X est la somme des températures moyennes journalières actives supérieures à 10°C et H, la somme des longueurs de jour durant la période où les températures sont actives. Cet indice nous donne la limite de culture de la vigne (Figure 2.2) notamment la limite septentrionale marquée par « l'isohéliotherme 2,6 » (Huglin, 1986).



Figure 2.2 : Limite septentrionale de la culture de la vigne en Europe (D'après Branas, Bernon et Levadoux, 1946 in Huglin, 1986)

L'indice de fraîcheur des nuits correspond à la température nocturne minimale moyenne du mois qui précède la vendange (Tonietto, 1999), voire des 30 jours précédents la date de récolte potentielle. Il se calcule :

- Dans l'hémisphère nord

IF = Température minimale de l'air du mois de septembre (moyenne des minimales), en °C ;

- Dans l'hémisphère sud

IF = Température minimale de l'air du mois de mars (moyenne des minimales), en °C. Généralement le calcul de l'indice est adapté selon le cépage étudié.

Le système de Classification Climatique Multicritères Géoviticole (ou Système CCM Géoviticole) (Tonietto et Carbonneau, 2004). Ce système (Annexe II) peut servir pour la détermination d'un zonage viticole, soit pour le diagnostic d'un climat d'une région viticole (Tonietto, 1999 ; Conceição et Tonietto, 2005). Il utilise de nombreux indices tels que l'indice de Huglin, l'indice de fraîcheur des nuits, etc. Ainsi, la division de l'indice de fraîcheur des nuits en plusieurs classes (des nuits très fraîches aux nuits chaudes) permet de déterminer le type de nuit dans le futur mais aussi de déterminer si la maturation des raisins est à surveiller. En effet, des raisins ayant eu une maturation à nuits fraîches ont une expression aromatique plus intense (Deloire, 2005) : dans un contexte de changement climatique, l'augmentation des températures minimales estivales pourrait donc modifier la composition aromatique des vins.

Les indices de Huglin, Winkler et de fraîcheur des nuits sont utilisés dans ce travail de recherche afin de constater l'évolution du type de climat en Champagne sur la période de contrôle à partir de l'indice de Huglin mais également d'établir une prospective bioclimatique sur les scénarios futurs en ce qui concerne l'évolution probable des types de nuits observées en Champagne mais aussi des sommes thermiques acquises. Ces indices présentent un intérêt du fait de leur accessibilité de calcul ne nécessitant que les données thermiques journalières issues des sorties de modèles du climat et malgré l'empirisme de leurs formules, permettent de donner un aperçu des conditions thermiques favorables d'une région viticole.

2.1.2.2 Une évolution du zonage viticole observée à partir des indices bioclimatiques

Ces indices et la classification précédente nous donnent une répartition approximative des vignobles à la surface du globe selon les isolignes thermiques moyennes annuelles de 10°C et 20°C (Figure 2.3).

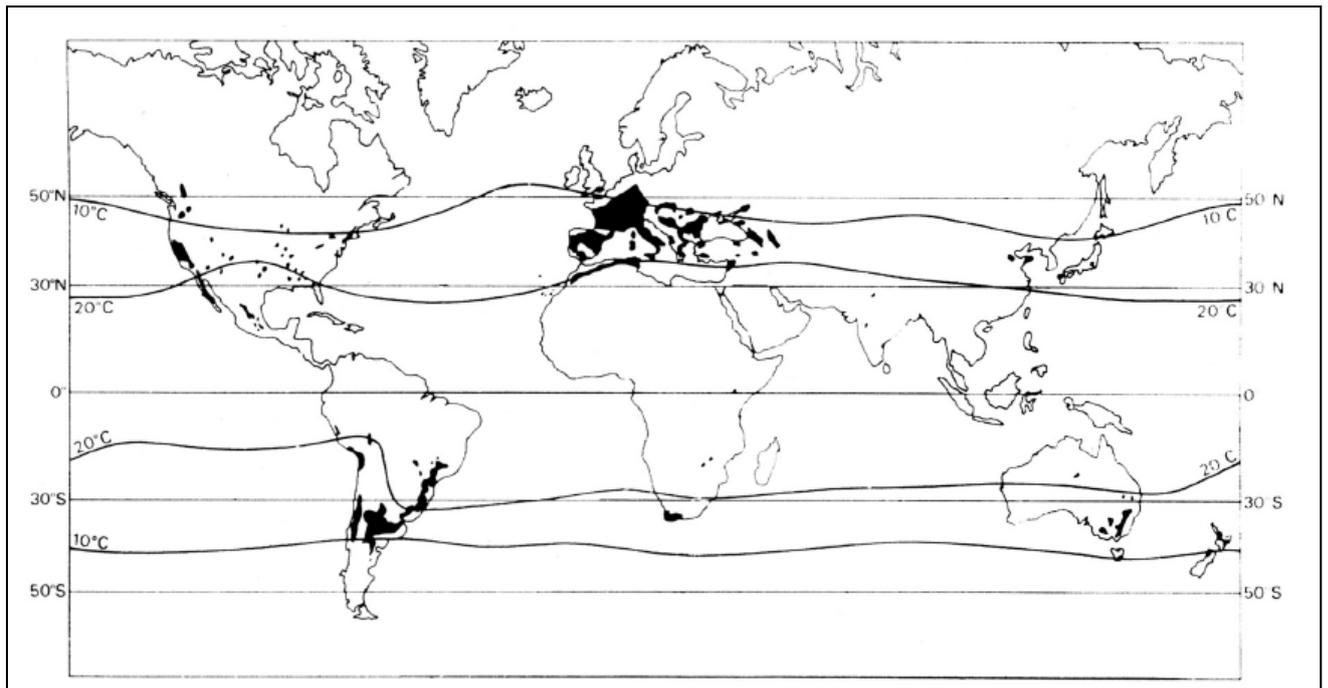


Figure 2.3 : Répartition des vignobles à la surface du globe selon les isolignes 10°C et 20°C (Source : Unwin, 1991)

Des glissements d'aires des cépages sont également observés à partir des tendances d'indice de Huglin (Schultz, 2000 ; Seguin et Garcia de Cortazar Aauri, 2004 ; Jones *et al.*, 2005, Jones, 2006 ; Lobell *et al.*, 2006 ; Madelin *et al.*, 2010 ; Seguin, 2010).

2.2 Évolution de la phénologie : un cycle végétatif raccourci ?

2.2.1 Les stades phénologiques

La vigne est une plante pérenne à fruits charnus. Par plante pérenne, on entend un système racinaire déjà établi, au début du cycle végétatif, qui contient en outre des réserves carbonées et azotées. Deux cycles différents se produisent simultanément pendant la croissance de la plante (Coombe et Dry, 1998 ; Due *et al.*, 1993). Le cycle végétatif commence avec le développement des bourgeons axillaires l'année précédente ; suivi de la dormance, le débourrement, la croissance des rameaux et leur aoûtement ; ce cycle se termine par la chute des feuilles.

Le développement physiologique de la vigne (Figure 2.4) est fortement influencé par plusieurs variables climatiques, en particulier par les sommes thermiques acquises (cumulées) lors du cycle végétatif d'avril à septembre (Huglin, 1986).

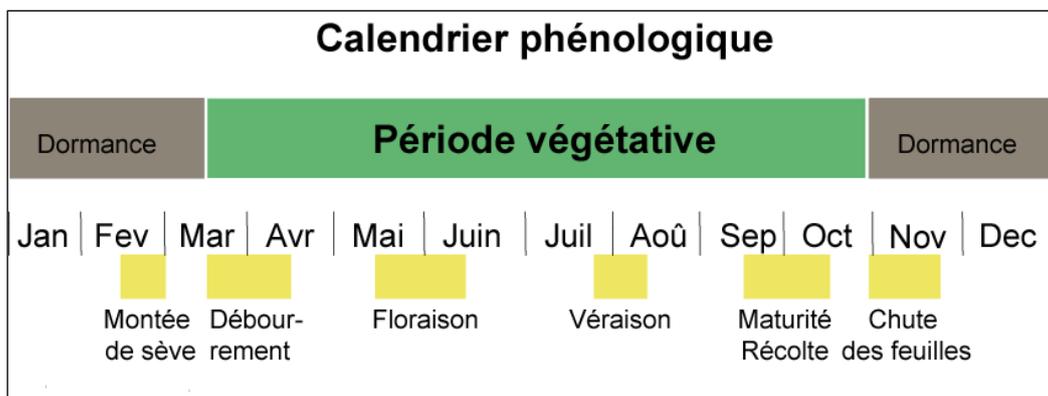


Figure 2.4 : Calendrier des stades phénologiques (avec leur durée en jaune) pour le vignoble marnais (Adapté de Huglin, 1986)

La phénologie (Figure 2.5) est l'étude des phénomènes périodiques du cycle végétatif généralement sur une année (Huglin, 1986) mis en relation avec les paramètres climatiques (Soltner, 1995).

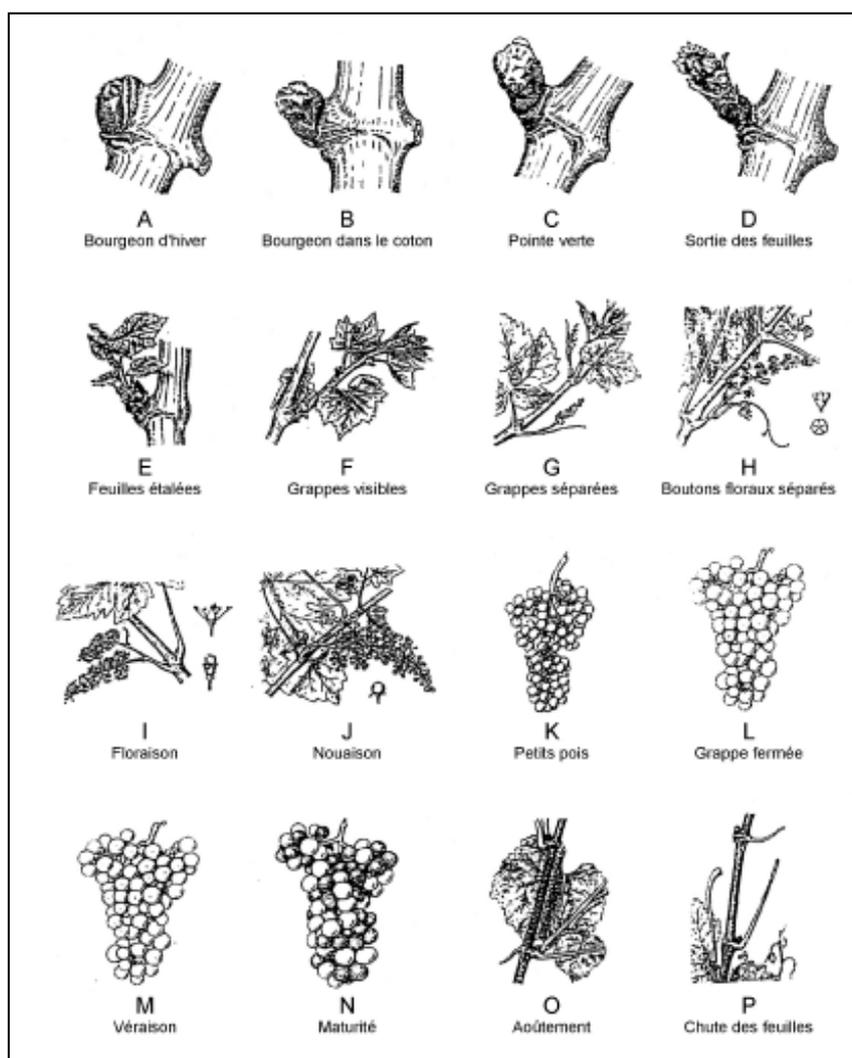


Figure 2.5 : Les stades repères de la vigne (Source : Baggiolini, 1952)

Le cycle végétatif de la vigne débute au printemps avec l'accumulation de sommes thermiques propices à la sortie de dormance de la vigne, généralement en avril mais cette date varie selon les régions, les cépages et présente une certaine variabilité interannuelle. Le cycle végétatif de la vigne après le repos hivernal démarre avec le **débourrement** (stades B et C) qui repose sur plusieurs phases, qui diffèrent selon la classification utilisée (Baggiolini, 1952). Durant cette phase, le bourgeon latent éclate et se développe au fur et à mesure pour enfin faire éclater la bourre (Carbonneau, 1992). Les températures acquises pour que le bourgeon soit dans le coton atteignent généralement de 8° à 12°C pendant plusieurs jours (Branas, 1974 ; Huglin, 1986 ; Galet, 2000). Ces bourgeons sont sensibles aux températures extrêmes printanières inférieures à -2°C : elles peuvent geler le bourgeon naissant lors de l'aléa gélif, notamment dans les vignobles septentrionaux tels que la Champagne.

La **floraison** correspond à l'épanouissement de la fleur (stade I) après la sortie des inflorescences et des premières feuilles. La floraison peut se poursuivre pendant plusieurs jours entre mai et juin, jusqu'à une dizaine environ, parfois plus si le temps est humide (pluie) mais aussi froid. La pluie gêne la dissémination des pollens et le froid empêche l'épanouissement complet des fleurs (Galet, 2000) Ce stade peut varier selon le cépage, le type de climat de la région viticole. Ce stade est également dépendant de la température : selon Millardet (1885), l'épanouissement est subordonné à la température. Au-delà des 35°C (Galet, 2000), la floraison est retardée. Huglin (1986) propose des sommes thermiques nécessaires selon les cépages pendant la période débourrement-floraison ; Christensen (1969) propose un cumul de températures actives ou « degrés-jours » compris entre 370 et 400 degrés-jours. Une mauvaise floraison entraîne le millerandage après la nouaison. Il s'agit d'une affection caractérisée par de petites baies colorées, très sucrées à côté des baies normales et selon Branas (1974) : « *L'intensité du millerandage¹⁰ est augmentée par les facteurs défavorables à la germination du pollen ; les températures basses et la pluie détrempeant le pollen, gênent ou empêchent sa germination et maintiennent aussi les fleurs encapuchonnées en diminuant la force des étamines ; leurs effets sont aggravés par les labours et l'irrigation* ».

La **véraison** (stade M) correspond au changement de couleur des baies : les baies au départ vertes et dures, deviennent translucides pour les cépages blancs et rouges pour les cépages de la même couleur (Galet, 2000). Les raisins, à cette période, ont besoin d'une certaine sécheresse (Becker, 1978 ; Carbonneau, 1980 ; 1992 ; 1996 ; 2003), les viticulteurs parlent de faire « *souffrir la vigne* ». La coloration des raisins rouges dépend de la température : des températures trop basses ou trop élevées sont associées à une faible coloration.

La **maturité physiologique** (Huglin, 1986), quant à elle, est le moment où les baies se gorgent de sucre et atteignent leur capacité maximale (stade N). Pour les vins de qualité, il

¹⁰ Millerandage : « Affection caractérisée par la présence de petites baies apyrènes, colorées, très sucrées, à côté des baies normales, pyrénées » (Galet, 2000).

faut attendre une légère concentration en sucres et une combustion de l'acide malique ou de récolter avant maturité pour garder une certaine acidité (Galet, 2000). Selon les régions, les attentes des viticulteurs ne sont pas les mêmes : tandis que dans les régions chaudes, ils tâchent de préserver une certaine acidité, dans les régions froides et septentrionales, le taux de sucres est gage de qualité (Huglin, 1986). De plus, le régime thermique durant la maturation du raisin est déterminant pour la coloration du raisin et la teneur en arômes (Coombe, 1987 ; Tonietto et Carbonneau, 2004). Les brises maritimes (Bonnardot, 1999) peuvent être importantes pour la réduction des températures de l'air en période de maturation du raisin comme dans la zone de Stellenbosch, en Afrique du Sud. Des nuits fraîches sont favorables pendant la maturation (Carbonneau, 1992) mises en avant dans le système de classification climatique multicritères géoviticole (Tonietto et Carbonneau, 2004) avec l'indice de fraîcheur des nuits.

2.2.2 Un cycle raccourci dans la plupart des vignobles : exemples en France

En réponse au changement climatique, on assiste à une évolution de la phénologie de la vigne (Barbeau, 2007 ; Bellia *et al.*, 2008 ; Seguin, 2010) car les interactions phénologie-température sont très fortes.

Depuis 1990, les cépages bordelais tels que le Merlot et le Cabernet Sauvignon présentent une précocité des différents stades avec une apparition des pointes vertes plus précoces d'environ dix jours, d'environ une dizaine de jours également pour la mi-floraison et la mi-véraison suit la même tendance (Bois, 2007). De plus, les relevés phénologiques des châteaux du Médoc montrent que la phénologie de la vigne était déjà plus précoce au début du XX^{ème} siècle, bien que moins marquée qu'actuellement (Chevet et Soyer, 2006 ; Bois, 2007 ; Bois et Van Leeuwen, 2008). L'élévation des températures conduit donc à un raccourcissement du cycle végétatif de la vigne.

Pour le Bordelais, le vignoble ne se réchauffe pas partout de manière homogène : ceci est dû aux climats locaux qui diffèrent selon les appellations avec des effets plus ou moins contrastés de la continentalité de ce vignoble qui s'étend sur une centaine de kilomètres. L'avancement des dates de débourrement pourrait également conduire à un aléa gélif accru (Bois, 2007). L'avancement de la floraison pourrait, quant à elle, induire un risque pluvieux plus élevé perturbant la fécondation.

En Alsace, le climat au sein du vignoble a également évolué : la température moyenne augmente d'environ 0,06°C par an depuis 1972 ; l'indice de Huglin ainsi que la biomasse ont augmenté ; et les stades phénologiques ainsi que les vendanges sont plus précoces : par exemple, la véraison d'environ 23 jours (Duchêne et Schneider, 2004).

2.2.3 La modélisation agronomique pour anticiper les changements phénologiques

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer les impacts du changement climatique sur la vigne : recréer en serre les conditions du réchauffement (Seguin, 2010), utiliser des simulations dans des modèles de croissance de la vigne tels que STICS (Garcia de Cortazar Atauri *et al.*, 2004 ; Garcia de Cortazar Atauri *et al.*, 2005 ; Garcia de Cortazar Atauri, 2006 ; Garcia de Cortazar Atauri et Brisson, 2007) observer les impacts sur les parcelles à échelles fines (Bois, 2007). A Bordeaux, pour les cépages rouges, la mi-floraison est atteinte lorsque 400 degrés-jours ont été atteints et 1100 degrés-jours pour la mi-véraison (Bois, 2007). La somme des températures supérieures à 10°C est en effet fortement corrélée aux dates phénologiques observées. L'utilisation des modèles de croissance de la vigne pour évaluer la réponse future au changement climatique est judicieuse. Ces modèles confirment la précocité des stades phénologiques dans le futur mais également une hausse de la production de biomasse accélérant les rendements, un déficit hydrique de la vigne accru (Garcia de Cortazar Atauri, 2006). Le modèle STICS inclut les stades phénologiques, la croissance racinaire, le fonctionnement hydrique, le fonctionnement azoté, etc. De plus, la culture de la vigne nécessite la prise en compte des systèmes de conduite de la vigne (Carbonneau, 2003) qui visent à maîtriser le feuillage et le rendement (Garcia de Cortazar Atauri et Brisson, 2007). La date de débourrement a été très largement prise en compte dans ce modèle car c'est elle qui détermine le départ du cycle végétatif de la vigne (Garcia de Cortazar Atauri *et al.*, 2006). Or celle-ci est très variable selon le cépage et ses caractéristiques de précocité de date de taille (Huglin, 1986). Le modèle BRIN (Garcia de Cortazar Atauri *et al.*, 2005) est donc utilisé afin de prendre en compte la dormance et la période post-dormance basé sur une adaptation du modèle de calcul de débourrement théorique de Riou et Pouget (1994). Ce modèle a permis la mise en place de simulations futures avec les sorties de modèle ARPEGE-Climat (Météo-France) de la date de débourrement. Un test a été effectué au préalable sur une période de contrôle (1960-1989). Ces simulations ont été réalisées six régions viticoles françaises et les cépages qui leur sont associés. Différents vignobles français ont été paramétrés dans ce modèle : Côtes du Rhône, Bordeaux, Cognac, Champagne, Anjou, etc. Ce modèle dynamique, à pas de temps journalier permet à la fois d'estimer les variables agricoles telles que le rendement ou la qualité et les variables environnementales telles que le nitrate. L'adaptation du modèle a été également faite pour huit cépages comme la Syrah, le Chardonnay, le Pinot Noir, etc. Le modèle STICS, pour les simulations futures, est couplé aux données simulées du MCG ARPEGE-Climat (Météo-France).

2.3 Des facteurs locaux déterminants pour la croissance de la vigne

2.3.1 L'exposition en coteaux : gage d'un bon ensoleillement ?

La topographie est importante pour les vignobles : l'exposition en coteaux permet d'obtenir de meilleurs vins. Les côtes ou coteaux viticoles, issus parfois du contraste géomorphologique roche dure/ roche tendre d'une cuesta notamment en Champagne, sont propices à la vigne s'ils sont exploités en fonction de la pente, l'altitude et l'exposition. Sur les côtes, l'ensoleillement est plus long et intense, les gelées printanières y sévissent moins, bloquées plus souvent en bas de coteau, provoquant des lacs d'air froid (Beltrando *et al.*, 1992 ; Bridier, 2001 ; Quénol, 2002 ; Madelin, 2004). L'exposition joue également un rôle important dans les vignobles septentrionaux tels que ceux de l'Alsace ou de la Champagne ainsi que dans les vignobles de Provence (Bridier et Quénol, 2010), des Côtes du Rhône (Bellia *et al.*, 2008), de l'Hérault (Tondut *et al.*, 2006). Elle est définie par l'orientation et l'inclinaison du sol avec une orientation nord souvent considérée défavorable dans les vignobles septentrionaux.

Dans un contexte de changement climatique, des coteaux exposés sud dans des régions climatiques où la température est élevée comme en Méditerranée pourraient être moins favorables pour le développement des baies et la maturation des raisins, notamment en été où les températures maximales sont élevées et où la vigne a besoin de nuits fraîches pour produire des arômes. A l'inverse, des vignobles plus septentrionaux, tels que la Champagne, pourraient bénéficier d'une meilleure exposition avec la hausse des températures qui permettra une augmentation de la biomasse végétale mais aussi des quantités de raisins.

2.3.2 Couverture du sol et texture du sol

2.3.2.1 *Proximité de lacs ou de forêts*

La proximité d'une surface en eau, d'un lac par exemple peut être favorable car les rayonnements solaires se réfléchissent par temps calme et agissent comme un miroir en s'ajoutant à l'influence de la pente et de l'exposition.

Les vignobles peuvent aussi se situer à proximité de forêts qui modifient plusieurs variables climatiques telles que la température du fait de l'énergie consommée par l'évaporation : celle-ci est d'autant plus élevée que l'humidité de l'air est faible et contribue à faire baisser la température.

2.3.2.2 *La texture du sol*

Les rendements de la vigne sont naturellement tributaires de la composition chimique du sol (Huglin, 1986). En effet, le sol joue un rôle conséquent dans les possibilités qualitatives

d'un milieu viticole : selon le type de sol, les vins donnent des spécificités gustatives. Les vins issus de sols légers sont plus floraux (Huglin, 1986). Le sol participe donc au goût des vins : au Canada, les sols sont propices à la vigne mais peu variés ce qui ne favorise pas la différenciation des goûts (Lasserre, 2001). L'homme peut bien entendu le modeler afin d'obtenir les rendements attendus au moyen d'intrants qui perturbent à long terme ce même sol en l'épuisant ou le polluant.

Les températures sont modifiées selon la conductivité thermique, la couleur, la nature du sol (Gayon et Peynaud, 1971) : ainsi certains sols clairs, bien souvent calcaires favorisent le grillage estival des baies du fait de leur forte réflexion. Le sol de la vigne peut être envisagé dans ses organisations spatiales car il est le facteur prédominant du terroir désigné par ses propriétés chimiques et hydriques mais aussi par ses caractéristiques morphologiques (Vaudour, 2003). En effet, les différenciations des sols à la fois chimiques et physiques participent aux compositions aromatiques des vins mais également aux microclimats qui en résultent du fait notamment des modifications thermiques engendrées. Ainsi, en Bourgogne, les parcelles issues d'un même terroir sont appelées « *climats* » : ce terme fait notamment référence aux propriétés gustatives des vins issus de la grande diversité de composition chimique, profondeur et drainage du sol mais également à l'exposition, l'altitude et les microclimats qui en résultent. Cette notion de « *climats* » intervient dans les appellations des vins de Bourgogne.

2.3.3 Les facteurs d'intensification du refroidissement nocturne et du réchauffement diurne

Les deux principaux aléas retenus dans cette thèse sont l'aléa gélif printanier au moment du débourrement et la canicule estivale, dommageables pour la vigne. L'aléa gélif se traduit par des températures négatives défavorables à la vigne et se produit lors de certaines conditions atmosphériques.

2.3.3.1 Le refroidissement nocturne

Le refroidissement nocturne accentue la baisse des températures de la couche limite, il se produit selon certaines conditions. Il s'opère lorsque le rapport entre l'énergie du rayonnement atmosphérique provenant au sol et l'énergie du rayonnement terrestre est négatif. Les températures baissent dès le coucher du soleil jusqu'au lever du jour et ce refroidissement accentue le risque de gel des bourgeons au printemps et de nombreuses études ont été réalisées sur la répartition spatiale des températures minimales lors de nuits radiatives, durant lesquelles cette répartition n'est pas homogène du fait des conditions de surface (Bridier *et al.*, 1995 ; Beltrando, 1998 ; Quénot, 2002 ; Madelin, 2004 ; De Parcevaux et Huber, 2007).

Les gelées radiatives et advectives

La variabilité spatio-temporelle des températures minimales est « *d'autant plus forte que RA et RT (Figure 2.6) diffèrent selon les conditions atmosphériques et selon les caractéristiques de l'environnement (sol, végétal, obstacles artificiels, ...) et du relief (pente, replat, cuvette, etc.)* » (Quénol, 2002).

Le gel de printemps se produit lors de gelées radiatives (temps anticyclonique, ciel clair et vent faible) ou lors de gelées advectives (arrivée d'une masse d'air froid). Lorsque les conditions atmosphériques sont radiatives avec un ciel clair (Figure 2.6), un vent faible et un air sec, les pertes d'énergie sont maximales (Carrega, 1994 ; Quénol, 2002). Les pertes radiatives dans l'infra-rouge ne sont pas compensées par les flux de conduction du sol, ni par rayonnement atmosphérique (Figure 2.6) contrairement au cas où il y a de la nébulosité. Cellier (1989), montre que l'on peut observer des températures négatives jusqu'à la fin mai et que généralement, les gelées n'ont lieu qu'en fin de nuit, dans les cas où les conditions météorologiques sont radiatives, favorisant un fort refroidissement entre le coucher et le lever du soleil.

Le gel advectif se caractérise par l'arrivée d'une masse d'air froid différente de celle qui est en place avec un vent supérieur à 3 m/s, une humidité relative faible et des températures minimales très basses (A.V.C., 1991 ; Quénol, 2002 ; Madelin, 2004). Dans la réalité, c'est assez souvent une situation intermédiaire.

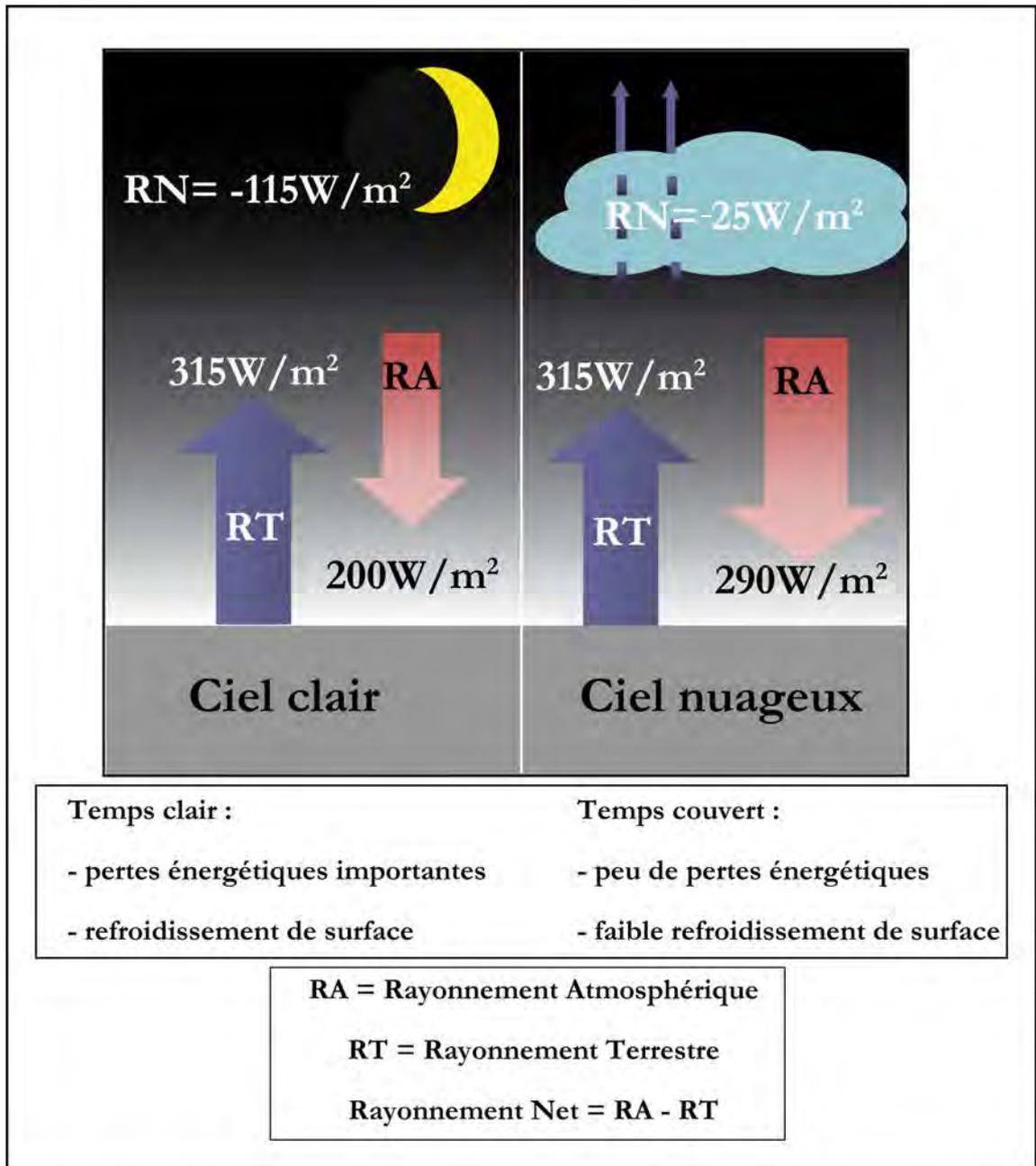


Figure 2.6 : Mécanismes du refroidissement nocturne à la surface de la Terre en fonction de la situation atmosphérique (adapté de A.V.C., 1991 ; Hufty, 2001 et Quénot, 2002)¹¹.

La variabilité des températures minimales est beaucoup plus faible lors de ces conditions advectives : les températures les plus basses peuvent être observées dans des zones où le brassage de l'air ne peut avoir lieu à cause d'un barrage. Par exemple, un obstacle en aval d'un coteau viticole fait stagner l'air froid et un fort refroidissement est observé (Quénot, 2002).

Bien souvent, les deux types de gelées sont combinés lors d'un épisode gélif auxquels s'ajoute le gel d'évaporation provenant de la végétation ou de la surface du sol humide

¹¹RT et RA sont en infra-rouge.

induisant un refroidissement rapide juste après le coucher du soleil, d'autant plus si l'air est sec (Quénol, 2002 ; Madelin, 2004).

Les contraintes locales

Les pertes d'énergie sont d'autant plus importantes que les conditions locales accentuent ce phénomène (Figure 2.7). La répartition spatiale des températures minimales peut varier en fonction :

- des couches superficielle et profonde du sol ;

En effet, l'atmosphère stagnante au dessus du sol et ses caractéristiques sont affectées par la surface sus-jacente et en acquièrent les propriétés thermiques (Yoshino, 1977 ; Quénol, 2002) et la capacité de restitution d'énergie du sol dépend de sa composition en surface mais également en profondeur. Lorsque la couche profonde du sol est composée d'éléments grossiers, il y a mauvaise conduction thermique : de ce fait, le transfert d'énergie entre le sol et la surface s'effectue mal et il n'y a pas compensation des déperditions thermiques. Dans un sol humide, l'eau permet la conduction entre les particules du sol. En surface, plus la couleur du sol est claire, plus le rayonnement est réfléchi et l'absorption moindre. Les transferts entre les profondeurs et l'atmosphère sont facilités lorsque le sol est nu et tassé ; un sol avec une couche superficielle épaisse recouverte est un obstacle à la conduction thermique (Carrega, 1994 ; Quénol, 2002 ; Madelin, 2004).

- de la topographie et des écoulements d'air froid ;

La topographie joue un rôle important dans le cas des refroidissements nocturnes. En effet, l'air au-dessus du sol se refroidit dans la nuit ; l'air froid plus dense, stagne et reste au niveau du sol par subsidence cependant lorsque la topographie est en pente comme dans les coteaux viticoles, l'air froid s'écoule par gravité (Yoshino, 1975 ; Endlicher, 1980 ; Beltrando *et al.*, 1992 ; Fallo, 1992 ; Bridier *et al.*, 1995 ; Beltrando, 1998 ; Quénol, 2002) le long des pentes formant des brises descendantes. Cet air s'écoule « par petites saccades » (Carrega, 1994) vers le bas, aboutissant à une inversion thermique dans les zones de cuvettes formant ainsi des lacs d'air froid.

- du vent ;

Il tend à rehausser les températures minimales par brassage de l'air, empêchant ainsi l'accumulation d'air froid.

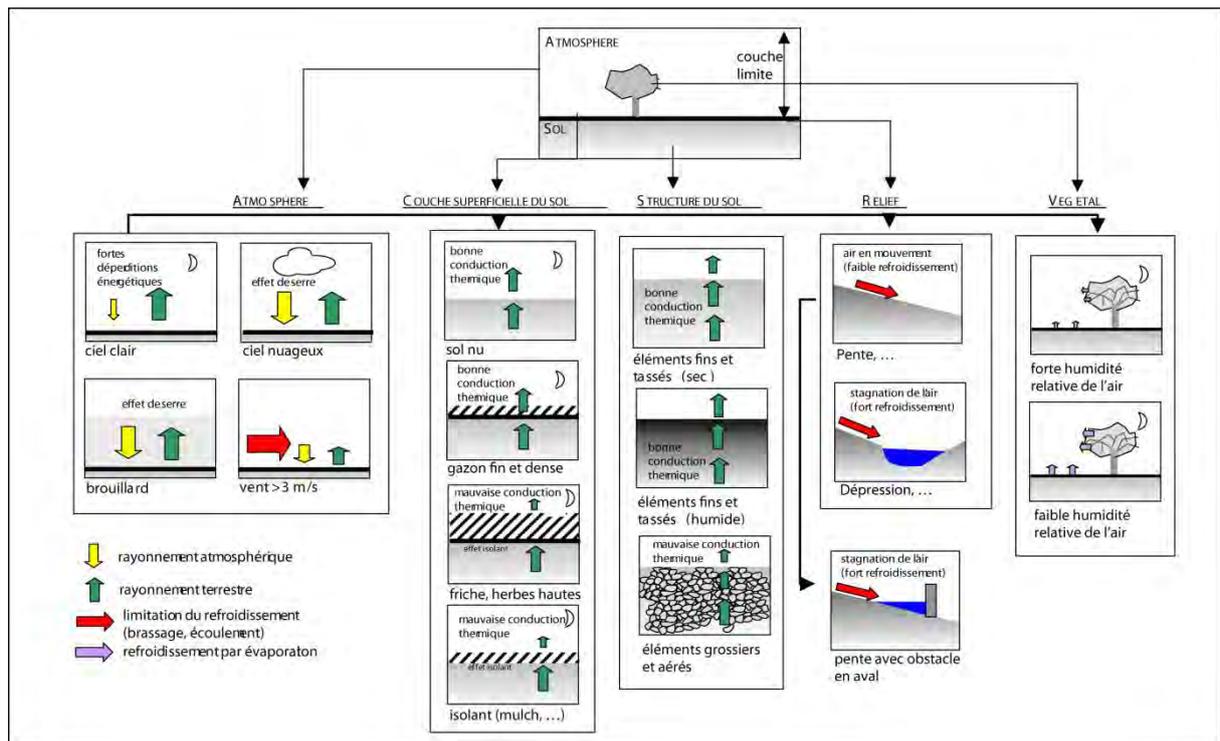


Figure 2.7 : Différents facteurs intervenant sur le refroidissement nocturne radiatif (Source : Quéno, 2002).

La vigne fortement vulnérable au refroidissement au moment du débourrement

La vigne est très sensible au refroidissement nocturne notamment lors du débourrement. La température du végétal diminue par pertes énergétiques dues au rayonnement ou à l'évaporation. Le gel des bourgeons printaniers dépend de la résistance acquise par la vigne aux forts refroidissements. « *Les dommages causés aux végétaux par le gel sont liés à la formation de glace dans les tissus du fait de la présence d'agents de cristallisation qui font cesser l'état de surfusion de l'eau* » (Villele et al., 1984). La survie de l'organe dépend donc du type de cristallisation subie : si la cristallisation est intracellulaire, la mort du végétal est constatée ; si elle est extracellulaire, tout dépend de la longueur de la période de refroidissement. Lors d'un refroidissement lent, la plante résiste mieux au gel car elle s'endurcit au froid, s'il est rapide, l'eau ne sort pas des cellules et cristallise entraînant la mort des cellules du fait d'altérations irréversibles (Leddet et Dereuddre, 1989). La sensibilité de la vigne au gel dépend également de l'avancée du développement végétatif (Cellier, 1989) : elle augmente avec l'avancée des stades phénologiques.

En Champagne (Figure 2.8), au moment du débourrement, la sensibilité de la vigne augmente de manière logarithmique avec le temps : plus le bourgeon est avancé, plus il est sensible aux températures négatives proche de 0°C avec une asymptote ou un seuil atteint vers -2°C pour un bourgeon mouillé et $-3,5^{\circ}\text{C}$ pour un bourgeon sec au moment du stade « C » de Baggiolini (1952) qui est celui où la pointe verte commence à sortir. La figure montre également qu'un bourgeon humide est beaucoup plus sensible aux températures négatives

proches du 0°C dès le stade du bourgeon dans le coton (stade « B ») ; un bourgeon sec résiste mieux à des températures très basses (< -7°C) dans le temps.

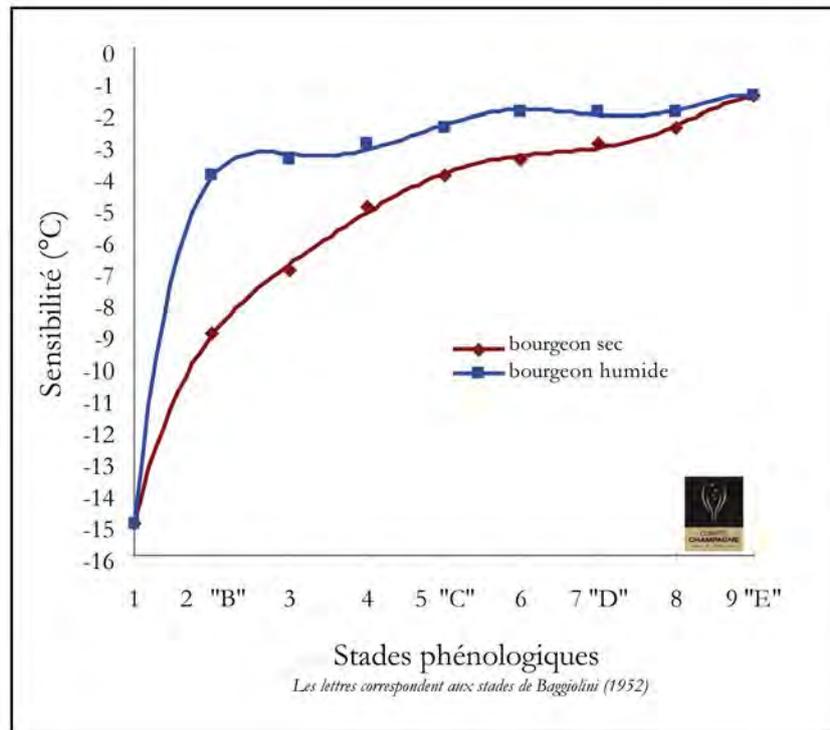


Figure 2.8 : Sensibilité du bourgeon de vigne au gel (Adapté de Langellier, communication privée)

2.3.3.2 Le réchauffement diurne

Le changement climatique suscite des interrogations quant à la possible augmentation des vagues de chaleur estivale : celles-ci peuvent être dommageables pour les vendanges. En effet, les baies grillent si elles sont sujettes à de fortes chaleurs et à un fort ensoleillement et la composition aromatique du vin peut changer suite à l'accumulation de sucres entraînant un taux d'alcool plus élevé.

La température de la surface du sol influence celle de l'atmosphère de la couche limite. Cette dernière se réchauffe au contact du sol puis s'allège et « *il s'ensuit un mouvement ascendant irrégulier (convectif), en bulles éparses d'assez petite taille au début (quelques mètres ou dizaines de mètres) qui tendent à grossir par coalescence en cours d'ascension pour atteindre des diamètres de l'ordre de 120 à 200 m environ quelques centaines de mètres après leur décollage* » (Carrega, 1994).

Les facteurs locaux peuvent intensifier ce réchauffement diurne, notamment :

- la texture, la nature et la couverture du sol déterminent la température de l'air : un sol foncé dont la réflexion est faible a un réchauffement plus important ;
- la topographie joue un rôle sur l'intensification du réchauffement. Un coteau viticole bien exposé et orienté au sud concentre plus d'énergie qu'un coteau exposé au nord. L'énergie solaire est alors maximale ;

La variabilité spatiale des températures maximales en été est moins évidente car elle est souvent lissée par les vents locaux qui atténuent les hétérogénéités possibles (Carrega, 1994).

2.3.4 Modifications vitivinicoles déjà observées

Les changements observés sur la température ont des répercussions sur la production viticole et de nombreuses interrogations sont suscitées quant aux possibles adaptations face à des changements de typicité et de qualité du vin.

2.3.4.1 *Des changements de typicité ?*

Certains vignobles pourraient déjà être sujets à des changements de typicité, c'est-à-dire un changement des particularités notamment aromatiques des vins.

En Bourgogne, Chabin *et al.* (2007), à partir des données climatiques et phénologiques de la vigne, ont comparé deux sites de la région de Beaune : l'un sur la Côte, l'autre dans les Hautes Côtes (La Rochepot). L'augmentation des températures, depuis 1987-1988 provoque une précocité des stades phénologiques et un raccourcissement de la période débourrement-maturité, impliquant des vendanges plus précoces. Une remise en cause de la typicité, voire de la qualité des vignobles, pourrait avoir lieu car la hausse des températures a plus d'effets sur les vignobles implantés sur l'arrière-côte, plus hauts en altitude que sur ceux implantés à une altitude plus faible, siège des plus grandes AOC (Figure 2.9).

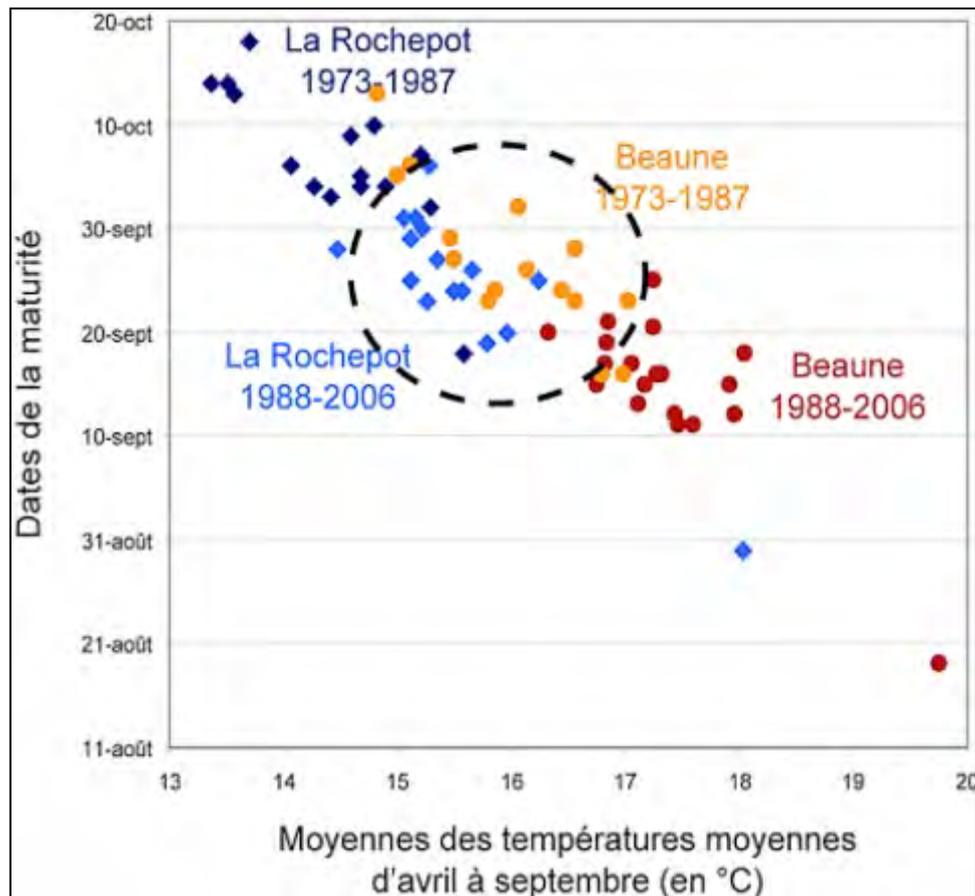


Figure 2.9 : Relations entre températures moyennes (avril – septembre) et dates de maturité – vendanges du Pinot noir à Beaune et à la Rocheport (Source : Chabin *et al.*, 2007)

2.3.4.2 *Des changements de qualité du vin ?*

Plusieurs facteurs contribuent à limiter la qualité de la production viticole dont la température semble être le plus marquant car elle régule le cycle phénologique de l'année. Dans un contexte de changement climatique, des modifications prononcées des températures décaleront la phénologie de la vigne mais nuiront également à la qualité des vins produits. Des températures élevées la nuit perturbent la synthèse des polyphénols et des températures supérieures à 35°C, le jour en plein soleil, provoquent des dommages sur les feuilles les plus exposées : elles se dessèchent et tombent très tôt n'assurant plus l'alimentation des baies (Agenis-Nervers, 2006). De plus, il existe une corrélation positive jusqu'à un certain seuil entre la température et la qualité des vins (Jones et Davis, 2000 ; Jones *et al.*, 2005 ; Jones 2007) : il s'agit d'une relation quadratique entre la température et la croissance de la vigne et la qualité du vin produit. Cette relation est reconnue par le classement des vins Sotheby's.

Les conditions météorologiques d'une année végétative joue un grand rôle sur les vendanges de l'année et la qualité du vin (Pomerol, 1984 ; Galet, 2000). Ces années particulières conservent leur entité par la mise en évidence de millésimes. La variabilité du climat a une grande importance pour les produits de la vigne, notamment à travers la notion de millésimes (Vaudour, 2003). Le millésime est « *l'ensemble de chiffres indiquant l'année*

de la récolte du raisin ayant servi à faire un vin ou un alcool à base de vin (...) Le millésime est la date de naissance du vin ; il authentifie l'âge d'un vin et permet à l'amateur de choisir, selon son goût et les circonstances, entre un vin jeune et un vin vieux. Très différent d'une date de péremption, c'est un guide pour une consommation optimale. Les récoltes étant, en Europe viticole tout au moins, très différentes d'une année à l'autre à cause de la variabilité du climat, le millésime donne une première information sur la qualité possible de la bouteille. Chaque millésime a son type, son évolution, sa réputation, sa cotation. (...) Il s'agit de comparer des qualités annuelles moyennes pour des vins d'âges variés » (Blouin, 2007).

Des études s'intéressent déjà à l'évolution du rendement et de la qualité en étroite relation avec les notations des millésimes. Des études en *Australie* sont réalisées pour voir les impacts des évolutions de concentrations de GES sur la viticulture (Webb *et al.*, 2005, Webb *et al.*, 2008a, Webb *et al.*, 2008b). Des données climatiques sont comparées à des estimations régionales de qualité des grappes : un impact négatif est observé sur les grappes ainsi qu'une augmentation du rendement. La sensibilité à la température varie bien entendu selon les espèces : pour les régions les plus froides d'Australie (Hall et Jones, 2010), les changements climatiques sont profitables et dommageables à l'intérieur des terres. Bindi *et al.* (1996) propose également d'évaluer le rendement et sa variabilité interannuelle dans un contexte de changement climatique. Ce changement a des impacts sur la viticulture avec une augmentation de 14% des degrés-jours et une accumulation de sucre plus importante ainsi qu'une amélioration de la qualité (Gladstones, 1992 ; Nemani *et al.*, 2001). Des indices thermiques mesurent la variabilité des températures et des extrêmes (Gladstones, 1992) : ces indices sont mis également en relation avec la qualité du vin (Nemani *et al.*, 2001). Il semblerait que les changements climatiques observés ont une influence positive sur la qualité des vins *californiens* : en effet, ceci est dû à l'augmentation de taille des baies ce qui contribue à l'amélioration de la qualité. Ces changements s'accompagnent de stades phénologiques plus précoces et de quantités de sucre plus élevées comme dans le *Bordelais* et ailleurs dans le monde (Jones et Davis, 2000). Dans le *Bordelais*, le réchauffement observé de 1952 à 1997 (Jones et Davis, 2000 ; Jones et Storchmann, 2001) a montré que la teneur en sucre est plus élevée pour le Merlot et le Cabernet Sauvignon, que les baies sont plus grosses offrant une meilleure qualité de vin. Cette qualité est aussi due à une augmentation des jours chauds pendant la floraison et la véraison et une baisse des jours de pluies pendant la maturité : en effet, la pluie peut réduire la production si elle est importante pendant les stades phénologiques importants tels que la floraison et la maturation. En bilan, un réchauffement accru comporte de nombreux enjeux car les vins risquent d'avoir des degrés d'alcool plus élevés, une teneur en sucre plus forte avec une perte d'arômes et d'acidité (Agenis-Nevers, 2006).

Afin de remédier à ces risques de baisse de qualité, l'ensemble des pratiques culturales pourrait être l'objet d'adaptations (Seguin, 2003 ; Bindi et Howden, 2004 ; Howden *et al.*, 2007) ainsi que les utilisations de l'eau (Garcia de Cortazar Atauri *et al.*, 2006). Des travaux

montrent une modification des conditions climatiques des vignobles à partir d'indices bioclimatiques et posent la question de l'adaptation des cépages traditionnels (Schultz, 2000 ; Duchêne et Schneider, 2004 ; Jones *et al.*, 2005). Le modèle STICS étudie la capacité d'adaptation avec l'implantation de la Syrah dans toutes les régions viticoles françaises : ainsi, «*pour le scénario B2, la culture de la Syrah pourrait s'implanter dans les vignobles de Bordeaux et Anjou et dans le cas du scénario A2 l'adaptation pourrait s'étendre aux vignobles de Champagne et de Bourgogne* » (Garcia de Cortazar Aauri, 2006).

CONCLUSION DU CHAPITRE 2

Les principales notions ont été définies dans un cadre bibliographique. En synthèse, la vigne est une liane résistante dont la croissance optimale est en étroites relations avec les facteurs météorologiques des différentes échelles spatiales (locales et régionales) mais surtout avec la température qui sert de régulateur à la photosynthèse et qui impose également des seuils au cycle végétatif. Dans un contexte de changement climatique, les répercussions des changements de la température pourraient induire des dommages conséquents d'où la nécessité de pouvoir anticiper les conditions thermiques futures au sein des vignobles au moyen d'outils pertinents.

Chapitre 3

Le changement climatique dans le vignoble champenois

Le vignoble champenois a une situation géographique très septentrionale par rapport à l'ensemble des vignobles du monde. L'intérêt de ce vignoble comme « objet géographique » de cette thèse réside dans le fait que ce vignoble pourrait bénéficier de nouvelles conditions thermiques dans le futur ce qui suscite de nombreuses interrogations quant à la nécessité d'engager des réflexions sur des adaptations possibles. Dans ce chapitre, le vignoble champenois est décrit à la fois par son contexte géographique mais aussi par son contexte socioculturel. Les premiers constats du changement climatique sont également mis en évidence notamment en ce qui concerne la phénologie au sein du vignoble.

3.1 Caractéristiques géographiques et spécificités

Le vignoble Champenois s'étend du 48°N au 49,5°N de latitude et a une superficie d'environ 30 000 ha, soit environ 6% de la viticulture française. Ce vignoble est morcelé sur plusieurs départements, implanté en majorité dans la Marne qui compte environ 20 000 ha et environ 70% de la production. Le vignoble s'organise en grandes régions viticoles : la Côte des Blancs, la Montagne de Reims, la vallée de la Marne et la Côte des Bar plus excentrée au sud-est du vignoble dans l'Aube où la topographie est plus accidentée. Dans cette thèse, les vignobles de la Marne sont étudiés notamment dans un souci d'homogénéité topographique (Figure 3.1).



Figure 3.1 : Les grandes régions viticoles du vignoble de la Marne étudiées (Adapté de « Le Terroir », www.champagne.fr)

3.1.1 Un vignoble de coteaux

Le vignoble est implanté sur les coteaux, afin que les vignes soient le mieux exposées au rayonnement solaire et éviter de soumettre les ceps à l'aléa gélif printanier très propice dans ce vignoble septentrional. Les altitudes ne dépassent pas 400 m mais les pentes peuvent être parfois fortes du fait de l'encaissement des vallées (Doledec, 1995). Les pentes font en moyenne 12% en Champagne et 10,4% dans la Marne avec pour les plus fortes 59% (essentiellement dans l'Aube) (Doledec, 1995).

Les coteaux viticoles champenois témoignent d'une diversité d'exposition (Figure 3.2 et Figure 3.3) avec une majorité de coteaux au sud et sud-est afin de pallier la position septentrionale du vignoble. Ils suivent une alternance roche dure/ roche tendre : il s'agit de cuestas.

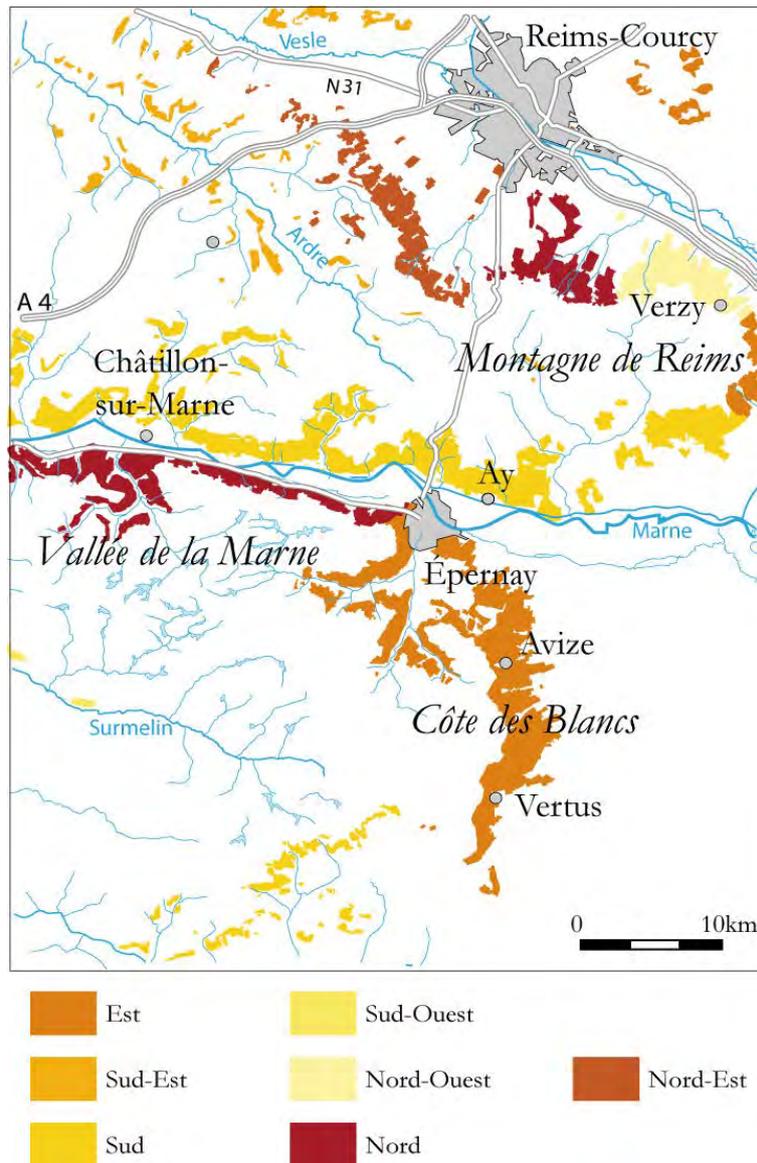


Figure 3.2 : Les expositions du vignoble de la Marne (Adapté de « Le Terroir », www.champagne.fr)

Généralement, les coteaux exposés à l'est, au sud-est et au sud ont des pentes plus douces et des formations superficielles plus profondes que les autres versants où les pentes sont plus fortes et les sols plus superficiels (Doledec, 1995). Cependant certains versants nord ont des pentes faibles et sols profonds.



Figure 3.3 : Paysage viticole champenois (Cliché : E. Briche, 2008)

3.1.2 Les roches en surface

Le vignoble de la Marne se situe notamment sur les versants de la vallée de la Marne et de la cuesta d'Ile de France sur des formations géologiques du Crétacé (Secondaire) ou du Tertiaire. Les principales natures de roches des formations de la zone étudiées sont des marnes et de la craie (Figure 3.4) ainsi que des calcaires et formations carbonatées. Des argiles et des sables sont également présents dans la Marne.

Les sédiments affleurants (Figure 3.4) sont de nature calcaire à 75%. Le calcaire favorise le drainage des sols, ce qui est bon pour la vigne et la maturation des raisins. Constituée de granules de calcite issus de squelettes de micro-organismes marins dont les plus fréquents sont les coccolites, la forte porosité du sol champenois en fait un réservoir d'eau (300 à 400 l/m³) qui assure à la plante une alimentation en eau suffisante même lors des étés les plus secs. Les calcaires ont une porosité moindre et les marnes sont des argiles calcaires à fortes réserves en éléments nutritifs (www.champagne.fr).

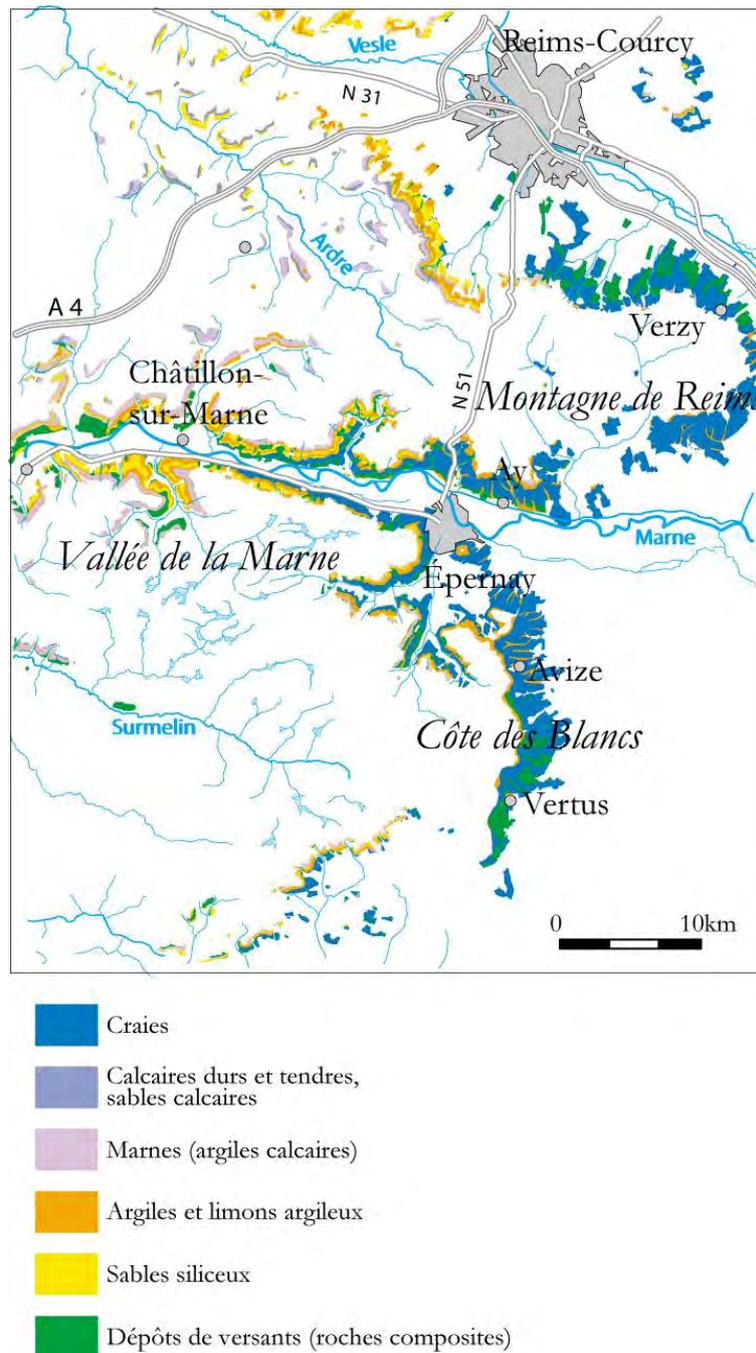


Figure 3.4 : Les formations lithologiques du vi gnohle de Champagne (Adapté de « Le Terroir », www.champagne.fr)

3.1.3 Un climat septentrional océanique de transition

Le climat présent en Champagne est un climat océanique de transition dans la Marne. Le climat océanique se dégrade avec des températures en hiver plus faibles vers l'est et une insolation plus intense vers le sud (Langellier, 1985 ; Doledec, 1995).

Les précipitations sont régulières au cours de l'année avec cependant deux maximas au printemps et en octobre-décembre. Les précipitations sont plus importantes en été qu'en hiver. Les températures sont d'une moyenne de 10°C pour la Marne et d'environ 1°C plus

faible pour le vignoble de la Côte des Bar. A Reims-Courcy, station synoptique du vignoble marnais, l'amplitude thermique est d'environ 16°C. L'aléa gélif printanier, récurrent en Champagne au printemps au moment du débourrement de la vigne, peut certaines années se prolonger jusque fin mai.

En Champagne, le vent est plutôt modéré et les masses d'air proviennent principalement du sud-ouest (Madelin, 2004). Des advections nord et est s'associent souvent à l'aléa gélif et sont suivies par des conditions radiatives.

Le vignoble champenois est à la limite septentrionale de la culture de la vigne en France mais bénéficie dans le contexte du réchauffement climatique de conditions plus favorables (Briche *et al.*, 2007).

3.2 Une Appellation d'Origine Contrôlée renommée

3.2.1 De la naissance du Champagne

Elle est contemporaine de l'émergence des grands crus bordelais entre les XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles. L'histoire du Champagne s'est souvent accompagnée de légendes et fables mystérieuses et les sources les plus fiables semblent être l'ouvrage « Naissance du Champagne » de Dom Pierre Pérignon. Au Moyen-Age, les vins de la Champagne sont appelés « vin de rivière » faisant référence à la proximité de la Marne ou « vin d'Ay » pour les blancs et « vin de la montagne » en périphérie de Reims et de la montagne de Reims pour les rouges. Le Champagne est né au fil de nombreux essais d'assemblage, que l'on doit à Dom Pérignon lui-même, reconnu pour ses talents de gouteur.

3.2.2 ...à l'Appellation Champagne

Le mythe du Champagne résulte de la combinaison de facteurs originaux constituant son terroir : un climat septentrional, un sous-sol crayeux, un relief crayeux et un savoir-faire. La Champagne bénéficie d'une histoire qui forge son identité : en effet, les Romains ont adapté des cépages résistants à la rigueur du climat puis les évêques des grandes abbayes régionales forgèrent le savoir-faire de la vinification. Le mythe du Champagne naît réellement lors de la maîtrise de l'effervescence dès 1730 avec une recherche constante depuis. Le Champagne devient le vin des « rois » depuis que le royaume de France émerge à Reims avec le baptême de Clovis.

L'Appellation émerge dès 1887 avec la Cour d'Angers, suite à un procès contre un négociant de Saumur qui utilisait les noms champenois, qui déclare qu'« on ne peut entendre par Champagne ou Vin de Champagne qu'un vin tout à la fois récolté et fabriqué en Champagne, ancienne province de la France, géographiquement déterminée et dont les limites

ne sauraient être étendues ni restreintes » (« L'Appellation Champagne », www.champagne.fr). Le 29 juin 1936, le Champagne devient Appellation d'Origine Contrôlée.

3.2.2.1 *Définition de l'AOC*

La définition actuelle des AOC des vins et spiritueux dans les aspects administratifs, judiciaires et professionnels date de 1935. « L'AOC est caractérisée à la fois par la provenance, les conditions de production et les caractéristiques de produits dépendants à la fois de facteurs naturels et humains. On crée l'Institut National des Appellations d'Origine (INAO), établissement public rassemblant les représentants de toutes les régions viticoles. » (Blouin, 2007). « *Le choix des cépages est toujours encadré de façon précise, très limitative, avec ou sans pourcentage mini/maxi imposé. On observe souvent un antagonisme entre « vins d'origine » et « vins de cépage ». Les AOC traditionnelles sont marquées par leurs cépages, ils peuvent être cités sur les contre-étiquettes, les documents commerciaux...mais ils ne sont que rarement mis en évidence (...) Le mode de conduite, la récolte, le rendement, la teneur en sucre et les pratiques œnologiques présentent certaines limitations* ». La notion d'AOC passe aussi par la mise en valeur de zones de production délimitées de manière précise, des savoir-faire locaux constants afin de mettre sur le marché des vins de qualité identifiables et différenciables contribuant à la notoriété des vins.

3.2.2.2 *Les cépages champenois*

L'appellation AOC Champagne compte environ 30 000 ha. Trois cépages sont autorisés dans la réglementation de l'AOC : le Pinot Noir essentiellement sur la Montagne de Reims, le Pinot Meunier dans la vallée de la Marne et le Chardonnay sur la Côte des Blancs (Figure 3.5). Plus précisément, les cépages sont choisis selon le milieu physique. Ainsi, sur les formations tertiaires, sur un axe ouest Reims-Epernay ainsi que dans les vallées : le pinot meunier domine à 80% ; sur un axe est Reims-Epernay, sur la craie, se trouvent les 1^{er} Crus et Grands Crus avec essentiellement du pinot noir et du chardonnay et enfin le chardonnay est présent à 99% à l'est de Reims-Courcy au niveau de la butte témoin de Nogent-l'Abbesse et sur la Côte des Blancs. La production est essentiellement du Champagne Blanc de Blanc sur cette côte. Le chardonnay n'est pas présent dans la vallée de la Marne où sont installées la plupart des Grandes Maisons notamment parce que le pinot meunier est préféré pour ses dates de débourrement et de floraison plus tardives. Quatre autres cépages existent également en Champagne et font partie de l'appellation : le pinot gris, le pinot blanc, le petit Meslier et l'Arbane mais ils n'occupent qu'un hectare du vignoble (Communication privée avec Laurent Panigai).

Cette répartition spatiale, d'origine anthropique, vise également à planter le Pinot Noir là où l'aléa gélif est le plus fréquent car ce cépage a un débourrement plus tardif.

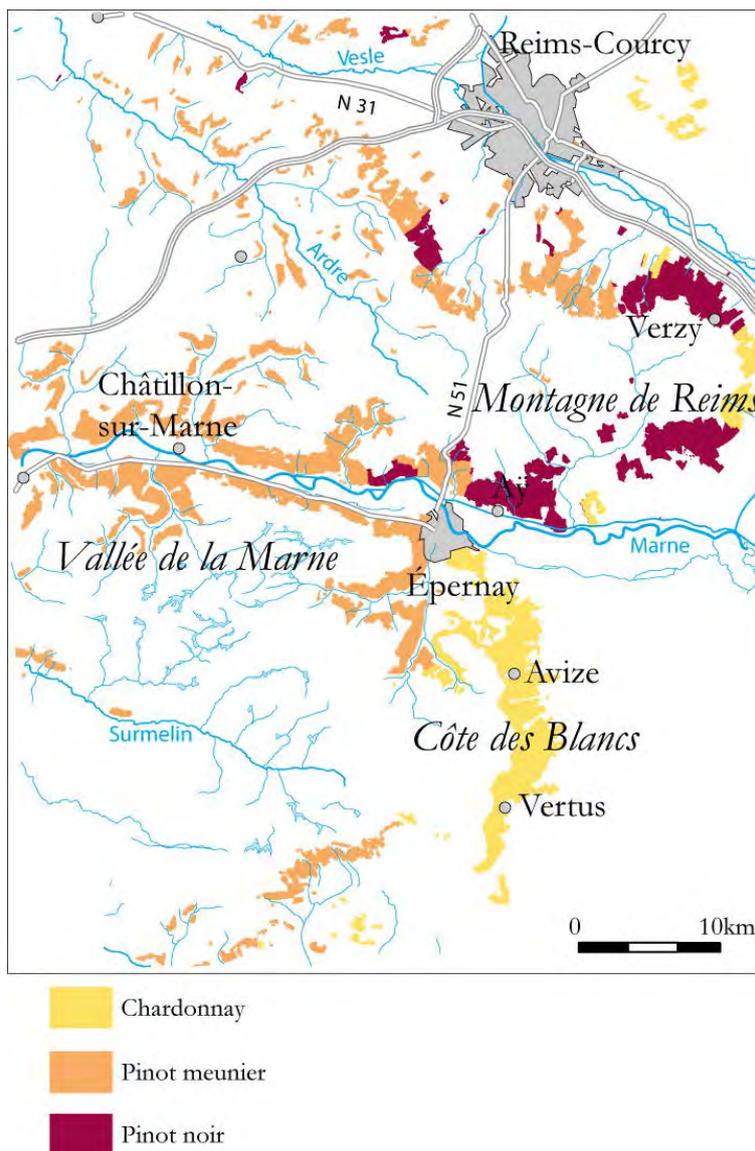


Figure 3.5 : Répartition des cépages au sein du vignoble de la Marne (Adapté de « Le Terroir », www.champagne.fr)

3.2.2.3 *Les terroirs champenois*

Tous ses paramètres font du vignoble un terroir particulier, voire même une multitude de terroirs originaux si l'on se place à l'échelle de la parcelle viticole avec son sol, son microclimat, son cépage et son mode de conduite. Le vignoble champenois, par sa compétitivité, son dynamisme sur les marchés des vins mondiaux s'ancre bien dans la tradition des vins de « terroir ». Le terme de « terroir » a souvent été propre à l'analyse de l'espace rural et à la description des systèmes agraires (Vaudour, 2003). Pour les œnologues, le terroir est défini par sa capacité à fournir une bonne maturation des raisins d'un cépage approprié quelque soient les conditions climatiques de l'année (Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971). La définition de terroir est très largement discutée dans la bibliographie. La définition institutionnelle donnée par l'Institut National des Appellations d'Origine associe le terroir à la

qualité du produit issu d'une aire géographique d'appellation d'origine contrôlée (AOC). L'INAO définit le terroir comme « *un ensemble de terrains qui par la nature plus ou moins variée de leurs sols (caractères agronomiques et géopédologiques), leur situation et leur environnement (topographie, exposition, etc, influant sur le mésoclimat) se sont révélés par l'expérience et les usages propices à la production des vins fins* » (Vaudour, 2003). Vaudour (2003) propose une synthèse des différentes définitions sous forme de typologie de notions mises en valeur par le sens et l'« essence » même du mot terroir en décomposant le terroir en « terroir-matière », « terroir-espace », « terroir-conscience » et « terroir-slogan » (Annexe III). En effet, ces notions interagissent pour définir le terroir comme gage de pérennité, d'origine, de spécificité, de typicité visant à la non-reproductibilité. Le terroir peut être enfin envisagé comme un système où se déroulent des interactions complexes entre le climat, le sol, le matériel végétal et le savoir-faire (Vaudour, 2003).

La notion de terroir a été définie en juin 2010 par l'Organisation de la Vigne et du Vin : « *Le terroir vitivinicole est un concept qui se réfère à un espace sur lequel se développe un savoir collectif, des interactions entre un milieu physique et biologique identifiable et les pratiques vitivinicoles appliquées, qui confèrent des caractéristiques distinctives aux produits originaires de cet espace* ».

Un « zonage viticole » ayant pour but de connaître la distribution spatiale des zones de « terroirs » homogènes a été mis en place par le CIVC dans le but de répondre aux questions des professionnels tels que le choix des porte-greffes, de la lutte contre l'érosion, etc (Doledec, 1995 ; A.V.C., 2010). En effet, le rendement est tributaire des facteurs physiques du milieu et du territoire, de la météorologie et du climat mais également des pratiques viticoles tels que le choix des terres exploitées, de l'architecture de la vigne, de l'enherbement lié à la contrainte hydrique. Il s'agit d'élaborer une pratique raisonnée de la viticulture en tenant compte de ces facteurs.

3.3 Premiers constats du changement climatique en Champagne

Comme cela a été énoncé dans le chapitre 2, des modifications, conséquences directes du changement climatique, sont observées dans les vignobles du Monde. En Champagne, les stades phénologiques sont plus précoces et les rendements ont augmenté depuis une trentaine d'années.

3.3.1 Evolution des stades phénologiques et des vendanges

3.3.1.1 Précocité des stades phénologiques

En Champagne, les stades phénologiques ont une tendance à la précocité. Chacune des séries de la figure 3.6 a été analysée pour repérer une éventuelle rupture dans la série des

données (test de Pettitt, 1979). Mise à part la série des dates du débourrement, le test montre une rupture statistiquement significative à la fin des années 1980 : la moyenne des deux sous-séries est statistiquement différente. Les courbes montrent à la fin des années 1980, une tendance à l'avancement des dates pour la véraison et la pleine floraison. Le débourrement ne présente pas cette rupture : pour sortir de la dormance hivernale, la plante a besoin d'enregistrer au préalable, une période de froid (Beltrando et Briche, 2010). La rupture statistique observée pour la vigne apparaît pour des séries de données environnementales sur de nombreuses régions du monde ce qui suggère un lien avec un phénomène atmosphérique d'échelle globale et confirme les conclusions du GIEC (2007).

Depuis 1987, la date de floraison est en moyenne plus précoce et même si le cycle fructifère floraison/vendange est très stable (autour de 96 jours), seules deux années ont vu ce cycle particulièrement raccourci, 1976 et 2003, en raison d'une canicule prolongée qui s'est traduite par des vendanges plus précoces (Beltrando et Briche, 2010).

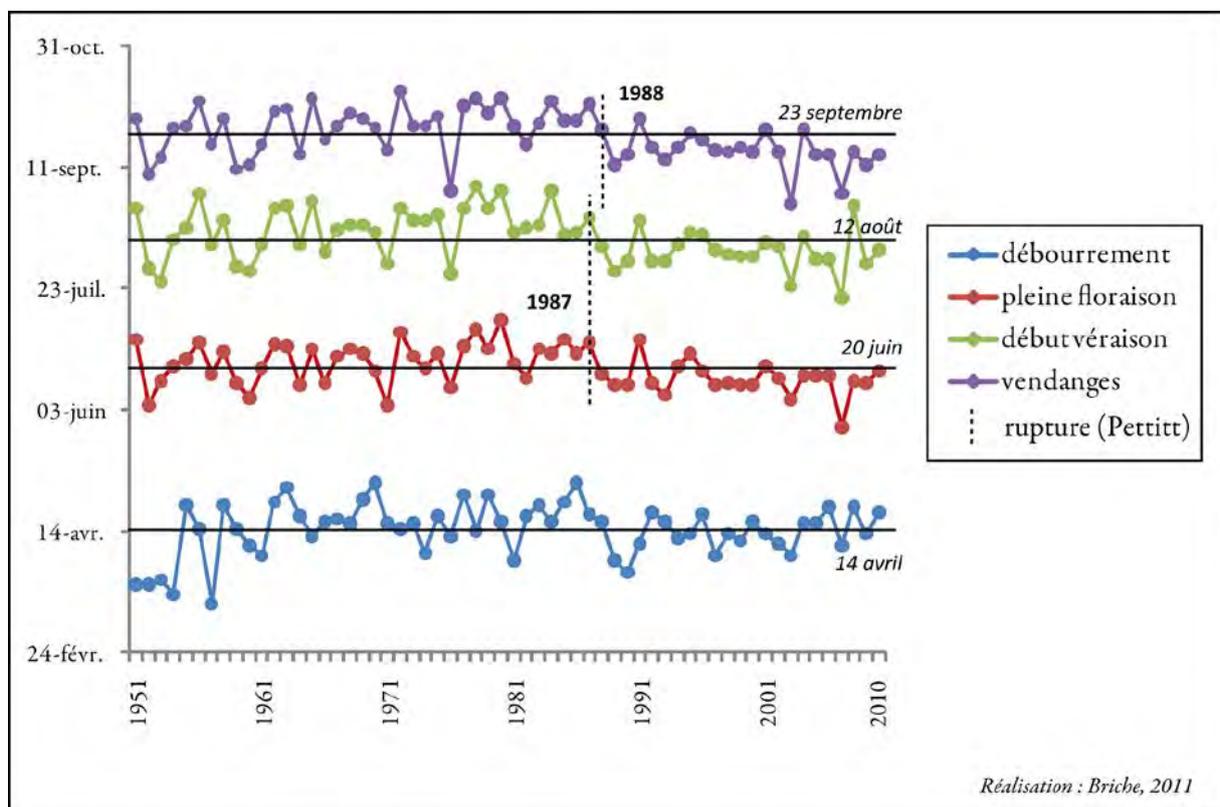


Figure 3.6 : Date des stades phénologiques et des vendanges de 1951 à 2010 (Données : CIVC et Magister)

3.3.1.2 *Avancée du ban des vendanges*

Le ban des vendanges annonce de manière subjective la date de récoltes, poussant parfois le viticulteur à vendanger pour éviter les intempéries telles que la pluie.

Le graphique (Figure 3.7), réalisé à partir des résumés de vendanges fournis par le CIVC et le réseau Magister, montre une tendance statistiquement significative à l'avancée des

dates de départ de vendanges pour les trois cépages présents au sein du vignoble champenois. La courbe de la température moyenne d'avril à septembre présente une tendance positive statistiquement significative. En Champagne, sur la période 1965-2005, les vendanges sont plus précoces d'une vingtaine de jours en moyenne. Les températures de l'année influencent le cycle végétatif de la vigne et les dates de vendanges : on observe une relation inverse significative ($r = -0,8$) entre la température moyenne et la date moyenne des vendanges (Beltrando et Briche, 2010). L'année 2003 présente une température moyenne d'avril à septembre beaucoup plus élevée que les autres années ($16,8^{\circ}\text{C}$) avec une date de vendanges extrêmement précoce (27 août contre 24 septembre en moyenne).

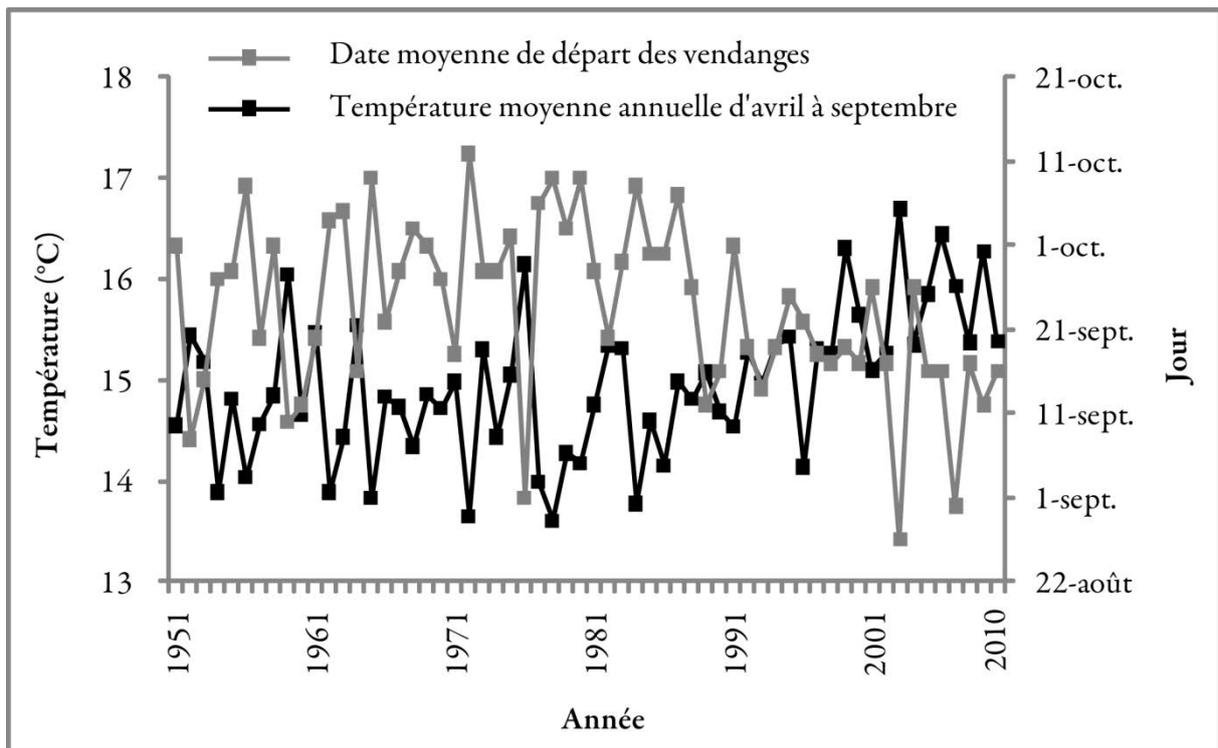


Figure 3.7 : Évolution des dates de vendanges et des températures moyennes d'avril à septembre de 1951 à 2010 (Données : CIVC et Magister).

3.3.1.3 *Raccourcissement de la période débourrement-vendanges*

En Champagne, l'écart entre la date moyenne du débourrement et celle du début de la vendange, est certes variable d'une année à l'autre (Beltrando et Briche, 2010), mais l'observation des tendances montre une diminution assez nette depuis le début des années 1990 (Figure 3.8).

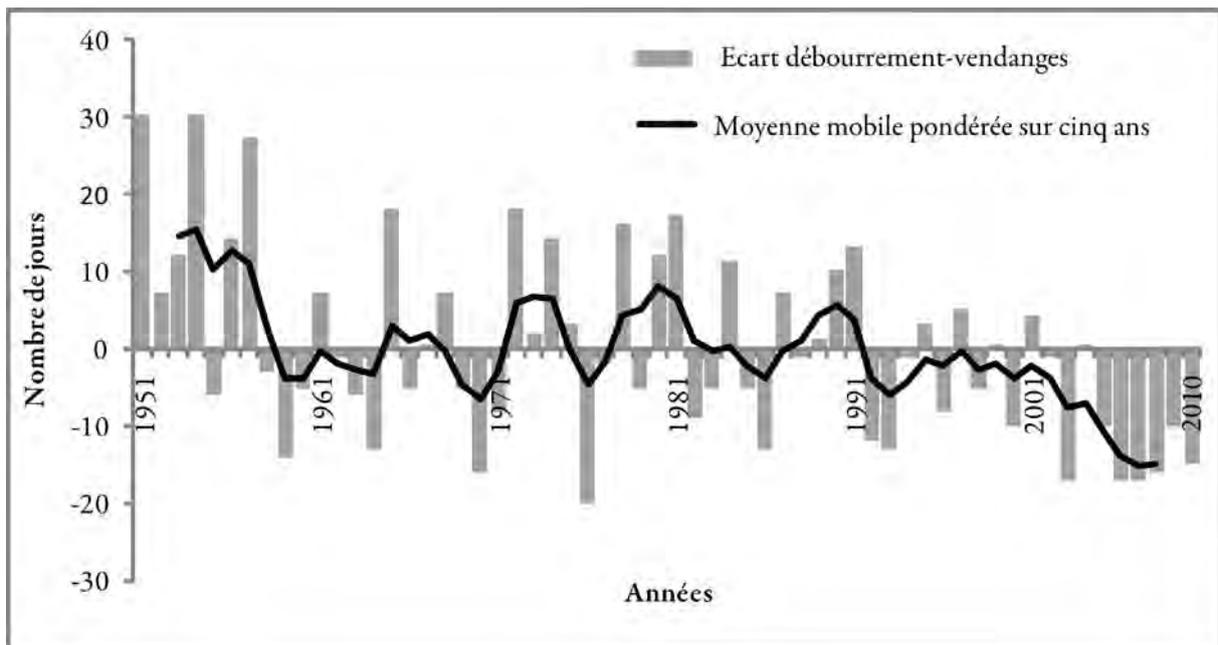


Figure 3.8 : Nombre de jours entre la date moyenne du débourrement et la date moyenne de début des vendanges, par rapport à la moyenne 1951-2010, en Champagne (Données : CIVC et Magister)

Le cycle végétatif de la vigne tend vers un raccourcissement de sa durée qui ne sera pas sans conséquences sur la viticulture et nécessitera une adaptation en termes de mode de conduite et de porte-greffe.

3.3.2 Évolution de l'indice bioclimatique de Huglin

Les tendances en degrés-jours (Figure 3.9) calculées montrent des différences selon les stations : Fort-Chabrol (Epernay) et Reims-Courcy présentent une tendance positive moins importante que les stations d'Avize bas et Bouzy haut ; cependant ces différences ne sont pas grandes du fait de l'unité de l'indice de Huglin.

Les valeurs de l'indice de Huglin expriment un type de climat. Ces valeurs en degrés-jours permettent de constater que le « type » de climat viticole évolue pour les quatre stations où des longues séries de données sont disponibles vers un type de climat plus chaud. D'après la classification établie par Tonietto et Carbonneau (2004), le climat champenois a évolué en trois décennies d'un climat « très frais » vers un climat « frais », atteignant même la classe climat « tempéré » en 2003.

L'indice hausse pour les quatre stations. Cet indice confirme les conclusions données par les tendances thermiques : lorsqu'une station enregistre des indices élevés, les autres varient dans le même sens. Cet indice lisse les données topoclimatiques et sert à caractériser l'ensemble d'une région viticole.

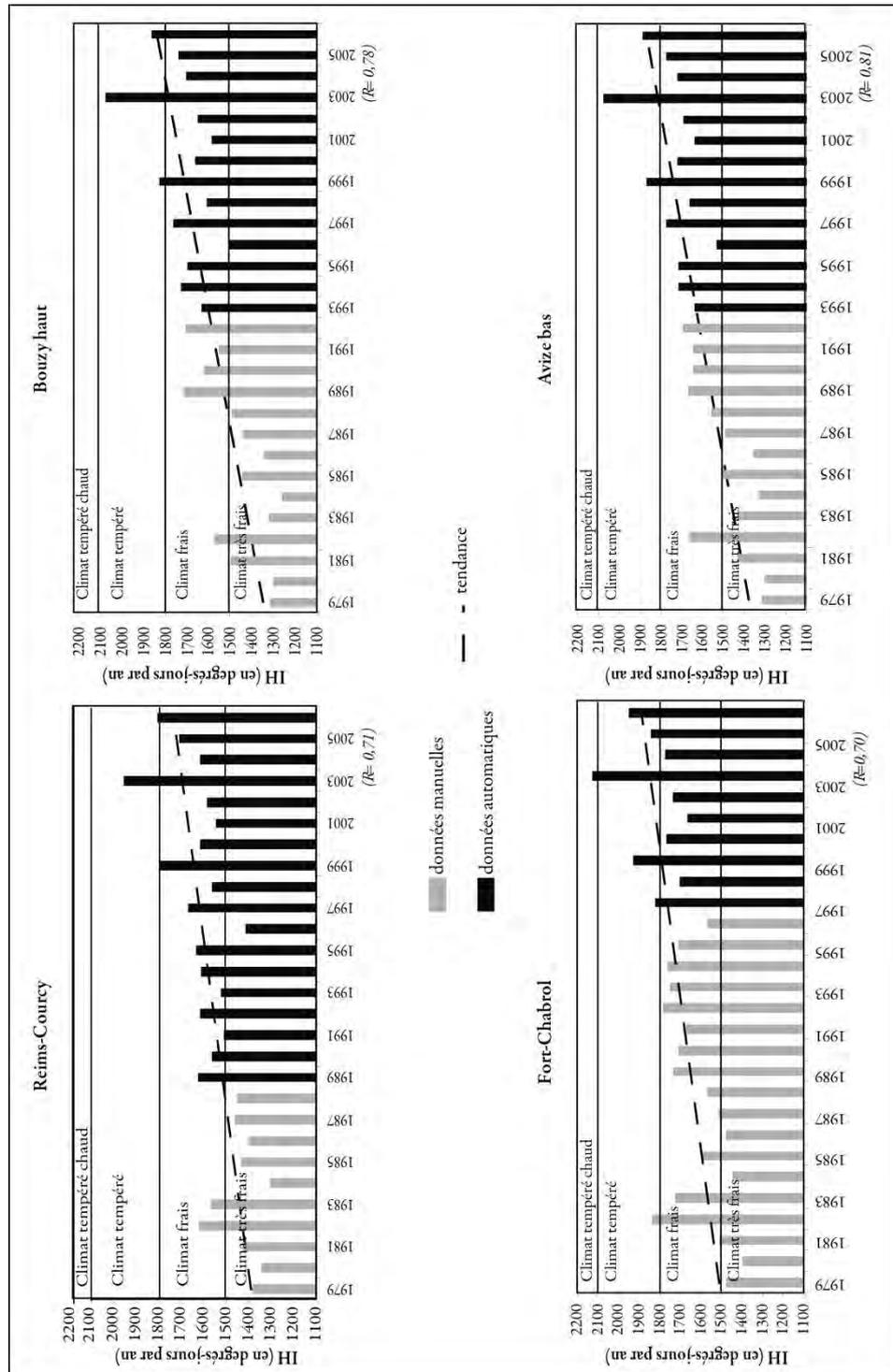


Figure 3.9 : Évolution de l'indice de Huglin pour les stations Bouzy Haut, Avize bas, Fort-Chabrol (Epernay) et Reims-Courcy (Données : CIVC et Magister, adapté de Briche, 2007).

La station Avize-bas se situe en zone de culture du Chardonnay. Selon Huglin (1978), l'optimum de l'indice bioclimatique pour ce cépage est de 1700 degrés-jours. Depuis 1976, il semblerait donc que ce cépage évolue dans un environnement climatique de plus en plus optimal même si les dernières années laissent entrevoir un dépassement de cet optimum bioclimatique.

3.3.3 Évolution du taux d'alcool et de l'acidité totale moyens par an

3.3.3.1 *Influence de la température sur le degré d'alcool potentiel*

Le degré potentiel et la température (Figure 3.10) évoluent positivement dans le même sens ($r = 0,5$) : en effet, plus la température augmente, plus le taux de sucre est élevé et par conséquent, le degré d'alcool également. On constate une hausse rapide à la fin des années 80 du degré d'alcool potentiel qui correspond à la période de rupture montrant la hausse des températures en Champagne.

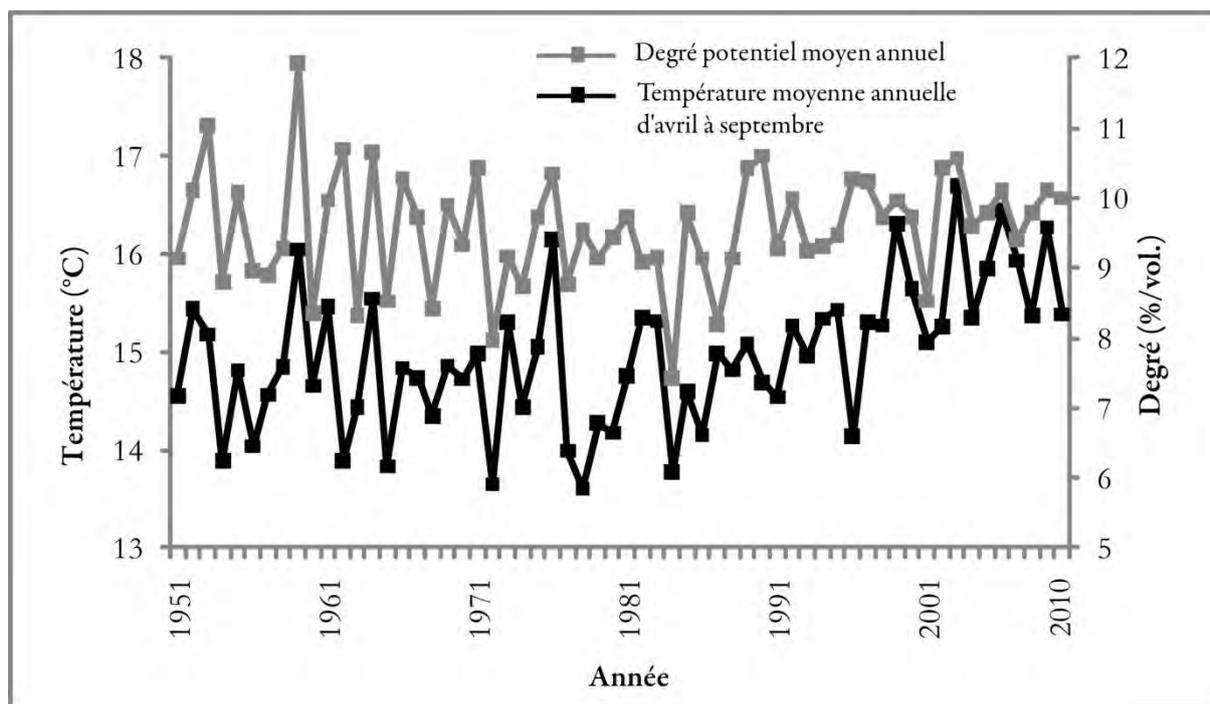


Figure 3.10 : Evolutions de 1951 à 2010 de la température moyenne annuelle d'avril à septembre et du degré potentiel moyen annuel (Données : CIVC et Magister).

Cette hausse du degré d'alcool potentiel pourrait, dans quelques décennies, changer la typicité des vins de Champagne même si les pratiques d'assemblage des moûts de plusieurs années permettent de nuancer cette augmentation pour le moment.

3.3.3.2 *Influence de la température sur l'acidité totale moyenne*

La température et l'acidité (Figure 3.11) varient inversement ($r = -0,8$) : plus la température est élevée, plus l'acidité diminue. On observe une baisse significative de l'acidité à la fin des années 80 d'environ 1 gH₂SO₄/L. L'acidité « *subit une combustion d'autant plus importante que la température est élevée* » (Liger-Belair et Rochard, 2008). Les années où la température est très élevée pendant la maturation des raisins, l'acidité notamment celle due à l'acide malique diminue. Cela peut avoir des conséquences sur la qualité des moûts car une acidité élevée favorise la manifestation des anthocyanes (Blouin, 2007) en relation avec la

bonne synthèse des tanins. Elle est également importante pour l'équilibre gustatif des vins et joue un rôle dans les saveurs : si elle est trop faible, les vins sont fades (Blouin, 2007).

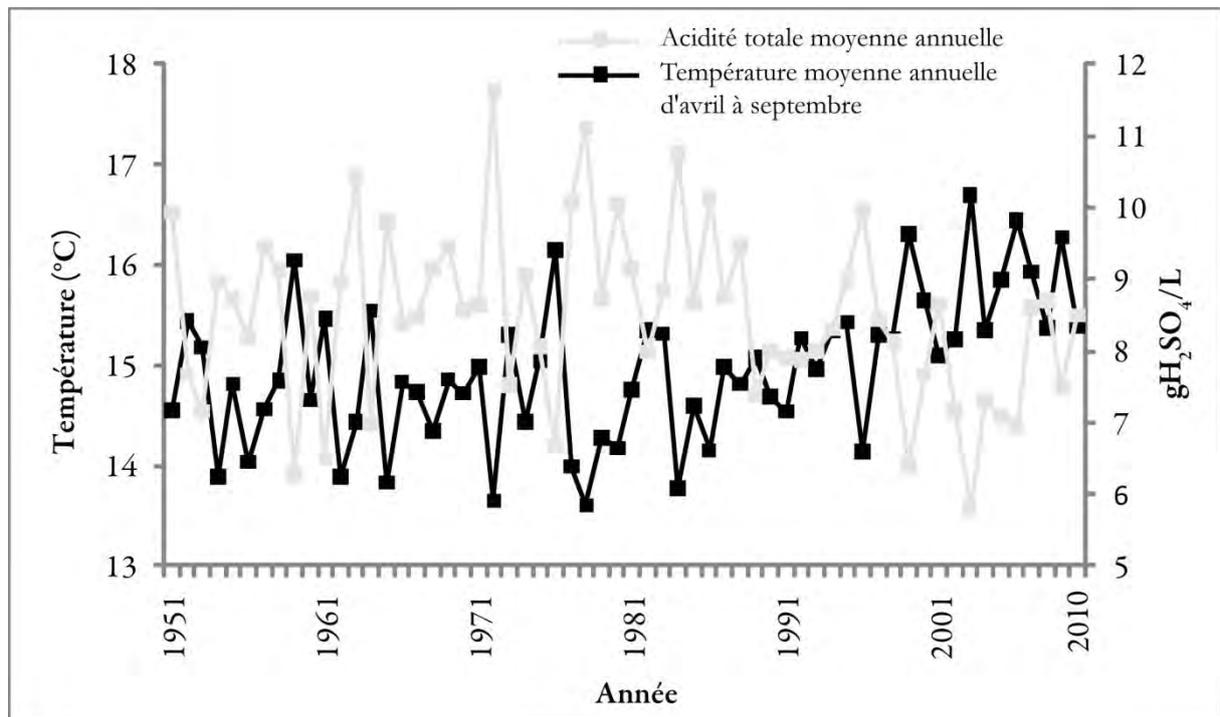


Figure 3.11 : Evolutions de 1951 à 2010 de la température moyenne annuelle d'avril à septembre et de l'acidité totale moyenne annuelle (Données : CIVC et Magister).

3.3.3.3 *Evolution du degré d'alcool potentiel et de l'acidité*

Le degré d'alcool et l'acidité (Figure 3.12) présentent une forte variabilité interannuelle de 1951 à 2010. Ils présentent une évolution inverse ($r = -0,6$) : les arômes issus de l'acidité peuvent diminuer lorsque le taux d'alcool augmente, faisant perdre aux vins leurs caractéristiques du terroir. Ce graphique met en évidence l'année 2003, elle a donné un degré moyen annuel de 10,6 contre 9,6 en moyenne, une acidité totale (gH₂SO₄/L) de 5,8 contre 8,3. Le rendement a baissé en 2003 avec 8 256kg/ha contre environ 11 400kg/ha en moyenne les autres années.

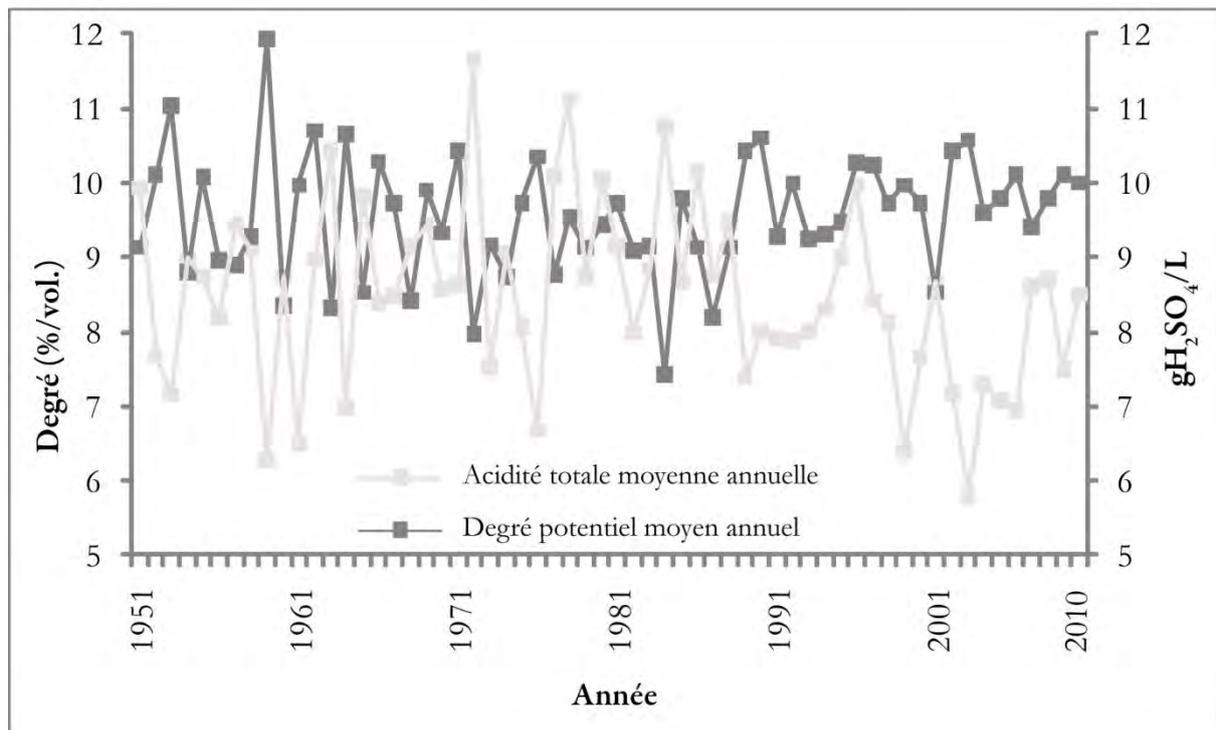


Figure 3.12 : Évolutions de 1951 à 2010 du degré potentiel moyen annuel et de l'acidité totale moyenne annuelle (Données : CIVC et Magister).

En Champagne, pour le moment, le changement climatique apporte de meilleures conditions thermiques pour ce vignoble septentrional dont la biomasse augmente ainsi que le rendement en moyenne ; les grappes mûrissent mieux. Les cépages sont dans un optimum thermique. Comme dans les autres vignobles français, le cycle végétatif se raccourcit et les stades phénologiques sont plus précoces.

3.4 Un vignoble menacé dans le futur ?

Ce vignoble de la Marne présente un intérêt dans le cadre d'une étude sur le changement climatique car il peut être touché par un aléa gélif printanier et des vagues de chaleur estivales.

3.4.1 Un vignoble sensible au gel

Par sa position septentrionale, le vignoble champenois est sujet à l'aléa gélif printanier de manière récurrente. Dans le futur, si le débourrement est plus précoce du fait des températures plus élevées au début du cycle végétatif, la vigne sera toujours soumise à des températures négatives fréquentes au printemps. En Champagne, les gelées printanières sont

extrêmement bien suivies par la profession et par le CIVC : des moyens de lutte peuvent être déclenchés et le suivi du gel est opérationnel.

Ainsi, selon le type de gelées printanières blanche ou noire¹², différents moyens de lutte peuvent être déployés tels que :

- l'aspersion, un des moyens de lutte contre les gelées printanières les moins polluants qui permet d'établir un équilibre eau-glace autour du bourgeon afin de le maintenir à 0 °C. L'aspersion est efficace quelque soit le type de gelée et leur intensité. Ce procédé nécessite une bonne connaissance du démarrage qui peut être risqué s'il n'est pas réalisé au bon moment. En effet, ce moyen de lutte permet à l'eau déposée sur le végétal de se transformer en glace : l'énergie libérée, lorsqu'elle est assez suffisante, permet de maintenir les jeunes pousses ou bourgeons dans un équilibre eau-glace à 0°C (A.V.C., 1991). L'aspersion dépend de l'humidité de l'air mais aussi du vent et de la température de l'air ambiant. L'eau apportée maintient l'équilibre si l'air est déjà saturé et lorsqu'il est sec, l'eau permet de le saturer. Un vent faible peut amener des masses d'air froid et sec : il faut alors apporter davantage d'eau qui va permettre le réchauffement et la saturation (A.V.C., 1991).
- les brasseurs d'air qui consistent à mélanger les couches d'air moins froides à 11 m et celles plus froides au sol ce qui permet un réchauffement au niveau du sol et les fils électriques chauffants.

D'autres dispositifs existent avec des coûts et des dommages environnementaux plus conséquents tels que le fuel pulvérisé (réchauffage de l'air), les combustibles solides, la combustion de gaz. Tous ces dispositifs sont autorisés et dépendent de la fréquence des gelées, des types de gelées, des tailles de parcelles et des moyens financiers possibles.

La prévision des gelées est en ligne sur l'extranet du CIVC mais est également diffusée par Météo-France. Les viticulteurs disposent également d'une table de déclenchement (AVC, 2010) pour les aider à respecter le protocole de mise en place de l'aspersion. Cette table indique les étapes à suivre dès la veille du déclenchement mais aussi s'il est encore possible de déclencher l'aspersion.

La profession est donc réactive face aux intempéries telles que le gel printanier et les viticulteurs connaissent les zones susceptibles de geler dans leurs parcelles.

¹²Lorsqu'une gelée blanche se produit, les conditions sont généralement radiatives et l'air est chargé en vapeur d'eau ; ainsi lors du refroidissement nocturne, l'eau se transforme en cristaux de glace et un manteau de givre recouvre les ceps de vigne. On parle de gelées noires lorsque les températures minimales sont extrêmement basses, inférieures à -7°C (AVC, 1991).

3.4.2 Un vignoble sujet à l'aléa gélif et aux vagues de chaleur : l'année 2003, annonciatrice d'un futur probable ?

L'année 2003 est considérée comme exceptionnelle et comme représentative des conditions probables du futur (André *et al.*, 2004 ; Agenis-Nevers, 2006). Elle est marquée en Champagne, par une forte période de gel début avril et une canicule estivale qui ont touché tout le vignoble (Briche *et al.*, 2011a et Briche *et al.*, 2011b).

Les évènements gélifs printaniers en Champagne ont été largement exploités dans la bibliographie (Sarmir, 1995 ; Beltrando, 1998 ; Quénot, 2002 ; Madelin, 2004 ; Madelin et Beltrando, 2005). Le printemps 2003 a été plus particulièrement étudié dans la thèse de Madelin (2004). Il est en effet possible d'identifier spatialement les zones les plus gélives et sensibles au gel afin d'installer un système de protection. Généralement, en Champagne, les températures les plus basses sont observées sur la Montagne de Reims et la Côte des Blancs (Madelin, 2004 ; Madelin et Beltrando, 2005) : ceci est dû à des facteurs locaux (*cf. Chapitre 2, 2.3.3*) tels que la topographie avec des cuvettes plus froides que les hauts de coteaux et l'orientation qui joue un rôle la répartition spatiale des températures minimales.

Cependant, même si les températures minimales sont en relation avec les caractéristiques géographiques et topographiques du vignoble, une différence est observée entre le gel agronomique et le gel météorologique en 2003 (Madelin et Beltrando, 2005). En effet, les parcelles où de nombreux dégâts ont été constatés ne sont pas forcément les parcelles où la température était la plus basse au printemps 2003 mais celles où les cépages ont débourré plus précocement. En 2003, le chardonnay a débourré le 4 avril, le pinot noir le 9 et le pinot meunier le 13 : ainsi même si la Montagne de Reims présentait les températures les plus basses en 2003, elle n'a pas été la plus touchée par les dommages dus au gel des bourgeons de printemps avec seulement 32% de dégâts contre plus de 80% au nord de la Côte des Blancs (Figure 3. 13), implantée en chardonnay.

La canicule 2003 a causé d'importants dommages sur les grappes de raisins en pleine maturation mais il n'existe pas de données chiffrées concernant les dégâts occasionnés par les températures élevées.

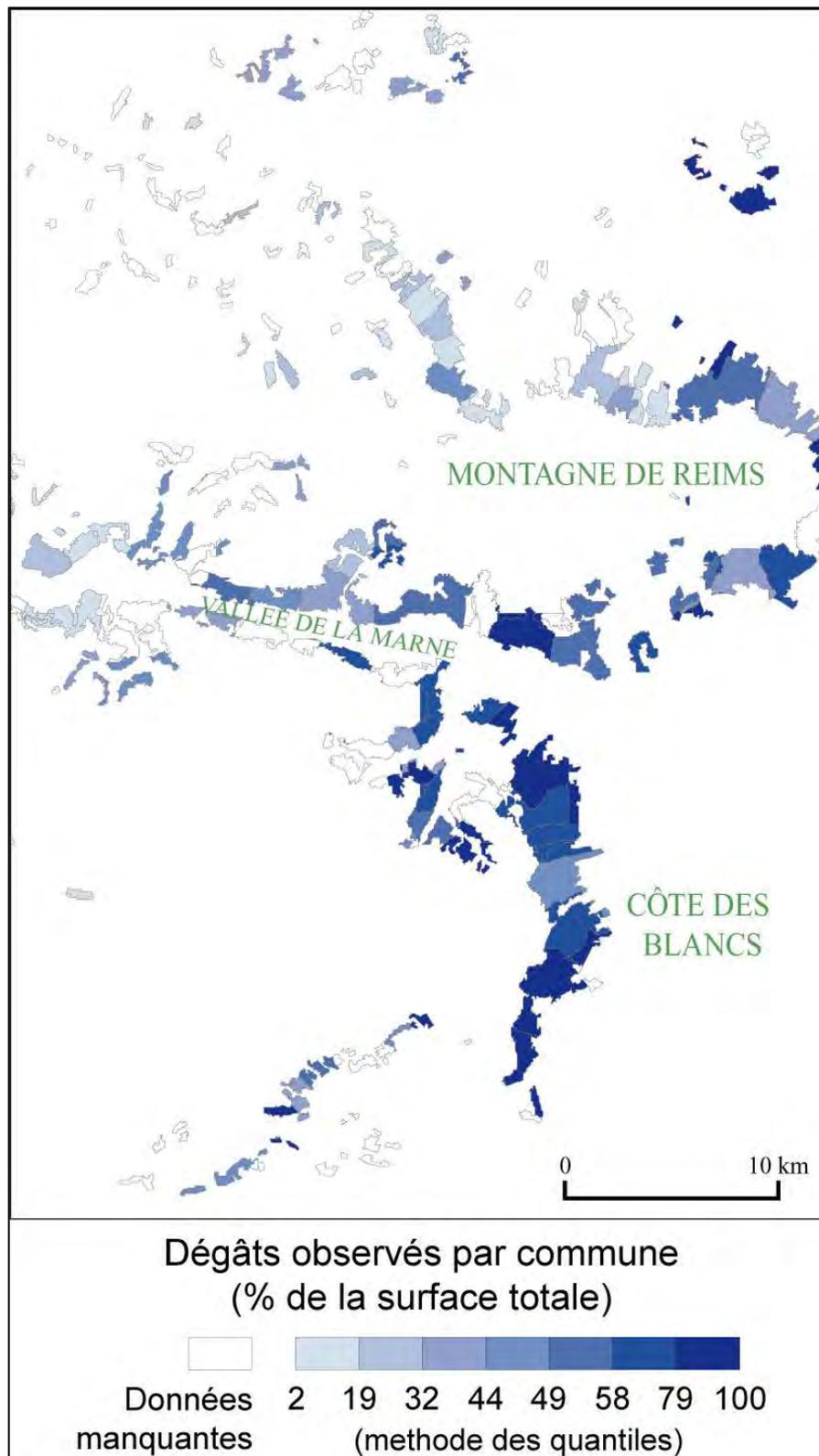


Figure 3.13 : Dommages causés par le gel au printemps 2003 dans le vignoble de la Marne (Madelin et Beltrando, 2005).

3.4.3 Jeux et enjeux du vignoble de Champagne dans un contexte de changement climatique

La figure 3.14 récapitule les enjeux de ce travail de thèse visant à modéliser le changement climatique au sein du vignoble de Champagne.

Ce travail de recherche s'attache à montrer l'évolution possible des températures au cours du XXI^{ème} siècle et l'impact de cette évolution sur la phénologie de la vigne dont le cycle végétatif tend à se raccourcir et à être de plus en plus précoce. Cela engendre de nombreuses interrogations sur la capacité de la vigne à s'adapter face à ces nouvelles conditions thermiques.

En Champagne, les interrogations majeures résident dans les aléas extrêmes thermiques : ceux-ci pourraient de plus en plus fréquents et intenses. Les répercussions des dommages pourraient alors occasionner des dégâts sur le végétal mais aussi sur l'économie viti-vinicole d'où l'importance d'évaluer les conditions futures à partir de modélisations numériques mais aussi de déterminer les possibles dangers pour certains coteaux viticoles dans le futur.

CONCLUSION DU CHAPITRE 3

Ces tendances inquiètent le milieu viticole, attentif à la météorologie et au climat. Les professionnels souhaitent avoir des informations sur le climat du futur à l'échelle des coteaux viticoles champenois. L'objectif appliqué de ce type d'étude est donc d'apporter des informations susceptibles d'aider les acteurs économiques à décider des mesures d'adaptation les plus adéquates en fonction des changements qui paraissent les plus probables.

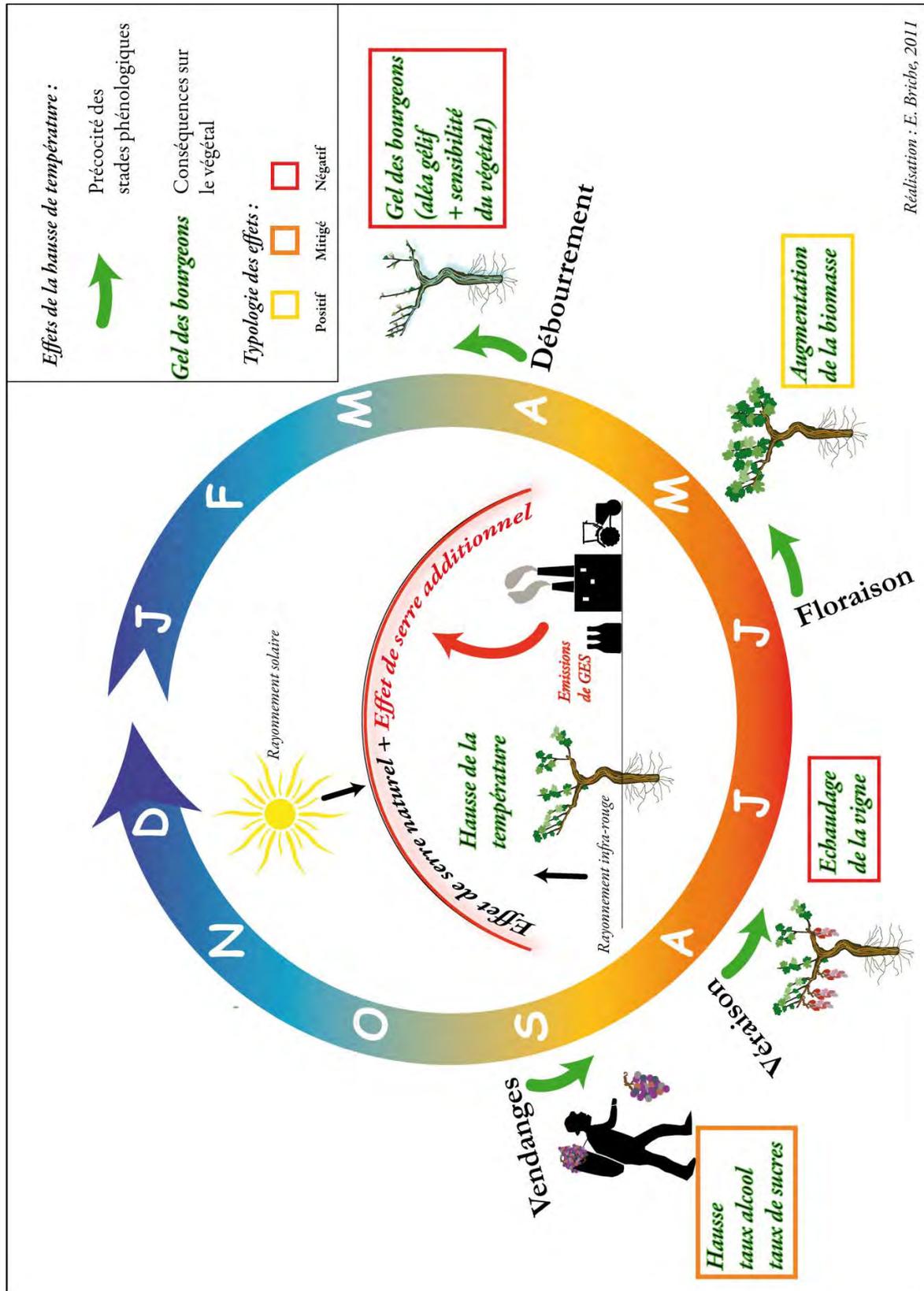


Figure 3.14 : Principaux effets du changement climatique sur le cycle phénologique et sur le végétal en Champagne.

Deuxième partie

Données et méthodes

Cette partie présente les données analysées et méthodes employées en se centrant dans un premier temps sur le réseau de stations météorologiques champenois. Dans un second temps, sur les sorties thermiques de modèles du climat exploitées et enfin les méthodes utilisées pour évaluer le changement climatique dans le vignoble champenois sur la période de contrôle et les scénarios futurs.

La méthodologie repose quant à elle sur des traitements statistiques uni-variées et bi-variées ainsi que sur des lois des extrêmes : en effet, les extrêmes thermiques sont défavorables à la vigne et deviennent un enjeu majeur dans les questions relatives au changement climatique d'où l'importance de les mettre en évidence dans les distributions statistiques.

Chapitre 4

Les données de températures observées et simulées

La base de données de températures de la Champagne est issue des mesures de 23 stations manuelles et automatiques dont l'historique est retracé brièvement. La zone d'étude se concentre sur la Marne afin de préserver une certaine homogénéité spatiale topographique et exclut les stations plus en retrait. Les données sont testées afin de voir si les séries sont stationnaires : les paramètres statistiques du phénomène ne doivent pas évoluer au cours du temps (Madelin, 2004). Nous développerons les caractéristiques des trois modèles du climat utilisés dans le cadre de cette recherche en précisant les données thermiques obtenues.

4.1 Données climatiques thermiques du réseau Champagne

4.1.1 Historique des données thermiques

Les données thermiques proviennent de deux types de stations issues de plusieurs réseaux de mesure implantés à différentes échelles spatiales. Le réseau de la Marne comprend 23 stations sur les 37 disponibles en Champagne (Figure 4.1) :

- Une station synoptique, Reims-Courcy, du réseau Météo-France avec les normes d'installation l'OMM implantée en plaine et représentative du climat de la région viticole. Les données sont disponibles depuis 1947 et l'étude réalisée tient compte du passage au mode de relevé automatique.
- 22 stations automatiques implantées sur les coteaux viticoles. Ces stations sont gérées par le CIVC et sont issues de plusieurs réseaux comme l'AGREMAM (Association de Gestion du REseau Météo Automatisé de la Marne), implanté entre 1992 et 1994, financé par des structures départementales publiques et des organismes privés tels que Mumm et Perrier-Jouët.

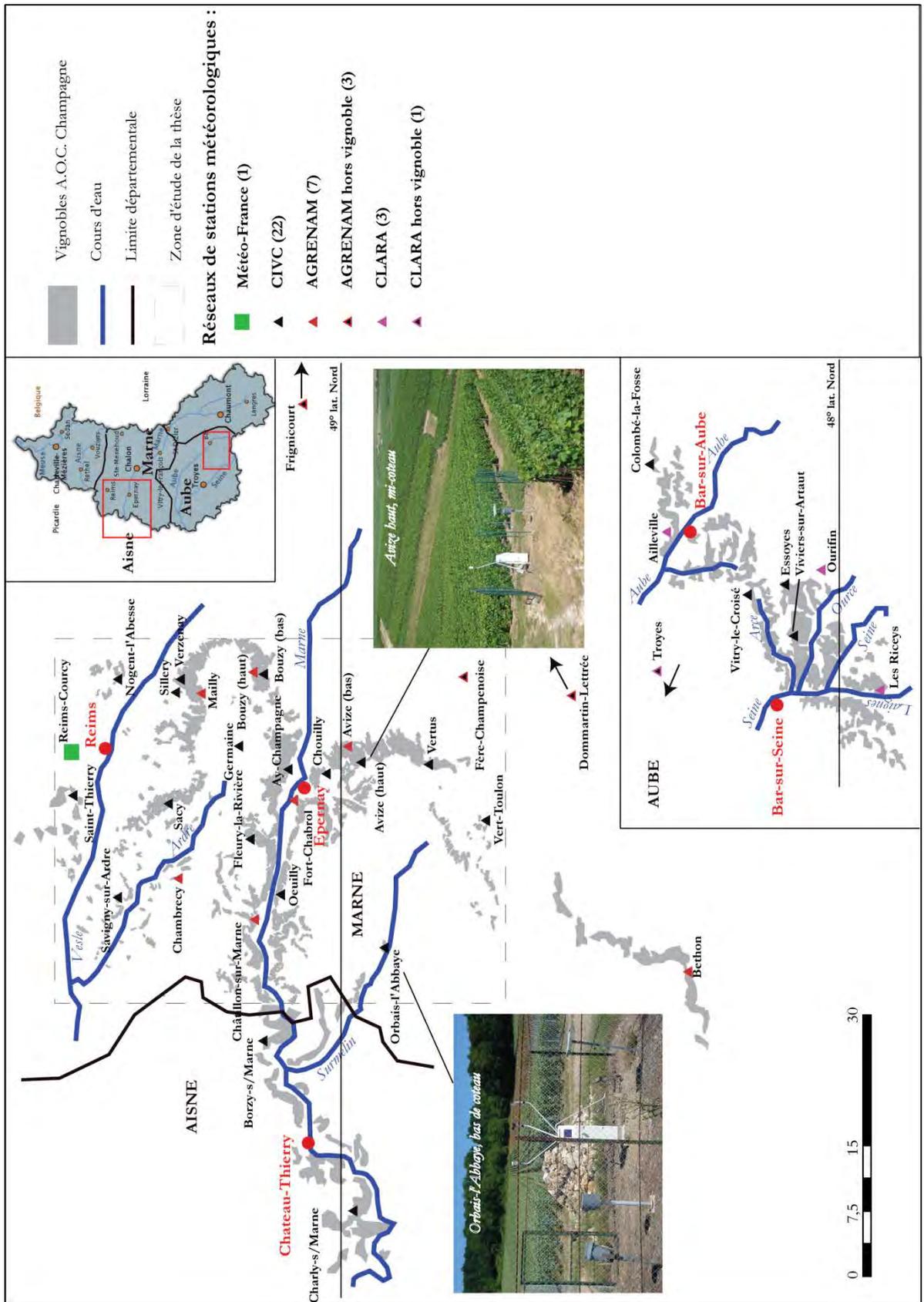


Figure 4.1 : Le réseau champenois au complet (Adapté de Madelin, 2004, Source : CIVC)

Ce réseau a pris fin en 2004 pour des raisons financières. Le CIVC gère désormais les stations sur les coteaux : Avize-Bas, Bouzy haut, Chambrecy, Châtillon, Epernay et Mailly incluses dans cette étude ainsi que la station de Béthon non concernée par ce travail de recherche. Le CIVC, en collaboration avec Météo-France et des universitaires (M. Lecompte et G. Beltrando), a eu la volonté d'installer un réseau plus complet de stations automatiques en 1991 dans le cadre du réseau de Zonage du vignoble : les capteurs sont placés selon différentes expositions, positions sur le coteau, altitudes et permettent de représenter au mieux la variabilité spatiale du climat sur les coteaux viticoles avec notamment des couples de stations bas de coteau / haut de coteau comme Avize bas / Avize haut, Bouzy bas / Bouzy haut, Verzenay / Mailly. Les stations Frignicourt, Fère-Champenoise, Dommartin Lettrée sont exclues car elles sont trop éloignées de la zone d'étude choisie. Les données des stations de l'Aube et de l'Aisne ne sont pas étudiées.

4.1.2 Stations et données

4.1.2.1 *Le matériel météorologique*

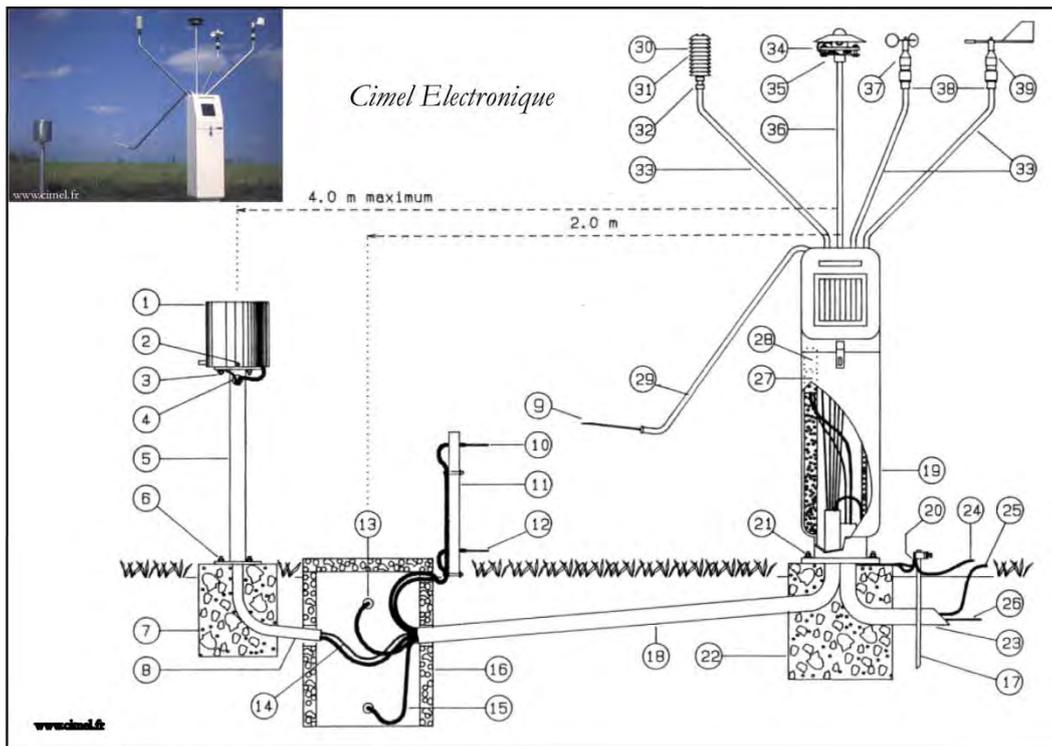
En Champagne, les stations météorologiques sont des stations automatiques et agroclimatiques Enerco de Cimel électronique (Figure 4.2) conforme aux recommandations de l'OMM. L'environnement de la station doit être soigné : le sol doit être enherbé et tondu régulièrement. En Champagne, le sol est recouvert d'un épandage d'écorce avec désherbage. La station est protégée par un enclos grillagé d'environ quatre mètres sur quatre. Ces stations sont équipées d'une batterie alimentée par des panneaux solaires permettant leur autonomie. Une station automatique peut intégrer plusieurs capteurs selon les variables étudiées : en Champagne, les différents capteurs sont : l'anémomètre (avec vitesse et direction), le pluviomètre, l'hygromètre, le pyranomètre, l'humectateur, les thermomètres sous abri à 2 m du sol et en indice actinothermique¹³. Les stations ne disposent pas de tous les capteurs, les utilisateurs peuvent choisir l'équipement de leurs stations selon leurs besoins. Chaque capteur a une marge d'incertitude et une fréquence d'enregistrements qu'il est possible de modifier selon les besoins.

Pour la température, seule variable exploitée, les capteurs relèvent les températures minimales, maximales et moyennes de la journée ainsi que les températures horaires à l'heure ronde (Tableau IV.I et IV.II). La transmission des données se fait par le réseau téléphonique

¹³ La température relevée en indice actinothermique est obtenu à partir de capteurs placés à quelques dizaines de centimètres du sol en rayonnement libre (Madelin, 2004).

ce qui permet une connexion à distance ainsi que de possibles interrogations de la station. Le logiciel de transmission pour les stations CIVC est le logiciel Bluesky.

Les températures en indice actinothermique, intéressantes en cas de refroidissement nocturne mais également lors des canicules estivales car elles sont proches de la température réelle des végétaux, ne sont pas utilisées parce que les sorties de modèles obtenues simulent la température de l'air à 2 m du sol et non la température au contact de la surface du sol.



- 1, 3, 4, 8 et 14 : pluviomètre
- 9 : sonde d'humectation
- 10 et 12 : sonde d'indice actinothermique
- 30 et 31 : sondes de température et d'humidité
- 34 : pyranomètre
- 37 : anémomètre
- 39 : girouette

Figure 4.2 : Station Enerco de Cimet électronique avec des exemples de capteurs disponibles (www.cimel.fr)

Tableau IV.I : Variables et descriptifs des capteurs (www.cimel.fr).

PARAMÈTRE	CADENCE DE MESURE	ÉTENDUE DE MESURE	RÉSOLUTION A 25°C	PRÉCISION
Température	5 s	-40 à +60 °C	0.1 °C	0.02 °C
Précipitation	4 ms	0-360 mm/h	1 basculement	N/A
Humidité	30 s	0-100 %	0.5 %	0.5 %
Humectation	5 s	N/A	6 mm	5 s
Force vent	0.5 s	0-64 m/s	0.1 m/s	N/A
Direction vent	0.5 s	360 °	5 °	1 °
Rayonnement	5 s	-5 à +1.5 w _m -2	1 J	0.05 %
Durée d'insolation	4 ms	N/A	36 s	N/A
Hauteur d'eau	60 s	20 000 inc	N/A	0.01 %
Pression ATM	60 s	900-1050 hPa	0.1 hPa	0.01 %

Tableau IV.II : Principaux résultats horaires et quotidiens (www.cimel.fr).

PARAMÈTRE	RÉSULTATS JOURNALIERS	RÉSULTATS HORAIRES
Température	- Valeurs minimale, moyenne et maximale	- Valeurs relevées à l'heure ronde
Précipitation	- Hauteur des précipitations - Hauteur maximale de pluie sur 6mm	- Hauteur des précipitations - Hauteur maximale de pluie sur 6mm
Humidité	- Valeurs minimale, moyenne et maximale - Temps pendant lequel l'humidité est > 90%, >80%, >60%, >40%	- Valeur relevée à l'heure ronde - Temps pendant lequel l'humidité est > 90%, >80%
Humectation	- Durée de mouillage	- Durée de l'humectation
Rayonnement	- Rayonnement intégré	- Rayonnement intégré
Vent	- Total du vent passé - Vitesse et instant du maximum	- Total du vent passé
Vent avec girouette	- Total du vent passé - Cumul sur 8 directions En option PATAC, traitement selon protocole Météo France	- Total du vent passé
Pression atmosphérique	- Valeurs minimale, moyenne et maximale	- Valeur relevée à l'heure ronde
Hauteur d'eau	- Valeurs minimale et maximale	- Valeur minimale et maximale relevées à l'heure ronde

4.1.2.2 *Les données thermiques retenues*

On utilise les données thermiques des 23 stations (Annexe IV et Figure 4.3) de la Marne. Ces températures de l'air sont mesurées sous abri à deux mètres du sol grâce à des capteurs de températures ayant une résolution de $0,1^{\circ}\text{C} \pm 0,02^{\circ}\text{C}$. Selon les phénomènes étudiés et les sorties de modèles analysées, on utilisera la base de données journalière ou horaire. Les températures sont relevées toutes les 5 secondes puis les valeurs maximales, moyennes et minimales sont mises à disposition au pas de temps quotidien. Pour les données horaires, les valeurs sont relevées à l'heure ronde en instantané (Tableaux IV.1 et IV.2).

L'annexe IV montre que quelques stations ont des longues séries de données, utilisées pour la détection d'une éventuelle rupture d'origine climatique : Reims-Courcy, Avize bas, Bouzy haut et Fort-Chabrol sont conservées pour cette étude.

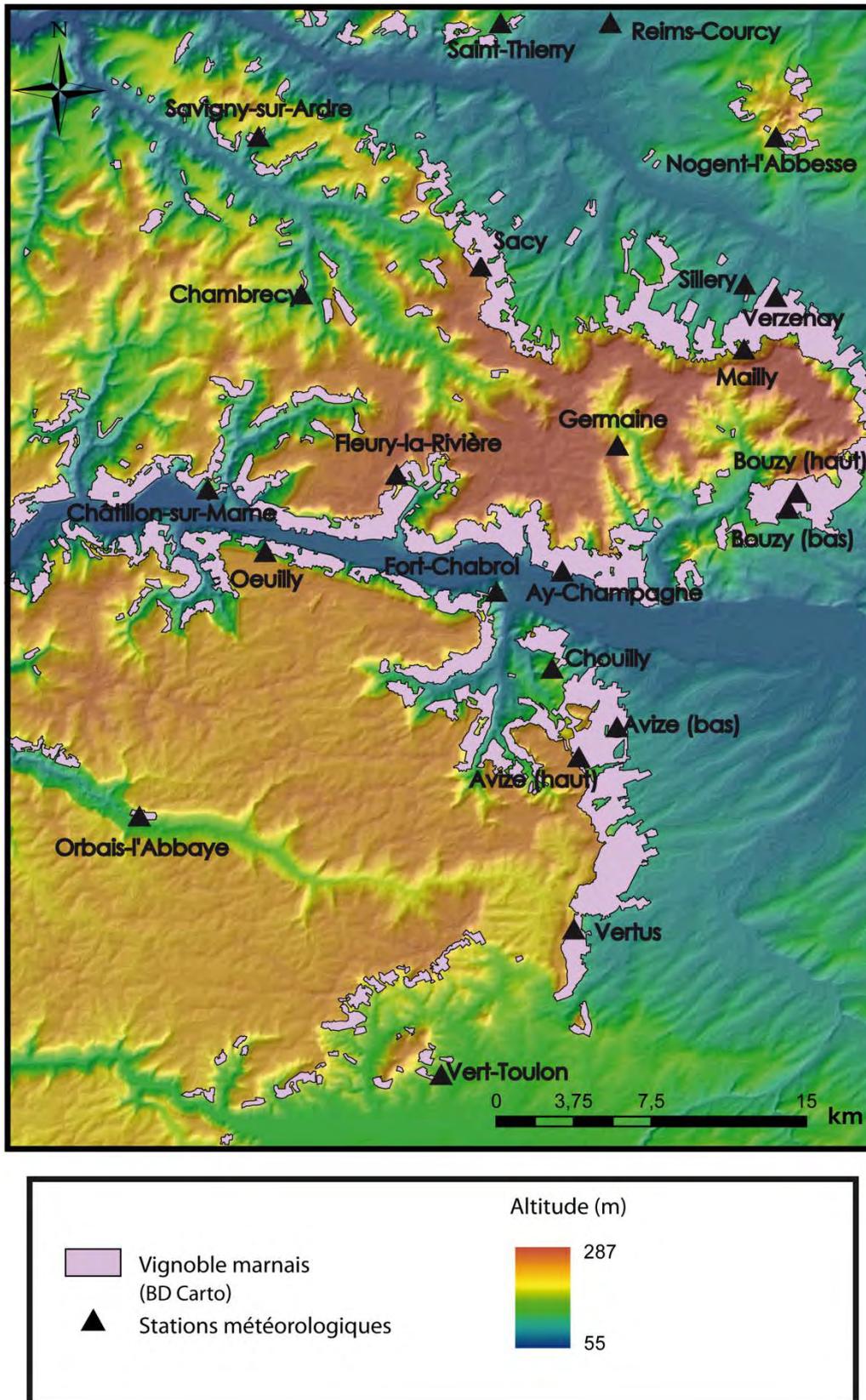


Figure 4.3 : Les 23 stations de la Marne (Données : CIVC, Météo-France et IGN)

4.1.3 Validité et fiabilité des données thermiques

La vérification de la fiabilité des jeux de données est indispensable. Elle peut s'effectuer par le remplacement des données manquantes mais aussi par le fait de valider la stationnarité des données en s'intéressant aux éventuels changements de capteurs, de mode de relevés, etc. Ici, les ruptures détectées sont de l'ordre d'un changement de stationnarité d'origine climatique sur les séries thermiques (Briche, 2007).

4.1.3.1 *Traitement et remplacement des données lacunaires*

Lorsque le nombre de valeurs manquantes est faible, les données ont été reconstituées (Briche, 2007). Si ce nombre est trop élevé (généralement supérieur à 5% de la série complète), la série est abandonnée. La station de Mailly n'est pas conservée car six mois de données sont manquants entre le passage des relevés manuels à automatiques. La série de données manuelles de Chambrécly est également écartée de l'étude car les données présentent des aberrations considérables.

Deux méthodes ont été utilisées lors de la vérification de la base de données thermique :

- lorsqu'une valeur journalière¹⁴ est manquante au sein de la série, elle est remplacée par la moyenne des jours qui l'entourent.
- lorsqu'il s'agit de plusieurs valeurs, des régressions linéaires sont effectuées avec la station « la plus proche » (Madelin, 2004) si le coefficient de corrélation est statistiquement significatif. Par exemple, les données de la station Bouzy haut sont comblées grâce à la série de données de la station Avize bas ; les deux stations ont un coefficient r de corrélation très élevé ($r = 0,94$ pour T_n et $r = 0,97$ pour T_x).

L'origine de ces valeurs manquantes peut être diverse. Elles peuvent être dues à une panne de capteur, à un changement de mode de relevés, une erreur lors de l'extraction des données.

4.1.3.2 *Détection des ruptures par les tests statistiques d'homogénéité*

Différents tests existent pour identifier les ruptures des séries météorologiques. Ces tests sont souvent utilisés pour caractériser l'évolution des températures (Bigot *et al.*, 2002 ; Zaharia *et al.*, 2002). Quatre tests dont celui de la normalité effectués grâce au logiciel Kronostats sont réalisés pour cette étude.

Dans la thèse, ces tests servent de prétraitements pour tester les séries thermiques des stations mais également pour détecter les ruptures d'origine climatique sur les séries où l'on dispose de longues séries de données telles que celle de Reims-Courcy.

¹⁴ Cette méthode est uniquement appliquée à la base de données journalière. Pour la base de données horaire 2003, aucune donnée n'est manquante sur les dates considérées.

Le test de Normalité

Ce test permet de vérifier si les séries de données, ici thermiques, suivent une loi normale et la normalité est nécessaire pour la réalisation du test de Lee et Heghinian. La distribution de Laplace-Gauss ou loi normale est symétrique. Sa forme représente une cloche et la distribution normale est définie par deux paramètres ; la moyenne (position de l'axe de symétrie) et l'écart-type (distance entre la moyenne et le point d'inflexion). Les valeurs de la fonction de répartition d'une distribution centrée-réduite (moyenne=0, écart-type=1) sont utilisées pour n'importe quelle distribution gaussienne.

Le test de Pettitt, 1979 (Ceresta, 1986)

Ce test, dérivé du test de Mann-Whiney, est réputé pour sa robustesse. Il s'agit d'une méthode non paramétrique qui ne fait pas d'hypothèse sur la nature de la distribution de la variable définissant la série d'observations. L'absence de rupture au sein de la série X_i de taille N constitue l'hypothèse nulle. Les valeurs des deux échantillons sont regroupées et classées par ordre croissant. On calcule alors la somme des rangs des éléments de chaque sous-échantillon dans l'échantillon total. A partir de deux sommes ainsi déterminées, une statistique est définie et testée sous l'hypothèse nulle d'appartenance des deux sous-échantillons à la même population (Lubes *et al.*, 1994). Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée, avec un seuil de significativité traduisant la probabilité de cette hétérogénéité temporelle.

La méthode bayésienne (Lee et Heghinian, 1977)

Cette méthode est une approche paramétrique qui requiert une distribution normale des variables étudiées. Elle fait l'hypothèse d'un changement de moyenne à un instant inconnu. La distribution *a priori* de l'instant de la rupture est uniforme, et compte tenu de cette information et des données, la méthode produit la distribution de probabilité *a posteriori* de l'instant de la rupture. La position dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de moyenne sont définis par des modes des distributions *a posteriori*. A ces modes sont associés des probabilités.

La méthode de segmentation de Hubert et alii (1989)

Le principe de cette segmentation est de diviser la série de données en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du ou des segment(s) voisin(s). Cette méthode permet de rechercher les éventuels changements de moyenne (Lubes *et al.*, 1994). La segmentation retenue doit être telle que pour un ordre m de segmentation donné, l'écart quadratique soit minimum. Cette condition est nécessaire mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre la contrainte suivante selon laquelle les moyennes des deux segments continus doivent être significativement différentes.

D'après les auteurs du test, cette méthode de segmentation peut être considérée comme un test de stationnarité, l'hypothèse nulle définissant la série étudiée comme stationnaire. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à 2, l'hypothèse nulle est acceptée et aucun niveau de signification n'est attribué à ce test.

Ces tests ont été réalisés automatiquement avec le logiciel Kronostats en tant que « prétraitements » des longues séries de données et donnent des résultats relativement similaires (Briche, 2007) avec une rupture d'origine climatique détectée à la fin des années 80. Le test de Pettitt est choisi pour l'analyse des résultats car il est reconnu pour sa robustesse et souvent utilisé dans les détections de ruptures dues au changement climatique (Bigot *et al.*, 2002 ; Briche *et al.*, 2009a et b).

4.1.3.3 L'origine des ruptures

Une série d'observations météorologiques est considérée comme homogène lorsque les conditions de mesure n'ont pas changé au cours du temps, de sorte, qu'elle ne soit affectée par aucun élément perturbateur modifiant la loi de distribution du paramètre mesuré sur la période d'étude. Une série d'observations météorologiques peut être hétérogène. Cette hétérogénéité est soit d'origine climatique si l'évolution est continue, soit d'origine artificielle avec une rupture d'homogénéité. Les méthodes statistiques utilisées pour détecter les ruptures ne font pas la distinction entre les ruptures d'ordre climatique et les ruptures artificielles : les métadonnées sont donc indispensables afin de vérifier s'il y a eu des pannes d'instruments de mesure, etc. Il existe beaucoup de paramètres réels ou artificiels (Figure 4.4) qui peuvent perturber une série de données thermiques (Mitchell et Dettwiller *in* Choissnel, 2001).

En France, six causes principales entraînent des ruptures dans les séries climatiques d'amplitude thermique pouvant être supérieure à 1°C (Mestre, 2000):

- un changement de capteur et/ou d'abri météorologique,
- une modification de l'environnement du capteur,
- un changement d'emplacement du site de mesure,
- un changement d'observateur,
- un changement du mode de calcul paramétrique,
- une valeur reconstituée sur de longue période,

Selon des études menées en France, il semblerait le déplacement du site provoquerait la plus grande hétérogénéité (Tableau IV.III). Des études menées en Finlande par Heino (1996) confirment cette observation.

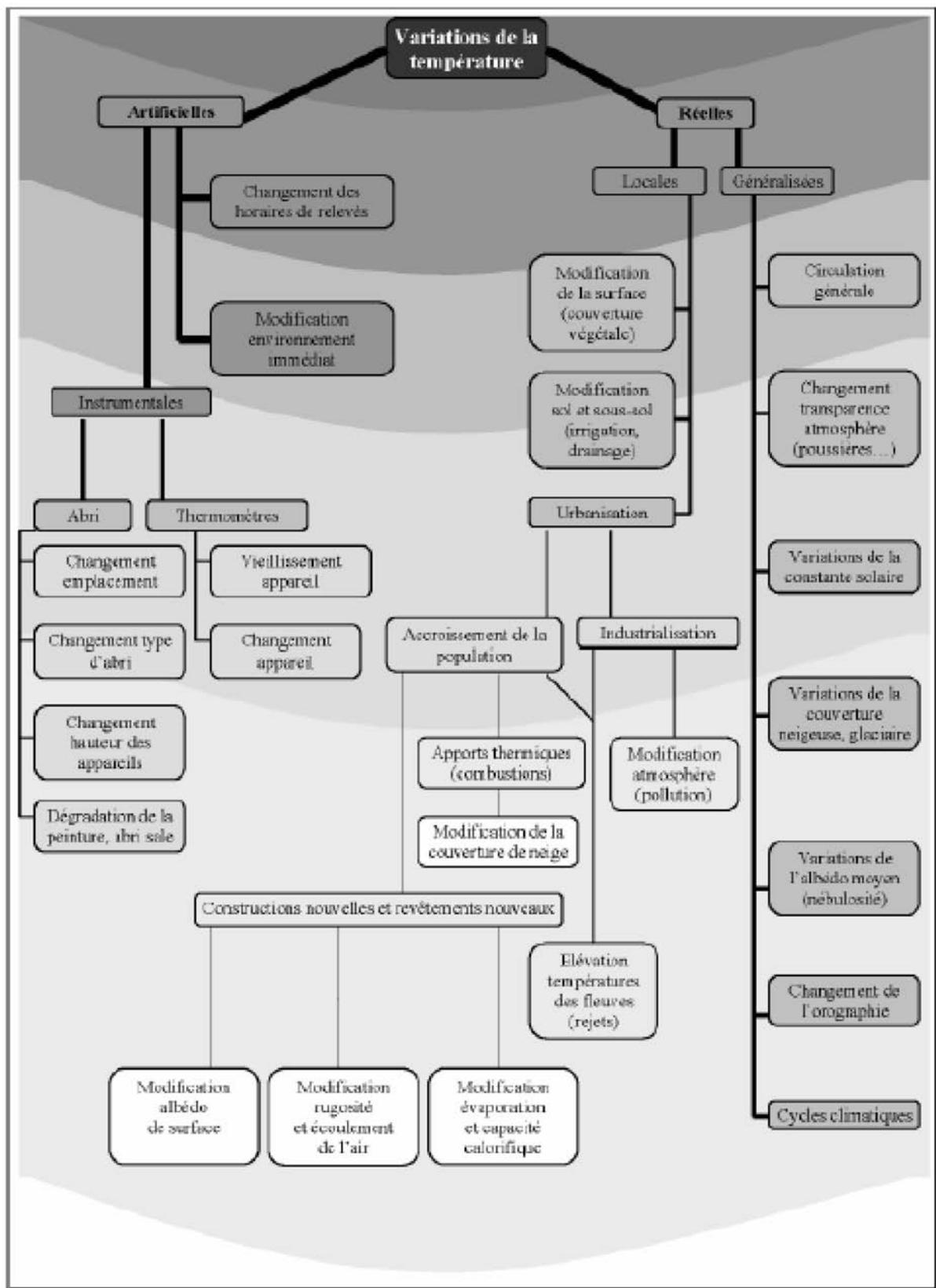


Figure 4.4 : Liste des facteurs de toutes origines pouvant entraîner une modification de la température mesurée. L'intensité de gris et les cercles concentriques soulignent le caractère additif des différentes causes de variation des températures. (Source : Mitchell et Dettwiler *in* Choissnel, 2002).

Tableau IV.III : Principales causes de ruptures d'homogénéité statistique en fonction de leur intensité sur différents paramètres météorologiques (d'après Heino, 1996).

Origine du changement	Paramètres météorologiques	
	TM	Tn, Tx
Instrumentation	-	+
Hauteur de l'instrument	+	+
Exposition	+	++
Heures d'observations	+	+
Méthode de calcul	++	-
Emplacement	++	+++
Environnement	+	+
Observateur	-	-

- : pas de problème majeur ;
 + : quelques hétérogénéité ;
 ++ : ruptures importantes ;
 +++ : ruptures très importantes.

En Champagne, les stations du vignoble marnais n'ont jamais changé d'emplacement : la source de ruptures la plus importante est donc évitée. Des discontinuités peuvent également survenir suite à des erreurs aléatoires ou à des erreurs systématiques lors des relevés automatiques mais elles sont bien souvent détectées et corrigées par le CIVC.

4.2 Les trois modèles du climat choisis

4.2.1 Le modèle du LMD à résolution dite « globale »

4.2.1.1 *Résolution du modèle LMD*

Le modèle du Laboratoire de Météorologie Dynamique (IPSL) est un modèle de circulation générale à « points de grille¹⁵ ». Pour cette étude, on utilise le modèle global en deux dimensions - n'incluant pas l'altitude- d'environ 300 km de résolution. Un point de grille d'une maille de 2,5°*3,75° de côté et de coordonnées : 1,87°E à 3,75°E et 48,16°N à 49,43°N est extrait de la grille globale et elle inclut le vignoble marnais¹⁶.

¹⁵ « Un point de grille » est le centre d'une maille de modèle.

¹⁶ Le point de grille du LMD n'est pas cartographié dans le manuscrit, il est situé en Picardie, hors du vignoble marnais étudié (Figure 4.8)

4.2.1.2 *Données thermiques du LMD*

Les données thermiques journalières (à raison de 360 jours par an) minimales et maximales en degrés Kelvin sont obtenues en format *netCDF* puis converties en °C dans le cadre de la thèse avec le logiciel Matlab.

Quatre séries sont disponibles :

- une série dite de « contrôle » de 1860 à 2000 ;
- trois séries de simulations futures (2001-2100) pour les scénarios A1B, B1, A2.

4.2.1.3 *Origine des données LMD*

Le modèle du LMD est la composante atmosphérique du modèle couplé IPSL-CM4-Version 1 utilisée pour le GIEC-AR4. Cette composante atmosphérique est héritée du modèle original du LMD datant du début des années 80 (Sadourny et Laval, 1984).

Les données en 2D sont accessibles dans le cadre du PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) sur le site de l'IPSL sur une plate-forme adaptée : <http://mc2.ipsl.jussieu.fr/simules.html>. Il fallait choisir :

- pour la période de contrôle, la simulation 20C3M (2L18) de 1860 à 2000 qui correspond à la série dite de « contrôle » prenant en compte les aérosols et les concentrations observées de GES ;
- pour les simulations futures de 2000 à 2100, les scénarios 2L26 (A2), 2L27 (A1B) et 2L28 (B1).

Dans le cadre du GIEC, c'est la version appelée « LMDz.3 » qui est utilisée dans le modèle couplé IPSL-CM4-Version 1 ; il s'agit de la seconde génération de modèle développé par le LMD. Ce modèle est nommé « LMDz » car le modèle peut être **zoomable** comme le modèle ARPEGE-Climat et surtout car sa résolution peut être plus fine que la résolution dite « globale » utilisée dans la thèse¹⁷.

4.2.2 Le modèle ARPEGE-Climat (RETIC) à résolution dite « régionale »

4.2.2.1 *Résolution du modèle ARPEGE-Climat (RETIC)*

La grille d'ARPEGE-Climat est étirée pour augmenter la résolution dans une zone d'intérêt autour d'un point appelé « pôle » et elle a la capacité d'être basculée (Figure 4.5) pour changer la position du pôle : il s'agit d'un downscaling dynamique. Cette capacité de zoom a permis de développer des études régionales du climat avec ARPEGE-Climat (Déqué *et al.*, 1994 ; Déqué et Piedelievre, 1995 ; Déqué *et al.*, 1998 ; Gibelin et Déqué, 2003 ; Déqué *et al.*, 2005 ; Li *et al.*, 2006 ; Somot *et al.*, 2008). Le modèle ARPEGE-Climat version 4.6 possède un pôle placé en mer Tyrrhénienne avec un facteur d'étirement de 2.5 et une

¹⁷ Le modèle du Laboratoire de Météorologie Dynamique est appelé modèle LMD dans la thèse.

résolution horizontale de l'ordre de 50 km dans la zone Europe-Méditerranée-Afrique du Nord.

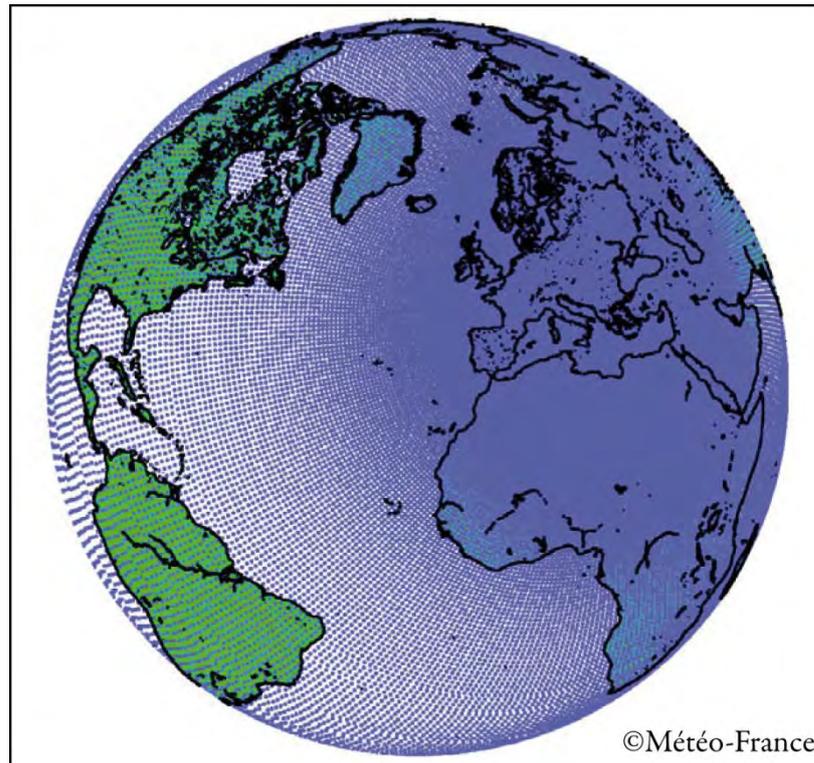


Figure 4.5 : Points de grille du modèle ARPEGE-Climat en maille variable, zoomé sur la Méditerranée.

4.2.2.2 *Données thermiques du modèle ARPEGE-Climat (RETIC)*

Les données des scénarios climatiques sont stockées sur la grille étirée d'ARPEGE-Climat qui n'est donc pas une grille régulière en latitude et longitude. Les coordonnées géographiques des quatre points (Figure 4.6) de restitution des données ont été fournies en accompagnement des données.

Les données proposées sont celles de quatre simulations déjà réalisées :

- la première couvre la période dite de « contrôle » 1950-2000 et utilise les forçages radiatifs (gaz à effet de serre, aérosols) observés ;
- les trois autres couvrent la période 2001-2100, en continuité avec la première simulation, et utilisent les forçages radiatifs des scénarios préconisés par le GIEC : A1B, A2 et B1.

Les données thermiques minimales et maximales à 2 m quotidiennes des quatre simulations disponibles ont été récoltées pour quatre points de grille couvrant la Champagne viticole. Les températures proposées répondent aux définitions climatologiques habituelles : les températures minimales de Jour (J) sur la période 18 H UTC J-1 à 18 H UTC J et les températures maximales de J sur la période 06 H UTC J à 06 H UTC J+1.

4.2.2.3 Origine des données ARPEGE-Climat (RETIC)

Ces données sont issues du "Réseau d'Etudes et de Transfert Interne des Connaissances" (RETIC, Toulouse) qui facilite le transfert de connaissances des équipes de recherche du CNRM vers les services opérationnels de Météo-France à travers la réalisation d'actions finalisées. Le modèle ARPEGE-Climat (Salas y Méliá *et al.*, 2005), dérivé du modèle de prévision opérationnelle de Météo-France, est devenu au cours du temps la composante atmosphérique du modèle "système terre" du CNRM couplant les différentes composantes du système climatique (atmosphère, océan, végétation, glace de mer). Comme le modèle ne simule pas l'évolution de l'océan, la température de surface de la mer (TSM) provient des simulations du GIEC-AR4 réalisées à Météo-France avec une version basse résolution non étirée (300 km) d'ARPEGE couplée au modèle d'océan OPA.

Le modèle du système terre utilisé pour le rapport IPCC-AR4 (2007) est décrit dans un article de Salas y Melia *et al.* (2005).

La physique utilisée dans le cadre de ce travail de recherche est basée sur la version 4.6 du modèle. Son maillage recouvre le globe avec plus de 35 000 points, dont environ 10% couvrent le territoire métropolitain dans la version étirée.

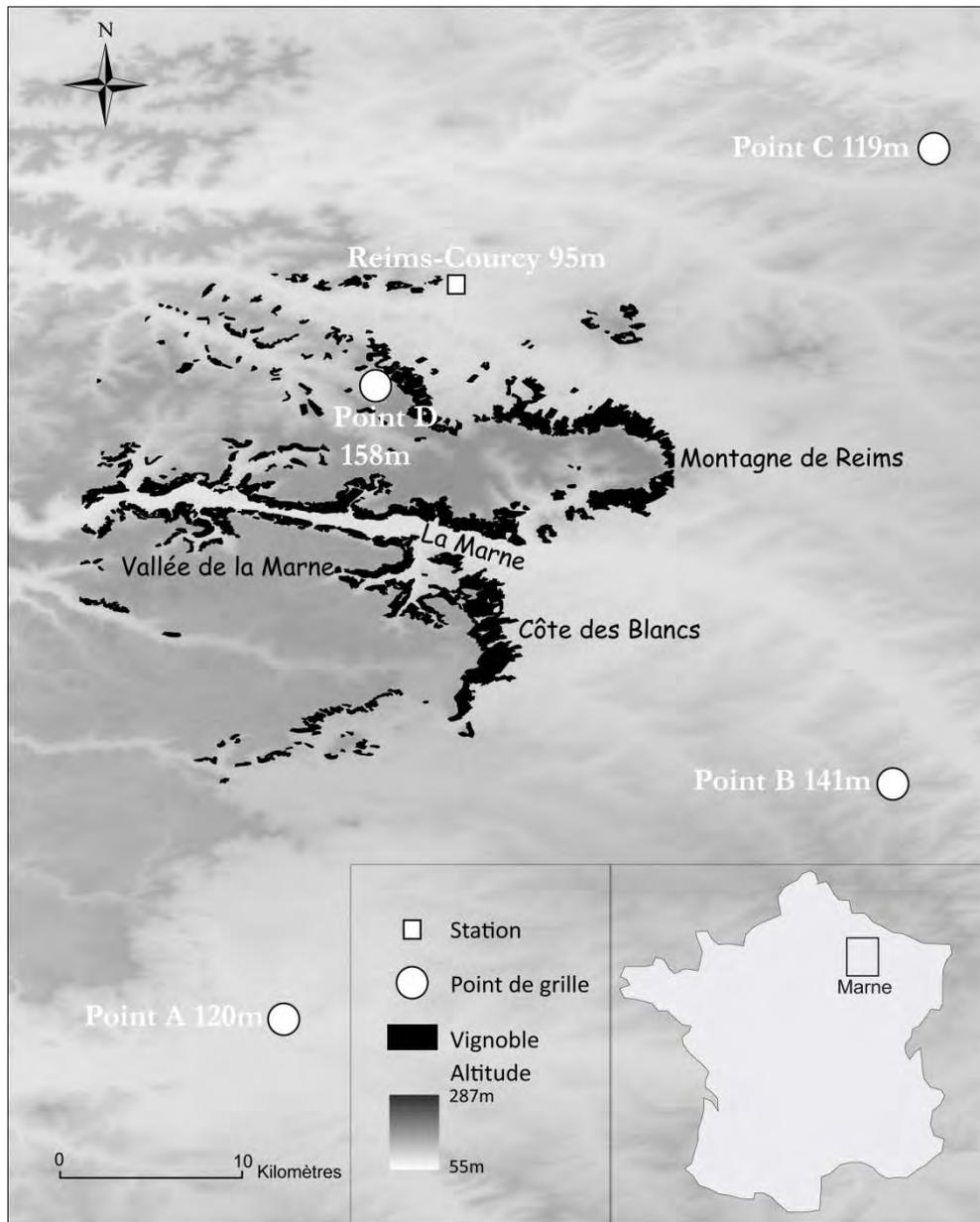


Figure 4.6 : Localisation du vignoble et des quatre points de grille ARPEGE-Climat (RETIC), (Données : SRTM, IGN, Météo-France in Briche *et al.*, 2010).

4.2.3 Différences entre les deux modèles français

Les différences majeures entre le modèle ARPEGE-Climat (CNRM) et le modèle du LMD (IPSL) résident dans leur dynamique atmosphérique et leur résolution. Le modèle du LMD a une dynamique explicite (Annexe V et Annexe VI) tandis que le modèle du CNRM a une dynamique semi-lagrangienne semi-implicite traitée par méthode spectrale (Déqué *et al.*, 2007 ; Dufresne et Royer, 2007). Ces différentes dynamiques impliquent des paramétrisations temporelles différentes : l'intégration du temps est réalisée au moyen de différents schémas ; ces méthodes servent à assurer une stabilité numérique. Il s'agit souvent de mettre en place un filtre temporel faible permettant des intégrations prolongées pour la modélisation du climat.

L'autre différence est la résolution de ces modèles. Le modèle LMD a une résolution à l'échelle globale tandis que le modèle ARPEGE-Climat (RETIC) a une résolution considérée comme « propice » aux études d'impacts régionales concernant la métropole.

Le modèle LMD peut être comme ARPEGE-Climat un modèle à maille variable, dans sa version LMDz avec un zoom de facteur 2 est appliqué pour avoir une résolution spatiale d'environ 160 km en France (Li, 1999).

A l'exception du transfert radiatif, les calculs de la physique des deux modèles sont basés sur des paramétrisations différentes, notamment pour les processus nuageux et la convection. Pour les processus en surface le modèle couplé de l'IPSL utilise le modèle ORCHIDEE (Krinner *et al.*, 2005), tandis que le modèle du CNRM utilise le modèle ISBA (Mahfouf *et al.*, 1995). Les forçages pris en compte pour les deux modèles sont ceux des projets ENSEMBLES - projet européen de 2004 à 2009 - et ESCRIME, visant à l'intercomparaison de plusieurs modèles pour le premier et des deux modèles français (Terray et Braconnot, 2007) pour le second. Les scénarios RETIC sont issus du même modèle que celui utilisé pour le projet ENSEMBLES mais sont réalisés à partir de NEC au lieu de Fujitsu qui sont les « *superordinateurs* » capables de faire tourner les simulations.

4.2.4 Le modèle RAMS¹⁸ à résolution dite « locale »

4.2.4.1 Résolution du modèle RAMS

Le modèle à méso-échelle RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) mis au point par l'Université du Colorado est un modèle à système de grilles imbriquées. Il s'agit d'un modèle à haute résolution dont le but est d'obtenir une simulation à échelle fine jusqu'à 200 m de résolution des paramètres météorologiques sur la période de contrôle - et jusqu'à 5 km sur la période future en cours de réalisation - en l'occurrence ici les températures, au sein du vignoble champenois. Dans le cadre de la thèse et du projet TERVICLIM, un système de quatre grilles imbriquées utilisées à des résolutions de 25 km, 5 km, 1 km et 200 m (Figure 4.7) dont la dernière couvre les domaines viticoles étudiés tels que celui de la Champagne qui représente une zone d'environ 70 km de côté avec 352 points de grille en abscisse et 332 points de grille en ordonnée. La grille 1 est synoptique et met en évidence les fronts, les champs de vents occidentaux avec un pas de maille de 25 km, il y a environ 70 mailles en latitude et 60 mailles en longitude.

¹⁸ Ces travaux ont bénéficié d'un accès aux moyens de calcul du CINES au travers de l'allocation de ressources 2011 (dossier : c2011016342 / projet : uhb6342) attribué par GENCI (Grand Équipement National de Calcul Intensif).

4.2.4.2 Données thermiques du modèle RAMS

Ce modèle est étalonné, testé et validé sur une période de contrôle. L'année 2003 permet d'étalonner le modèle du fait de ses conditions particulières et par conséquent difficilement modélisables.

En effet, cette année est marquée par un aléa gélif dommageable au printemps, plus précisément en avril avec des températures minimales très faibles et la canicule de l'été 2003 qui a touché une grande partie de l'Europe de l'Ouest.

Des dates clés ont été choisies dans le cadre du projet TERVICLIM car les calculs nécessitent beaucoup de temps : du 4 au 9 avril et du 4 au 8 août 2003. Une réflexion en amont a donc été réalisée pour le choix des dates gélives printanières et estivales caniculaires récurrentes dans les vignobles français étudiés avec le modèle RAMS (Val de Loire, Bordelais et Champagne). Ce modèle à méso-échelle est très largement étudié dans la communauté des modélisateurs du climat pour des études très fines mais également par des géographes-climatologues.

4.2.4.3 Origine des données RAMS

La version 6.0 du modèle est utilisée. Le modèle RAMS est un modèle eulérien non-hydrostatique, parallèle (Pielke *et al.*, 2002). Ce modèle est basé sur des équations physiques qui reproduisent les processus physiques de l'atmosphère. Il s'agit d'un modèle météorologique développé pour la simulation et la prévision des phénomènes atmosphériques à méso-échelle, c'est-à-dire à aire limitée par opposition à des modèles globaux (Cotton *et al.*, 2003). Il est construit autour d'un ensemble d'équations non-hydrostatiques (Annexe VI) et compressibles permettant de décrire la dynamique (équations du mouvement) et la thermodynamique atmosphérique (équation thermodynamique) en prenant en compte les mouvements verticaux de l'atmosphère, non négligeables à ces échelles. Ce jeu d'équations est complété par les équations de conservation de la masse et de continuité du rapport de mélange pour chaque type d'hydrométéores pronostiqués. Si l'échelle spatiale est suffisamment fine pour que le phénomène physique soit résolu, alors les équations sont dites explicites ; par contre, si l'échelle spatiale est trop grande, alors le phénomène se déroule à une échelle inférieure à la maille (le domaine de simulation est subdivisé en un certain nombre de mailles ou cellules élémentaires) : alors, des paramétrisations plus ou moins complexes selon l'application sont utilisées. Cette approche permet d'évaluer tous les processus à petite échelle tels que la turbulence, la convection, la microphysique ou encore les processus radiatifs, qui jouent un rôle prépondérant aux échelles plus importantes. De nombreuses paramétrisations sont donc incluses dans RAMS pour simuler la diffusion turbulente, le rayonnement solaire et terrestre, les mécanismes décrivant la formation des nuages et la précipitation, la convection nuageuse, les effets cinématiques dus à la topographie, les échanges de chaleur latente et sensible entre le sol et l'atmosphère. Un

modèle de sol/végétation comprend plusieurs niveaux à l'intérieur du sol et prend en compte les différentes caractéristiques de la texture du sol et du couvert végétal (LEAF3, Walko *et al*, 2000 ; Walko et Tremback, 2004). Des données observées sur le terrain sont insérées dans le modèle afin de l'ajuster le mieux possible à la réalité mais pas celles des stations implantées sur les coteaux viticoles. Ce modèle intègre différents paramètres aux échelles emboîtées tels que la texture du sol avec une classification réadaptée par l'équipe pour intégrer les modes de classifications françaises aux classes de texture anglo-saxonnes. Il tient compte également d'un équilibre entre le sol et l'atmosphère en terme de température (°C) et d'humidité, prend en compte l'hétérogénéité de surface, la forme de la côte, la topographie est suivie pour la couche de surface. La couche limite varie selon la journée en termes de gradient de vitesse, de températures par rapport aux corps, la couche de surface quant à elle est une couche à flux constants. Le modèle RAMS intègre un forçage aux limites des champs synoptiques par un modèle à petite échelle ECMWF-Reading, à partir de modèles petite échelle. Il intègre un modèle de végétation, de sol et d'hydrologie qui ne s'avère pas très performant en termes de ruissellement, un modèle de nuage avec une microphysique détaillée comprenant sept hydrométéores.

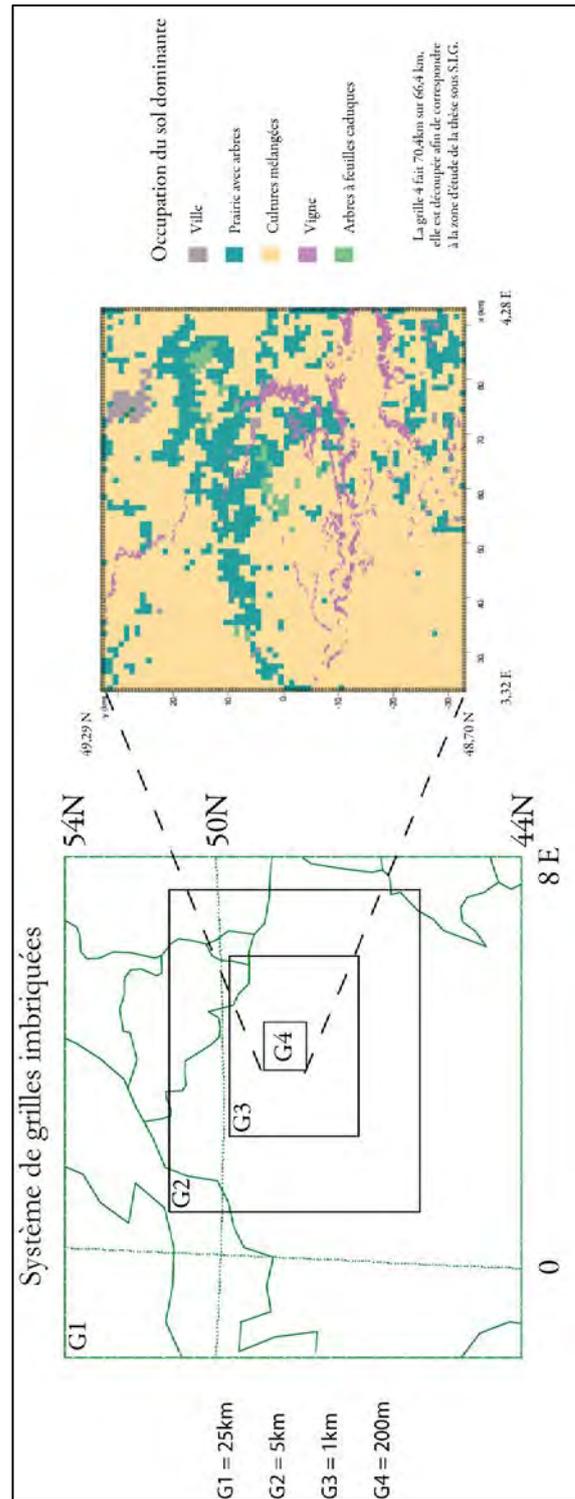


Figure 4.7 : Schématisation des grilles imbriquées de RAMS avec un zoom sur la grille 1 et l'occupation dominante (Données : RAMS, Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).

4.3 Les trois scénarios du GIEC retenus

Les scénarios (A1B, A2 et B1) sont les plus couramment utilisés dans les études d'impacts du changement climatique (Tableau IV.IV).

Tableau IV.IV : Récapitulatif des scénarios de simulations futures utilisés dans le cadre de l'étude (adapté du *Rapport Spécial du GIEC, Scénario d'émissions, Résumé à l'intention des décideurs*, Nakicenovic et Swart, 2000 ; in Briche *et al.*, 2009a ; 2010 ; 2011a).

A1B	<p>Le canevas et la famille de scénarios A1 décrivent un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement.</p> <p>Le scénario A1B se caractérise par un équilibre entre les sources ce qui signifie que l'on ne s'appuie pas excessivement sur une source d'énergie particulière, en supposant que des taux d'amélioration similaires s'appliquent à toutes les technologies de l'approvisionnement énergétique et des utilisations finales.</p>
A2	<p>Le canevas et la famille de scénarios A2 décrivent un monde très hétérogène. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale.</p>
B1	<p>Le canevas et la famille de scénarios B1 décrivent un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficace. L'accent est sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiatives supplémentaires pour gérer le climat.</p>

CONCLUSION DU CHAPITRE 4

Ce chapitre a permis de présenter les données thermiques utilisées en expliquant d'une part le réseau disponible pour la Champagne puis d'autre part, les modèles à échelles spatio-temporelles différentes dont des données thermiques ont été extraites pour cette étude (Figure 4.8).

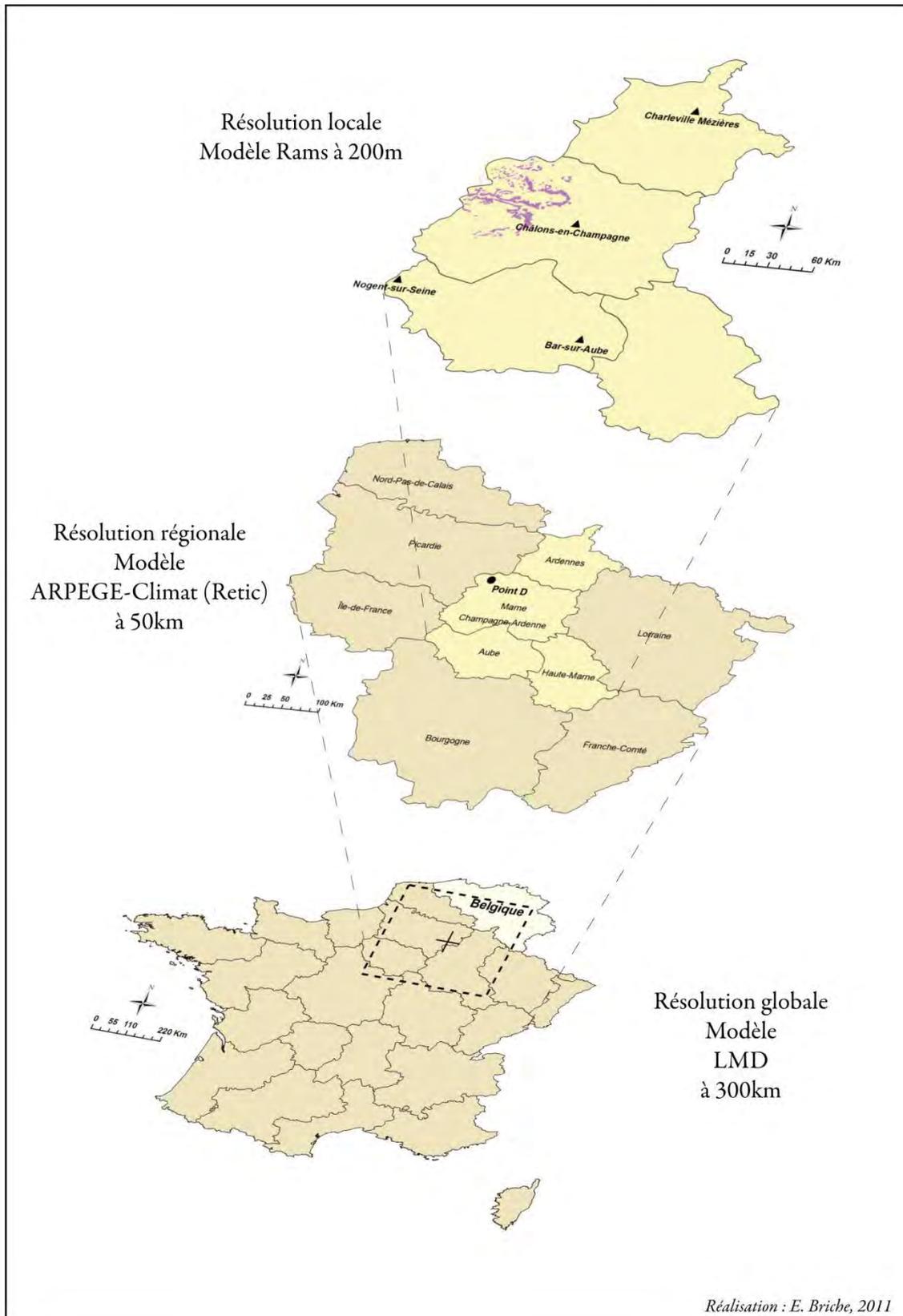


Figure 4.8 : Schéma récapitulatif des modèles et de leur résolution spatiale

Chapitre 5

Les données environnementales et agronomiques

Une base de données complémentaire aux données thermiques est indispensable pour les données d'entrée du modèle à méso-échelle RAMS à 200 m et 5 km de résolution mais aussi pour la géo-localisation de la zone d'étude dans son contexte topographique et environnementale.

5.1 Les données environnementales

5.1.1 Le SRTM et la BD Alti

Le modèle numérique de terrain (MNT) est un outil essentiel pour la réalisation de cartes explicites afin de visualiser les caractéristiques topographiques de la zone d'étude, ici un vignoble dont les conditions thermiques sont fortement dépendantes de l'exposition, de la pente et de l'altitude des coteaux viticoles. Cette information peut être obtenue à la fois sous forme raster, l'espace est divisé en cellules, ou en format vecteur lorsque les éléments graphiques sont des lignes telles que des courbes de niveau (isohypses). Ces MNT permettent de visualiser, d'analyser le relief et éventuellement modéliser les phénomènes qui lui sont liés. Dans le cadre de cette étude, deux MNT à résolutions différentes sont utilisés ; le SRTM venant combler les lacunes de la BD Alti de l'IGN, obtenue morcelée par le CIVC.

5.1.1.1 Le SRTM

Le SRTM data version 4.1 ou « Shuttle Radar Topography Mission » fait référence à des fichiers vectoriels topographiques permettant la création du modèle numérique de terrain fournies en accès libre à 90 m de résolution sur le site [glcf](http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml) en format .tiff en degrés décimaux avec le système de projection WGS 84 en latitude et longitude. La base de données est importable en fichier ascII sous un logiciel de SIG. Le satellite utilisé est le « Space Shuttle Endeavor » (<http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>).

5.1.1.2 La BD Alti de l'IGN

La BD Alti a été acquise par le CIVC auprès de l'IGN. Ces MNT ont été construits à partir de la numérisation de cartes topographiques au 1/50000^e ou 1/25000^e et à partir de photographies aériennes (1/30000^e ou 1/60000^e). La base de données obtenue est en ascII en

trois colonnes contenant les coordonnées en Lambert II étendu (X et Y) et les altitudes en mètres (Z) par rapport au niveau de la mer avec une précision de 3 et 5 mètres. Les coordonnées sont obtenues avec une résolution de 50 mètres sur quatre zones découpées du vignoble champenois (Madelin, 2004) ce qui pose un inconvénient de morcellement spatial lorsque l'on souhaite représenter les points de grille des sorties de modèles avec le fond altitudinal.

5.1.2 La BD Carto de l'IGN

La BD Carto de l'IGN est une base de données complète, structurée en plusieurs thématiques (réseau routier, hydrographie, unités administratives, toponymes, etc.), il s'agit d'une « *représentation de l'image de la surface terrestre que l'on peut observer dès que l'on s'élève au-dessus du sol, ou encore une schématisation de l'image qu'en donnent les cartes à l'échelle du 1/100000^e* » (CERTU et IGN, 1998). La BD Carto est issue de cartes au 1/50000^e de l'IGN, des images satellitaires de SPOT. La marge d'incertitude de ces données est entre 15 et 50m. L'information géographique est donnée par des informations sémantiques, des informations géométriques.

Le thème occupation du sol a été extrait de la BD Carto. Il permet l'obtention des parcelles viticoles et de délimiter l'environnement des stations qui influence très largement les températures. La base de données de la BD Carto est une « *image du terrain réel vu à travers les spécifications de la BD Carto à une date donnée* » (CERTU et IGN, 1998).

5.1.3 La base de données RAMS à 200 m

5.1.3.1 Les images MODIS

Les images Modis /Terra 16 jours de NDVI à 250 m de résolution sont en accès libre et peuvent être téléchargées sur « EOS Data Gateway » prises aux dates clés de 2003 choisies pour la calibration du modèle à méso-échelle RAMS. Les images SST de Modis de températures de surface de la mer ont été également téléchargées sur cette plateforme.

5.1.3.2 La texture du sol

Le modèle RAMS inclut 12 classes de sol issues de la nomenclature USDA - c'est-à-dire issues de la carte mondiale des sols FAO-UNESCO - qui diffèrent des nomenclatures des types de sol françaises. La différence réside dans les seuils de fractions en argile, limon et sable. En France, les deux nomenclatures les plus couramment utilisées sont celles de GEPPA (Groupe d'Etudes des Problèmes de Pédologie Appliquée) et de Jamagne (Figures 5.1 et 5.2) utilisée pour la cartographie des sols de l'Aisne (Richer de Forges *et al.*, 2008). Le triangle de GEPPA comporte 17 classes ; celui de Jamagne 15 classes dans sa version modifiée.

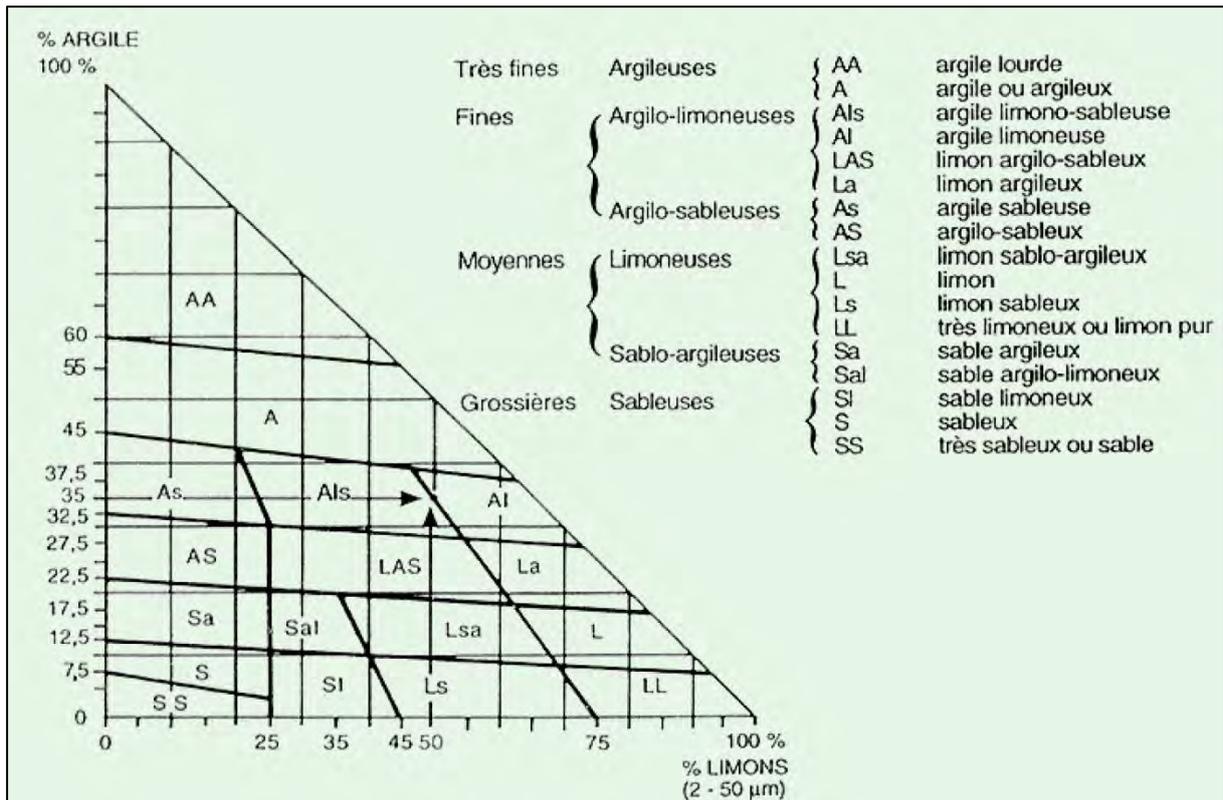


Figure 5.1 : Triangle des textures de GEPPA (Source : www.sols-de-bretagne.fr)

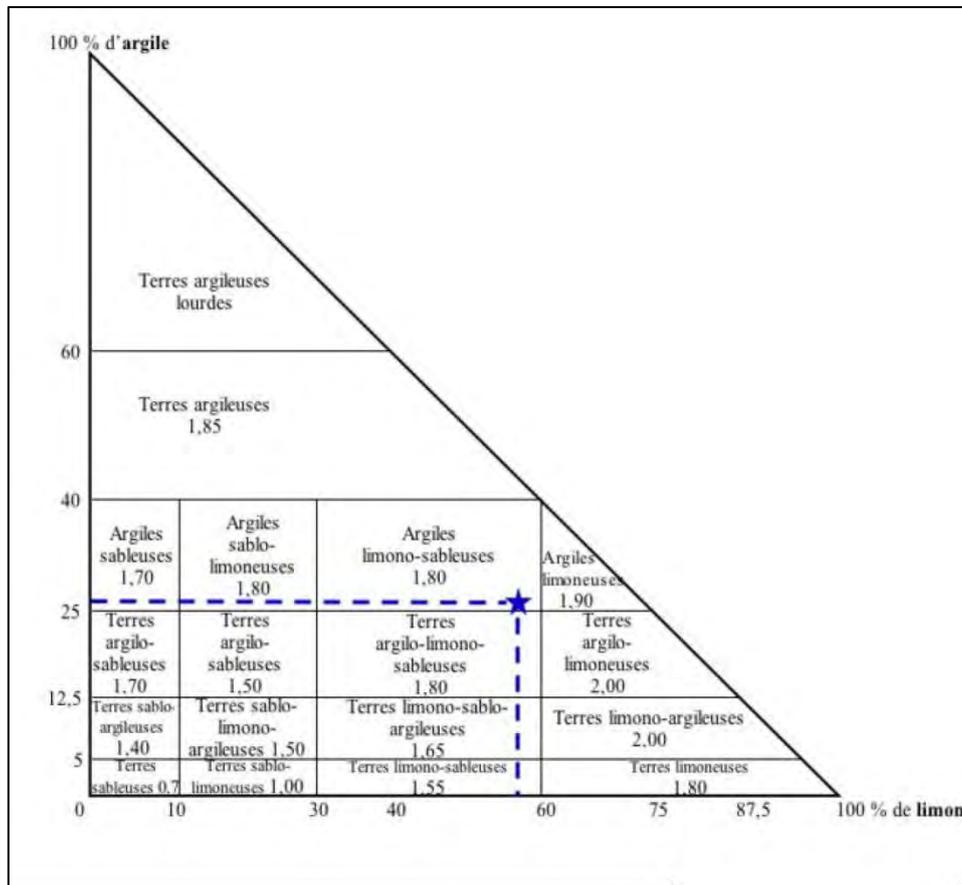


Figure 5.2 : Triangle des textures de Jamagne *et al.*, 1977 (Source : www.afidol.org)

Ces nomenclatures sont mises en relation avec le fichier SIG fourni par le CIVC qui donne la texture du sol avec les 3 lettres L pour limon, A pour argile et S pour sable. Ces textures sont disponibles à plusieurs profondeurs, pour la base de données RAMS, la structure en surface est prise en compte. Ce fichier SIG est issu de relevés effectués avec des trous de tarière environ tous les 4 hectares selon un maillage régulier par Catillon pour la Marne et l'Aisne (1975) et Kossura pour l'Aube et la Marne qui ont établi la cartographie des sols (Communication privée avec le CIVC).

Pour la base de données à 200 m, des classes ont été ajoutées au modèle RAMS pour obtenir une nomenclature en 16 classes (Annexe VII) correspondant aux types de sol observés dans le Val de Loire et en Champagne. Cette nomenclature proposée a été validée par les agronomes et pédologues de l'INRA d'Angers. Le maximum de concordance entre les types de sols RAMS et ceux observés pour les deux vignobles septentrionaux essentiellement issus du triangle de GEPPA a été gardé.

Toutes les données de la base environnementale ont servi d'entrées au modèle à méso-échelle RAMS. Des prétraitements SIG ont été effectués afin de convertir toutes les données en format raster à 200 m de résolution en projection identique (WGS 84 – Lat/Long) puis converties en ASCII pour être fournies à l'équipe de modélisation de Clermont-Ferrand.

5.2 Données agronomiques

5.2.1 Stades phénologiques

Ces données sont issues de la base de données Magister. « *Magister Champagne est un Groupement d'Intérêt Economique qui a été créé en 1993. Cette structure autonome permet de réunir les différents partenaires de la filière viticole soucieux de mettre en œuvre une protection raisonnée au sein du vignoble champenois. Ce réseau a été créé afin de promouvoir la lutte raisonnée au sein du vignoble et de proposer aux viticulteurs les appuis techniques nécessaires à une protection de la vigne réfléchie, efficace et mettant en œuvre des pratiques respectueuses du milieu naturel* » (Information Magister, 2002).

Pour les stades phénologiques, sur la période 1951 à 2010:

- le débourrement est relevé à mi- débourrement,
- la floraison est relevée à la pleine floraison,
- la véraison est relevée au début.

Les données obtenues sont une moyenne des dates phénologiques tous cépages confondus (Pinot noir, Meunier et Chardonnay).

5.2.2 Données de maturité et dates de vendanges

En Champagne, le départ des vendanges nécessite un réel suivi de la maturité, véritable diagnostic de la bonne qualité. Pour cela une normalisation des relevés a été mise en place notamment concernant le poids moyen des grappes, la richesse en sucre des raisins, l'acidité totale et le niveau d'attaque de la pourriture grise. Le réseau maturité a été mis en place dès 1956, il compte aujourd'hui environ 400 parcelles échantillonnées le mois avant les vendanges, ces parcelles sont de plus géolocalisées ce qui permet de travailler sous SIG.

Les données de maturité sont issues du réseau Magister également de 1951 à 2010. On a obtenu :

- le taux moyen d'alcool par an pour les trois cépages en degré potentiel d'alcool en % /vol. ;
- la moyenne annuelle d'acidités totales pour les trois cépages en $\text{gH}_2\text{SO}_4/\text{L}$;
- la date officielle de début des vendanges moyenne pour les trois cépages confondus.

5.2.3 Pourcentages des parcelles gelées

La base de données 2003 de surfaces gelées au printemps a été récoltée auprès du CIVC. Cette base de données, issue du réseau Magister, contient le pourcentage gelé par cépages par commune étudiée mais également le pourcentage total gelé par rapport à la surface des parcelles.

CONCLUSION DU CHAPITRE 5

Les deux précédents chapitres récapitulent par thématique les données requises pour ce travail de thèse : les données thermiques observées et simulées au cœur de la réflexion proposée mais aussi les données complémentaires pour l'ajustement de la démarche ou pour compléter les données d'entrées de la modélisation à méso-échelle RAMS.

Trois modèles sont utilisés : ils ont des résolutions spatiales et temporelles différentes. En effet, pour travailler à l'échelle d'un coteau viticole, les MCG et les modèles à maille variable ne suffisent pas mais permettent néanmoins de donner une prospective des conditions thermiques futures au sein de la région viticole étudiée. Pour affiner l'analyse et obtenir des simulations à l'échelle topoclimatique, le modèle à méso-échelle paraît plus adapté mais les temps de calcul sont très longs. Les simulations RAMS peuvent être obtenues sur un espace restreint et un temps très court. Elles complètent l'apport des autres modèles d'où la nécessité de faire un lien entre les différentes perspectives possibles et d'en dégager les informations adaptées.

Chapitre 6

Approches méthodologiques

Afin de répondre à la problématique envisagée dans le cadre de cette thèse et de pouvoir exploiter les sorties des modèles sélectionnés selon leur résolution spatiale et temporelle, les choix temporels et spatiaux sont développés afin de montrer la méthodologie scalaire appliquée pour obtenir une modélisation spatiale du changement climatique à l'échelle locale du vignoble de la Marne. Plus la résolution spatiale et temporelle augmente, plus les extrêmes seront analysés en détail et quantifiés statistiquement car ce sont ces extrêmes thermiques, qui, dans un contexte de changement climatique, pourraient être les plus défavorables pour la viticulture champenoise. Plus l'échelle d'analyse s'affine au cours de l'étude, plus la méthodologie fera appel aux systèmes d'information géographique pour intégrer les champs de températures simulés sur la période de contrôle puis sur les scénarios futurs.

6.1 La question du temps

Ce travail de recherche traite de la température. Cette dernière est analysée sur différents pas de temps : il s'agit d'une analyse diagnostique. La démarche diagnostique s'appuie sur une analyse statistique de la variabilité climatique et de l'élaboration d'hypothèses explicatives. Les sorties de modèles sont validées et testées sur une période de contrôle puis des simulations sont effectuées sur le futur. Pour cela, une méthodologie adaptée à chaque échelle d'analyse est mise en place.

6.1.1 La base de données quotidienne (1950-2000 et 2001-2100)

Une étude diagnostique - destinée à analyser la variabilité climatique principalement aux échelles mensuelles, saisonnières et annuelles sur un pas de temps intermensuel à interannuel - est réalisée sur la période de contrôle (1950-2000) puis sur les scénarios de simulations du climat futur (2001-2100).

Trois pas de temps (mensuels, saisonniers, annuels) tenant compte du cycle végétatif de la vigne (avril à septembre) sont utilisés notamment pour :

- L'évolution des températures à l'échelle annuelle ;
- Les fréquences saisonnières, mensuelles d'extrêmes ;

- Les calendriers de probabilités durant la période végétative (avril à septembre) pour des températures comprises de 20 à 30°C, sachant que ces températures correspondent à un intervalle optimal pour la maturation des baies de raisin pendant la période estivale (Huglin, 1986) ; un calendrier de probabilités étant « *un moyen d'expression permettant de représenter le comportement saisonnier de la variabilité d'un paramètre climatique* » (Peguy, 1976). L'échelle verticale est logarithmique afin d'obtenir plus de précisions sur les plus faibles valeurs et chaque courbe représente une valeur de température (en °C) ;
- Les indices bioclimatiques de Huglin, Winkler calculés durant la saison végétative ainsi que l'indice de fraîcheur des nuits sur les nuits avant les vendanges ;
- L'utilisation des lois des extrêmes.

Ces analyses sont réalisées pour les modèles ARPEGE-Climat (RETIC) et du LMD.

6.1.2 La base de données horaire (2003)

La base de données horaire est disponible pour les 23 stations du vignoble de la Marne et ce pas de temps est celui du modèle à méso-échelle RAMS. En effet, les sorties à méso-échelle à 200 m de résolution nécessite un long temps de calcul d'où le choix de dates clés en amont avant de lancer la simulation pour l'année de référence choisie : 2003.

6.1.2.1 Les dates retenues :

9 jours sur l'année 2003 ont été simulés du fait de leur caractère exceptionnel. Cette année est particulière en Champagne durant la période du cycle végétatif de la vigne d'avril à septembre. Elle est marquée par :

- un aléa gélif printanier prononcé au moment du débourrement : 5 jours sont simulés, du 4 au 9 avril 2003 ;
- la canicule estivale, due à l'installation d'un anticyclone ancré sur l'Europe occidentale à l'origine de températures record notamment durant la première quinzaine d'août, pendant la maturation des baies. La littérature sur le changement climatique considère souvent la canicule 2003 comme pouvant donner un « *aperçu du climat futur* » (André *et al.*, 2004 ; Agenis-Nevers, 2006). 4 jours sont simulés, du 4 au 8 avril.

Les conditions météorologiques du printemps 2003 sont extrêmement particulières en Champagne. En effet, dès février, le réchauffement est rapide, les sommes thermiques nécessaires au débourrement sont atteintes précocement début avril (le 4 avril contre le 14 avril en moyenne) et cette précocité s'associe à une sensibilité accrue de la vigne aux gelées printanières. Ces dernières sont brutales en avril et le bilan est lourd fin avril : 29 000 hectares sont touchés et plus de 13 000 hectares sont détruits à 100% (Langellier *et al.*, 2003a et b).

L'été 2003 fait suite à de nombreux dégâts provoqués par le gel printanier : les températures maximales sont très élevées en juillet et caniculaire la première quinzaine d'août (Langellier *et al.*, 2003a et b). Des températures jamais observées auparavant en Champagne sont enregistrées de l'ordre de 42°C ; pourtant les vignes ne souffrent pas de la sécheresse hydrique puisant dans les recharges hydriques de l'automne précédent. Néanmoins, sur certaines parcelles, des pertes importantes sont dues à l'échaudage des baies lors de la maturité.

Pour les deux périodes, sont obtenues par l'équipe de modélisation du Laboratoire de Météorologie Physique (LaMP) de Clermont-Ferrand :

- les données permettant de réaliser des champs de températures à 5h du matin et à 15h l'après-midi, qui sont respectivement les heures d'obtention des minimas et maximas journaliers en .ascII ainsi que toutes les heures pour deux dates : les 8 avril et 8 août 2003 ;
- les 24h de données thermiques pour les 9 jours simulés en .ascII ;
- les transects longitudinaux et latitudinaux des températures (verticales) de l'atmosphère sur les stations de référence du vignoble de la Marne servant de référence pour cette échelle d'analyse en .cgm ;
- les graphiques journaliers (en .cgm) modèle/station avec les marges d'incertitude des températures du modèle dans un rayon de 1,5 km de la station sont obtenus lors de la modélisation à méso-échelle.

Toutes ces données sont issues du modèle RAMS sur la simulation 2003 avec le système de grilles imbriquées présentés dans le chapitre 4 et ont une résolution de 200 m.

Quelques champs de pression, température, vitesse et direction du vent ont été obtenus pour la grille 1 (en .cgm) afin d'être mis en relation avec les situations synoptiques des dates clés choisies.

Les données RAMS collectées pour ce travail de thèse sont conséquentes : elles ont été obtenues auprès de Sylvie et Guy Cautenet en différents formats puis triées et analysées dans ce travail. Les données en .ascII ont notamment permis la réalisation de graphiques pour certaines, d'autres ont été intégrées et traitées sous SIG afin d'obtenir des champs thermiques ; celles en .cgm ont été retouchées sous un logiciel de DAO.

6.1.2.2 Comparaison de l'évolution des températures simulées et observées au cours de la nuit

Les températures décroissent de 14h-15h à 4h-5h : à partir du lever du soleil, le réchauffement est rapide du fait de l'apport énergétique du rayonnement solaire.

Les minimas nocturnes sont entre 4h et 5h du matin, plus particulièrement à 5h du matin pour les dates choisies. L'heure moyenne du minimum n'est pas la même selon les stations. Pour les données simulées RAMS, 7 stations sont étudiées et comparées aux sorties à méso-échelle : nous prendrons donc 5 h du matin afin d'avoir les mêmes transects pour toutes les stations retenues.

L'aléa gélif printanier de 2003 est analysé par le suivi de l'évolution des températures minimales au cours de la nuit en s'attachant au refroidissement nocturne (*cf. chapitre 2, 2.3.3.1*). Pour cela, on analyse les nuits gélives observées sur les stations choisies pour la modélisation RAMS en comparant statistiquement les résultats observés aux résultats simulés. On calcule donc la différence entre les températures horaires observées sur les stations et simulées par le modèle entre 19h la veille et 5h du matin, soit approximativement entre l'heure ronde moyenne du coucher du soleil et la température la plus froide en moyenne au cours de la nuit.

6.2 Choix des stations suivant la résolution des modèles

La dimension spatiale est quant à elle prise en compte une fois les résultats obtenus. La représentation cartographique facilite et permet la visualisation du phénomène étudié et surtout de sa représentation au sein de la zone d'étude. Ces résultats seront combinés avec d'autres éléments d'information telle que l'occupation du sol ou le relief ; le but étant de rechercher d'éventuelles structures spatiales au sein du vignoble comme voir si le changement climatique est homogène sur tout le vignoble.

6.2.1 A l'échelle régionale : la station de Reims-Courcy comme représentative du climat de la région viticole de la Marne

On a choisi la station de Reims-Courcy comme référence de la période de contrôle sur les données de simulations LMD et ARPEGE-Climat ; cela se justifie par le fait que :

- Reims-Courcy est une station du réseau synoptique Météo-France et caractérise le climat moyen de la Champagne viticole, plus précisément la région viticole de la Marne, étudiée dans ce travail de recherche
- Les données de cette station sont disponibles sur toute la période de contrôle (1950-2000).

6.2.1.1 *Critique de la représentativité de la station Reims-Courcy*

La station de Reims-Courcy est utilisée comme référence pour le vignoble, cependant elle n'est pas implantée sur les coteaux viticoles et une critique des données de cette station est nécessaire. Les stations disponibles sur la période 1979-2000 sont fortement et significativement corrélées. La station de Reims-Courcy présente des températures moyennes annuelles plus basses que les autres stations (Figure 6.1) ; cela est observé également de manière plus flagrante, sur la figure 6.2 réalisée à partir d'un indice. Ce dernier est la moyenne des trois stations sur la période présentée, sachant que ces trois stations sont les seules disponibles avec des longues séries de données fiables.

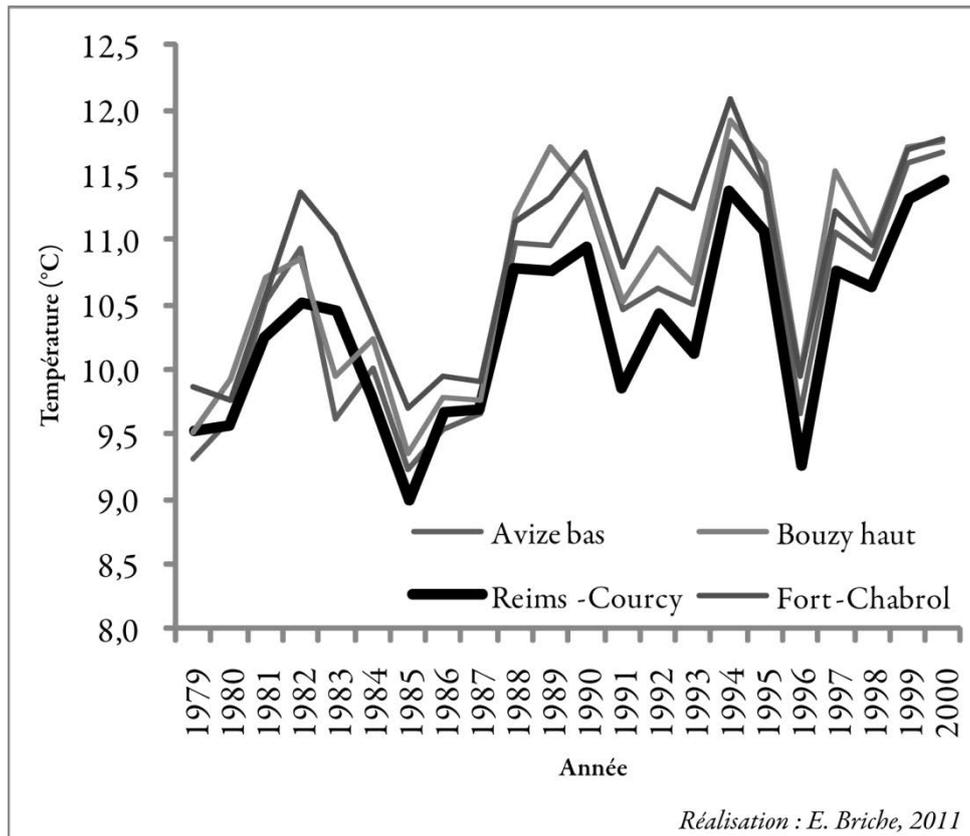


Figure 6.1 : Comparaison des températures moyennes annuelles entre des stations implantées sur les coteaux viticoles et Reims-Courcy (Source : Météo-France, CIVC)

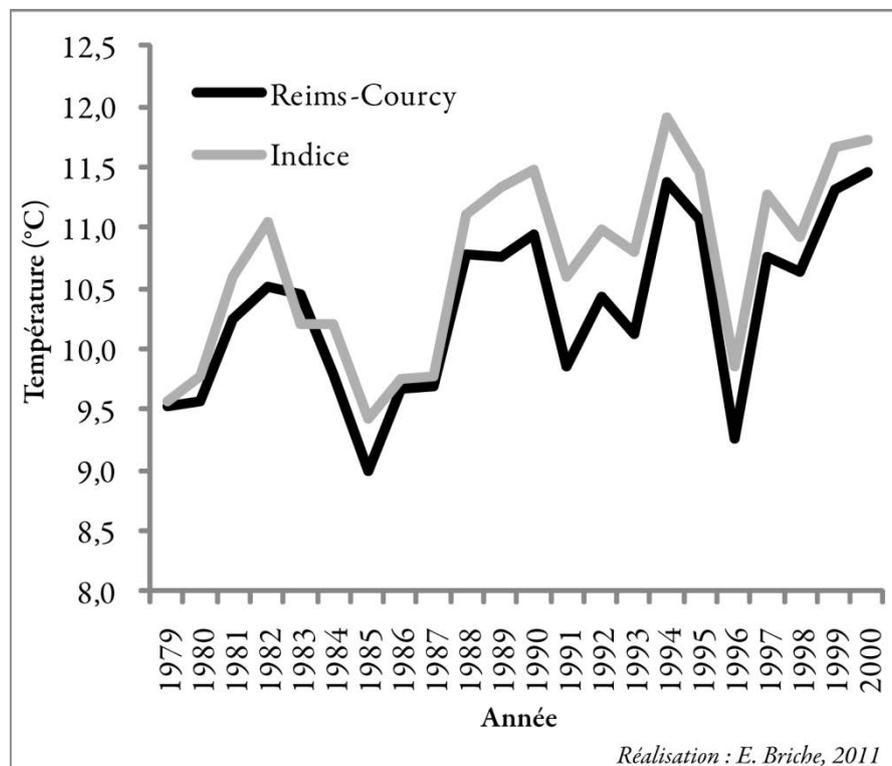


Figure 6.2 : Comparaison des températures moyennes annuelles entre l'indice de la Marne et Reims-Courcy (Source : Météo-France, CIVC)

6.2.1.2 *Choix d'un seul point de grille ARPEGE-Climat (RETIC)*

Un seul point de grille ARPEGE-Climat (RETIC), celui situé au cœur du vignoble (point D) est conservé pour la suite de l'étude. Ce choix s'explique du fait que les mailles des autres points de grille couvrent beaucoup moins le vignoble de la Marne mais aussi parce que les quatre points de grille ont des coefficients de corrélation statistiquement significatifs entre eux supérieurs à 0,9 ; l'étude des quatre points s'avère redondante.

6.2.2 A l'échelle topoclimatique : les stations du vignoble

Pour la modélisation à échelle locale, voire même topoclimatique, le réseau des 23 stations est utilisé pour étudier et analyser les événements extrêmes de l'année 2003. 7 stations ont été retenues pour la validation des simulations sur l'année 2003 du modèle RAMS. Il s'agit de Bouzy haut, Avize bas, Châtillon-sur-Marne, Epernay, Verzenay, Fleury-la-Rivière et Reims-Courcy. Ces stations sont représentatives des trois grandes régions viticoles de la Marne : la Montagne de Reims, la Côte des Blancs et la vallée de la Marne. Elles ont des altitudes, expositions et position sur les coteaux bien différentes avec notamment une station réputée comme « froide » et dans une zone où le refroidissement nocturne en situation radiative est très marqué comme Verzenay. La station de Reims-Courcy reste la station de référence tout au long de la thèse afin d'avoir, pour tous les types de modélisation utilisés, une comparaison commune.

6.3 Les outils statistiques utilisés

Les méthodes statistiques sont classées en différents types selon leur utilisation. Pour résumer l'information, il s'agit de statistiques descriptives ; elles sont explicatives lorsqu'un phénomène est expliqué par un autre. Ici, nous verrons plutôt les méthodes statistiques utilisées selon le nombre et la nature des variables étudiées.

6.3.1 Statistiques univariées et bivariées

E. Vigneron (1997) définit la statistique comme un « *ensemble de méthodes visant à décrire, à résumer et à interpréter des phénomènes dont le caractère essentiel est la variabilité. Elle a pour vocation unique de fournir de la manière la plus rigoureuse possible des éléments d'appréciation utiles à l'explication ou à la prévision de ces phénomènes mais par elle-même elle n'explique ni ne prévoit aucun d'entre eux* ».

Les statistiques univariées s'attachent à la description des variables une par une. La description est réalisée par des paramètres dits de position ou valeurs centrales (moyenne, médiane et mode) et par des paramètres de dispersion (écart-type, étendue, etc.). Ces

paramètres permettent entre autres, de caractériser la forme de la distribution statistique, indispensable en vue d'une représentation cartographique la plus appropriée possible.

Ces paramètres, bien souvent compilés sur les valeurs brutes des séries de données, permettent de décrire la variabilité à la fois spatiale et temporelle des phénomènes étudiés comme les températures à différents pas de temps et selon différents résultats issus des sorties de modèles ou de stations implantées au cœur du vignoble.

Les statistiques bivariées, quant à elles, s'attachent à quantifier, qualifier, détecter la relation entre deux caractères. Différentes méthodes sont possibles selon la nature des variables étudiées telles que par exemple pour deux caractères quantitatifs, le coefficient de Bravais-Pearson.

6.3.1.1 Le coefficient de Bravais-Pearson (R)

La corrélation simple mesure l'intensité de la relation entre deux variables. Le coefficient de Bravais-Pearson (R) mesure l'intensité de la relation entre deux caractères quantitatifs. Le nuage de points permet tout d'abord de vérifier la forme de la relation et également de vérifier l'effet de certains points sur une éventuelle droite de régression. La relation entre les deux caractères peut-être non linéaire. Ce coefficient est compris entre -1 et 1 et le signe indique le sens de la relation (Groupe Chadule, 1997). Il est ensuite nécessaire de tester la significativité de la relation grâce à la table des valeurs critiques du r de Bravais-Pearson (Annexe VIII). Cette table indique pour un risque d'erreur α donné et le nombre d'individus (degrés de liberté), le seuil du r à franchir pour que la relation soit significative. Cette corrélation est utilisée pour tester la significativité des séries de données thermiques entre elles : modèle/station, stations entre elles.

6.3.1.2 L'écart-type et le coefficient de variation

L'écart-type est le paramètre de dispersion absolu le plus utilisé du fait de sa précision. La valeur de l'écart-type s'exprime dans l'unité de mesure de la variable étudiée (Vigneron, 1997). Il est intéressant pour comparer des distributions avec la même unité de mesure.

Le coefficient de variation est quant à lui le rapport entre l'écart-type et la moyenne et c'est un paramètre de dispersion relatif : il est généralement exprimé en % et permet la comparaison de séries de données n'ayant pas la même unité de mesure.

6.3.1.3 La fréquence

Une fréquence est par définition un effectif relatif (Groupe Chadule, 1997). Une fréquence s'exprime avec un nombre entre 0 et 1 ou en pourcentage. Il s'agit d'un effectif (nombre d'individus ou occurrences) exprimé en pourcentage de l'effectif total.

6.3.1.4 *La moyenne mobile*

La moyenne mobile est une technique statistique permettant de simplifier une chronique en lissant le bruit, l'irrégularité des cycles. « La technique des moyennes mobiles consiste à lisser les irrégularités en associant aux valeurs y_{ti} d'une chronique de nouvelles valeurs z_{ti} qui sont les moyennes arithmétiques d'une valeur originelle y_{ti} et des valeurs qui l'encadrent » (Groupe Chadule, 1997). Des moyennes mobiles pondérées sur cinq ou dix ans sont utilisées pour lisser les chroniques.

6.3.2 Tests statistiques

Des tests statistiques sont requis pour vérifier la relation entre différentes séries de données. Chaque test développé ci-dessous est utilisé dans ce travail de recherche notamment en ce qui concerne la comparaison entre les données thermiques observées des stations du réseau champenois et les données thermiques simulées des sorties de modèles du climat.

6.3.2.1 *Le test de Student*

Le test de Student permet de comparer deux moyennes observées sur deux échantillons, ces deux distributions étant supposées normales et de même variance (Vigneron, 1997). Dans un premier temps le test consiste à calculer une estimation de la variance commune. On peut ensuite calculer le coefficient t par une formule transposée de l'écart réduit. Une fois le coefficient t calculé, le degré de signification de cette valeur se lit dans la table t de Student (Annexe IX) sur la ligne correspondant au nombre de degrés de liberté (ddl). Si la valeur absolue de t calculé est supérieure à la valeur de t critique lu dans la table au risque 5%, les deux moyennes sont significativement différentes.

6.3.2.2 *Le test d'Anderson-Darling*

Le test d'Anderson-Darling est utilisé comme test de Normalité afin de justifier l'utilisation du test non-paramétrique précédent. Ce test (Stephens, 1974) permet de vérifier si une distribution suit une loi Normale. Les valeurs critiques de ce test sont dépendantes de la loi testée. Il s'agit d'un test d'hypothèse. L'hypothèse nulle (H_0 : La distribution suit une loi Normale) est rejetée si le test statistique donne une valeur plus grande que la valeur critique de la table associée.

Ce test est utilisé pour les distributions d'extrêmes froids printaniers et chauds estivaux sur la période de contrôle. Ces distributions ne suivent pas une loi normale et ce de manière statistiquement significative à 5% d'après les résultats du test d'Anderson-Darling, utilisé en préalable à l'utilisation du test non paramétrique suivant dans la démarche statistique utilisée pour qualifier les distributions statistiques des données observées.

6.3.2.3 Le test de Kolmogorov-Smirnov

Le test de Kolmogorov-Smirnov (Siegel et Castellan, 1988 ; Williams, 2001) permet de comparer dans le cadre de ce travail de thèse, les distributions de chaque sortie de modèle à la distribution de la station Reims-Courcy et de déterminer si elles suivent la même loi de manière statistiquement significative (avec $\alpha=5\%$). L'hypothèse nulle (H_0 : les deux distributions suivent une même loi) est rejetée si la valeur critique de la table associée est inférieure à la valeur du test observée sur les données. Ce test est souvent utilisé dans les études sur les extrêmes hydro-climatiques en préalable de la réalisation de loi de Gumbel qui permet de calculer la période de retour d'évènements extrêmes (Kharin et Zwiers, 2000). Dans ce cas, le test permet de déterminer quelle loi des extrêmes est la plus adaptée aux échantillons de données traitées. Il s'agit d'un test d'hypothèse non paramétrique : il n'y a aucune hypothèse sur la distribution sous-jacente des données. Ici, les échantillons étudiés (modèle/station) sont indépendants.

Le test de Kolmogorov-Smirnov convient lorsque les distributions ne sont pas normales, présentent des queues allongées et généralement dissymétriques. Ces caractéristiques sont observées sur les périodes étudiées. Par définition, les extrêmes se produisent très souvent à une résolution spatiale fine d'où la difficulté de les modéliser précisément et l'importance de les traiter dans des études de comparaison modèle/station (Palutikof *et al.*, 1997). Ces phénomènes rares sont souvent, d'un point de vue statistique, en-dessous du 1^{er} décile et au-dessus du 9^{ème} décile (Beniston *et al.*, 2007) des distributions de températures voire même en-dessous du 5^{ème} centile et au-dessus du 95^{ème} centile (Kharin et Zwiers, 2000). Les extrêmes, valeurs à fréquence faible ou de faible amplitude, diminuent graduellement en deux queues (inférieure et supérieure) qui entourent les valeurs à grandes fréquences.

Les extrêmes dommageables pour la vendange en qualité et quantité sont mis en évidence en observant et en comparant, sur la période de contrôle, les distributions statistiques des sorties des modèles à la mesure sur la station de référence aux deux périodes clés identifiées pour la vigne : au moment de l'aléa gélif printanier (avril) et durant la période estivale de maturation des baies.

6.3.3 Statistiques et extrêmes thermiques : lois statistiques des extrêmes

Avant de développer la mise en place de l'application d'une loi des extrêmes sur les données de sorties de modèles régionales et sur les données observées de la station Reims-Courcy, nous justifierons le choix d'une telle démarche et les étapes nécessaires. Les lois des extrêmes sont notamment utilisées en hydrologie pour déterminer la probabilité de retour d'une crue, de fortes précipitations.

6.3.3.1 Définition d'une loi de probabilité

Une loi de probabilité est une formulation mathématique et se distingue des autres lois par le fait qu'elle inclut un certain nombre de paramètres dans sa formulation mathématique. Les paramètres déterminés pour les lois de probabilités sont :

- des paramètres de forme (k) qui peuvent caractériser l'aplatissement, l'asymétrie, etc. Il peut y avoir entre 0 et 2 paramètres de forme,
- des paramètres d'échelles qui caractérisent les variations de la variable X, ce sont généralement les paramètres de dispersion,
- des paramètres de position dits x_0 , qui se situent dans la zone de variation de X.

Souvent, sont utilisées les valeurs centrales de la population ou une des bornes de l'intervalle de variation.

6.3.3.2 Etapas de la démarche

La démarche des hydrologues est utilisée afin d'énoncer des probabilités concernant l'avenir à partir des données passées sur lesquelles la loi de probabilité la plus appropriée est choisie pour établir une prospective à partir des scénarios futurs. Les extrêmes sont caractérisés par leur intensité, leur fréquence et parfois leur durée et on cherche à déterminer la probabilité que l'intensité de -2°C au printemps ou de 35°C en été ne soit pas atteinte ou dépassée. Cette probabilité est appelée fréquence de non-dépassement, probabilité de non-dépassement ou fréquence de non-apparition. Elle est calculée en fonction d'une période de retour de l'évènement extrême, notamment d'un à une dizaine de jours dans cette étude.

Cette démarche suppose généralement plusieurs étapes :

- La sélection des observations en rapport avec le phénomène étudié : ici les températures extrêmes minimales gélives printanières (mars et avril) et maximales estivales (juin, juillet et août), ces données étant largement étudiées avant d'être testées sur ce type de lois de probabilités,
- L'ajustement des distributions statistiques des fréquences étudiées à une loi de probabilité théorique,
- L'utilisation des résultats de l'étape précédente pour énoncer des probabilités concernant l'avenir mais ici, surtout utiliser les scénarios futurs.

6.3.3.3 Prétraitements réalisés

Afin de déterminer les probabilités de non-dépassement des températures extrêmes sur la période de contrôle puis sur la période de simulation future avec des périodes de 1 à une dizaine de jours¹⁹, des lois statistiques dites lois des extrêmes sont utilisées. Les lois des

¹⁹ Les périodes de retour de 1 à 7 jours sont choisies en fonction de la vigne. Un jour extrême peut contribuer au gel ou à l'échaudage. Plus la vigne est sujette à des aléas extrêmes, plus elle peut devenir vulnérable et le risque de dommages augmente. D'autres facteurs tels que l'humidité du bourgeon au printemps entrent en jeu.

valeurs extrêmes (Figure 6.3), régulièrement utilisées, sont la loi de Jenkinson ou loi Généralisée des Valeurs Extrêmes (GEV) et la loi de Gumbel, qui est un cas particulier de la première loi.

La loi de Jenkinson (1955 *in* Lubes et Masson, 1991) résume les trois types de lois possibles : la loi de Fréchet lorsque $k > 0$, la loi de Gumbel lorsque $k = 0$ et la loi de Fréchet lorsque $k < 0$ (Figure 6.3). Les trois lois se distinguent par leur courbure sur le papier fonctionnel de Gumbel (Lubes et Masson, 1991).

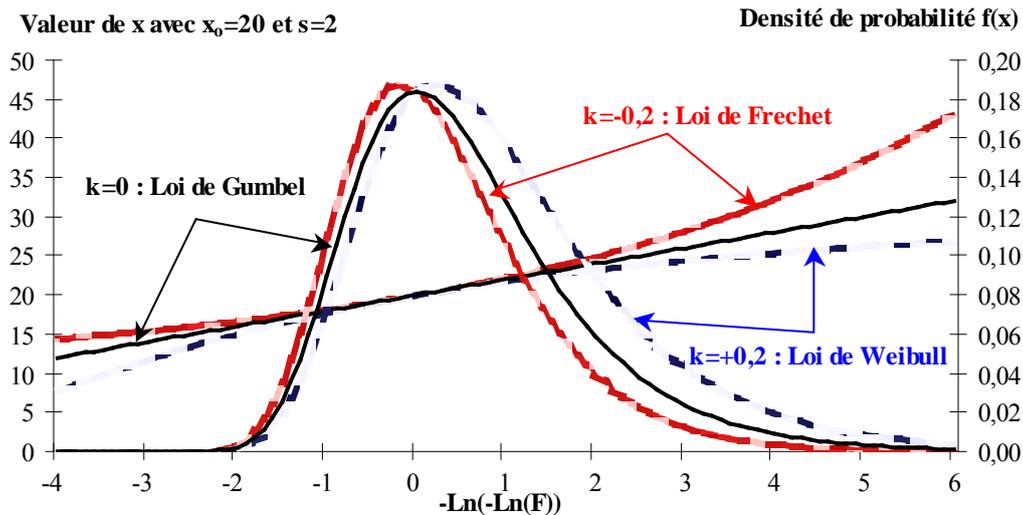


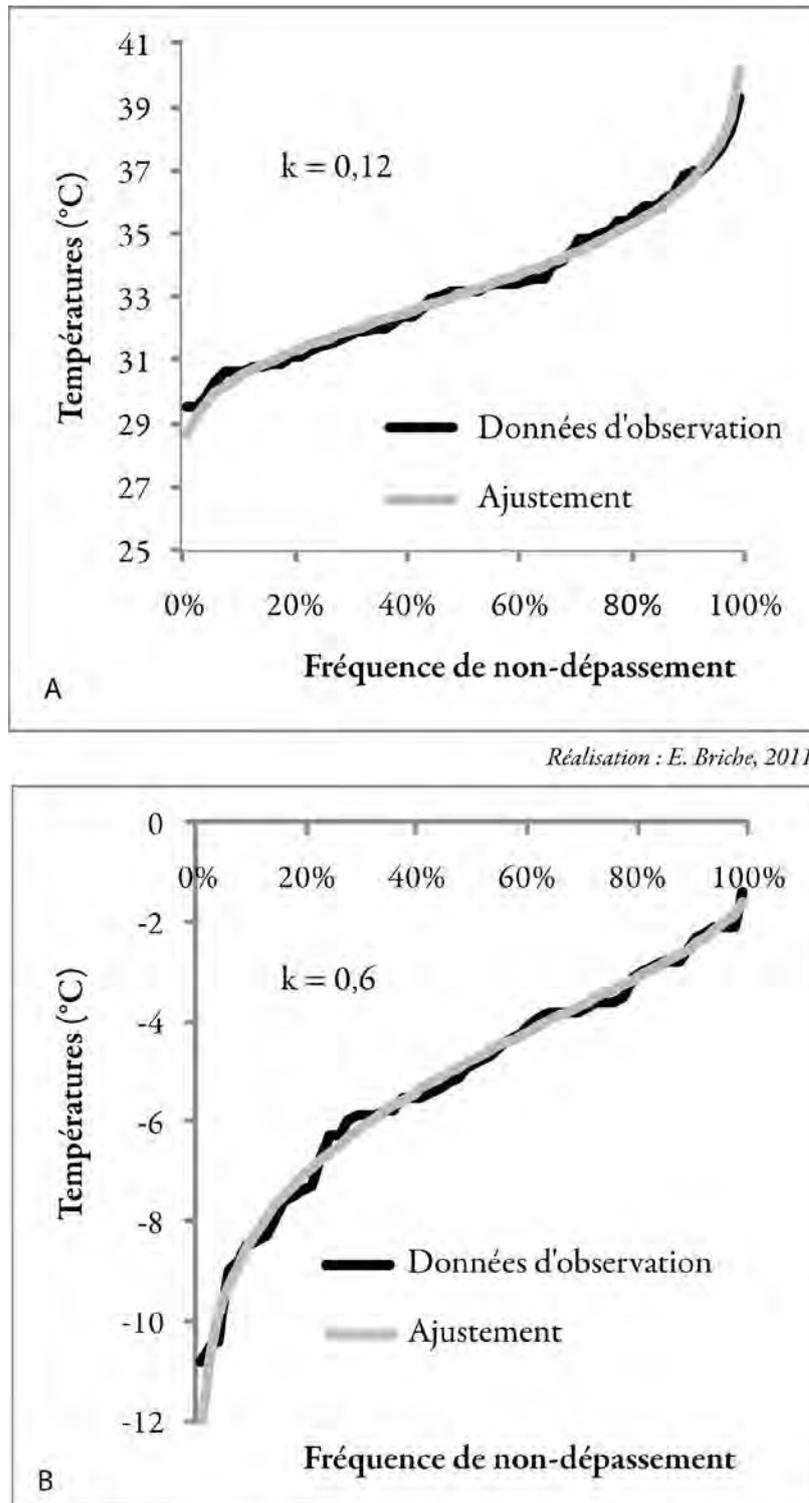
Figure 6.3 : Représentation graphique des lois des extrêmes (Source : Laborde Jean-Pierre, 2009)

Pour déterminer la loi la plus adaptée, on doit déterminer le signe de k . Des simulations ont donc été effectuées avec la série temporelle la plus longue possible, Reims-Courcy de 1947 à 2010, afin de déterminer le paramètre de forme k pour les extrêmes chauds estivaux puis pour les extrêmes froids printaniers.

Une simulation aléatoire²⁰ sur 1000 ans est réalisée afin de déterminer quelle loi de probabilité est la plus adaptée aux données de Reims-Courcy : on cherche à rejeter l'hypothèse d'un ajustement à une loi de Gumbel. On obtient ainsi (Figure 6.4) :

- k estimé = 0,12 (Figure 6.4, A) pour les températures extrêmes chaudes estivales avec un intervalle de confiance à 90% : $-0,16 < k \text{ estimé} < 0,17$. Si la population suit une loi de Gumbel dans la réalité, k est différent de 0 donc l'hypothèse que la série de référence suit une loi de GEV est acceptée.
- k estimé = 0,6 (Figure 6.4, B) pour les températures extrêmes froides printanières. Pour 1000 tirages aléatoires, il n'y en a eu aucun de négatif, l'intervalle de confiance à 90% est de $0,38 < k \text{ estimé} < 0,76$. k est positif de manière indiscutable, la loi de GEV est donc acceptée.

²⁰ La simulation est réalisée pour chaque hypothèse : les échantillons suivent une loi de GEV et les échantillons suivent une loi de Gumbel.



Réalisation : E. Briche, 2011

Figure 6.4 : Ajustement des données de la station de Reims-Courcy au modèle issu de la loi de GEV pour une période de retour de 1 jour pour les extrêmes estivaux (A) et les extrêmes printaniers (B).

Les distributions statistiques suivent une loi de GEV et non une loi de Gumbel avec l'intervalle de confiance à 90%.

La méthode des moments pondérés (Lubes et Masson, 1991) a été utilisée pour définir les paramètres sur la longue série de données de Reims-Courcy qui sert de référence pour les simulations (Annexe X).

Avec les k obtenus, on trace les courbes d'ajustement de GEV pour les températures journalières minimales de mars et avril et les températures maximales journalières de juin, juillet, août de 1950 à 2000 pour les quatre points de grille et la série Reims-Courcy. Ces calculs nous permettent d'obtenir les fréquences²¹ des températures extrêmes. Ces fréquences sont calculées pour le futur sur les trois scénarios en gardant les paramètres de la loi de GEV préalablement définis sur la longue série de Reims-Courcy.

6.4 Les SIG : de la cartographie à la modélisation spatiale

Le système d'information géographique est utilisé dans le cadre de ce travail notamment dans la dernière partie sur la modélisation à échelles fines afin de restituer les résultats du modèle à méso-échelle RAMS. L'intérêt est de pouvoir gérer une base de données conséquente, de la hiérarchiser, d'en extraire les informations les plus pertinentes en rapport avec la problématique posée et surtout de localiser les phénomènes étudiés.

Dans ce travail, le SIG permet de réaliser des traitements spatiaux avec des croisements d'information spatiale selon une approche multi-couches.

6.4.1 La cartographie ponctuelle

La cartographie ponctuelle est utilisée pour mettre en évidence les différences thermiques entre les stations du réseau de la Marne lors de certaines dates mais aussi pour comparer les températures observées aux champs de températures simulées par le modèle à méso-échelle RAMS.

Les méthodes de discrétisation sont choisies selon la forme des distributions statistiques des séries de données à cartographier et sont les plus couramment utilisées en cartographie en implantations ponctuelles telle que les méthodes de discrétisations en amplitudes égales, en effectifs égaux...

6.4.2 Le modèle conceptuel de données pour obtenir la modélisation des températures

Un modèle conceptuel de données a été mis en place notamment pour la phase de traitement des données à méso-échelle RAMS dans le but :

²¹ Les fréquences sont obtenues à partir de la formule empirique de Hazen avec $F = (r-0.5)/n$ avec r le rang de l'échantillon et n la taille de l'échantillon.

- de définir les étapes pour l'obtention d'un rendu final mettant en évidence les phénomènes étudiés ;
- d'automatiser la chaîne des géo-traitements à partir d'un modèle builder sous le logiciel Arcgis.

L'analyse spatiale implique l'exécution de plusieurs opérations, qui doivent être effectuées sur chaque fichier notamment pour les différentes dates clés choisies pour RAMS.

Le modèle builder est un modèle de traitement permettant d'automatiser les manipulations SIG. Une ou plusieurs opération ou tâche peuvent être réalisées en incluant les intrants qui sont les données spatiales existantes avant l'exécution du modèle, les opérations qui sont les traitements à appliquer et enfin les extrants qui sont les données spatiales générées par l'opération. Le modèle (Annexe XI) a permis à partir d'un fichier .txt contenant les latitudes, longitudes et les températures de la zone d'étude dégradées en points de grille à 200 m de résolution, de géolocaliser les données, de les interpoler afin d'obtenir un champ de températures puis de réaliser un découpage pour cibler la zone d'étude.

L'interpolation (Dobesch *et al.*, 2008) est ici réalisée « en plus proche voisin » car il s'agit juste de passer des données ponctuelles à des données lissées à partir d'un fichier ascII où la maille est régulière, c'est-à-dire avec un point de température tous les 200 m. Ces données en fichier ascII sont issues de champs de températures désagrégés à partir du modèle à méso-échelle RAMS. L'utilisation de la méthode « en plus proche voisin » est utilisée par les modélisateurs du climat afin de conserver la dynamique du champ original (www.cerfacs.fr). La valeur de chaque cellule de la surface est égale à la valeur de la donnée située le plus près. La taille et la forme des polygones ne dépendent donc que de la distribution des points d'échantillonnage.

Ce modèle est ensuite appliqué à tous les fichiers horaires disponibles sur les dates clés de 2003 utilisées pour la modélisation à méso-échelle.

CONCLUSION DU CHAPITRE 6

La méthodologie (Figure 6.5) s'appuie sur l'articulation des échelles spatiales et temporelles étudiées. A chaque modèle utilisé, une base de données du vignoble de la Marne adaptée à la fois sur l'échelle temporelle et l'échelle spatiale. De plus, le modèle à méso-échelle RAMS est forcé à ses bornes par le modèle ARPEGE-Climat pour l'obtention des simulations futures d'où la nécessité de bien valider ces données thermiques à l'échelle régionale et surtout d'en quantifier les biais, notamment en ce qui concerne les extrêmes thermiques. Même si ceux-ci sont difficilement modélisables et de ce fait, peu étudiés dans les études d'impacts du changement climatique (Seguin, 2010), ils constituent un enjeu crucial dans le cadre de cette étude ciblée sur la viticulture champenoise qui pourrait fortement devenir tributaire des fréquences d'aléas extrêmes thermiques dommageables pour la vigne dans le futur d'où l'importance d'en donner une prospective même avec des marges d'incertitudes.

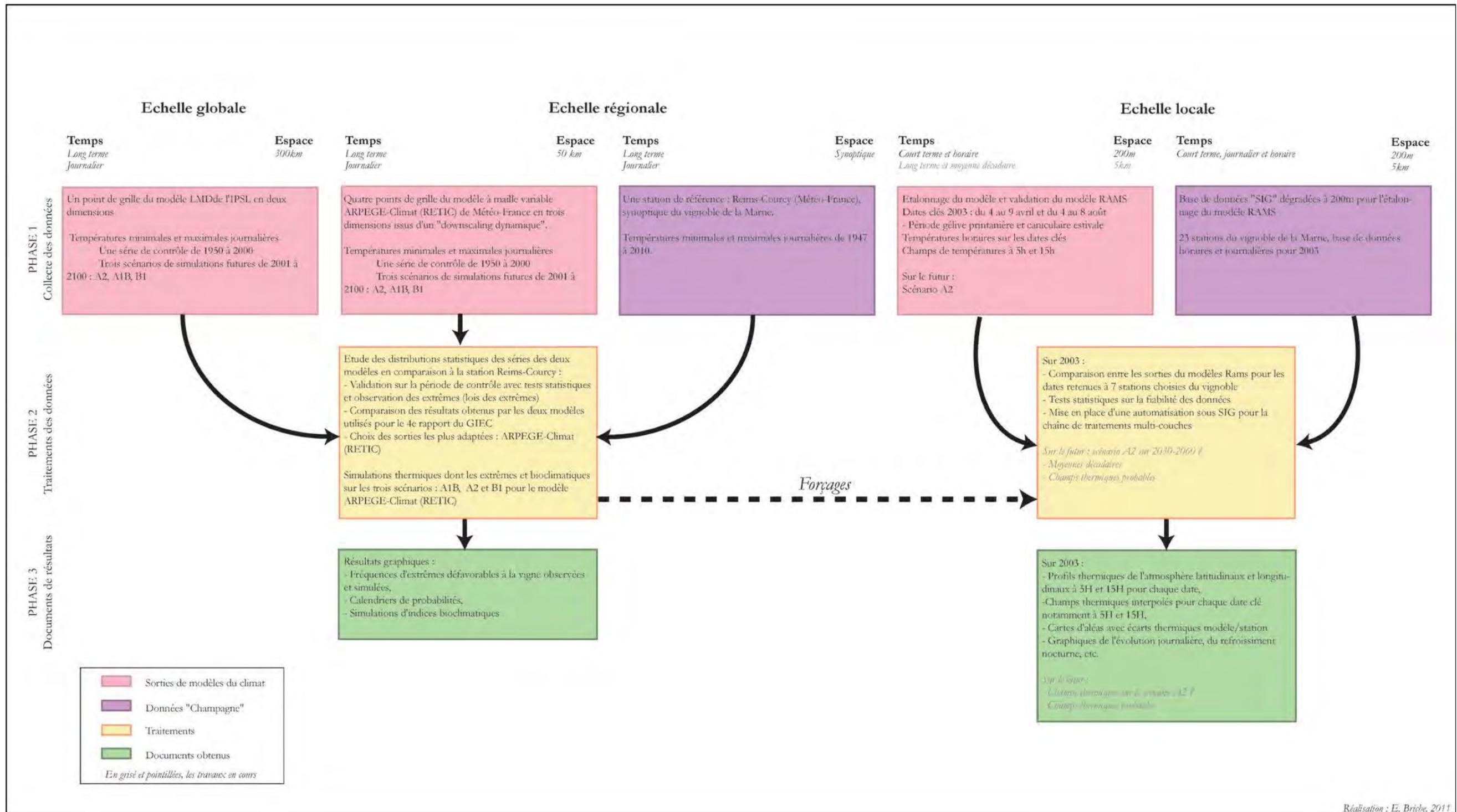


Figure 6.5 : Schéma récapitulatif de la méthodologie de la thèse

Troisième partie

Les sorties régionales de modèles du climat : Du climat passé à la prospective climatique et bioclimatique future au sein du vignoble champenois

Cette première partie de résultats montrent comment s'articulent les modèles de circulation générale du climat (MCG) dans la réflexion sur la modélisation du climat à l'échelle du vignoble champenois. Les modèles sont les seuls outils actuels capables d'anticiper les conditions thermiques futures ; la température étant le principal facteur du bon déroulement du cycle végétatif de la vigne. Cet outil, en dépit des marges d'incertitude inhérentes à la modélisation numérique, apporte une prospective à l'échelle d'une région viticole en tenant compte des évolutions socio-économiques possibles du monde. Cette prospective permet d'anticiper les conditions bioclimatiques, thermiques extrêmes futures afin de mieux appréhender les changements possibles au sein du vignoble.

Suite à une comparaison de sorties de MCG dont l'un à maille variable, cette partie montrera que le modèle ARPEGE-Climat (RETIC) à 50 km de résolution s'avère plus adapté que le modèle du LMD à 300 km dans le cadre d'une étude d'impacts du changement climatique à l'échelle d'une région viticole telle que la Champagne.

Ce modèle est ensuite testé, validé et critiqué par comparaison avec la station synoptique (Reims-Courcy) du vignoble, considéré comme les conditions thermiques à l'échelle de la région viticole et permet ensuite, en tenant compte des biais du modèle, de donner une vision prospective des conditions thermiques de la Champagne.

Chapitre 7

Comparaison thermique entre les observations et les simulations de 1950 à 2100 pour les modèles numériques LMD et ARPEGE-Climat (RETIC)

Ce chapitre présente l'analyse des résultats obtenus avec les sorties de MCG : l'état de l'art et la méthodologie ont montré que certains modèles sont mieux adaptés à l'échelle régionale notamment en raison de leur résolution.

Une inter-comparaison entre les deux modèles français et la station synoptique du vignoble Reims-Courcy est réalisée afin de déterminer les résultats les plus probants pour une modélisation du changement climatique à l'échelle du vignoble de Champagne. Ces sorties de modèles du climat sont issues de Météo-France – CNRM (ARPEGE-Climat) et de l'Institut Pierre Simon Laplace (modèle dit « LMD » du Laboratoire de Météorologie Dynamique). Elles sont étudiées à différentes échelles temporelles : des moyennes annuelles aux extrêmes thermiques journaliers de moments clés pour la vigne tels que pendant le débourrement ou la véraison sur une période dite de contrôle 1950-2000 puis sur les trois scénarios de simulations futures les plus couramment utilisés dans les études de prospective future : les scénarios A1B, B1 et A2.

7.1 Comparaison des températures des sorties de modèles du LMD et ARPEGE-Climat (RETIC) avec la station Reims-Courcy

Pour savoir si les sorties de modèles thermiques peuvent être directement utilisées dans les études d'impacts, des comparaisons statistiques avec des données observées (Reims-Courcy) sont effectuées. Les formes de distributions des données thermiques annuelles sont comparées notamment durant le cycle végétatif de la vigne d'avril à septembre afin de valider les sorties de modèles.

7.1.1 Comparaison thermique entre les simulations des deux modèles et les observations de la station Reims-Courcy sur les températures moyennes annuelles de 1950 à 2000

La période de contrôle permet de tester les séries simulées des modèles : le point « D²² » pour le modèle ARPEGE-Climat (RETIC) et le point « LMD » pour le modèle de l'IPSL avec les données collectées de la station Reims-Courcy. Les données de températures de l'air sous abri de cette station sont utilisées pour la comparaison avec les sorties des modèles. Cette série dispose d'une longue série dont l'homogénéité a été testée au préalable (Pettitt, 1979) sur la période dite de « contrôle ». Une rupture détectée en 1987 pour la station Reims-Courcy (Briche *et al.*, 2009a) sur les températures moyennes annuelles. Cette rupture est statistiquement significative ($\alpha = 5\%$) d'origine climatique car elle ne résulte pas d'un changement de capteur ou d'un déplacement de la station ; elle est observée sur un grand nombre de stations météorologiques françaises (Moisselin *et al.*, 2002). Le même test est réalisé sur les deux modèles : une rupture est détectée en 1984 pour ARPEGE-Climat (RETIC).

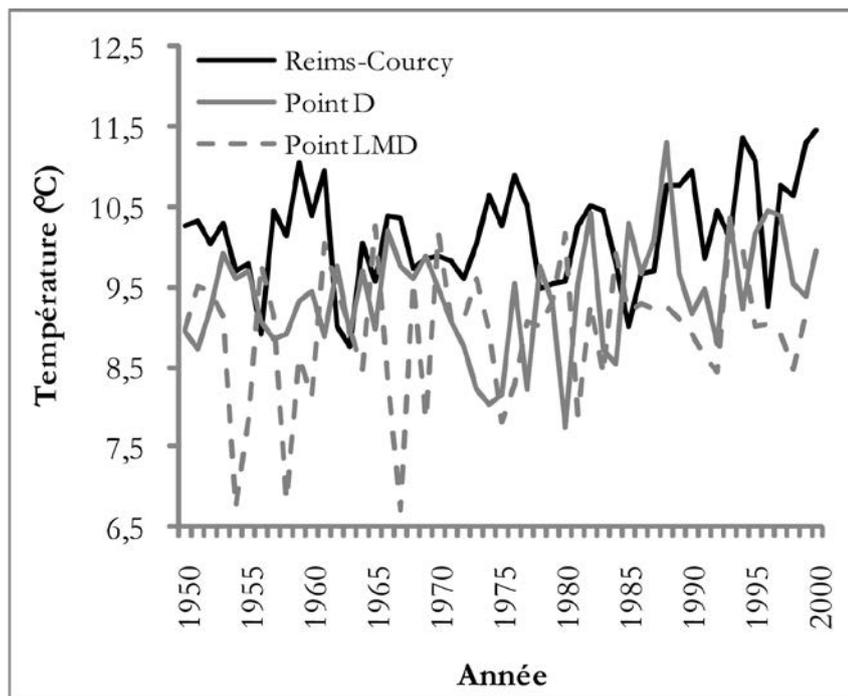


Figure 7.1 : Température moyenne annuelle de 1950 à 2000 pour le point de grille LMD, le point D et la station Reims-Courcy (Données : IPSL et Météo-France)

Le graphique avec les températures moyennes annuelles (Figure 7.1) montre que la courbe du LMD est plus froide que celles de la station Reims-Courcy et du point D sur la période de contrôle de 1950 à 2000. Si l'on compare les moyennes annuelles sur la période,

²² Le point de grille ARPEGE-Climat (RETIC) choisi pour ce chapitre de comparaison avec le point de grille LMD est celui au centre du vignoble de la Marne appelé le « point D ».

celle du LMD est de 8,9°C, celle du point D de 9,4°C tandis que celle de la station est de 10,2°C. Le point de grille du LMD présente un biais froid d'environ 1°C tandis que celui d'ARPEGE-Climat (RETIC) présente un biais autour de 0,5°C, moins évident que pour le modèle LMD et d'environ 0,5°C. En effet, le modèle ARPEGE-Climat simule mieux les températures aux moyennes latitudes que le modèle LMD (Dufresne *et al.*, 2006 ; Dufresne et Royer, 2007). Sur le graphique, la courbe du point D semble mieux reproduire la distribution de celle de la station : ceci est dû également à la variabilité interannuelle plus forte du point LMD avec 0,8 (écart-type) de dispersion autour de la moyenne contre 0,6 pour la station ; cette forte dispersion est bien marquée sur le graphique de 1950 à 1970 avec des années où la température moyenne annuelle est très basse pour le LMD, d'environ 7°C.

7.1.2 Comparaison thermique entre les simulations des deux modèles et les observations de la station Reims-Courcy sur les températures moyennes d'avril à septembre de 1950 à 2000

La comparaison entre les deux modèles et la station de référence est également réalisée sur les températures moyennes annuelles d'avril à septembre sur la période de contrôle (Figure 7.2).

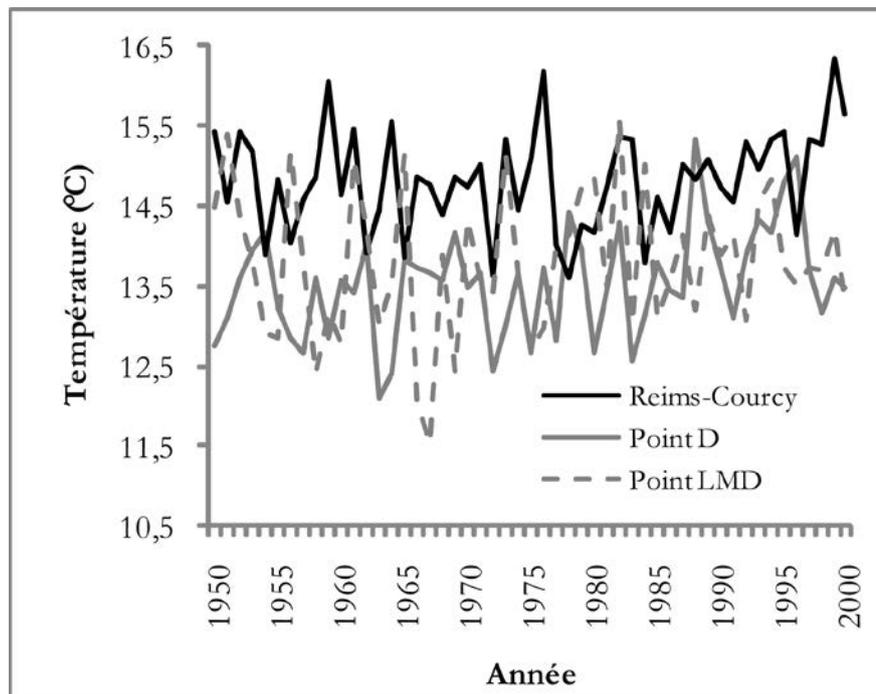


Figure 7.2 : Température moyenne annuelle d'avril à septembre de 1950 à 2000 pour la station Reims-Courcy, pour le point de grille LMD et le point D (Données : IPSL et Météo-France)

Sur les températures moyennes annuelles durant le cycle végétatif de la vigne (avril à septembre), le biais froid est également constaté avec pour la station Reims-Courcy, une moyenne de 14,8°C et de 13,5°C pour le point D et de 13,8°C pour LMD. Un biais froid est

également constaté d'environ 1°C pour le modèle LMD, il est moins évident pour le modèle ARPEGE-Climat (RETIC). La variabilité interannuelle est à nouveau plus forte pour le LMD (écart-type de 0,8) tandis que celle d'ARPEGE-Climat (écart-type de 0,7) est beaucoup plus proche que celle de la station (écart-type de 0,6).

Ces sorties sont étudiées à une échelle temporelle plus fine afin de comparer les deux modèles à la réalité observée sur Reims-Courcy sur des questions qui touchent à la sensibilité de la vigne. En effet, ce sont les températures extrêmes, qui, lorsqu'elles dépassent certains seuils peuvent être défavorables au bon développement de la vigne durant son cycle végétatif (Seguin, 2010). Cette question est encore peu développée dans les études d'impacts du changement climatique mais nécessite d'être soulevée afin de donner une fourchette d'estimation de ces extrêmes par les modèles.

7.2 Comparaison des sorties thermiques journalières extrêmes entre les sorties de modèles ARPEGE-Climat (RETIC) et LMD avec la station Reims-Courcy

On compare donc les séries de températures minimales et maximales journalières issues du point de grille ARPEGE-Climat, de celui du LMD et de la station de référence du vignoble. La période de contrôle (1950-2000) permet de mettre en évidence les biais des distributions statistiques des sorties des modèles en termes d'estimation de fréquences d'extrêmes.

7.2.1 Des aléas gélifs printaniers redoutés

Les allures des distributions des sorties de modèles et de Reims-Courcy (Figure 7.3) sont assez similaires : elles ont une forme plutôt gaussienne ; pourtant celles des modèles ne suivent pas la même distribution que la station de manière statistiquement significative (Kolmogorov-Smirnov à 5%). La moyenne des températures journalières d'avril de Reims-Courcy sur la période de contrôle est de 3,8°C ; elle est plus chaude de 0,6°C (LMD) à 1,2°C (point D) par rapport aux sorties de modèles. Les sorties de modèles présentent un biais froid évident corroboré par les queues inférieures des distributions qui mettent en valeur les extrêmes gélifs printaniers (<-2°C) : le minimum de Reims-Courcy est de -5,5°C contre -9,2°C (point D) et -7,5°C (LMD). Les sorties de modèles sur la queue inférieure sont entre 3,7°C (point D) et 2°C (LMD) plus froides que la station de référence à proximité du vignoble considérée elle-même comme froide par rapport à l'ensemble du vignoble (Madelin, 2004) lors des gelées printanières. Les distributions montrent que les fréquences égales à -2°C font partie des grandes fréquences : les courbes s'affinent et les queues inférieures apparaissent

autour de -5°C (Briche *et al.*, 2010). En avril, les fréquences de températures inférieures et égales au seuil de -2°C sont presque triplées pour le point de grille D (14 % pour chaque point en cumul) par rapport à la station Reims-Courcy (5% en cumul) avec un biais froid moyen de 2°C . Les fréquences égales à -2°C sont considérées comme extrêmes pour la vigne car elles suscitent le gel agronomique même si elles ne font pas partie des extrêmes statistiques inférieures au 5^{ème} centile.

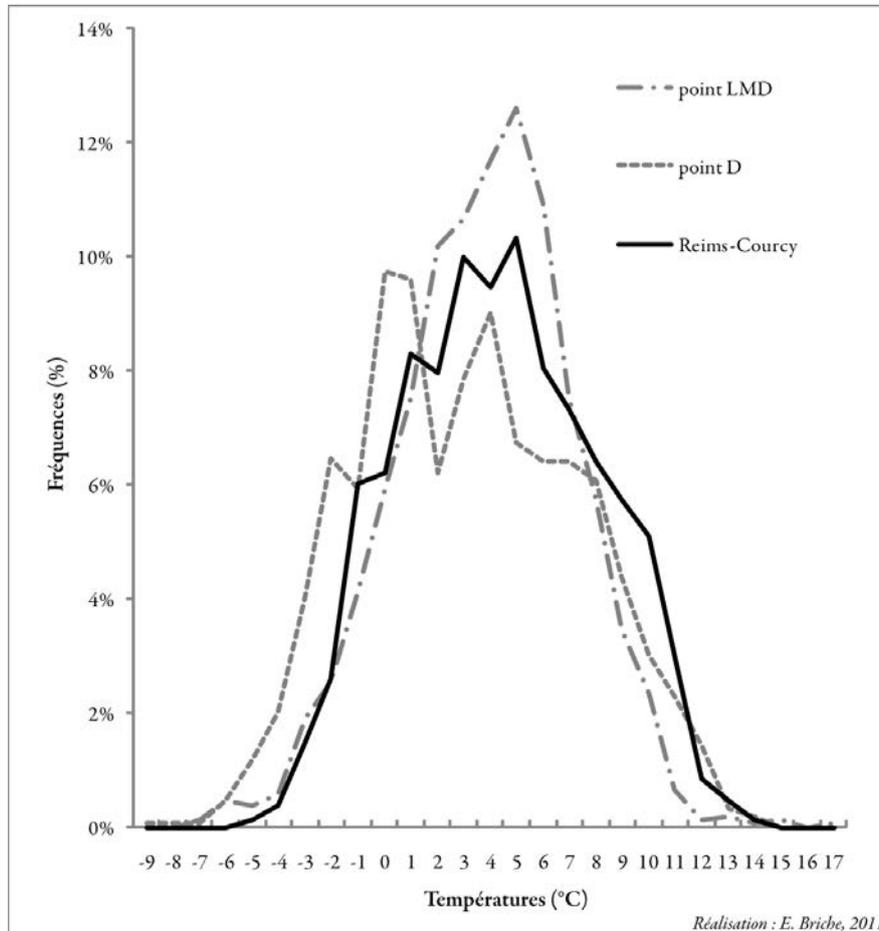


Figure 7.3 : Distributions statistiques des températures minimales journalières en avril pour Reims-Courcy, les points de grille LMD et D de 1950 à 2000 (Données : CIVC, LMD et Météo-France – CNRM)

7.2.2 Des extrêmes estivaux dommageables peu fréquents

Le test de Kolmogorov-Smirnov appliqué sur montre que les distributions statistiques des sorties de modèles, qui ont des allures assez similaires avec un décalage plus prononcé vers les températures maximales les plus élevées pour la courbe LMD, ne suivent pas les mêmes distributions que la station Reims-Courcy (Figure 7.4) de manière statistiquement significative à 5%.

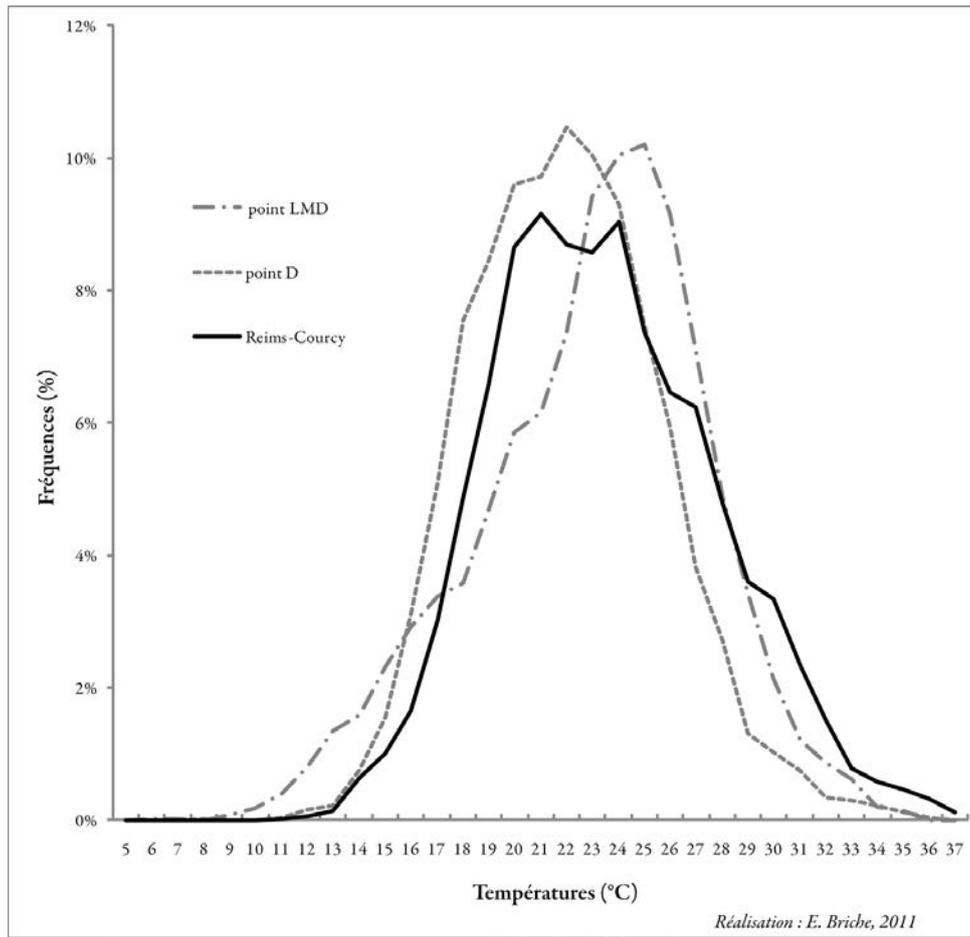


Figure 7.4 : Distributions statistiques des températures maximales journalières en juin, juillet et août pour Reims-Courcy, les points de grille LMD et D de 1950 à 2000 (Données : CIVC, LMD et Météo-France – CNRM).

Sur les queues supérieures de distributions, le maximum de la station Reims-Courcy est de 37,7°C contre 34,8°C pour le modèle LMD et 36,7°C pour le point D : un biais froid de 1°C pour le modèle ARPEGE-Climat et de 3°C pour le modèle LMD est observé sur les extrêmes chauds estivaux. En termes de fréquences par rapport au seuil des 35°C, les températures extrêmes pour le modèle ARPEGE-Climat cumulent 0,15% (point D) d'extrêmes supérieurs ou égaux à 35°C, 0,13% pour le point de grille LMD contre 0,87% pour Reims-Courcy : les sorties de modèles présentent un biais froid en termes d'extrêmes estivaux. Ce biais froid est également constaté sur les queues inférieures des distributions des sorties de modèles : le minimum de Reims-Courcy est de 10,5°C tandis que celui du point LMD est de 5,8°C avec un biais de 4,7°C et le minimum du point de grille du modèle ARPEGE-Climat est de 8°C avec un biais de 2,5°C.

7.2.3 Synthèse critique

Les extrêmes tels que les gelées printanières sont le résultat d'une combinaison de paramètres météorologiques difficiles à modéliser qui résultent de divers processus (advectif,

radiatif ou combinés) et qui sont fortement tributaires de la couche nuageuse. Les modèles climatiques actuellement disponibles ne disposent pas d'une résolution spatio-temporelle suffisamment fine pour fournir des simulations précises des extrêmes. Les résultats obtenus lors de cette comparaison corroborent les conclusions en termes d'extrêmes : les modèles ne simulent pas encore correctement les extrêmes car leur distribution spatiale se rapproche moins de la réalité (Terray et Braconnot, 2007), notamment parce que sur cette étude ; les extrêmes simulés par les modèles sont ceux de mailles à échelle nationale et régionale, beaucoup plus larges que le climat de la région viticole que la station synoptique représente.

En effet, les différences entre les données simulées représentatives de mailles de 50 km ou 300 km de côté et les données ponctuelles d'une station de référence font partie des marges d'incertitude de ce type d'étude : une maille simplifie les paramètres spatiaux pris en compte par la station retenue. Dans ce contexte, le modèle ARPEGE-Climat (RETIC), dédié aux études d'impacts du changement climatique aux échelles régionales de la France semble plus adapté à l'étude sur le vignoble marnais et le biais froid peut être en partie corrigé par une prise en compte de l'altitude. Des données désagrégées du type SAFRAN à 8 km de résolution et au pas de temps horaire (Pagé, 2008) pourraient mieux correspondre à ce type d'étude ou encore l'utilisation d'un MCR tel que RAMS peut permettre la désagrégation des données à l'échelle d'un coteau viticole afin de mieux prendre en compte les caractéristiques locales tels que la topographie.

Les deux modèles présentent des biais froids évidents, plus intenses sur la distribution des extrêmes thermiques journaliers pendant les périodes où la vigne est sensible lors de son développement végétatif. Cette sous-estimation est plus faible pour le modèle ARPEGE-Climat (RETIC), plus adapté à l'étude du vignoble champenois, du fait de sa résolution régionale à 50 km mais aussi car il prend mieux en compte la topographie du fait qu'il soit tridimensionnel. Ces biais, pris en compte, font partie des marges d'incertitude de la modélisation du climat, seuls outils disponibles pour anticiper les conditions thermiques futures au sein du vignoble abordées dans cette dernière partie.

Il s'agit de voir si les fréquences d'aléas extrêmes vont augmenter dans le futur. Conformément aux conclusions du GIEC, la fréquence des extrêmes chauds estivaux dans le futur devrait augmenter tandis que les extrêmes froids d'avril, au moment du débourrement, devraient diminuer. Cependant, dans un contexte de changement climatique, le débourrement pourrait être éventuellement plus précoce et des extrêmes froids printaniers en mars pourraient provoquer un gel accru des bourgeons. Des fréquences plus élevées de ces extrêmes, auxquels la vigne est sensible lors de son cycle végétatif, pourraient modifier les conditions thermiques et les rendements du vignoble marnais.

7.3 Prospective sur les températures de 2001 à 2100 pour les deux modèles retenus

La prospective future donne un aperçu du climat futur, cet aperçu traite de la première décennie commune entre données observées en Champagne du XXI^{ème} siècle sur la station de référence et données simulées sur les trois scénarios futurs pour établir la valeur de ces prévisions socio-économiques (GIEC, 2007). La période complète disponible est ensuite étudiée par décennie.

7.3.1 Comparaison modèles / station sur les trois scénarios sur la période 2001-2010

La Figure 7.5 montre une comparaison sur les températures minimales et maximales moyennes annuelles sur 2001-2010. Sur les températures minimales, la courbe de Reims-Courcy est plus chaude avec des températures en moyenne de 6,6°C tandis que les trois scénarios confondus ont une moyenne de 5,4°C, c'est-à-dire d'environ 1°C plus froid comme sur la période de contrôle 1950-2000 pour le modèle ARPEGE-Climat (RETIC). Par contre, pour le modèle LMD, plus froid sur la période de contrôle qu'ARPEGE-Climat, est sur les températures moyennes annuelles minimales plus proches de la station Reims-Courcy notamment avec les scénarios A2 et B1 donnant des températures moyennes sur la période étudiée de 2001 à 2010 égales à celle de Reims-Courcy (6,6°C). Sur les températures maximales, un biais froid est constaté pour les deux modèles français étudiés ; ce biais est plus prononcé pour le modèle LMD d'environ 2,5°C pour le scénario A1B à 2°C pour les scénarios B1 et A2. Pour le modèle ARPEGE-Climat (RETIC), ce biais est d'environ 1°C à 1,5°C selon le scénario utilisé.

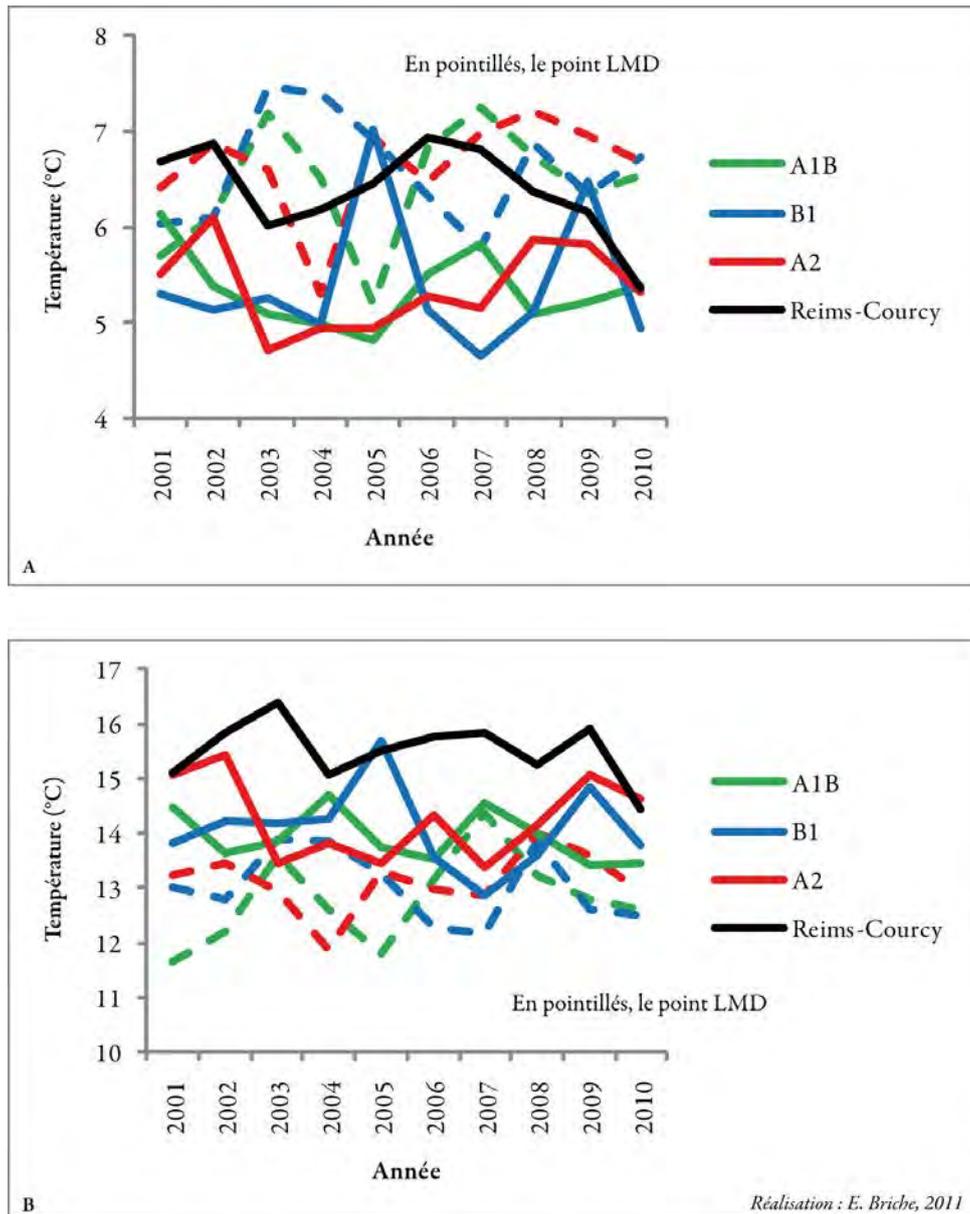


Figure 7.5 : Températures moyennes minimales (A) et maximales (B) annuelles sur 2001-2010 pour Reims-Courcy, les trois scénarios simulés pour le point LMD et le point D au centre du vignoble (Données Météo-France – CNRM, IPSL- LMD et CIVC)

Les scénarios futurs présentent également un biais froid sur la période connue par rapport à la station Reims-Courcy, du même ordre que sur les températures moyennes annuelles de la période de contrôle pour le modèle ARPEGE-Climat (RETIC). Pour le modèle LMD, le biais varie selon s'il s'agit des températures maximales ou minimales moyennes annuelles. Ces sorties futures sont étudiées à une échelle plus fine afin d'anticiper la fréquence des aléas extrêmes auxquels la vigne est particulièrement soumise et sensible.

7.3.2 Comparaison des simulations futures des extrêmes thermiques journaliers de 2001 à 2100

Les scénarios futurs permettent d'obtenir un aperçu de l'évolution des extrêmes climatiques, en tenant compte des biais inhérents aux sorties de modèles et des marges d'incertitude, au sein du vignoble afin de pouvoir anticiper les conséquences d'une nouvelle donne climatique et surtout aider la profession viticole à s'adapter à des événements extrêmes probablement plus marqués et plus fréquents. Ces extrêmes sont analysés par décennie afin de lisser la forte variabilité interannuelle que produisent les deux modèles sur la période 2001-2100.

7.3.2.1 *Extrêmes froids printaniers probables*

Les fréquences (Figure 7.6.) simulées pour les extrêmes froids d'avril futurs présentent des tendances générales à la baisse pour les deux modèles cependant les fréquences sont beaucoup plus faibles (autour de 3% en moyenne) pour le LMD que pour le modèle ARPEGE-Climat (autour de 6% en moyenne), ce qui corrobore sur la période future, l'accentuation dans la distribution statistique des températures gélives printanières très froides pour le modèle ARPEGE-Climat, observée sur la période 1950-2000 (Figure 7.3). Pour le modèle ARPEGE-Climat, la baisse la plus élevée sur la période future est observée pour le scénario le plus chaud (A2) et la moins importante pour le scénario B1. Les fréquences futures prévues par le modèle LMD présentent une baisse sur la période mais cette fois le scénario A1B a la diminution la plus faible. Des baisses importantes des extrêmes froids printaniers signifient que le vignoble marnais pourrait être moins soumis dans le futur à l'aléa gélif en avril ; cependant, la hausse des températures pourrait favoriser un débourrement plus précoce dans le temps, en l'avançant en mars. Pour ce mois, le modèle ARPEGE-Climat (RETIC) annonce une légère hausse des fréquences d'aléas gélifs pour le scénario B1, tandis que l'on remarque cette même caractéristique pour le scénario A2 du LMD (Annexe XII).

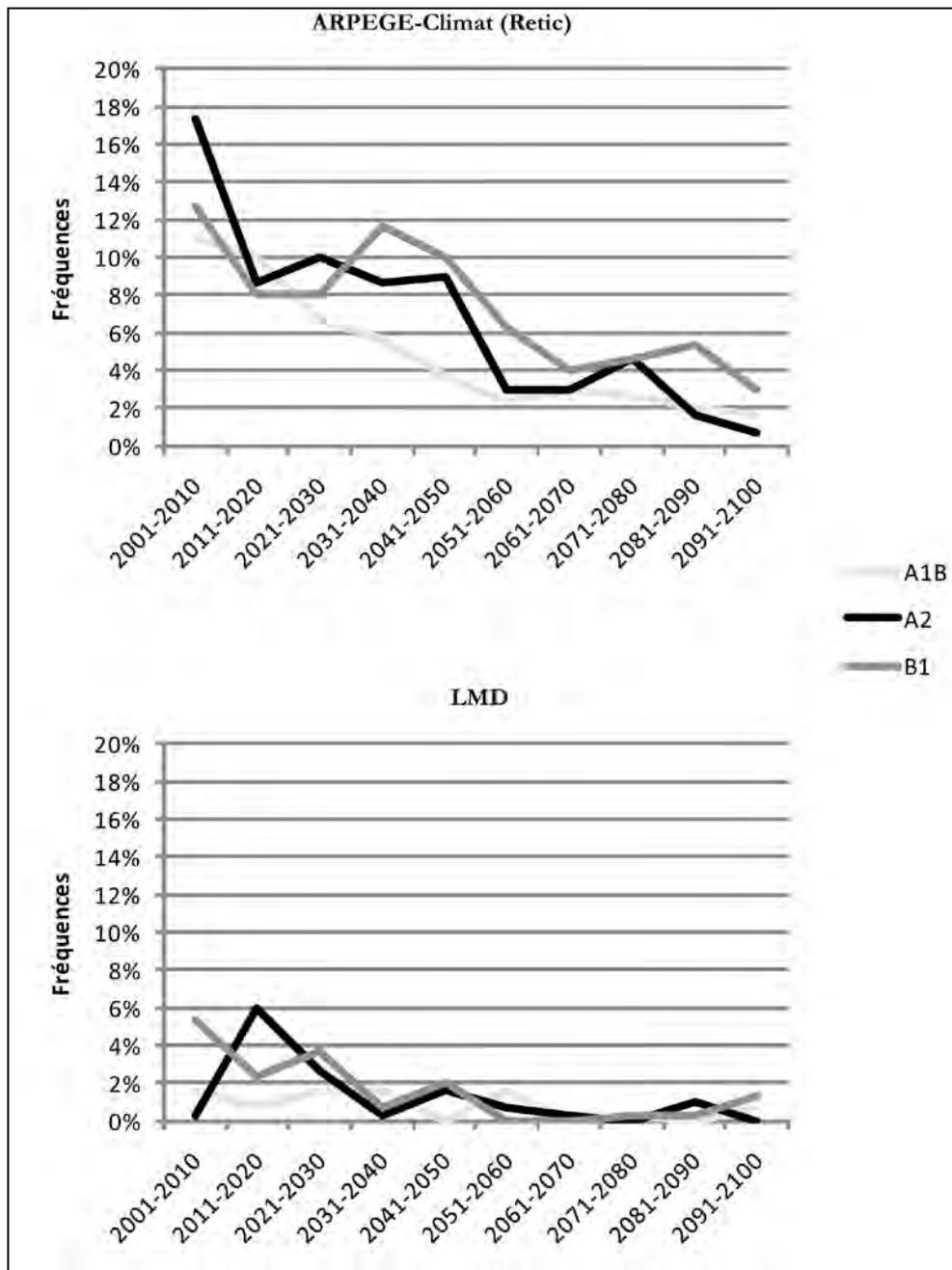


Figure 7.6 : Evolution décennale future des extrêmes printaniers (avril) inférieurs ou égaux à -2°C de 2001 à 2100 pour les deux modèles étudiés (point D ARPEGE-Climat et point LMD) et pour les trois scénarios de simulations (Données : Météo-France -CNRM ; IPSL-LMD in Briche *et al.*, 2010)

En effet, le gel peut être fréquent entre fin mars et début mai. Le réchauffement climatique observé influe sur les stades phénologiques : en Champagne, la précocité de la floraison est avérée. Dans le futur, les jeunes bourgeons pourraient être soumis à des aléas de gel plus fréquents à la fois en mars (Annexe XII) si la vigne débourre plutôt mais également au moment de la floraison où quelques aléas de gel sont encore visibles en mai. Cet aléa gélif inquiète les viticulteurs notamment en ce qui concerne les cépages précoces tels que le Chardonnay en Champagne : afin de le rendre plus résistant au gel, des apports en potassium

et phosphore pourront être réalisés (A.V.C., 2010). La température joue ici un rôle seuil en étant défavorable au développement de la vigne lors des aléas de gel pluriannuels mais également un rôle « cumulatif » en fragilisant le cep de vigne du fait des impacts répétés des contraintes climatiques : en effet, le gel peut provoquer des lésions qui favorisent l'apparition de maladies, qui parfois s'installent sur le cep.

7.3.2.2 Extrêmes chauds estivaux probables

Les simulations (Figure 7.7) des scénarios A2 et A1B du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) prévoient, sur la période future, des hausses des extrêmes estivaux plus importantes que pour le modèle LMD (Briche *et al.*, 2010). Pour le scénario B1, le plus optimiste, les fréquences prévues par les deux modèles sont très proches jusqu'à la décennie 2071-2080 avec une hausse rapide pour le modèle ARPEGE-Climat (RETIC). Le modèle du LMD prévoit des extrêmes estivaux beaucoup moins fréquemment (environ 2,5% en moyenne) que le modèle ARPEGE-Climat dans le futur (environ 3,5% en moyenne).

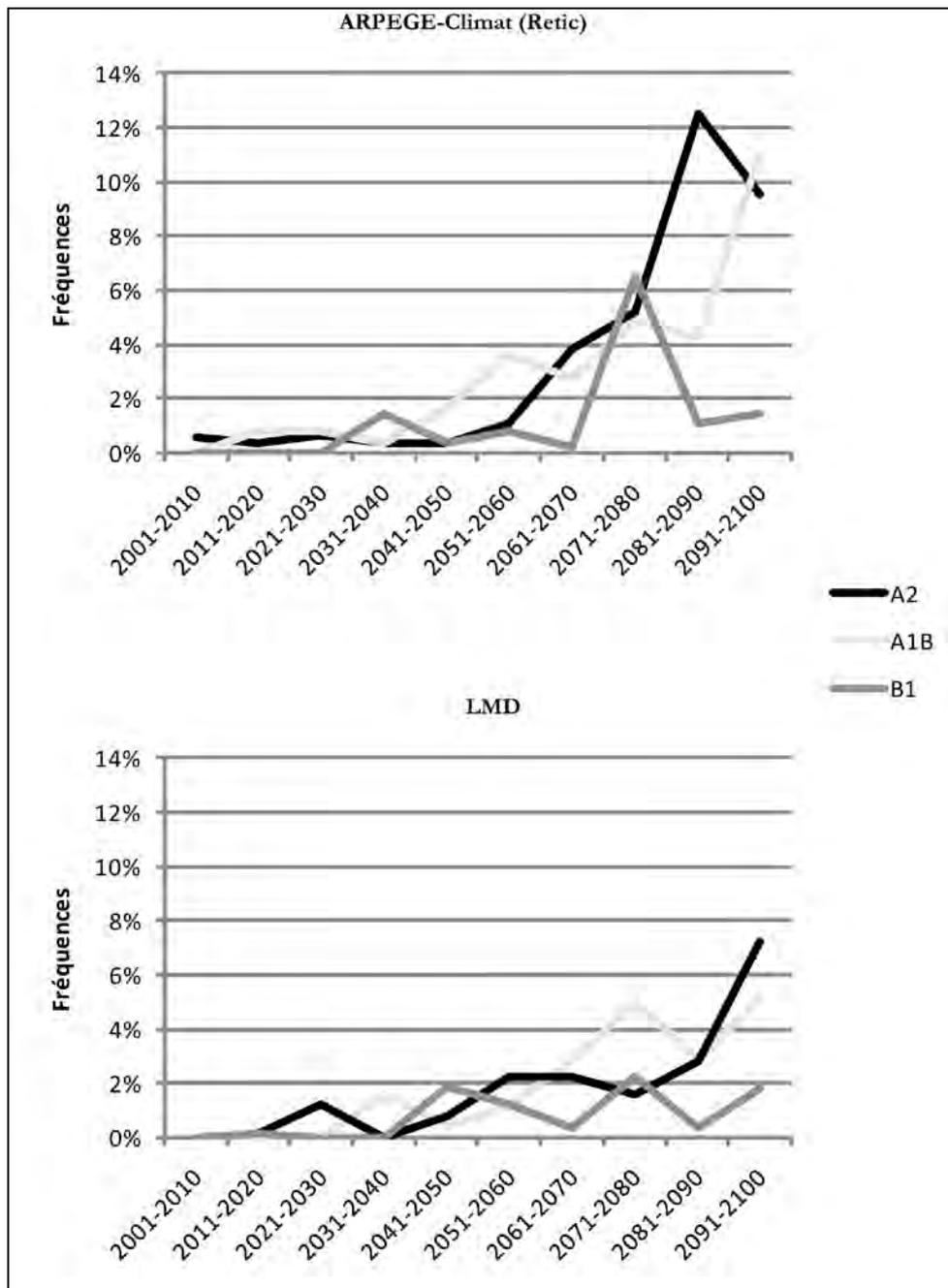


Figure 7.7 : Évolution décennale future des extrêmes estivaux (J/J/A) supérieurs ou égaux à 35°C de 2001 à 2100 pour les deux modèles étudiés (point D ARPEGE-Climat et point LMD) et pour les trois scénarios de simulations (Données : Météo-France - CNRM ; IPSL – LMD in Briche *et al.*, 2010)

CONCLUSION DU CHAPITRE 7

Le modèle ARPEGE-Climat (RETIC) donne une meilleure approximation de la réalité de la station synoptique du vignoble Reims-Courcy même si un biais froid d'environ 1°C est constaté sur l'échelle temporelle la plus grossière et d'environ 2°C sur les extrêmes thermiques défavorables à la vigne.

Sur la prospective future, les simulations proposées semblent présenter un biais froid également même pour le scénario A2, le plus pessimiste d'environ 1°C également sur la période commune avec les données observées de 2001 à 2010.

Le modèle zoomé sur la France est plus adapté, notamment par sa résolution de 50 km, pour être validé en comparaison avec la station de référence et établir une analyse prospective future critique basée sur un biais froid d'environ 1°C, voire 2°C pour les extrêmes thermiques.

Les sorties du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) sont analysées plus en détail au sein des chapitres 8 et 9.

Chapitre 8

Comparaison entre ARPEGE-Climat (RETIC) et la station sur la période de contrôle (1950-2000) : Aspects thermiques et bioclimatiques

Dans ce huitième chapitre, les aspects thermiques et bioclimatiques des données thermiques journalières du point de grille ARPEGE-Climat (RETIC) sont étudiés à deux échelles temporelles afin de tester plus finement le modèle requis pour cette étude de modélisation du changement climatique au sein du vignoble champenois. Les sorties de températures sont testées à l'aide de tests statistiques afin de vérifier si les distributions statistiques du modèle correspondent à celles de la station de référence pour permettre dans un second temps le calcul d'indices bioclimatiques relatifs à la vigne permettant de déterminer le climat approprié d'une région viticole.

8.1 Validité des températures des sorties de modèles sur la période de contrôle 1950-2000

Des températures annuelles aux températures journalières extrêmes, les séries thermiques sont analysées statistiquement afin de déterminer leur validité par rapport à la station de référence Reims-Courcy.

8.1.1 Températures moyennes annuelles minimales et maximales

Les températures moyennes annuelles, moyennes annuelles maximales et minimales sont étudiées afin de comparer les sorties de modèle à la station synoptique du vignoble Reims-Courcy.

8.1.1.1 *Les températures maximales moyennes annuelles*

Sur les températures maximales moyennes annuelles de 1950 à 2000 (Figure 8.1), une rupture statistiquement significative, avec l'hypothèse nulle d'absence de rupture rejetée au seuil de confiance à 90% est détectée en 1987 avec le test de Pettitt (1979) avec une moyenne de 14,3 avant et de 15,1 après la rupture, soit un saut de 0,8°C. Pour le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC), une rupture est détectée en 1984. La rupture de la fin des

années 1980 est souvent détectée dans les études régionales sur le changement climatique (Mestre, 2000 ; Moisselin *et al.*, 2002). La figure 8.1 montre que la phase chaude est plus marquée pour la station de référence que pour le point de grille du modèle. Ces périodes chaudes sont également plus intenses (en année et mois) à partir des ruptures détectées pour la station (1987) et pour le point de grille (1984).

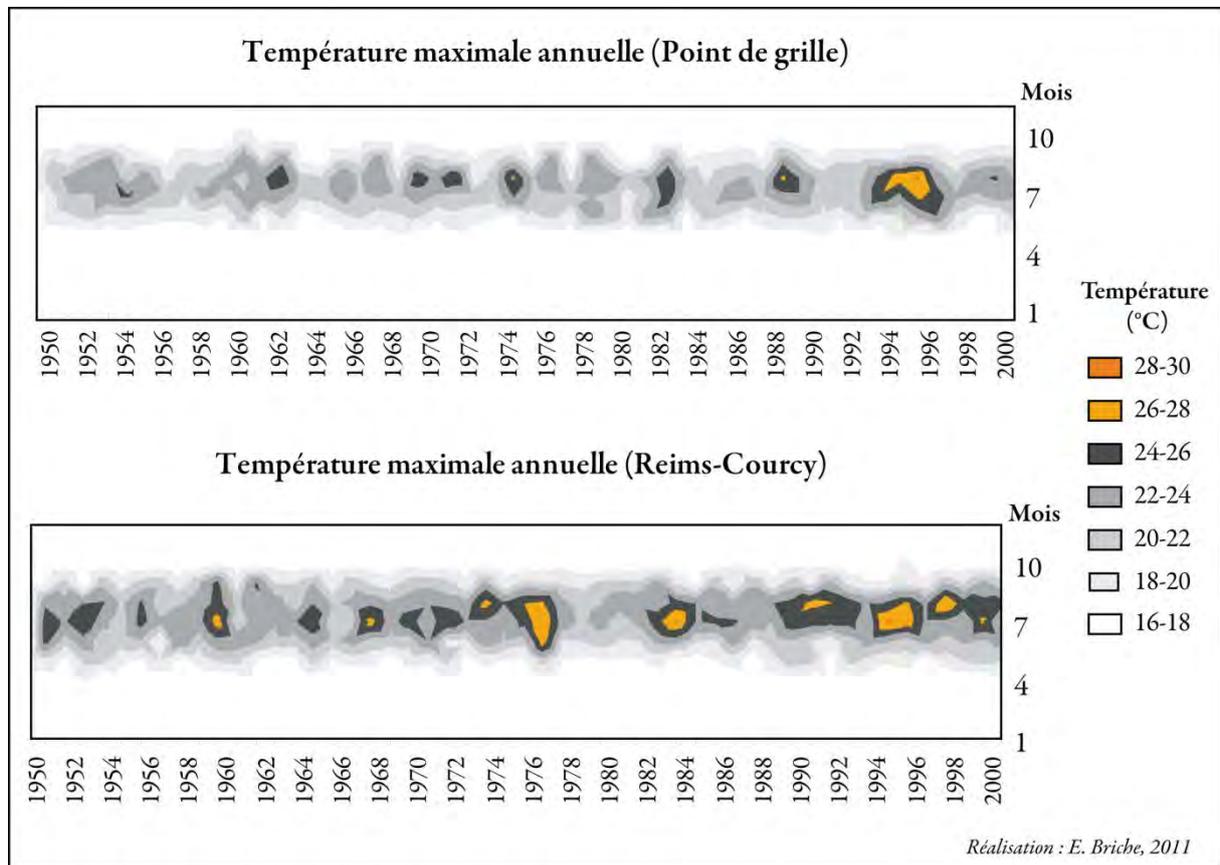


Figure 8.1 : Températures maximales annuelles pour le point de grille ARPEGE-Climat et la station Reims-Courcy²³ (Données : Météo-France – CNRM, CIVC).

Sur les températures maximales moyennes annuelles de 1950 à 2000, une rupture statistiquement significative avec l'hypothèse nulle d'absence de rupture rejetée au seuil de confiance à 90% est détectée en 1987 avec le test de Pettitt (1979) avec une moyenne de 14,3 avant et de 15,1 après la rupture soit un saut de 0,8°C. Pour le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC), une rupture est détectée en 1984 avec une hausse d'environ 0,7°C selon le point étudié. Le rupture de la fin des années 1980 est souvent détectée dans les études régionales sur le changement climatique (Mestre, 2000 ; Moisselin *et al.*, 2002).

²³ La première classe en blanc intègre les températures inférieures à 16°C.

8.1.2 Les températures minimales moyennes annuelles

Sur les températures minimales moyennes annuelles, une rupture au seuil de confiance à 90% est détectée en 1973 pour la station Reims-Courcy et en 1980 pour le point de grille. Les températures augmentent nettement après ces ruptures sur les deux séries.

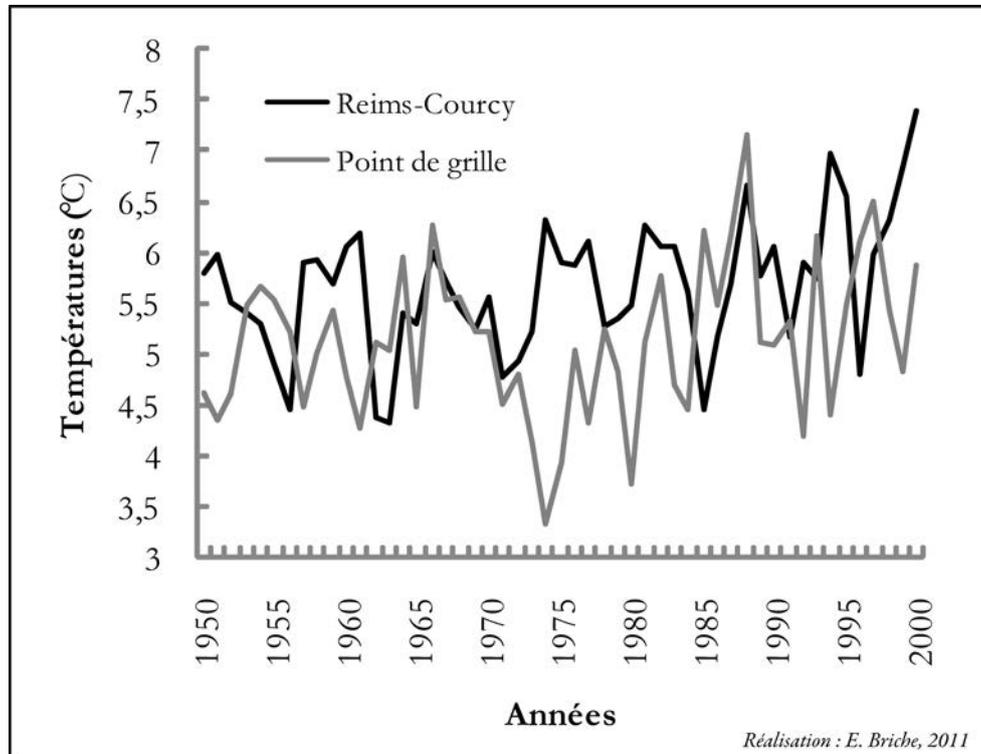


Figure 8.2 : Températures minimales annuelles pour le point de grille ARPEGE-Climat et la station Reims-Courcy (Données : Météo-France – CNRM, CIVC).

Le modèle reproduit plutôt bien la courbe des températures minimales de la station (Figure 8.2) avec en moyenne un biais froid de $0,5^{\circ}\text{C}$: en effet pour la station, la moyenne est de $5,6^{\circ}\text{C}$ contre $5,1^{\circ}\text{C}$ pour le modèle. Concernant la variabilité interannuelle, la dispersion autour de la moyenne avec l'écart-type est de $0,7$ contre $0,6$ pour la station.

8.1.3 Comparaison des distributions statistiques des températures moyennes maximales et minimales annuelles

Le test de Student permet de déterminer si les distributions statistiques des sorties de modèles ARPEGE-Climat (RETIC) sont statistiquement représentatives de la station de référence du vignoble Reims-Courcy. Ce test permet donc de justifier la comparaison des températures moyennes annuelles de la série de référence Reims-Courcy et des sorties du modèle ARPEGE-Climat (RETIC). La distribution statistique du point de grille retenu est comparée, testée et critiquée par rapport à Reims-Courcy (Figure 8.3). Les paramètres statistiques ont permis de constater que les moyennes sont proches : elle est égale sur les

températures maximales moyennes annuelles de 1950 à 2000 à 14,6°C pour Reims-Courcy alors qu'elle est de 13,6°C pour le point de grille²⁴ soit 1°C plus froide.

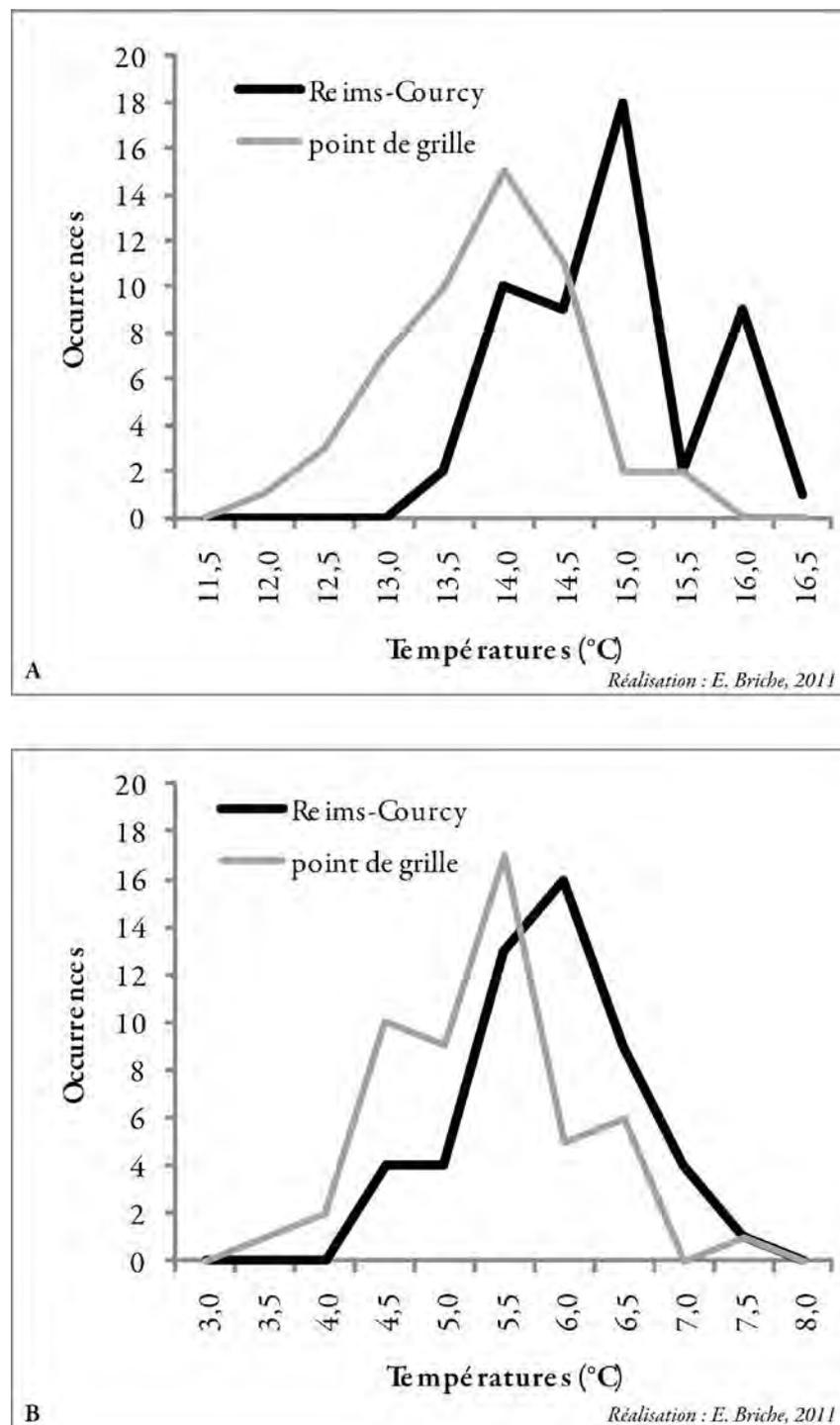


Figure 8.3 : Occurrences des températures maximales (A) et minimales (B) moyennes annuelles. Station de Reims- Courcy et point de grille sur la période de contrôle de 1950 à 2000 (Données : CIVC et Météo-France – CNRM in Briche *et al.*, 2009a)

²⁴ Le point de grille ARPEGE-Climat (RETIC) est à partir de ce chapitre appelé « point », « point de grille » étant donné que celui du LMD n'apparaît plus dans la démarche.

De plus, les distributions sont testées sur les données thermiques annuelles avec le Test de Student avec en préalable, la réalisation d'un test de normalité et de variances, qui permet de démontrer que pour la plupart des séries des trois variables étudiées (températures minimales, maximales et moyennes), les moyennes sont d'un point de vue statistique, significativement différentes pour le point de grille (Briche *et al.*, 2009a).

Le modèle ARPEGE-Climat (RETIC) représente correctement l'allure gaussienne de la distribution de la station synoptique Reims-Courcy même s'il comporte un biais froid évident : les courbes de Reims-Courcy pour les deux graphiques sont décalées vers les températures les plus chaudes.

8.2 Températures optimales et extrêmes (à partir des données mensuelles et/ou journalières)

Les températures sont maintenant étudiées à un pas de temps correspondant au cycle végétatif de la vigne (d'avril à septembre) et pendant les périodes clés (débourrement et véraison) du développement de la vigne durant lesquelles des températures extrêmes peuvent être défavorables aux futures vendanges.

8.2.1 Températures extrêmes gélives printanières

Les températures minimales d'avril influencent directement le bon développement de la plante. Le risque de gel des bourgeons, au moment du débourrement est très surveillé par la communauté viticole champenoise du fait de la fréquence de cet aléa printanier. Les distributions statistiques des températures journalières minimales du mois d'avril sur la période de contrôle 1950-2000 (Figure 8.4) montrent que la série du modèle est assez proche de la station Reims-Courcy. Le modèle simule cependant plus d'occurrences gélives ($<0^{\circ}\text{C}$) que la station de référence, pourtant elle-même considérée comme froide (Madelin, 2004). En avril, les occurrences de températures inférieures à -2°C , seuils du gel agricole, sont presque triplées pour le point de grille par rapport à la station Reims-Courcy (Briche *et al.*, 2009a et b).

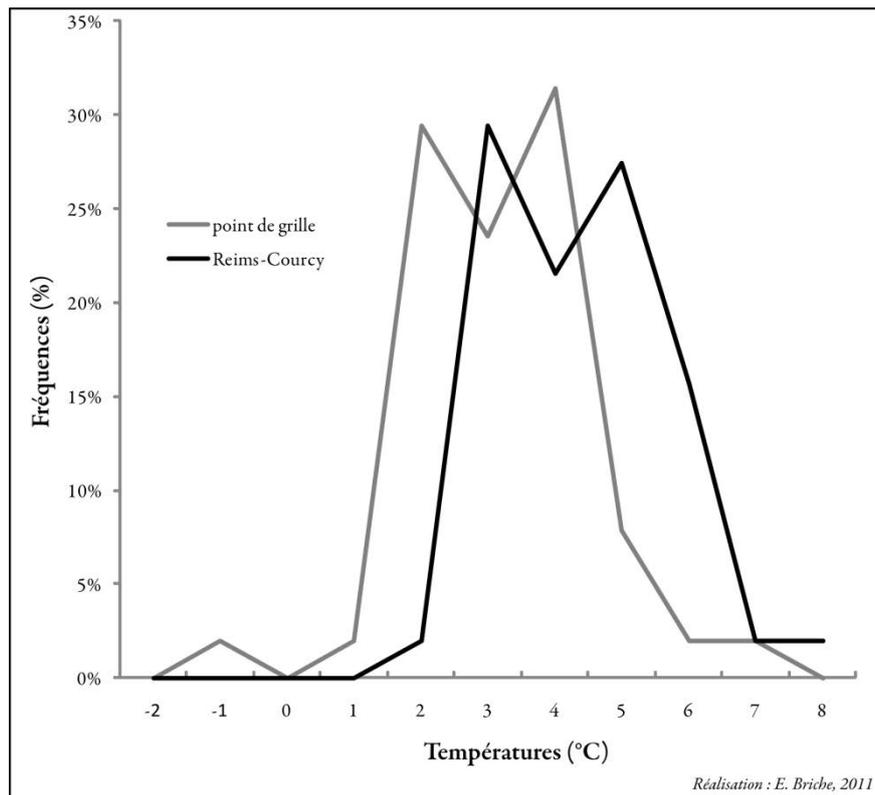


Figure 8.4 : Distributions statistiques des températures minimales en avril pour la station de référence et les points de grille de 1950 à 2000 (Données : CIVC et Météo-France – CNRM).

8.2.2 Températures optimales et extrêmes estivales

Les températures estivales sont étudiées au pas de temps saisonnier (moyenne sur les trois mois d'été) et au pas de temps journalier pour tester la modèle sur la période estivale au sein du vignoble à partir de graphiques de températures mais également de calendriers de probabilités.

Les distributions statistiques du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) calculées à partir des températures maximales estivales sur la période de contrôle sont différentes de la station Reims-Courcy (Figure 8.5). Cette dernière, d'allure gaussienne, présente un décalage vers les extrêmes chauds tandis que les séries du modèle ARPEGE-Climat montrent un biais froid évident avec un décalage des distributions vers les températures moyennes maximales les plus froides (inférieures à 22°C). Pour les températures supérieures à 25°C, la série du modèle est assez proche, en termes d'occurrences (autour de 2) de la station de référence même si l'allure de la courbe est différente.

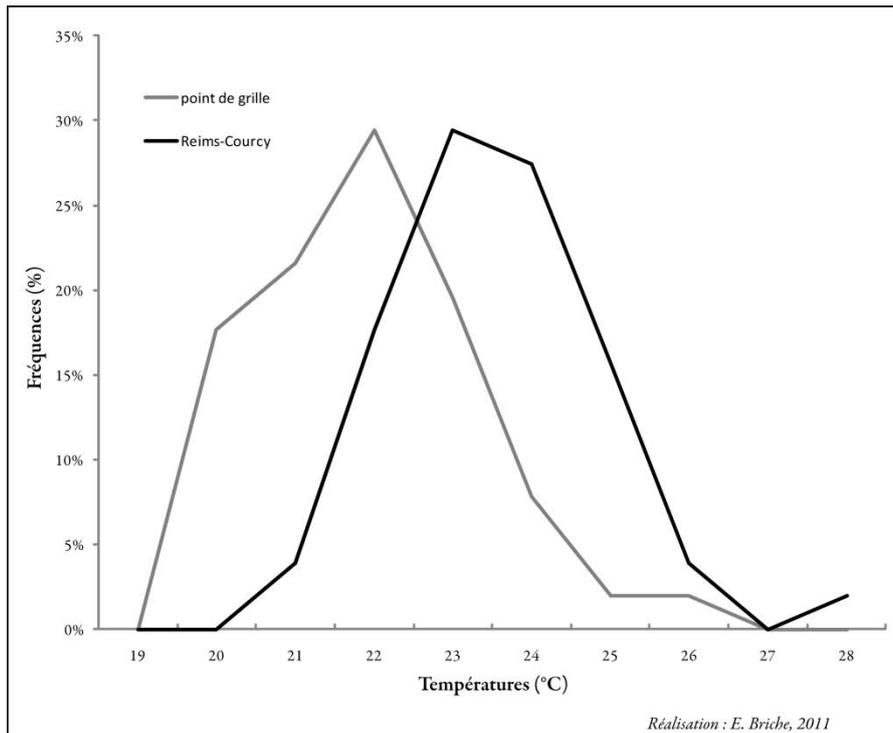


Figure 8.5 : Distributions statistiques des températures maximales estivales (moyenne des trois mois : juin, juillet et août) pour la station de référence et le point de grille de 1950 à 2000 (Données : CIVC et Météo-France – CNRM)

La figure 8.6 représente le calendrier de probabilités des températures au-delà de seuils thermiques favorables au bon développement de la plante (Huglin, 1986) : l'optimum thermique de la vigne se situe entre 20 et 30°C environ entre la floraison et la véraison. Ce calendrier montre les températures maximales mensuelles de ces seuils durant la période de contrôle pour le point de grille, situé au cœur du vignoble marnais ainsi que pour la station de référence Reims-Courcy. Les probabilités d'occurrences des températures chaudes du point de grille D montrent à nouveau le biais froid : les courbes de la série de modèle (en pointillés) suivent la même distribution que celles de la station Reims-Courcy avec un « s aut » de probabilités. De plus, le maximum de probabilités est obtenu en juillet pour Reims-Courcy et plutôt en août pour le modèle. Sur cette figure, la maille au centre du vignoble marnais simule un biais froid et les courbes simulées reproduisent correctement les températures optimales mais de manière beaucoup plus biaisée les extrêmes supérieures à 35°C défavorables à la vigne durant la véraison et pouvant entraîner l'échaudage des baies (Huglin, 1986 ; Bergqvist *et al.*, 2001 ; Matus *et al.*, 2006).

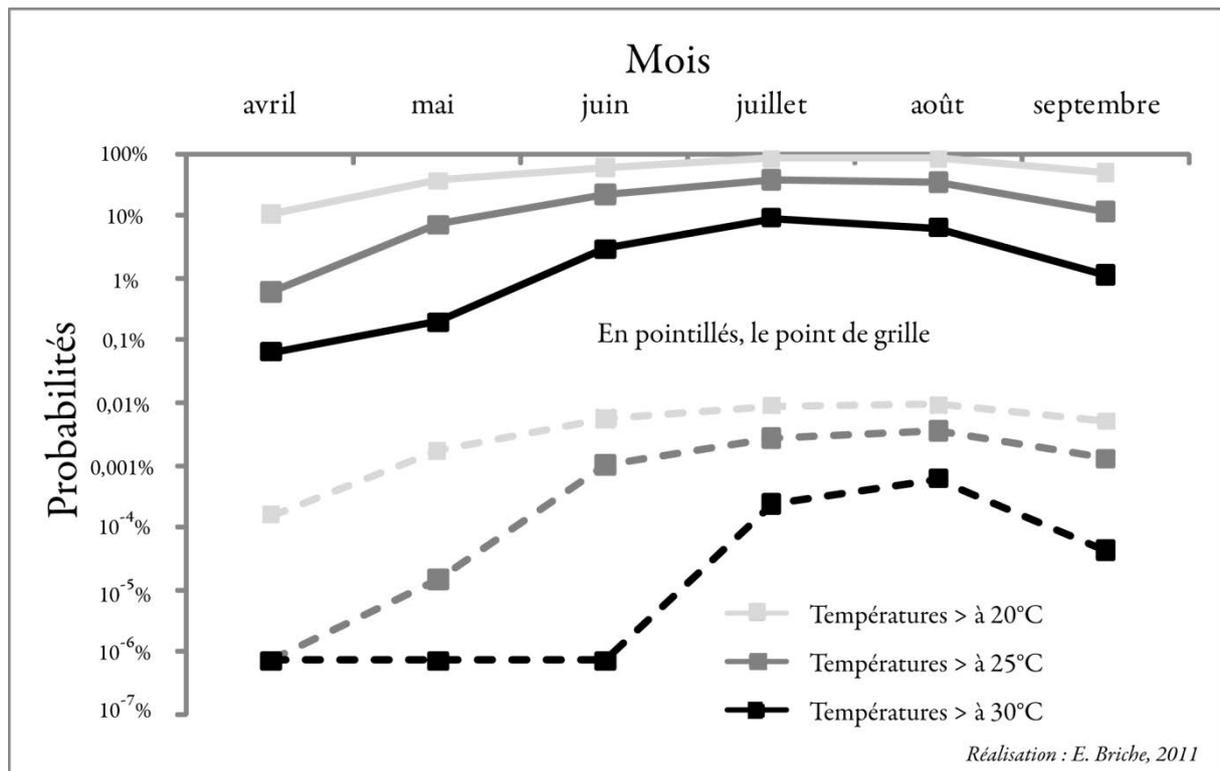


Figure 8.6 : Calendrier de probabilités des températures chaudes durant le cycle végétatif de la vigne (avril à septembre) entre la station Reims-Courcy et le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) de 1950 à 2000 (Données : CIVC et Météo-France – CNRM in Briche *et al.*, 2009a).

8.3 Discussion sur le biais froid : proposition d'une correction empirique par l'altitude

Les sorties de modèle ARPEGE-Climat (RETIC) sont tridimensionnelles : elles prennent en compte l'altitude. De ce fait, en prenant en compte l'altitude de la station Reims-Courcy (95m), on corrige les séries de températures du modèle après avoir effectué une correction en fonction de l'altitude où le gradient altitudinal préconise une baisse de la température de 0,6°C tous les 100 mètres. Ainsi, une partie du biais froid peut-être expliquée par une correction dite altitudinale avec une correction de 0,4°C pour le point de grille.

Cette correction altitudinale (Figures 8.7 et 8.8) a été appliquée sur les distributions statistiques des températures minimales journalières d'avril et maximales journalières des mois d'été (juin, juillet et août).

Sur les températures minimales journalières d'avril sur la période de contrôle (Figure 8.7), la correction permet de corriger environ 1°C du biais d'environ 2°C sur la queue de distribution inférieure correspondant aux extrêmes thermiques gélifs printaniers. En effet, si l'on prend la courbe du point de grille avant et après correction ; pour une fréquence de 3%, on a une température de -4°C avant correction puis de -3°C après correction sachant que la station Reims-Courcy, pour cette même fréquence d'apparition, présente une température de -

2°C. Pour les températures maximales journalières estivales (Figure 8.8), le biais corrigé sur les extrêmes thermiques estivaux sur la queue de distribution supérieure est équivalent à celui observé sur les températures minimales d'avril même si pour les températures entre 29°C et 32°C, l'écart entre la station et les points corrigés restent importants, d'environ 2°C.

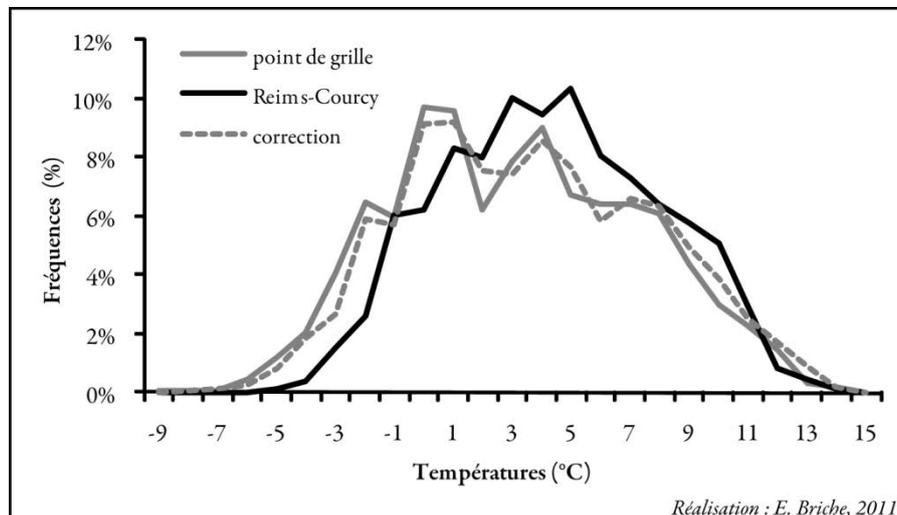


Figure 8.7 : Distributions statistiques des températures minimales journalières en avril de 1950 à 2000 de la station Reims-Courcy et du point ARPEGE-Climat avant et après correction altitudinale (Données ARPEGE-Climat (RETIC) et CIVC).

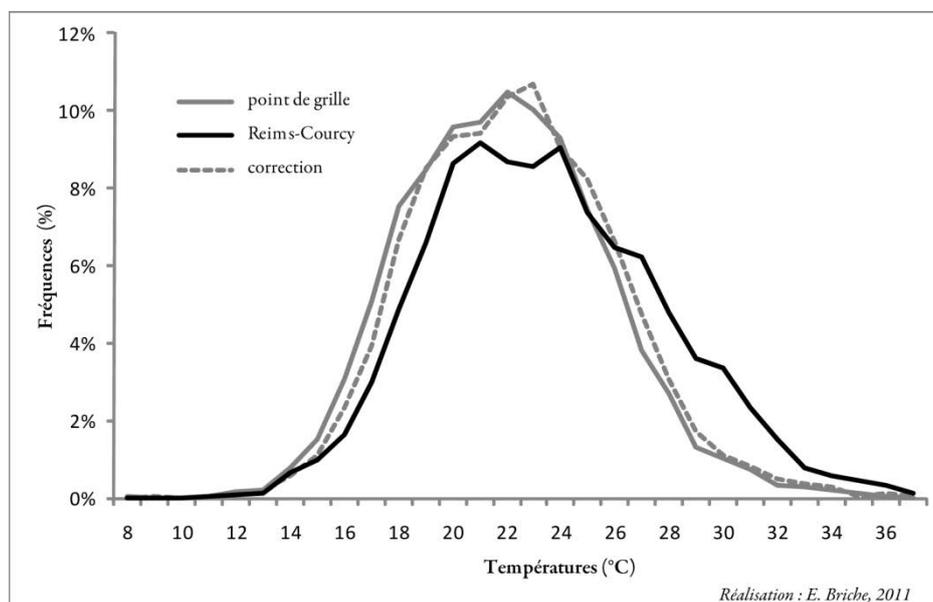


Figure 8.8 : Distributions statistiques des températures maximales journalières en été de 1950 à 2000 de la station Reims-Courcy et du point ARPEGE-Climat avant et après correction altitudinale (Données ARPEGE-Climat (RETIC) et CIVC).

Les variations d'altitude entre les points de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) et la station de référence Reims-Courcy expliquent donc en partie (environ 1°C) le biais froid. Cependant, cette correction est à nuancer : en effet, l'altitude du modèle est une altitude moyenne sur la maille de 50 km de côté, elle est donc considérée comme un facteur

zonal et ne représente donc pas la variabilité spatiale de la topographie au sein du vignoble et surtout les conditions locales autour de la station. De plus, cette correction est réalisée de manière empirique, dans prise en compte des échanges de chaleur avec l'environnement, de la condensation et des précipitations or la variabilité spatiale de la température est importante dans le vignoble du fait des conditions de surface telles que l'état de la biomasse végétale, de la topographie, de l'exposition des coteaux.

Les sorties ARPEGE-Climat (RETIC) pourraient être remplacées par des sorties plus localisées, issues de méthodes de régionalisation statistiques et/ou dynamiques (*cf. 4.2.1.2, chapitre 4*) qui corrigent les données issues de ce modèle à maille variable pour obtenir une résolution de 8 km au pas de temps horaire comme les sorties SAFRAN issues de la désagrégation par les types de temps (Pagé, 2008) ou encore la méthode de Déqué (2007) dans le cadre du projet IMFREX qui permet la désagrégation, cette fois-ci point par point en corrigeant les données de résolution à 50 km. Certaines de ces données corrigées sont d'ailleurs désormais disponibles et en libre accès.

Le modèle ARPEGE-Climat (RETIC), comme déjà annoncé dans le chapitre précédent, rend dans l'ensemble bien compte des conditions thermiques extrêmes au sein du vignoble champenois sur la période de contrôle de 1950 à 2000 avec un biais récurrent de sous-estimation. Ces données thermiques permettent de porter l'intérêt sur des indices bioclimatiques, certes empiriques, mais permettant la synthèse d'un type de climat d'une région viticole.

8.4 Comparaison modèle / station à partir d'indices bioclimatiques

Les indices de Huglin (1978) et de Winkler (1962) sont les indices bioclimatiques les plus couramment utilisés dans les études du changement climatique dans les régions viticoles. Ils sont basés sur des calculs simples de cumuls de degrés-jours ou températures actives supérieures à 10°C durant le cycle végétatif de la vigne.

8.4.1 Observation de l'évolution du cumul des degrés-jours et comparaison de l'indice de Winkler

L'indice de Winkler (1962), initialement établi pour définir cinq types de région viticole en Californie en fonction des températures moyennes journalières permet de donner un aperçu du type de climat d'une région viticole. Pour la Champagne, sur la station Reims-Courcy, et pour la période 1950-2000, l'indice de Winkler vaut 1016 degrés-jours contre 839 pour le point ARPEGE-Climat. La courbe du modèle (Figure 8.9) est plus faible que la station Reims-Courcy et les deux courbes appartiennent à la zone 1 de l'indice de Winkler (Huglin,

1986) avec des indices inférieurs à 1390 de grés-jours correspondant à la zone tempérée fraîche.

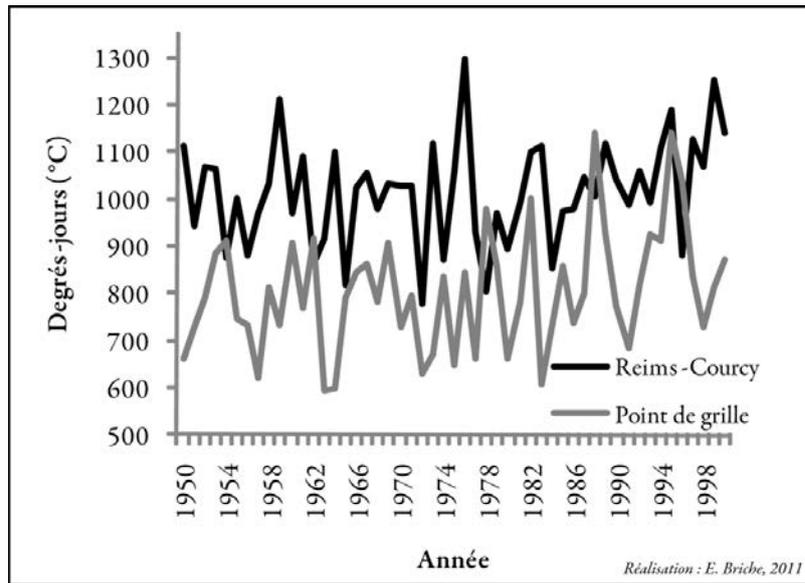


Figure 8.9 : Indice de Winkler de 1950 à 2000 pour la station Reims-Courcy et le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) (Données : Météo-France – CNRM, CIVC).

La figure 8.10 qui montre le cumul des degrés-jours sur la période de l'indice de Winkler, à partir des températures moyennes journalières, corrobore le biais froid des sorties de modèles ARPEGE-Climat (RETIC) : en effet, la courbe du modèle a la même allure que la courbe de la station Reims-Courcy mais avec des valeurs plus faibles. Par exemple, au 28 octobre, la station a cumulé environ 1000 degrés-jours contre 800 pour le point D.

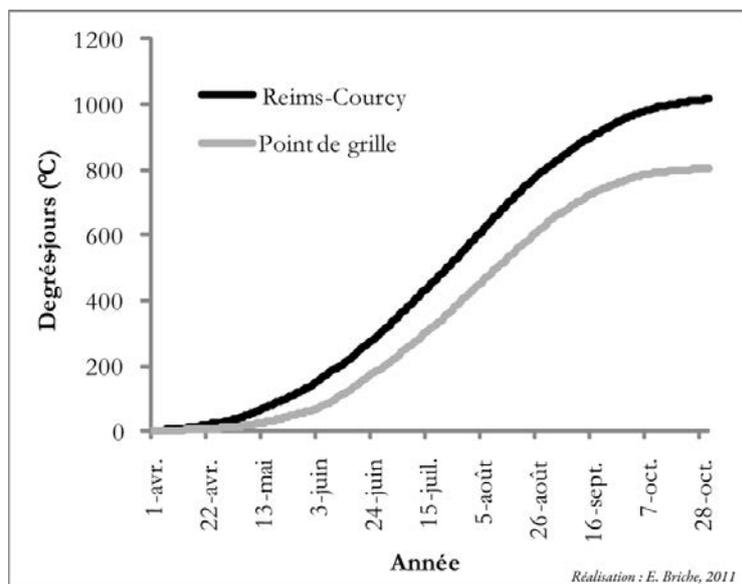


Figure 8.10 : Cumul moyen des degrés-jours du 1er avril au 31 octobre sur la période 1950-2000 pour la station Reims-Courcy et le point de grille ARPEGE-Climat (RETIC) (Données : Météo-France - CNRM, CIVC).

Concernant les stades phénologiques (Figure 8.11), le biais froid du point de grille montre que les stades phénologiques sont atteints beaucoup plus tard sur le modèle si l'on considère les sommes thermiques nécessaires pour l'atteinte de chaque stade : ainsi la vendange ne peut pas être placée sur la courbe du modèle car elle n'atteint pas les 1000 degrés-jours nécessaires. Sur l'application bioclimatique, même si le point de grille reproduit la croissance de manière fiable, le biais est trop prononcé pour évaluer les dates obtenues pour les stades phénologiques.

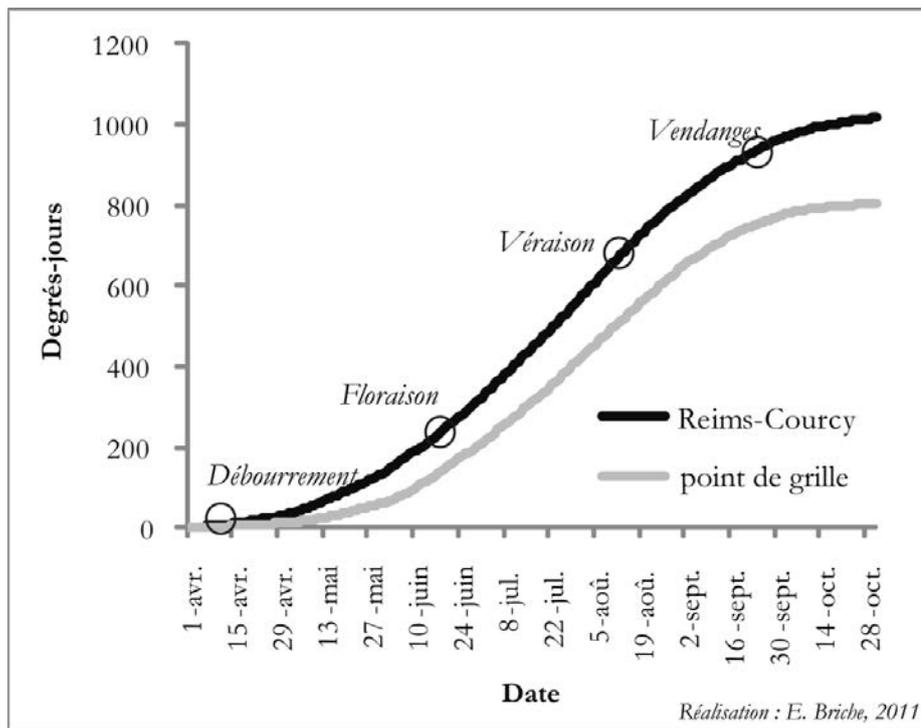


Figure 8.11 : Comparaison du cumul de degrés-jours de 1950 à 2000 pour la point de grille et la station de Reims-Courcy ; date des stades phénologiques en moyenne (Données : Météo-France – CNRM, CIVC).

8.4.2 Observation et comparaison de l'évolution de l'indice de Huglin sur la période de contrôle 1950-2000 pour la station de référence et le point de grille ARPEGE-Climat (RETIC)

Sur la période 1950-2000, l'évolution de l'indice de Huglin (Figure 8.12) montre que le type de climat du vignoble champenois semble évoluer du climat « très frais » vers le « frais », voire vers « le tempéré frais » si la dernière décennie 2001-2010 est prise en compte. Pour le point de grille, le type de climat ne dépasse pas le « frais » avec très peu d'occurrences du type « frais ».

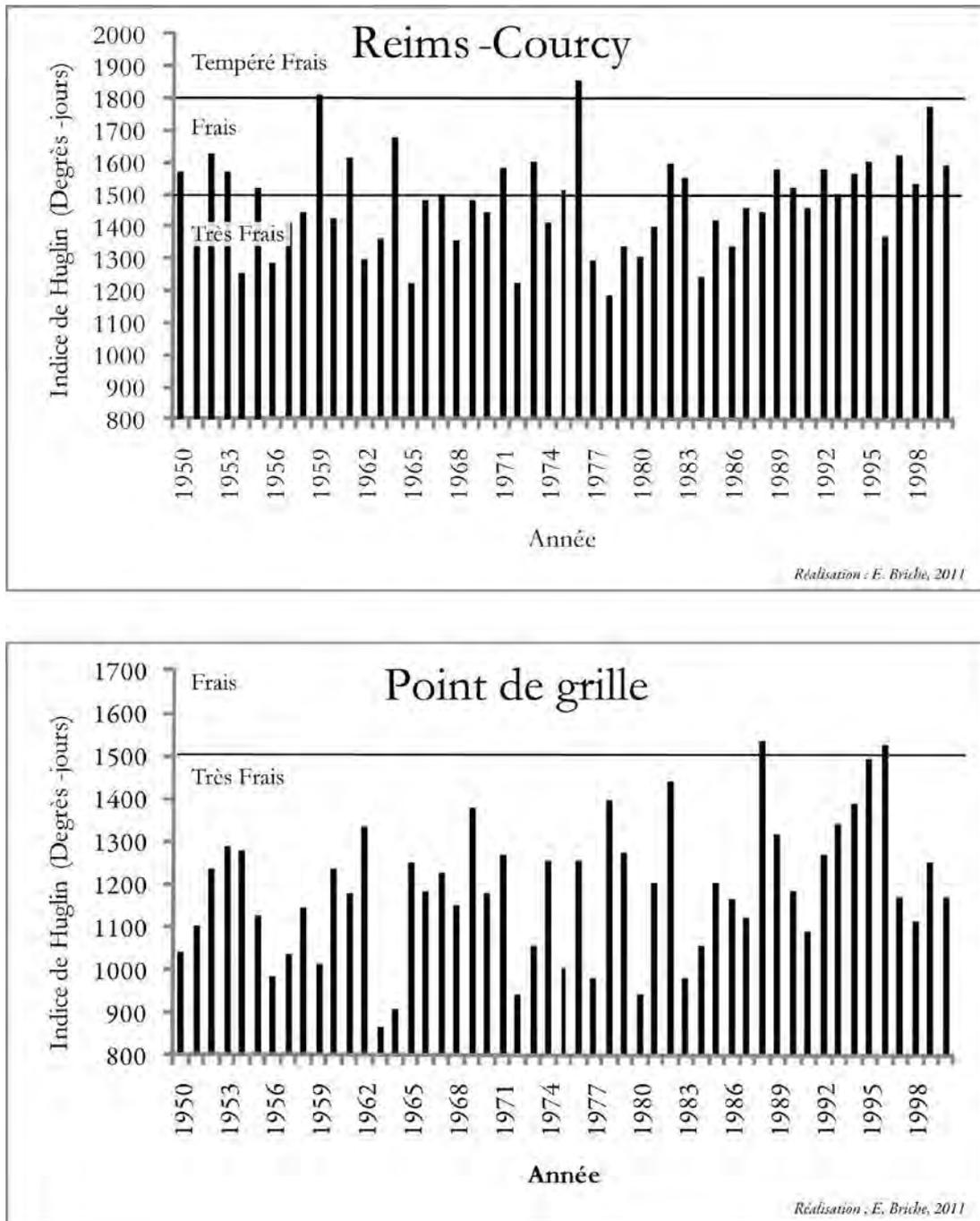


Figure 8.12 : Évolution de l'indice de Huglin de 1950 à 2000 pour le point de grille et la station Reims-Courcy (Données : Météo-France – CNRM).

8.4.3 Observation et comparaison de l'évolution de l'indice de fraîcheur des nuits sur la période de contrôle 1950-2000 pour la station de référence et le point de grille ARPEGE-Climat (RETIC)

L'indice de fraîcheur des nuits (Figure 8.13, A) calculé à partir des températures minimales de septembre est, de 1950 à 2000 pour les deux courbes étudiées, relativement

stable de 9°C pour le point de grille et de 9,6°C pour la station : on retrouve le biais froid du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) autour de 0,5°C.

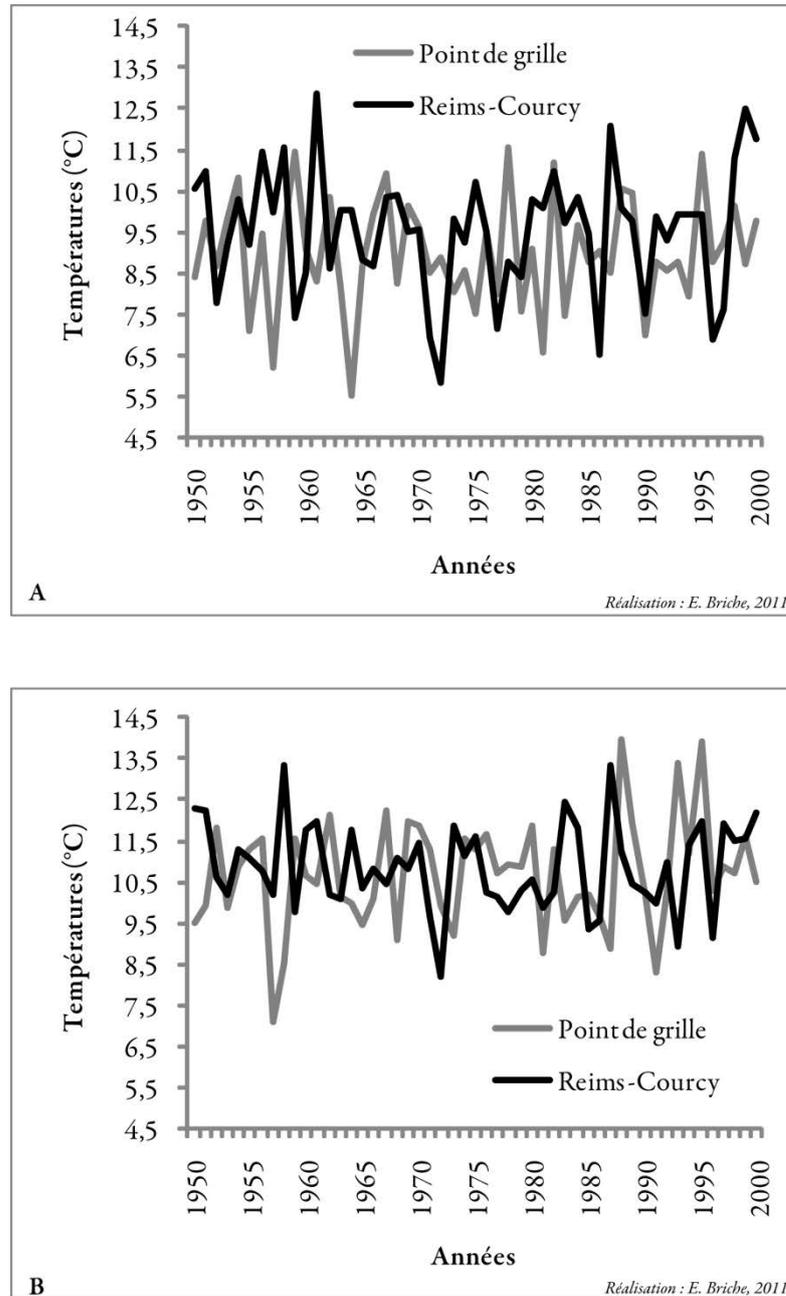


Figure 8.13 : Evolution de l'indice de fraîcheur des nuits de 1950 à 2000 (A) et calculé de mi-août à mi-septembre (B) pour le point de grille et la station Reims-Courcy (Données : Météo-France – CNRM).

Cet indice est également calculé du 15 août au 15 septembre (Figure 8.13, B) : en effet, dans le contexte du réchauffement des températures, les vendanges sont déjà plus précoces. En effet, en moyenne, elles débutent le 25 septembre sur la période 1950-2000, par contre si l'on considère la rupture validée de la fin des années 80, la date moyenne sur la période post-rupture est le 17 septembre. Cette précocité peut être défavorable pour la bonne maturité des baies avant les vendanges qui ont besoin de fraîcheur la nuit or les températures

d'août sont généralement plus élevées que celles de septembre. En effet, la maturation est la période entre la véraison et les vendanges, le réchauffement climatique modifie les conditions nycthermiques de la vigne en raccourcissement la période maturation et en la décalant vers le mois d'août (Madelin *et al.*, 2010) ce qui empêche la maturation lente et progressive des baies et entraîne une baisse de qualité des futurs moûts.

Le graphique 8.13 montre que si l'on décale le calcul de l'indice dans le temps, les nuits sont beaucoup plus chaudes, d'environ 1°C d'où les risques possibles dans le futur sachant que les températures continueront d'augmenter. Les moyennes de la station et du point de grille sont presque égales : 10,7°C pour le point de grille et 10,9°C pour la station.

CONCLUSION DU CHAPITRE 8

Les indices bioclimatiques montrent que pour un type de climat d'une région viticole, le modèle ARPEGE-Climat (RETIC), même s'il présente un biais froid estime la même chose que la station de référence Reims-Courcy soit un type de climat « très frais » évoluant vers un type de climat « frais » sur la période de contrôle 1950-2000.

Les sorties du modèle ARPEGE-Climat sont étudiées en détail pour une prospective future sur les scénarios de changement climatique tenant compte de l'évolution socio-économique du monde tout en prenant en considération les biais froids développés jusqu'à présent.

Chapitre 9

Analyse prospective climatique et bioclimatique avec ARPEGE-Climat (RETIC) de 2001 à 2100

Ce chapitre développe l'analyse prospective du climat des conditions thermiques au sein du vignoble champenois à partir des trois scénarios les plus couramment utilisés dans les études d'impacts du changement climatique à l'échelle régionale : les scénarios A1B, B1 et A2. Les sorties thermiques et indices bioclimatiques calculés sont étudiés sur la période commune station / scénarios de 2001 à 2010 pour enfin être analysés en détail sur toute la période de simulation future.

9.1 Comparaison entre la station Reims-Courcy et les simulations futures (2001-2100)

Les données thermiques du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) sont traitées sur différentes périodes plus ou moins longues où les données de la station de Reims-Courcy sont disponibles et fiables afin d'aborder la prospective par une critique des biais présents sur les scénarios futurs.

9.1.1 Températures et indices bioclimatiques sur 2001-2010

9.1.1.1 Les températures minimales et maximales de 2001 à 2010

La variabilité interannuelle est très marquée (*cf. Figure 7.5, A et B*) du fait de l'observation des données sur une période décennale. La canicule 2003 n'est pas lissée à ce pas de temps : elle apparaît nettement sur les courbes des températures minimales et maximales de la station. Le modèle ARPEGE-Climat ne la reproduit pas.

9.1.1.2 L'indice bioclimatique de Huglin de 2001 à 2010.

Le graphique suivant (Figure 9.1) montre l'évolution de l'indice de Huglin sur la décennie 2001-2010 pour la station Reims-Courcy et le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) pour chaque scénario. Cette décennie est considérée par l'OMM (www.omm.fr) comme la plus chaude depuis les relevés météorologiques effectués à la surface du globe et le type de bioclimat d'après Huglin tend vers un type de climat tempéré

(entre 1800 et 2100 degrés-jours) alors que sur la période de contrôle 1950-2000, le type de climat moyen est « frais ». Le point de grille du modèle simule sur les trois scénarios des types de climat plutôt « très frais » inférieurs à 1500 degrés-jours et la variabilité interannuelle est très forte : cette caractéristique est observée sur les sorties de modèles du climat sur les simulations futures (Dufresne *et al.*, 2006 ; Dufresne et Royer, 2007). La courbe du modèle a la même tendance que celle de la station : on ne retrouve pas le pic de 2003 mais « le contraire aurait été le fruit du hasard » (Déqué *in* www.imfrefx.mediasfrance.org).

En effet, les données de sorties de modèles du climat sont à analyser en termes de distribution et non en termes d'évènements précis car le modèle ne simule pas les années extrêmes précisément.

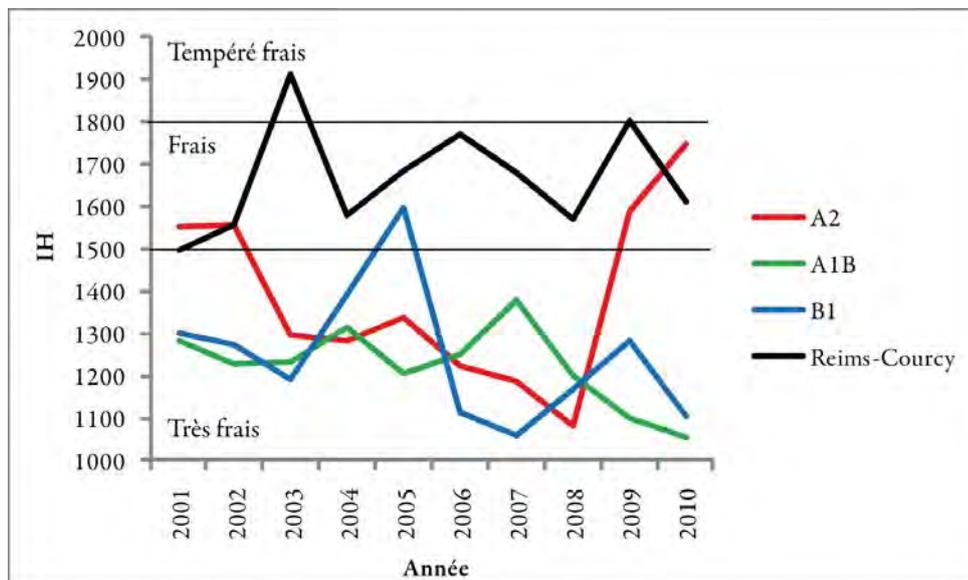


Figure 9.1 : Indices bioclimatiques de Huglin de 2001 à 2010 pour le point de grille ARPEGE-Climat (RETIC) sur les trois scénarios de simulations futures et pour la station Reims-Courcy sur les données observées (Données : Météo-France – CNRM et CIVC)

La résolution du modèle ARPEGE-Climat ne permet pas de simuler les évènements extrêmes de l'année 2003 tels que la canicule estivale : le modèle à méso-échelle RAMS permettra, dans une seconde partie de résultats d'établir une analyse temporelle plus fine afin de voir si ce type de modèle parvient à reproduire la situation particulière de 2003. Chaque modèle a sa capacité de résolution spatiale mais aussi temporelle.

9.1.2 Comparaisons 1971-2000 / 2071-2100

Les fins des XX^{ème} et XXI^{ème} siècles sont étudiées afin d'observer les changements bioclimatiques futurs. Les simulations masquent généralement la tendance au réchauffement jusqu'en 2050 du fait de la forte variabilité interannuelle. Les études d'impact s'intéressent sur la période 2071-2100 (Déqué, *in* www.imfrefx.mediasfrance.org) lorsque le signal du changement climatique est évident.

9.1.2.1 *Sur l'indice de Huglin*

L'indice de Huglin est étudié pour une comparaison entre la station de référence 1971-2000, le point de grille au sein du vignoble sur cette même période et sur la période 2071-2100 sur les trois scénarios de simulations futures (Figure 9.2). La courbe de contrôle du point de grille reproduit correctement celle de la station Reims-Courcy mais le biais froid est évident, d'environ 400 degrés-jours. Sur la période 1971-2000, le type de climat de la courbe Reims-Courcy est « frais » contre « très frais » sur le modèle pour la même période. Le point de grille simule pour les 30 dernières années du XXI^{ème} siècle un type de climat « tempéré » pour le scénario B1 à « tempéré chaud » pour le A2 déjà annoncé par García de Cortázar Aauri (2006). Ceci s'explique par le fait que le scénario A2 est le plus pessimiste d'où un climat beaucoup plus chaud.

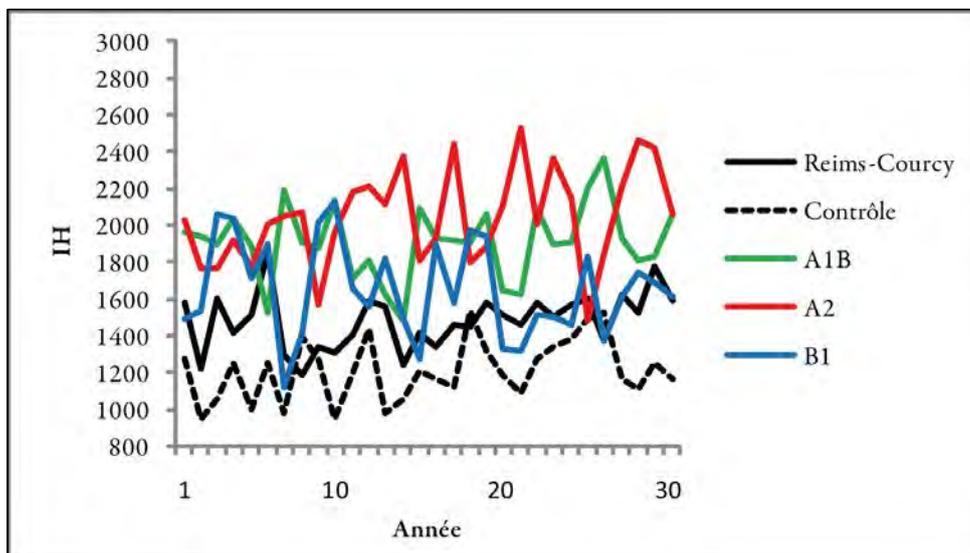


Figure 9.2 : Comparaison de l'indice de Huglin pour la station Reims-Courcy et du point de grille au sein du vignoble (à partir des données de la période dite de « contrôle ») de 1971 à 2000 avec les simulations futures pour les trois scénarios du point de 2071 à 2100 (Données : Météo-France – CNRM, CIVC).

9.1.2.2 *Sur les cumuls de degrés-jours*

Afin de bien montrer l'évolution thermique et l'empreinte du changement climatique, les cumuls de degrés-jours moyens sur la période 2001-2100 pour les trois scénarios sont comparés à ceux sur la période 2071-2100 (Figure 9.3).

L'analyse de la courbe montre que pour les trente dernières années de simulation cumulent plus de sommes thermiques efficaces à partir de juillet pour atteindre pour le scénario A2 1800 degrés-jours fin octobre contre 1300 sur le siècle complet. De plus, le scénario B1 sur les trente dernières années équivaut au scénario A1B sur la période complète ce qui corrobore les conclusions du GIEC (2007) annonçant un réchauffement plus intense en

2100 avec un changement climatique bien prononcé et non lissé par la variabilité interannuelle après 2050.

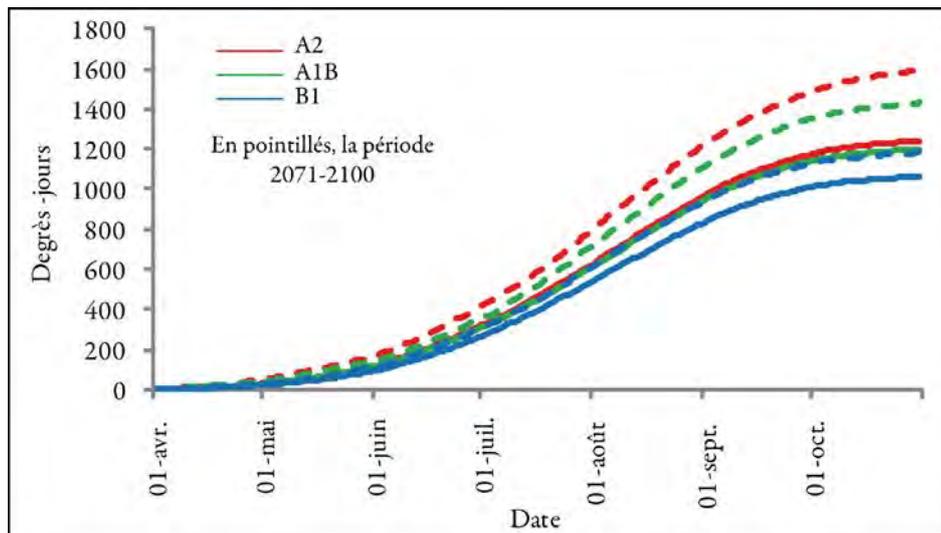


Figure 9.3 : Comparaison des cumuls de degrés-jours moyennés du 1^{er} avril au 31 octobre sur les périodes 2001-2100 et 2071-2100 pour le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) pour les trois scénarios de simulations futures (Données : Météo-France – CNRM).

9.1.2.3 *Sur l'indice de fraîcheur des nuits*

Le scénario le plus pessimiste (A2) montre que les températures pourraient augmenter de manière statistiquement significative dans le futur : les températures minimales évolueraient d'environ 12°C à 18°C à la fin du XXI^{ème} siècle (Figure 9.4). Le rafraîchissement des nuits pourrait ne plus être suffisant et correspondre à des nuits chaudes (Tonietto et Carbonneau, 2004).

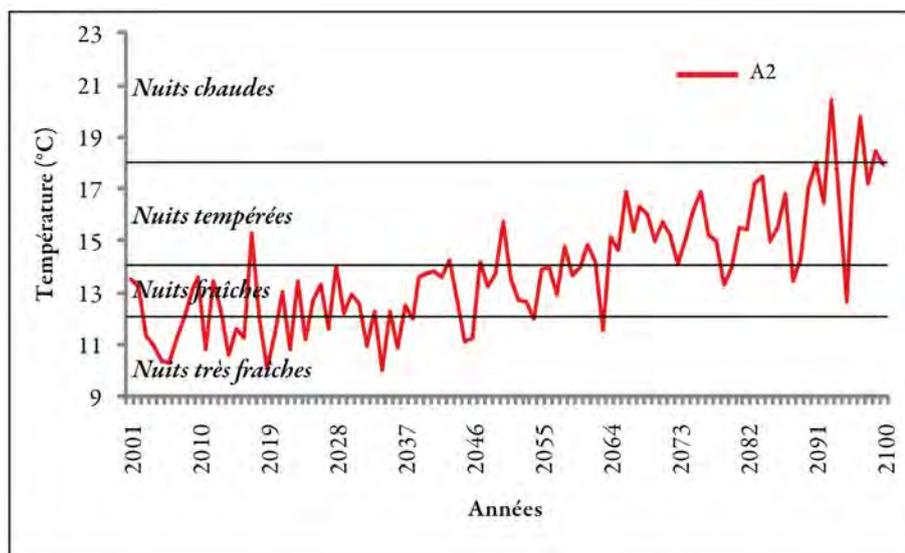


Figure 9.4 : Évolution de l'indice de fraîcheur des nuits de mi-août à mi-septembre sur la période 2001-2100 pour le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) pour le scénario de simulation future A2 (Données : Météo-France – CNRM).

Jusque 2065 environ, les nuits favoriseraient la synthèse des anthocyanes (Koshita *et al.*, 2007). La question de l'encépagement pourrait se poser dans le futur : en effet, des cépages tels que ceux que l'on trouve en Grèce (Koundouras *et al.*, 2006) supportent des nuits sèches contrairement à ceux implantés en Champagne. Pour le moment, les cépages champenois bénéficient de meilleures conditions climatiques et bioclimatiques dans ce contexte de changement climatique : le réchauffement des nuits profite au vignoble actuellement.

Dans des conditions nocturnes plus chaudes, la maturation ne sera plus aussi lente et progressive d'où la nécessité d'anticiper les changements futurs en adaptant les pratiques culturales, en augmentant par exemple la surface foliaire pour permettre aux raisins de mûrir et de dégager leurs arômes sans endommager les pellicules des baies. (Tonietto et Carbonneau, 2004 ; Yamane *et al.*, 2006 ; Koshita *et al.*, 2007)

9.1.2.4 Sur les extrêmes thermiques défavorables à la vigne pendant son cycle végétatif

Les lois hydroclimatiques telles que celle de GEV (Generalized Extreme Value) permettent d'appréhender les périodes de retour de fréquences de températures extrêmes défavorables à la vigne durant son cycle végétatif. La figure 9.5 montre les fréquences des températures extrêmes froides printanières en mars-avril (A), et extrêmes chaudes estivales (B) sur la station Reims-Courcy en 1971-2000 et sur le point de grille sur les périodes 1971-2000 et 2071-2100 à partir du scénario A1B avec une période de retour d'un jour.

Pour les températures gélives (Figure 9.5, A), la courbe obtenue pour Reims-Courcy est très proche de celle du scénario A1B : le biais froid est ici très marqué puisque la courbe simulée sur les données de contrôle a la même tendance que les deux autres mais les fréquences sont beaucoup plus accentuées pour les minimas (inférieures à -5°C). Le point de grille sur la période 1971-2000 simule 80% de chances d'avoir au moins 1 jour inférieur à -5°C en mars-avril contre $-2,5^{\circ}\text{C}$ pour le scénario A1B et la station Reims-Courcy.

L'évolution entre les deux périodes est ici bien marquée avec $2,5^{\circ}\text{C}$ de réchauffement sur les extrêmes froids avec le scénario A1B. Ces lois seraient cependant mieux utilisées après correction des données car la courbe future du scénario A1B (2071-2100) est presque identique à celle de la station sur 1971-2000. Les extrêmes froids simulés sont accentués sur 1971-2000 et les prévisions futures conservent ce biais en surestimant la diminution probable des températures gélives.

Pour les extrêmes chauds estivaux (Figure 9.5, B), les trois courbes présentent des décalages prononcés même si elles évoluent similairement. Le biais froid du point de grille sur la période de contrôle est marqué : il y a 80% de chances d'obtenir au moins une journée avec une température supérieure à $32,5^{\circ}\text{C}$ pour le point contre une température supérieure à 35°C pour Reims-Courcy. Pour cette même fréquence, la courbe du point sur la période 2071-2100 avec le scénario A1B est de 40°C : l'évolution des fréquences de températures extrêmes estivales future annoncée par le dernier rapport du GIEC (2007) est avérée.

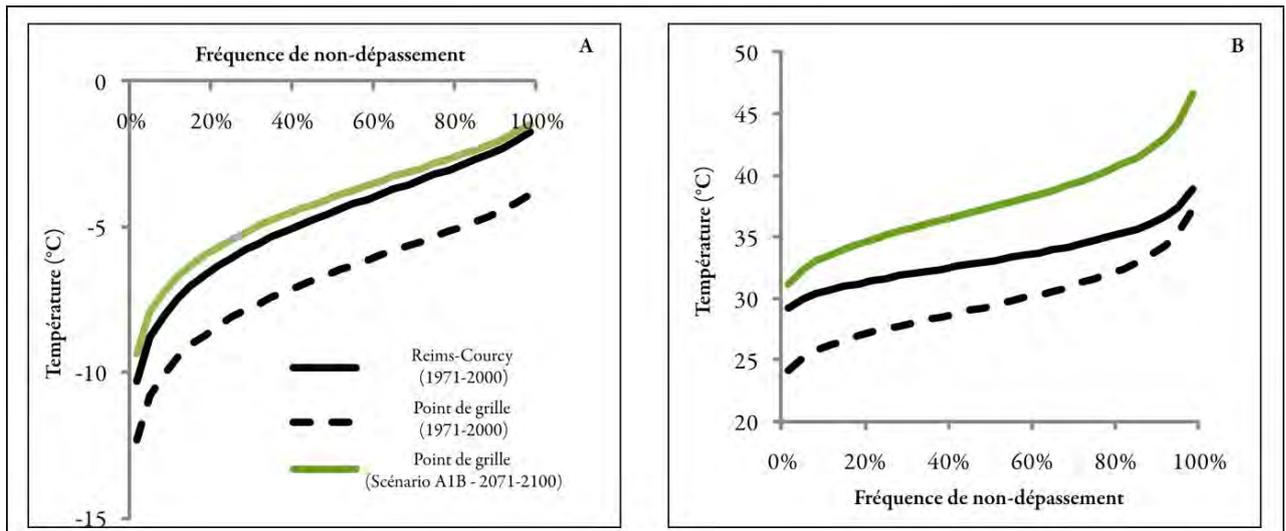


Figure 9.5 : Comparaison entre la station Reims-Courcy et le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) pour les températures minimales journalières (A) au printemps (mars-avril) et maximales journalières (B) estivales (juin, juillet et août) pour des périodes de retour d'un jour (Données : Météo-France – CNRM, CIVC).

Les biais sur la période de contrôle et sur les scénarios de changement climatique futurs sont marqués de manière plus ou moins prononcés selon la méthode d'analyse employée.

9.2 Simulations des températures extrêmes futures

Les études sur le changement climatique montrent que dans le futur, les longues sécheresses estivales, les événements extrêmes tels que les coups de chaleur (André *et al.*, 2004 ; Harvard *et al.*, 2010) seront beaucoup plus fréquents et auront des conséquences directes sur les écosystèmes tels que la vigne, dépendante des températures, sensible aux extrêmes thermiques. Analyser les tendances futures des températures extrêmes donne une approximation des conjonctures aux professionnels, qui peuvent alors anticiper des adaptations possibles à des températures plus gélives en mars et des canicules (Meehl et Tebaldi, 2004) plus fréquentes en été.

9.2.1 Observation des températures gélives printanières futures

La fréquence des gelées de printemps peut limiter la durée du cycle végétatif en détruisant complètement ou partiellement les bourgeons : les récoltes sont alors aléatoires et moins rentables (Galet, 2000). Les aléas gélifs printaniers sont une des premières inquiétudes des professionnels champenois cependant le vignoble dispose de meilleures conditions thermiques depuis quelques décennies qui pourraient limiter la fréquence de ces aléas.

9.2.1.1 *Fréquences des températures extrêmes gélives futures*

Dans le futur, la fréquence des températures extrêmes gélives inférieures à -2°C diminue en mars et en avril pour les trois scénarios (Figure 9.6 A et B). Cette baisse est surtout marquée après 2050 pour le scénario A2 en mars et avril, en avril pour les scénarios A1B et A2.

En 2001, pour le scénario A2, le plus proche de la décennie 2001-2010 de la station Reims-Courcy, la fréquence est de 30% en mars, d'environ 20% en avril. Cette fréquence est d'environ 20% vers 2100 en mars et de moins de 5% en avril. Même si les courbes des trois scénarios baissent nettement en avril, les courbes pour le mois de mars tendent à augmenter à nouveau vers 2070.

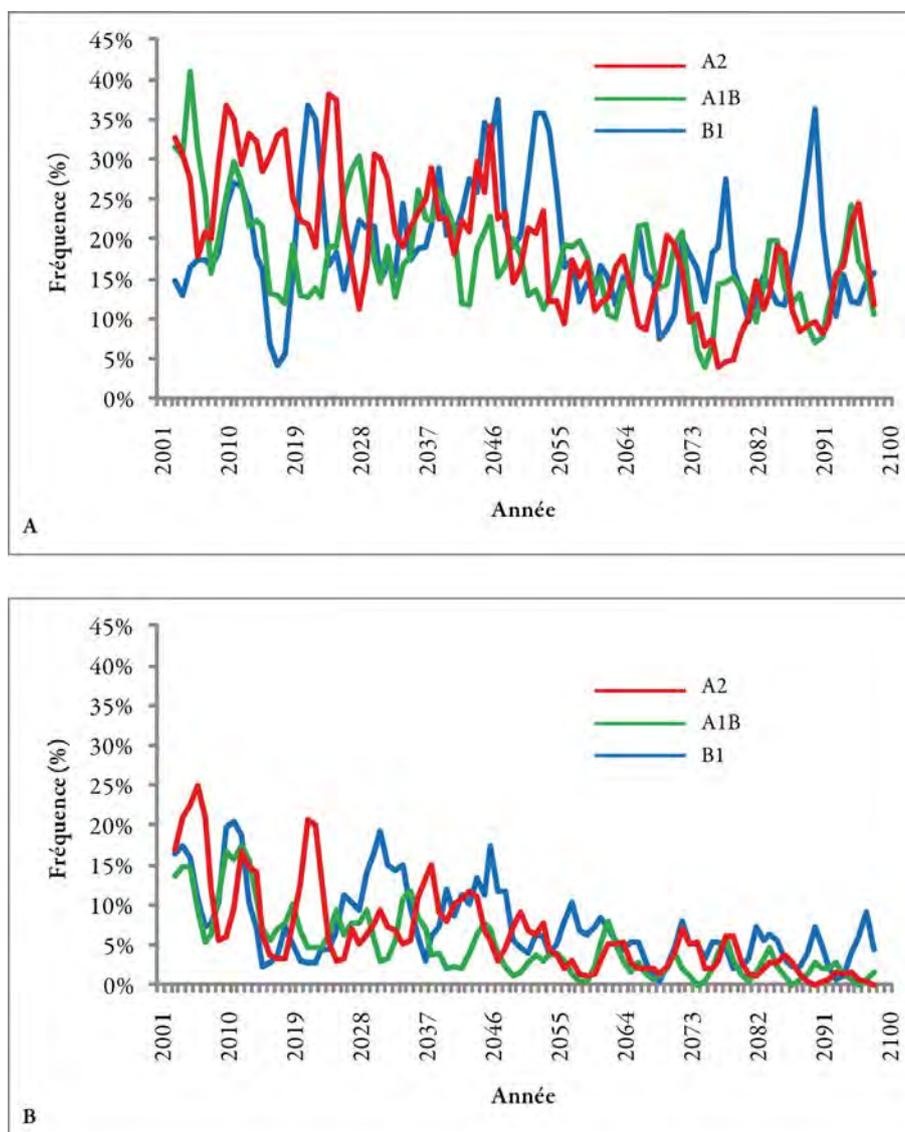


Figure 9.6 : Moyennes mobiles pondérée sur cinq ans des températures inférieures à -2°C en mars (A) et en avril (B) pour le point de grille sur les trois scénarios de simulation future (Données : Météo-France – CNRM).

9.2.1.2 *Fréquences de non-dépassement des températures extrêmes gélives futures*

Les fréquences de non-dépassement des températures gélives futures au printemps pour les périodes de retour de 1 et 7 jours (Figure 9.7) montrent que les trois scénarios sont presque confondus. Sur la période 2001-2100, il y a en moyenne, 80% de chances qu'il y ait au moins un jour inférieur à $-2,5^{\circ}\text{C}$ et 40% de chances d'avoir 7 jours inférieurs à $-2,5^{\circ}\text{C}$ sur la période future (2001-2100).

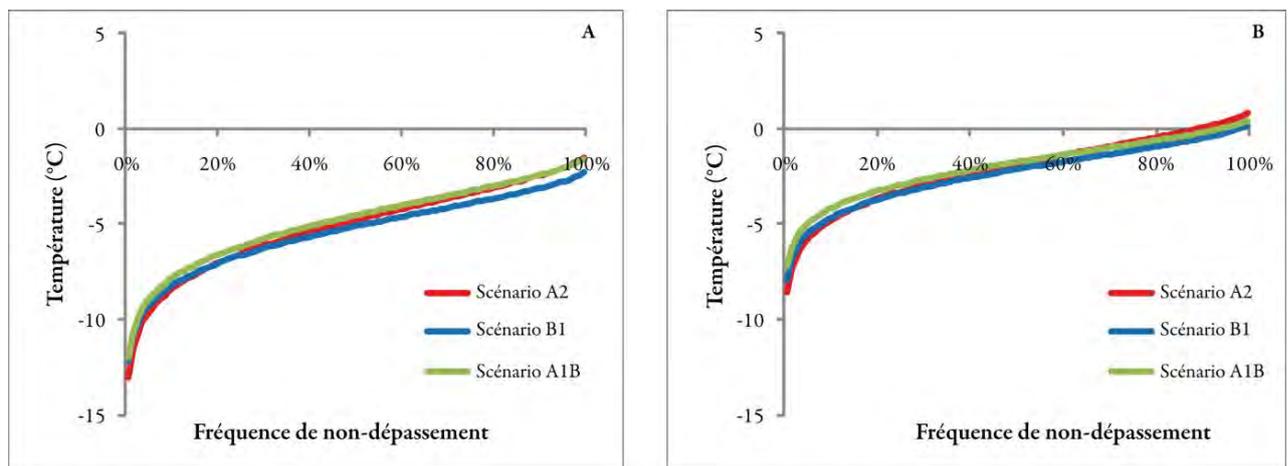


Figure 9.7 : Températures gélives extrêmes printanières (mars-avril) obtenues sur la période 2001-2100 à partir d'une loi de GEV pour les trois scénarios de simulations futures avec des périodes de retour de 1 jour (A) et 7 jours (B), (Données : Météo-France – CNRM).

9.2.2 Observation des températures optimales et extrêmes estivales futures

9.2.2.1 *Températures estivales extrêmes de plus en plus fréquentes*

La figure 9.8 montre les fréquences d'extrêmes estivaux futurs supérieurs à 35°C pour les trois scénarios : ils présentent tous une tendance à l'augmentation. Cette augmentation est plus nette et marquée à partir des années 2070 notamment pour le scénario A2, le plus pessimiste des scénarios.

La forte variabilité interannuelle lissée par les moyennes mobiles pondérées sur cinq ans, est marquée pour les trois scénarios et la tendance au réchauffement est beaucoup plus nette en fin de siècle conformément à la bibliographie (GIEC, 2007 ; Dufresne *et al.*, 2006 ; Déqué et Somot, 2010).

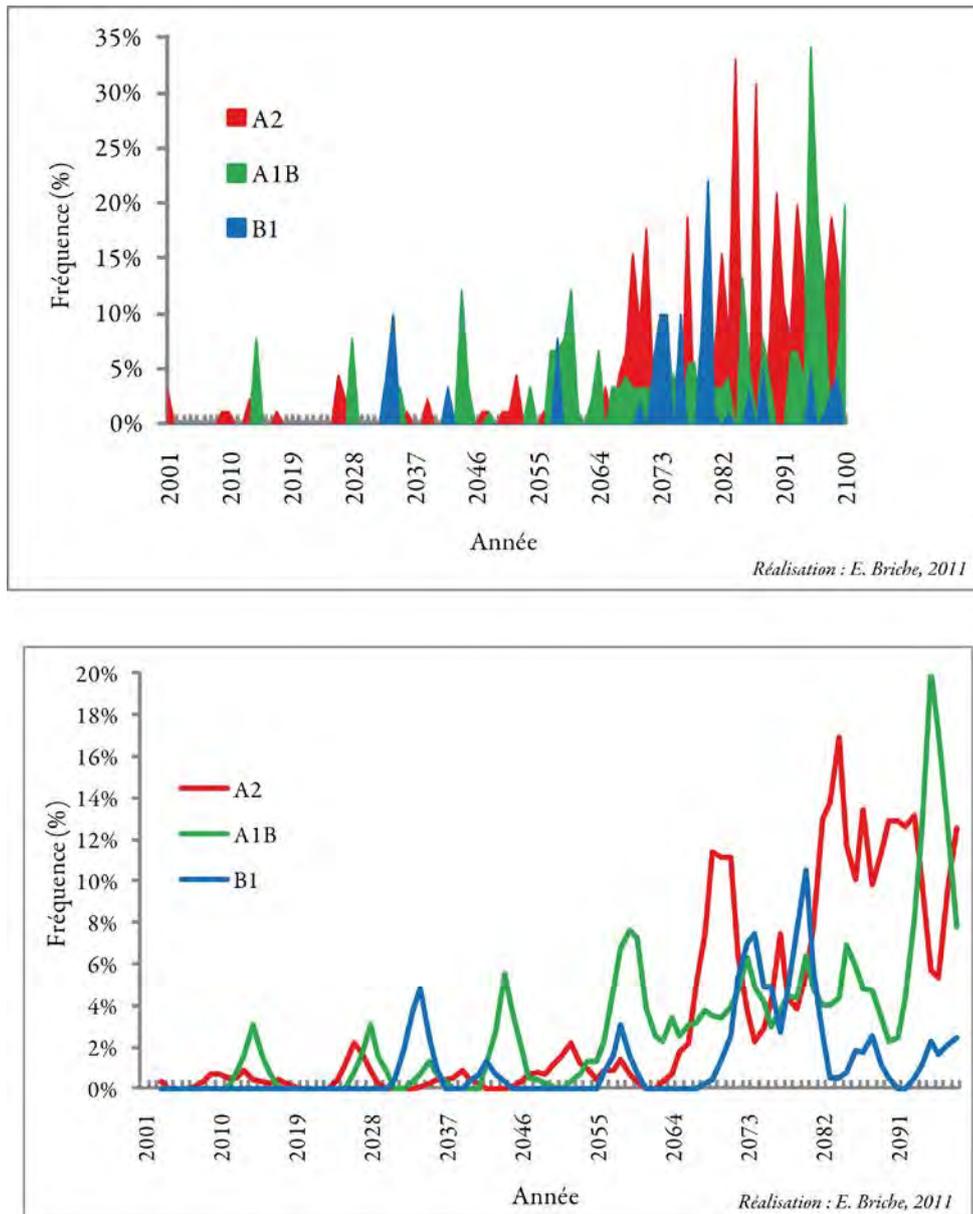


Figure 9.8 : Fréquences des températures estivales supérieures à 35°C et moyenne mobile pondérée sur cinq ans pour le point de grille (Données : Météo-France CNRM).

De plus, pour les trois scénarios, une forte variabilité interannuelle est observée avec une hausse importante des fréquences après 2070 (Déqué, 2007). Ces observations valident les conclusions du GIEC (2007) à l'échelle globale qui prévoient une hausse des fréquences d'évènements extrêmes chauds ainsi qu'une variabilité interannuelle plus forte dans le futur (Tableau IX.I). La moyenne trentenaire 2071-2100 montre une dispersion par rapport à la moyenne de 9% pour le scénario A2 alors qu'elle est de 1% sur la première période (2011-2040) équivalente à celle de la station sur la période 1971-2000 : la variabilité interannuelle augmente notamment après 2070 (Briche *et al.*, 2011a).

Tableau IX.I : Dispersion par rapport à la moyenne (écart-type) pour la station Reims-Courcy de 1971 à 2000 et pour le point de grille sur les trois scénarios par période de 30 ans des fréquences de températures maximales extrêmes (supérieures à 35°C) estivales (Données : CIVC, Météo-France – CNRM, *in* Briche *et al.*, 2011a).

	1971-2000	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Reims-Courcy	0,01			
B1		0,02	0,02	0,05
A1B		0,02	0,04	0,07
A2		0,01	0,03	0,09

9.2.2.2 *Évolution des seuils de températures estivaux optimaux et extrêmes*

La figure 9.9 présente l'exemple de l'évolution des fréquences de seuils thermiques estivaux possibles pour le scénario A1B. Les quatre courbes montrent une tendance à la hausse des fréquences de températures maximales estivales et une rupture semble apparaître autour de 2050 : elle est bien marquée pour les températures supérieures à 25°C (Test de Pettitt significatif au seuil de 5%) et correspond à la logique des scénarios. En effet, le signal de changement climatique n'apparaît réellement qu'à partir des années 2050, il est masqué avant par la variabilité interannuelle (Déqué *in* www.imfrex.mediasfrance.org). Cette hausse de températures favorise la précocité des stades phénologiques : les sommes thermiques sont atteintes plus rapidement. La hausse des températures supérieures à 35°C après 2050 signifierait également la hausse possible des aléas extrêmes chauds estivaux, voire caniculaires, défavorables à la plante.

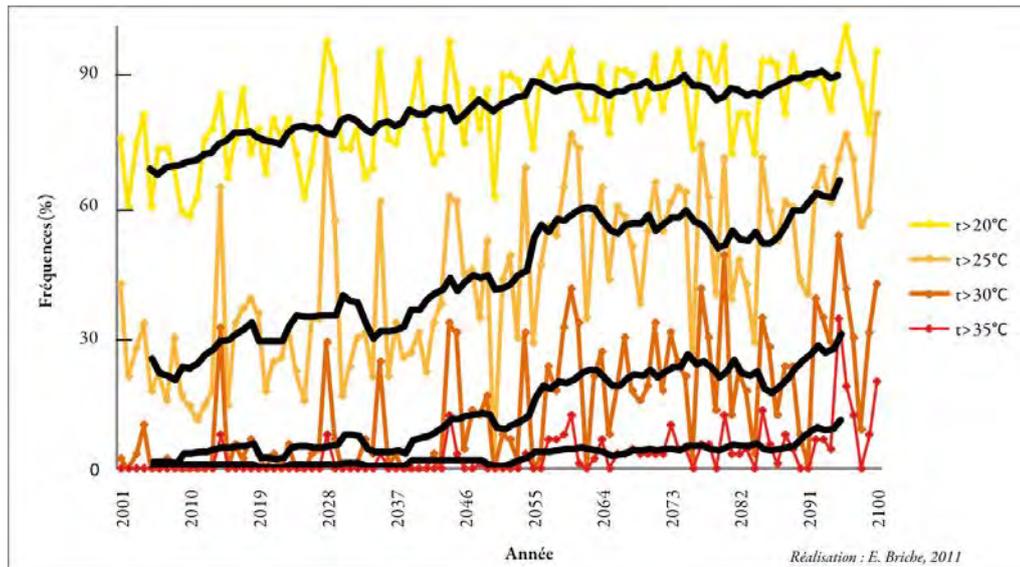


Figure 9.9 : Fréquences des températures journalières estivales (juin, juillet et août) au-delà de certains seuils et moyennes mobiles sur 10 ans pour le point de grille, sur la période simulée 2001-2100, avec le scénario A1B (Données : Météo-France – CNRM in Briche *et al.*, 2009)

9.2.2.3 *Fréquences de non-dépassement des températures estivales journalières extrêmes*

Les fréquences de non-dépassement de températures extrêmes estivales journalières chaudes pour des périodes de 1 et 7 jours (Figure 9.10) pour les trois scénarios présentent les mêmes tendances pour les trois scénarios mais de manière moins homogène que pour les extrêmes gélifs printaniers : en effet, la courbe du scénario B1 se démarque beaucoup plus des deux autres scénarios. Sur la période 2001-2100, les scénarios A1B et B1 préconisent presque 90% de chances d'apparition d'au moins une température journalière maximale supérieure à 40° contre 35°C pour le scénario B1. Il y a 90% de chances d'avoir dans le futur, en moyenne, au moins 7 jours pouvant dépasser une température de 35°C durant l'été pour les scénarios A1B et A2 contre 100% de chances pour le B1 : le maximum atteint par le scénario pour 7 jours d'apparition est donc 35°C.

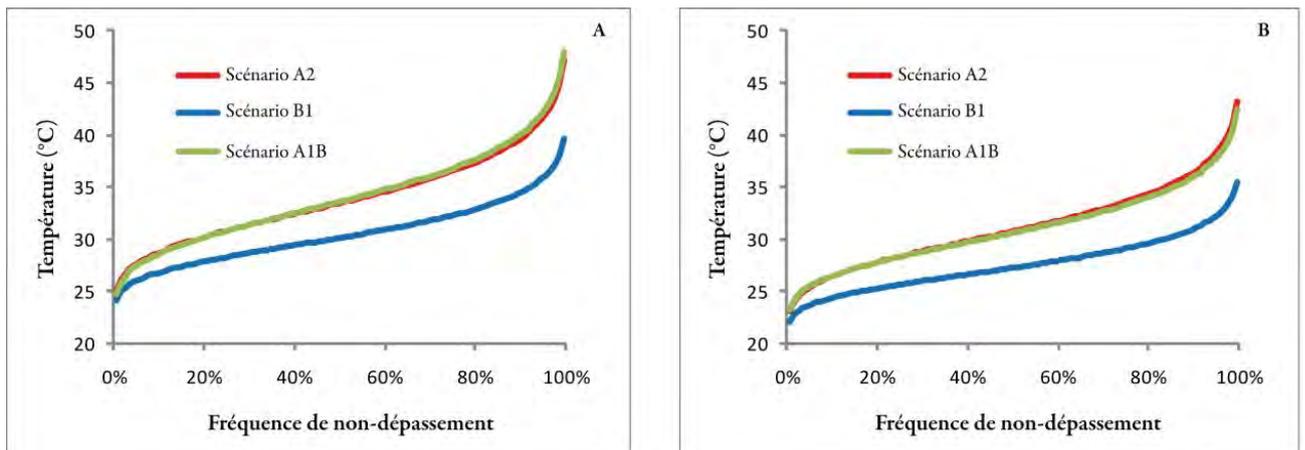


Figure 9.10 : Fréquences de non-dépassement des températures extrêmes estivales obtenues sur la période 2001-2100 à partir d'une loi de GEV pour les trois scénarios de simulations futures avec des périodes de retour de 1 jour (A) puis 7 jours (B), (Données : Météo-France – CNRM).

9.2.3 Année 2003, représentative des températures futures ?

L'été 2003 est significatif car il est caractérisé par un épisode exceptionnel d'environ 3 mois combinant des températures chaudes supérieures à la normale (Bessemoulin *et al.*, 2004) et une période de forte sécheresse (André *et al.*, 2004 ; Beniston, 2004 ; Seguin, 2010) impliquant des dommages tels que l'échaudage des baies mais également une date des vendanges extrêmement précoce (Chuine *et al.*, 2004) avec un degré alcoolique généralement très élevé et des acidités faibles (Seguin et García de Cortázar Aauri, 2004).

Cette canicule pourrait anticiper les conditions thermiques futures au sein des vignobles et permet donc d'interroger les résultats des simulations thermiques et bioclimatiques futures sachant que 2003 pourrait être une année « typique » dans le futur (Meehl et Tébaldi, 2004 ; Seguin, 2004 ; Agenis-Nervers, 2006 ; Seguin, 2010).

Durant l'été 2003, 16 jours ont atteint des températures maximales supérieures à 30°C et 8 ont atteint des températures maximales supérieures à 35°C. Les probabilités d'obtenir dans le futur, sur la période 2001-2100, des occurrences de températures supérieures à 30°C et 35°C égales ou supérieures à l'été 2003 sont :

- Pour les températures maximales journalières supérieures à 30°C, 37% d'années sur la période 2001-2100 seront susceptibles d'atteindre le nombre d'occurrences de l'année 2003, 39% pour le scénario A1B et 20% pour le B1 ;
- Pour les températures maximales journalières supérieures à 35°C, 14% des années de la période de simulation future pourront atteindre les occurrences obtenues en 2003 pour le scénario A2, 9 % pour le A1B et 1% pour le B1.

Les résultats obtenus à l'échelle de la France (Terray et Braconnot, 2007) sont validés à l'échelle de la région viticole de Champagne : les vagues de chaleur, définies comme des séries d'au moins cinq jours consécutifs où la température diurne dépasse la normale

climatique (1961-1990) d'au moins 5°C, pourraient augmenter dans le futur. Ce nombre est d'environ 20 en Champagne autour de 2050 avec le scénario A2 du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France utilisée dans le cadre du projet ESCRIME.

L'augmentation des vagues de chaleur estivales pourrait poser des problèmes en Champagne pendant la maturation des raisins. Cette période correspondant à celle pendant laquelle la « baie ayant atteint sensiblement son volume définitif subit des transformations chimiques importantes : accumulation de sucres, diminution de l'acidité », (Guillon, 1905 *in* Galet, 2000) est particulièrement sensible car le risque de grillage peut être atteint généralement entre 35°C et 42°C selon la bibliographie avec une photosynthèse qui devient nulle autour de 40°C (Motorina, 1958). Des températures en juillet supérieures ou égales à 30°C « sont généralement garantes d'une bonne réussite viticole » (Gadille, 1967) cependant la sécheresse peut retarder la véraison provoquant l'échaudage.

Les prévisions futures diffèrent selon les scénarios climatiques issus des scénarios socio-économiques et sont conformes aux conclusions du GIEC (2007) à l'échelle globale : une forte variabilité interannuelle, un signal de changement climatique mieux détecté après 2050, des canicules estivales plus fréquentes.

La vigne risque, en Champagne, d'être soumise aux aléas climatiques tels que les vagues de chaleur de manière plus fréquente et plus intense, souvent à l'origine de l'échaudage des baies pendant la maturation. L'aléa gélif pourra être moins important en avril mais fréquent en mars ce qui peut s'avérer inquiétant dans la perspective d'un débourrement plus précoce. Cette précocité sera inhérente à l'atteinte plus rapide du cumul de degrés-jours nécessaires pour la sortie de dormance.

Les indices bioclimatiques sont analysés sur la période future d'afin d'en déduire le type de climat futur probable au sein du vignoble champenois.

9.3 Prospective bioclimatique

De nombreuses études d'impacts du changement climatique sur la viticulture utilisent la prospective bioclimatique pour tenter d'évaluer les conditions viables pour les cépages traditionnels implantés historiquement dans les régions viticoles et d'anticiper les glissements d'aires de culture de la vigne.

9.3.1 Simulations de l'indice bioclimatique de Winkler

Les degrés-jours de Winkler constitués par la somme des températures moyennes journalières au-dessus de 10°C pour la période du 1^{er} avril au 30 octobre, soit 7 mois,

préconisent un cumul de 993°C à Reims-Courcy faisant appartenir la Champagne à la région I où l'on retrouve Bordeaux, Beaune et Genève (Huglin, 1986 ; Galet, 2000).

Les scénarios A1B et A2 (Figure 9.11) prévoient un changement de région viticole avec des sommes qui pourraient atteindre en 2100 la région III pour le A1B (entre 1649 à 1927 °C) et la région IV (entre 1924 et 2204°C) correspondant à des régions viticoles méditerranéennes telles que celles de Florence ou Venise, voire des régions plus arides telles que Mendoza en Argentine ce qui soulève la question de l'adaptation des pratiques agricoles, voire celle du changement des cépages ancestraux.

Ces indices doivent être cependant nuancés, ils sont calculés de manière empirique et proposent des classifications générales sans tenir compte des pratiques agro-culturelles locales qui permettent aux viticulteurs de s'adapter aux changements progressivement, voire même selon les conditions thermiques de l'année.

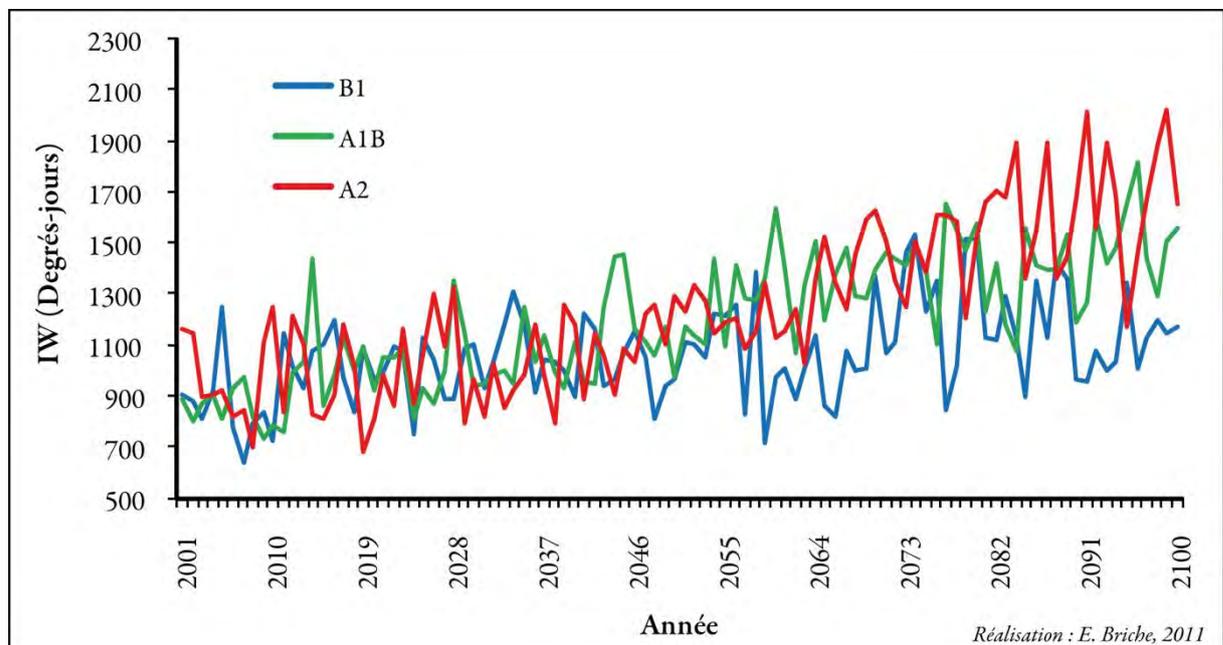


Figure 9.11 : Simulation de l'indice de Winkler de 2001 à 2100 pour le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) pour les trois scénarios de simulations futures (Données : Météo-France – CNRM)

9.3.2 Simulations de l'indice bioclimatique de Huglin

L'évolution de l'indice héliothermique de Huglin pour le vignoble champenois tend vers le type de climat tempéré-chaud dans le futur sur la moyenne trentenaire de 2070 à 2099 pour le scénario A2 (Figure 9.12) ce qui correspond dans la bibliographie à des régions telles que celles de Santiago du Chili, la Napa en Californie, Madrid, Montpellier ou encore Bastia pour la France et aux cépages tels que le Carignan, le Grenache ou l'Aramon (García de Cortázar Atauri, 2006). Cela ne signifie pas que la Champagne sera équivalente à ces vignobles mais plutôt que le type de climat évolue vers celui de régions chaudes.

L'indice de Huglin (1978) permet de classifier les zones climatiques viticoles et les cépages associés à chacune de ces régions. Le changement climatique abordé dans différentes études est abordé dans la viticulture par cet indice qui permet de montrer le changement de zonage et par conséquent des cépages traditionnels implantés depuis des décennies (Seguin et Garcia de Cortazar, 2004 ; Duchêne et Schneider, 2004 ; Jones *et al.*, 2005) même si cet indice repose sur un mode de calcul empirique qui ne prend pas en compte les caractéristiques locales telles que la topographie.

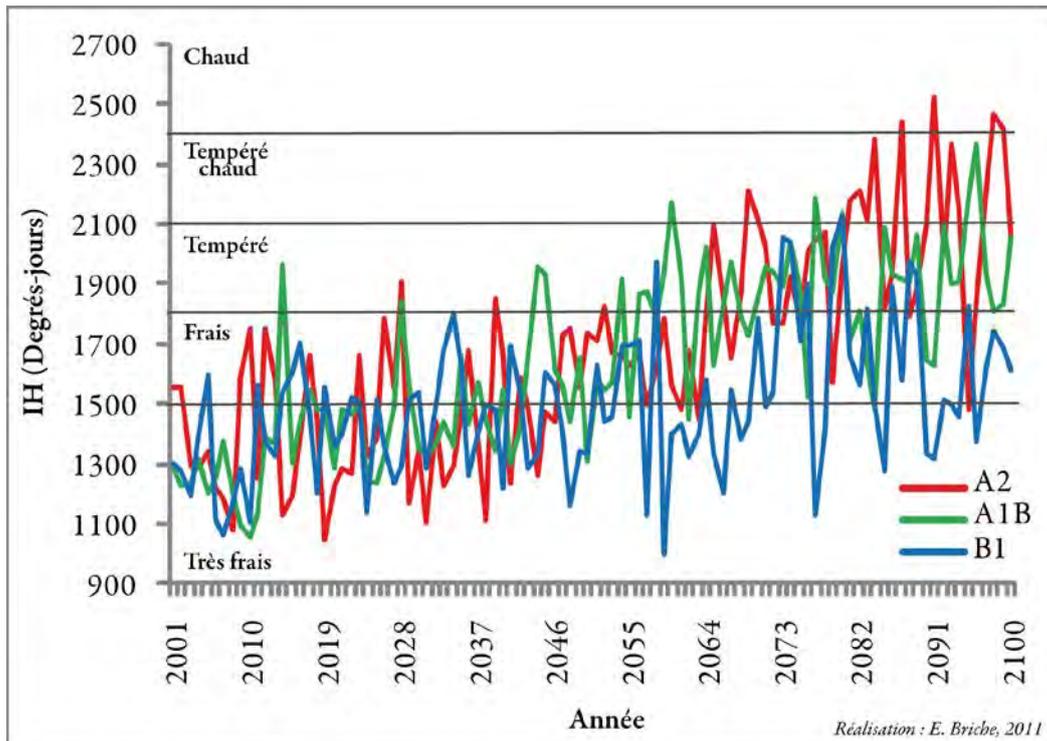


Figure 9.12 : Simulation de l'indice de Huglin de 2001 à 2100 pour le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) pour les trois scénarios de simulations futures (Données Météo-France - CNRM)

CONCLUSION DU CHAPITRE 9

Ce chapitre a permis de développer les perspectives futures thermiques et bioclimatiques de la région viticole champenoise. Même si la vision que donne les indices bioclimatiques peut paraître alarmiste ; leur mode de calcul est bien souvent empirique et se base sur des classifications sommaires.

La région viticole champenoise tend vers un type de climat plus chaud, qui lui est favorable pour le moment et les nuits plus chaudes contribuent au meilleur développement des baies et à leur bonne maturité.

CONCLUSION DE LA PARTIE 3

Cette partie a permis la validation et la critique des sorties de modèles issus des MCG et plus précisément des sorties du modèle à maille variable d'ARPEGE-Climat (RETIC).

Même si les biais sont évidents, les validations réalisées sur la période de contrôle montrent que la tendance thermique des dix dernières années de la station Reims-Courcy est très proche de celle du point de grille avec le scénario A2.

Nous avons pu donner un aperçu thermique futur pour la région viticole de Champagne mais il est nécessaire de prospecter à une échelle plus fine, prenant en compte les facteurs locaux. De ce fait, cette prospective permet d'anticiper des phénomènes extrêmes qui seront de plus en plus récurrents et défavorables au bon déroulement du cycle végétatif de la vigne. Les viticulteurs vont devoir s'adapter à un cycle végétatif plus court, décalé dans le temps, avec des risques de gel toujours importants au printemps, des canicules estivales de plus en plus fréquentes et surtout des conditions thermiques durant la maturation beaucoup plus chaudes qu'actuellement. Néanmoins, les pratiques culturales donnent un éventail large de possibilités d'adaptation en termes d'intrants permettant aux cépages précoces tels que le chardonnay de résister au gel, de gestion de la masse foliaire en été, etc. et la Champagne, comme en témoignent les indices bioclimatiques bénéficie d'un meilleur type de climat donnant un optimum thermique aux cépages champenois. Les inquiétudes peuvent être certes relativisées mais il est nécessaire d'anticiper les futures décennies.

Pour cela, le modèle à méso-échelle RAMS est paramétré afin d'obtenir des sorties à résolution de 200 m sur la période de contrôle (et à 5 km sur la période future. L'année 2003 sert d'étalonnage et vient compléter la démarche précédente en ciblant les aléas extrêmes qui risquent d'être plus fréquents dans le futur afin de déterminer leur répartition sur les coteaux viticoles grâce à une modélisation spatiale.

Quatrième partie

Modélisation spatiale à méso-échelle RAMS en 2003

Cette partie montre les applications réalisées sur le vignoble de La Marne avec le modèle à méso-échelle RAMS. Ce modèle permet d'obtenir sur la période de contrôle une résolution de 200 m, tenant compte des caractéristiques (occupation du sol, évolution de la végétation, texture du sol...) de la Champagne à l'échelle topoclimatique.

L'année 2003 sert d'étalonnage et de validation des simulations à méso-échelle car les conditions particulières de 2003 sont difficiles à modéliser. En effet, le vignoble champenois a été touché par une phase gélive intense au printemps au moment du débourrement et par la canicule estivale observée sur toute l'Europe Occidentale.

Quelques dates clés, marquante de ces deux phases extrêmes sont extraites du modèle à méso-échelle afin d'être comparées à quelques stations du vignoble. La bibliographie sur le changement climatique considère souvent la canicule 2003 comme pouvant donner un « aperçu du climat futur » (André et al., 2004 ; Bessemoulin et al., 2004 ; Agenis-Nevers, 2006 ; Seguin, 2010).

Chapitre 10

Observation, validation et simulation de l'aléa gélif printanier

La première phase extrême de l'année 2003 est une phase gélive. Les gelées printanières sont assez fréquentes en Champagne du fait de sa position septentrionale qui rend le vignoble vulnérable à ce type d'accidents climatiques et celles de 2003 ont été dommageables pour les vignes. Les jeunes bourgeons, à peine sortis, sont fragiles et vulnérables et peuvent être détruits si l'évènement gélif est intense notamment pour le Chardonnay dont le débourrement est plus précoce que les deux autres cépages traditionnels en présence : le pinot noir et le pinot meunier.

10.1 L'aléa gélif printanier 2003 dans le vignoble marnais

Il s'agit dans cette partie de déterminer l'importance de l'épisode de gel 2003 au printemps : les dommages causés par le gel ont fragilisé les vignes dès le début du cycle végétatif.

10.1.1 La période gélive 2003 au sein d'un temps plus long (1981-2010)

10.1.1.1 *Observation des températures minimales d'avril*

L'année 2003 s'inscrit dans la tendance observée du réchauffement climatique : en effet de 1981 à 2010 (Figure 10.1), les températures moyennes minimales du printemps et plus particulièrement d'avril tendent à augmenter d'environ 1,5°C sur la normale étudiée en conformité avec les conclusions du GIEC (2007). La moyenne des températures d'avril en 2003 est de 4,1°C ce qui correspond à la moyenne observée sur la période : les températures d'avril 2003 ne sont donc pas exceptionnellement plus froides que d'ordinaire. Par contre, en 2003, le débourrement est observé le 4 avril contre en moyenne le 14 avril tous cépages confondus sur la période 1951-2010. Les sommes thermiques nécessaires au débourrement sont acquises précocement avec une sortie de l'hiver plutôt douce d'où des bourgeons fortement susceptibles d'être gelés début avril où les températures minimales sont beaucoup plus basses que durant la période.

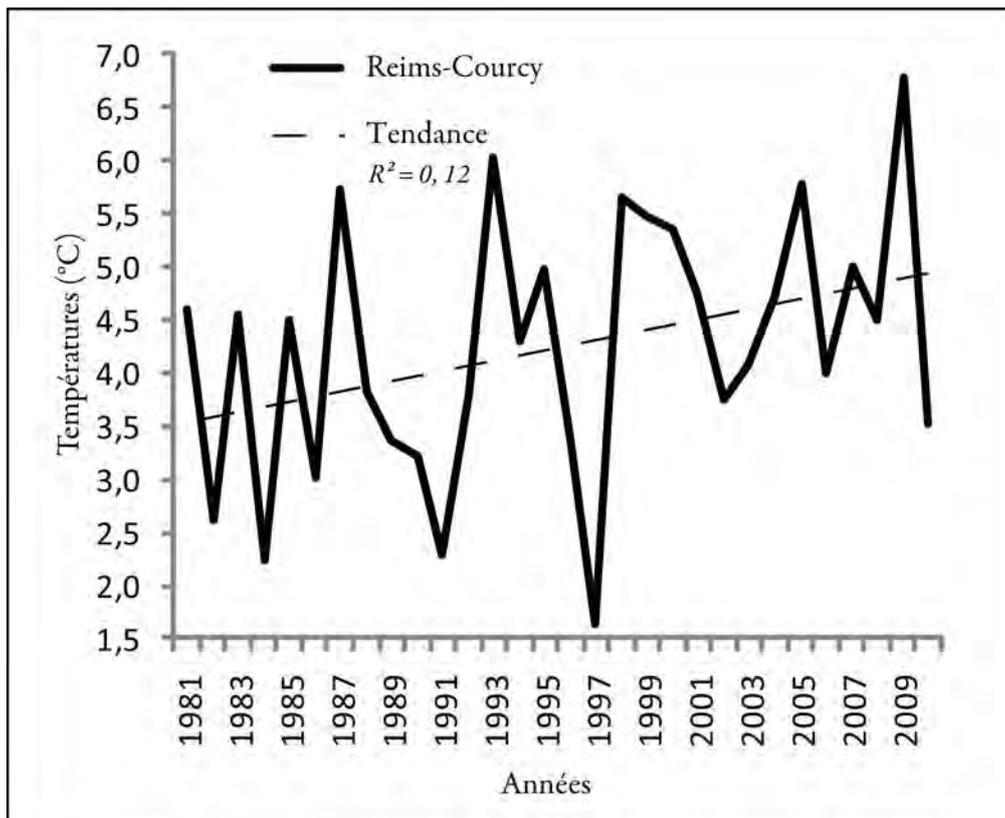


Figure 10.1 : Température minimale moyenne du mois d'avril 2003 de la station Reims-Courcy de 1981 à 2010 (Source : Météo-France et CIVC).

10.1.1.2 Observation et comparaison du printemps 2003 par quinzaine

La seconde quinzaine du mois de mars et surtout la première quinzaine d'avril 2003 (tableau X.I) sont beaucoup plus froides que sur la période 1981-2010 d'où le risque de gel des jeunes bourgeons précoces notamment pour le Chardonnay de la Côte des Blancs, qui a été le plus touché par la destruction des bourgeons lors de l'aléa gélif 2003 (cf. chapitre 3, 3.4).

Tableau X.I : Températures minimales moyennes en °C par quinzaine sur le printemps pour la station Reims-Courcy.

	2003	1981-2010
moyenne du 15/03 au 31/03	0,7	3,3
moyenne du 01/04 au 15/04	1,1	3,4
moyenne du 16/04 au 30/04	7,0	5,1
moyenne du 01/05 au 15/05	7,4	7,5
moyenne du 16/05 au 31/05	11,2	8,8

10.1.2 L'aléa gélif 2003 en Champagne

10.1.2.1 Détermination et isolation de la période gélive printanière

En 2003, la période gélive s'étend essentiellement du 7 au 11 avril, juste après le débourrement des bourgeons, plus précoce qu'en moyenne. Deux nuits notamment occasionnent des dégâts importants : la nuit du 7 au 8 avril et celle du 10 au 11 avril (Figure 10.2). Lorsque le vent est calme et que le ciel est clair, la situation radiative (Geiger, 1965 ; 1969 ; Carrega, 1994 ; Halley *et al.*, 2003) est à l'origine de différences importantes entre des stations éloignées de quelques kilomètres comme 8°C en Champagne (Beltrando, 1998). Cette variabilité spatiale des températures est expliquée par le rôle de la topographie dans un paysage de coteaux viticoles (Madelin et Beltrando, 2005).

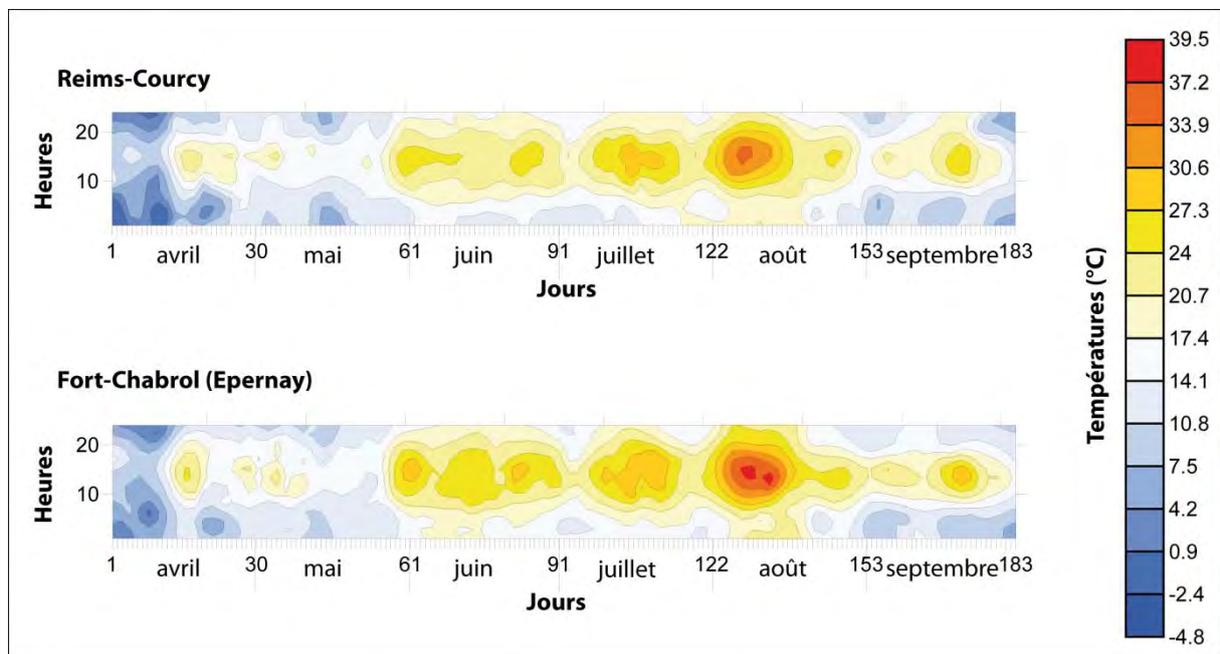


Figure 10.2. : Observations des températures horaires d'avril à septembre 2003 (discrétisation en moyenne et écart-type) pour deux stations du vignoble (Données : CIVC).

Les conditions météorologiques du printemps 2003 sont extrêmement particulières en Champagne (Langellier *et al.*, 2003, Moncomble *et al.*, 2007). En effet, dès février, le réchauffement est rapide, les sommes thermiques nécessaires au débourrement sont atteintes précocement début avril (le 4 avril contre le 14 avril en moyenne) et cette précocité s'associe à une sensibilité accrue de la vigne aux gelées printanières. Ces dernières sont brutales en avril (Figure 10.2.) et fin avril, 29 000 hectares sont touchés et plus de 13 000 hectares sont détruits à 100% (Langellier *et al.*, 2003a et b).

La station de Reims-Courcy montre une phase gélive plus intense : ceci est dû à sa position dans une cuvette et lors de phases gélives, l'air froid ne s'écoule pas comme le long

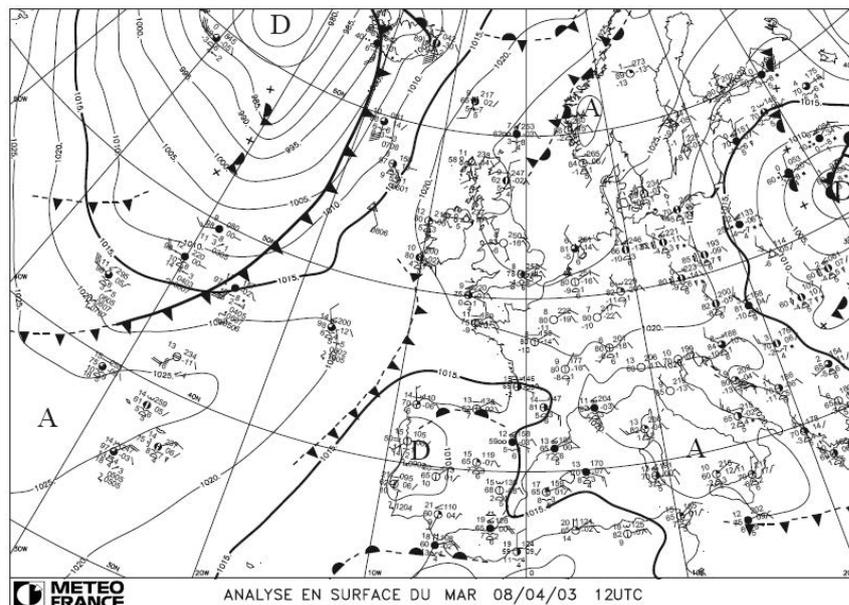
des coteaux viticoles (Fort-Chabrol) et s'accumule. Du 7 au 11 avril, cette station est celle qui enregistre le plus d'heures gélives météorologiques (inférieures à 0°C) (Figure 10.2).

10.1.2.2 *Les conditions météorologiques des nuits gélives*

Deux nuits ont été très gélives en 2003 : les nuits du 07 au 08 avril et du 10 au 11 avril et les conditions météorologiques ont été très favorables au gel radiatif. En effet, les nuits du printemps 2003 sont favorables à l'accroissement du refroidissement par des déperditions énergétiques d'origine radiative suite au dégagement du ciel. Le gel peut alors être dommageable pour la vigne, à peine sortie du débourrement.

Une dorsale anticyclonique s'étend de la Scandinavie à l'Atlantique le 8 avril (Figure 10.3). Elle apporte un air froid et sec sur toute la France, même si le bassin méditerranéen est plus soumis à des nuages bas et quelques bruines. Le vignoble champenois est directement soumis à l'arrivée de cette masse d'air en provenance de Scandinavie. Il en résulte des températures extrêmement négatives comme à Reims avec -6°C. La nuit du 07 au 08 avril, précédée par cette journée très froide avec un vent de secteur N à NE, est une nuit claire jusqu'au lever du jour en situation radiative avec une vitesse du vent inférieure à 2 m/s favorisant le gel (Figure 10.3, 10.4 et 10.5). En effet, à Reims-Courcy, la direction maximale des 7 et 8 avril est de 90° et 100° soit une direction d'est et la vitesse maximale est faible le 8 avril : 5 m/s. A Fleury, le vent est relevé à 2 m du sol, la nuit du 7 au 8 avril est bien marquée par un vent faible inférieur à 2 m/s avec une direction N-NE. Le vent de Reims-Courcy, plus élevé en vitesse maximale journalière, s'explique par le fait l'anticyclone a apporté l'air froid advectif.

Les deux types de refroidissement – advectif et radiatif - se combinent lors de cette phase gélive 2003 : l'air froid venant de l'est est apporté par advection et la nuit, si le ciel se dégage, le refroidissement en cours est accentué par des déperditions radiatives notamment dans les secteurs topographiques abrités tels que les cuvettes.



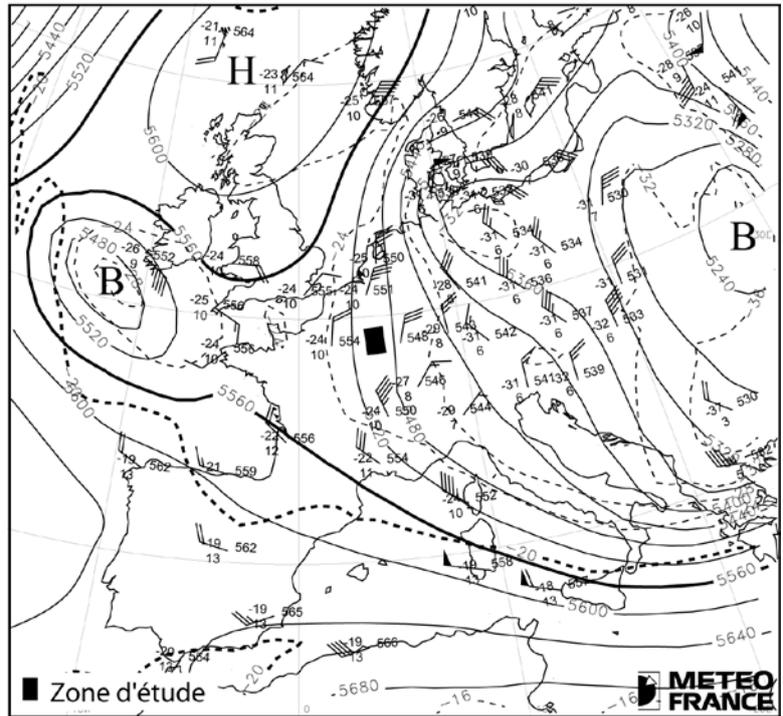


Figure 10.3 : Bulletin Hebdomadaire d'Etudes et de Renseignements de Météo-France, du 8 avril 2003 en surface et en altitude, 12H UTC.

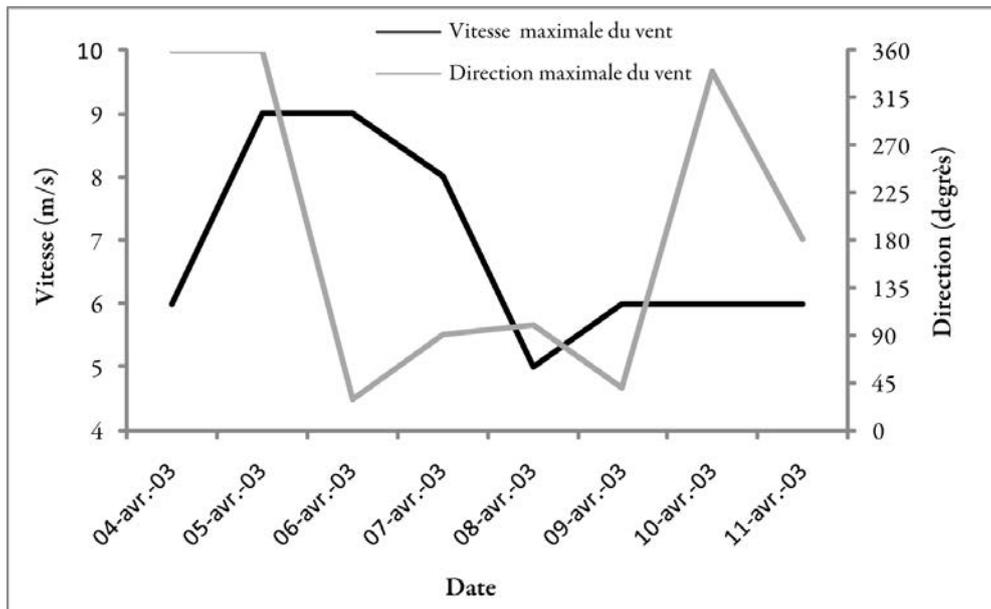


Figure 10.4 : Vitesse et direction²⁵ maximales quotidiennes du vent à Reims-Courcy du 4 avril au 11 avril 2003 (Données : CIVC et Météo-France).

²⁵ Le vent est relevé à 10 m du sol à Reims-Courcy pour limiter les perturbations et turbulences de l'écoulement (Madelin, 2004).

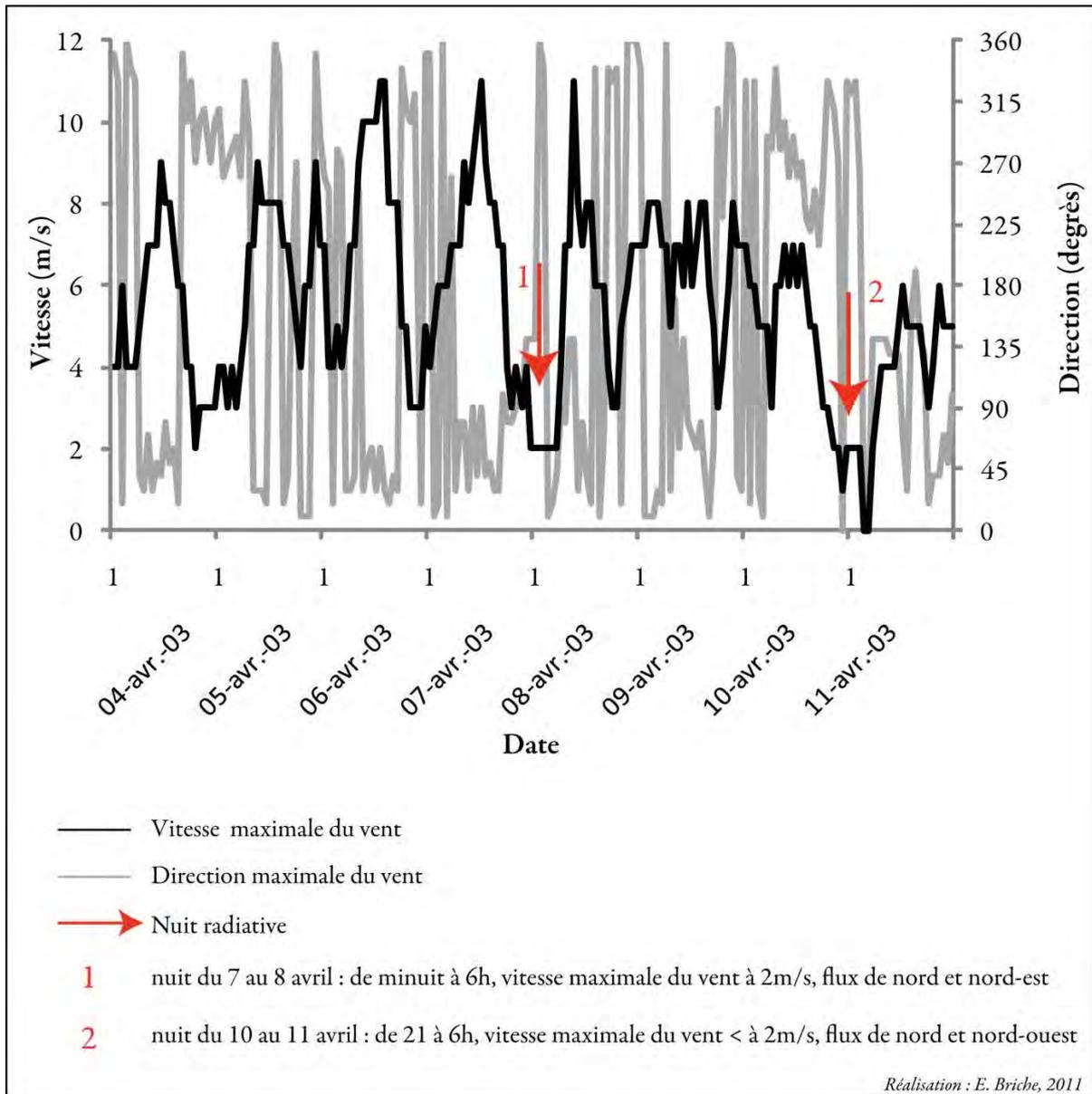


Figure 10.5 : Vitesse et direction²⁶ maximales horaires du vent à Fleury-la-Rivière du 4 au 11 avril 2003 (Données : CIVC).

Le 10 avril, la perturbation du sud-ouest est présente sur l'est de la France et a apporté des précipitations notamment neigeuses (Figure 10.6). L'advection d'air plus froid et sec est toujours présente sur le nord de la France. La journée du 10 avril est nuageuse et caractérisée par des précipitations neigeuses dans l'après-midi (entre 14:00 et 16:00) puis dans la nuit (entre 22:30 et 23:30) ; elle marque le retour à une situation advective et la fin de l'épisode froid printanier 2003. Les dégâts majeurs ont été observés la nuit du 10 au 11 avril. La vigne est fragilisée et plus vulnérable : gorgés d'eau, les bourgeons gèlent par cristallisation des tissus suite au refroidissement nocturne lors du dégagement du ciel avec un vent faible inférieur à 2 m/s à Fleury entre 21h et 6h avec un flux de N-NW ; à Reims-Courcy, la

²⁶ Le vent est relevé à 2 m du sol à Fleury.

direction maximale du 10 a vril étant de N-NE et la vitesse de 6m/s (Figures 10.4 et 10.5) (Quénol, 2002). Tous ces paramètres définissent le risque de gel des bourgeons avec un aléa gélif intense et des jeunes bourgeons fragilisés.

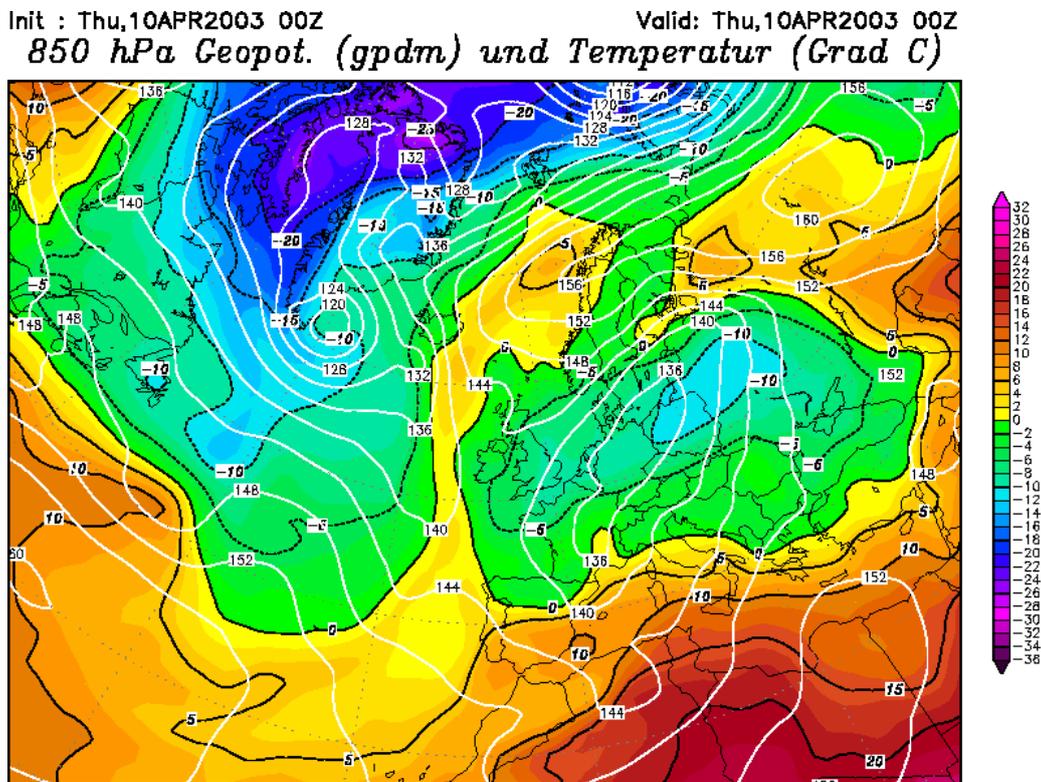


Figure 10.6 : Analyse synoptique du 10 avril (Source : www.wetterzentrale.de)

10.1.2.3 La nuit du 8 avril 2003

La carte des minimas printaniers horaires atteints durant la nuit du 08 avril (Figure 10.7) montre qu'il est difficile de repérer des différences spatiales majeures en tenant compte des pentes. Certaines stations enregistrent les températures les plus basses (entre -9°C et $-5,1^{\circ}\text{C}$). Il s'agit de Chambrecy (bas de coteau, ouest, 125 m), Savigny (mi-coteau, sud, 125 m), et Sacy (mi-coteau, nord, 155 m) situées au nord-ouest de la montagne de Reims à des altitudes plutôt élevées sur les coteaux ; Verzenay (bas de coteau, nord, 95 m) située dans un secteur plutôt gélif avec une exposition nord et une situation en bas de coteau moins favorables et Germaine (bas de coteau, ouest, 175 m), considérée comme un poste très froid (Madelin, 2004). Les stations de la vallée de la Marne ou à proximité comme Fleury, Bouzy haut, Chouilly enregistrent en revanche des minimas moins négatifs (entre $-0,3$ et $-1,7^{\circ}\text{C}$).

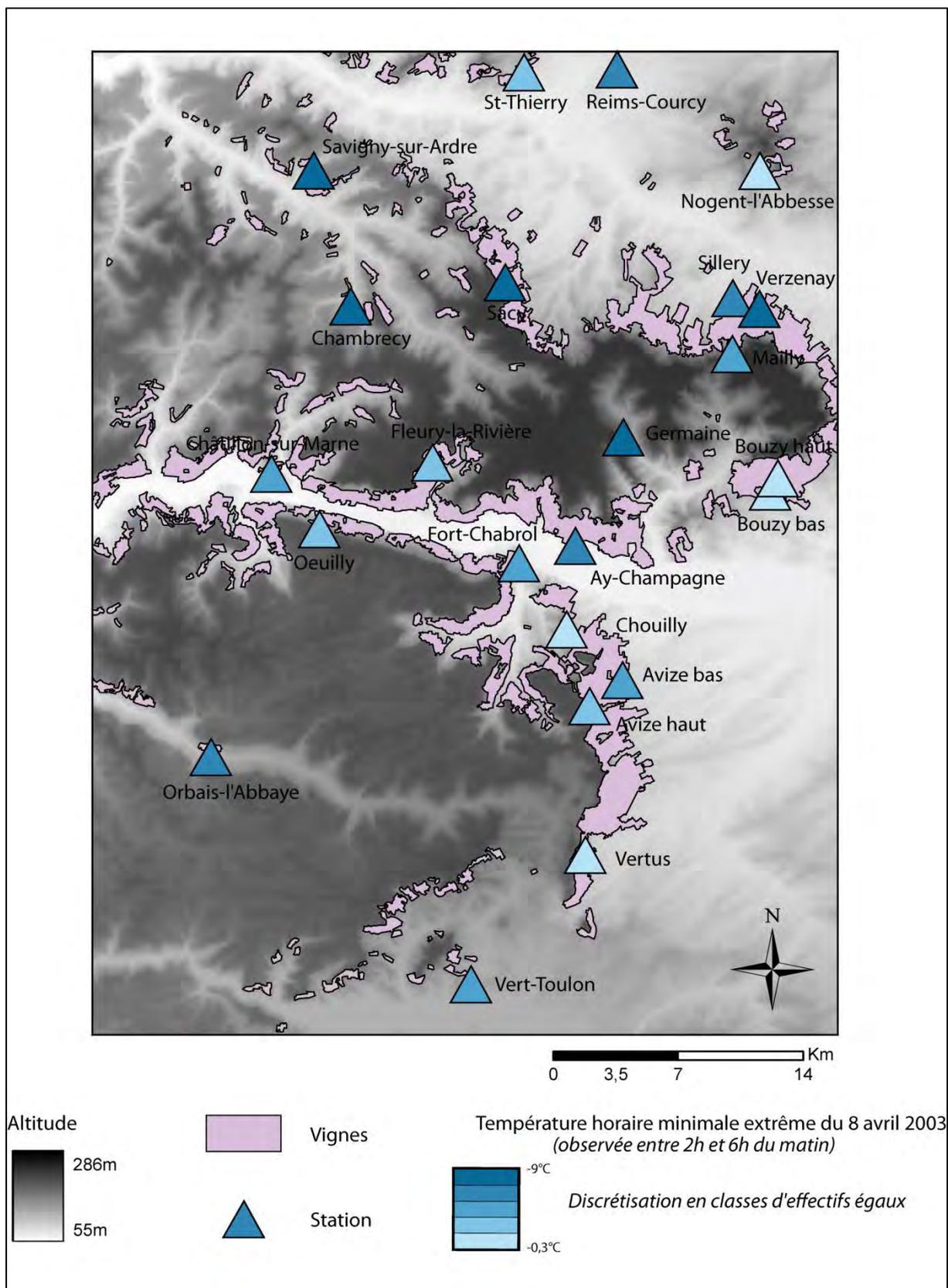


Figure 10.7 : Minimas horaires thermiques observés le 8 avril (entre 2h et 6h du matin) pour les 23 stations du vignoble marnais (données : CIVC, SRTM, BDCarto©IGN).

La variabilité spatiale des températures pour cette nuit à fort refroidissement essentiellement radiatif n'est pas évidente à partir de la cartographie ponctuelle cependant la topographie joue un rôle prépondérant dans cette répartition : en effet, les stations implantées en cuvette ou en bas de coteau ont enregistré des températures plus négatives. De plus, le nord-est du vignoble apparaît plus froid sur cette carte : ceci est dû à l'apport de froid par un flux de nord/nord-est. Cette date est utilisée pour la réalisation d'une modélisation spatiale avec le modèle RAMS.

10.2 Comparaison modèle/stations lors de la phase gélive à partir des données horaires

10.2.1 Simulations du 4 au 9 avril 2003 entre RAMS et les stations de référence

10.2.1.1 *Les corrélations linéaires sur les données horaires du 4 au 9 avril 2003*

Du 4 au 9 avril, les corrélations de Bravais-Pearson entre les données observées sur les 7 stations choisies et les données simulées par RAMS sont statistiquement significatives à 5% avec des coefficients supérieurs à 0,87. Le modèle RAMS reproduit bien la chronologie des événements, les courbes sont très proches et ont les mêmes cycles sur la période étudiée avec une reproduction correcte du cycle journalier avec les extrêmes froids printaniers nocturnes à 5h ou 6h du matin (Figure 10.8). Les courbes montrent que les simulations sont de plus en plus précises au fur et à mesure de la simulation, en effet, les premiers jours servent d'étalonnage du modèle. Les nuits les plus froides où les extrêmes froids sont observés pour toutes les stations sont les nuits du 7 au 8 et du 8 au 9 avril avec des températures inférieures à 0°C, seuil du gel météorologique et qui atteignent le seuil de gel agronomique pour certaines stations (températures inférieures à -2°C). Avant le lever du jour, pour Reims-Courcy, les températures sont inférieures à -2°C les 8 et 9 avril ainsi que pour Verzenay, Châtillon, Avize bas et Epernay le 8 avril qui est l'une des deux nuits les plus gélives en Champagne en 2003. Ces températures sont simulées par le modèle avec une accentuation des extrêmes nocturnes (entre 4 et 6h) : le modèle RAMS montre un biais froid évident notamment pour la station de Fleury-la-Rivière avec une différence de température de 7,2°C à 5h du matin le 9 avril.

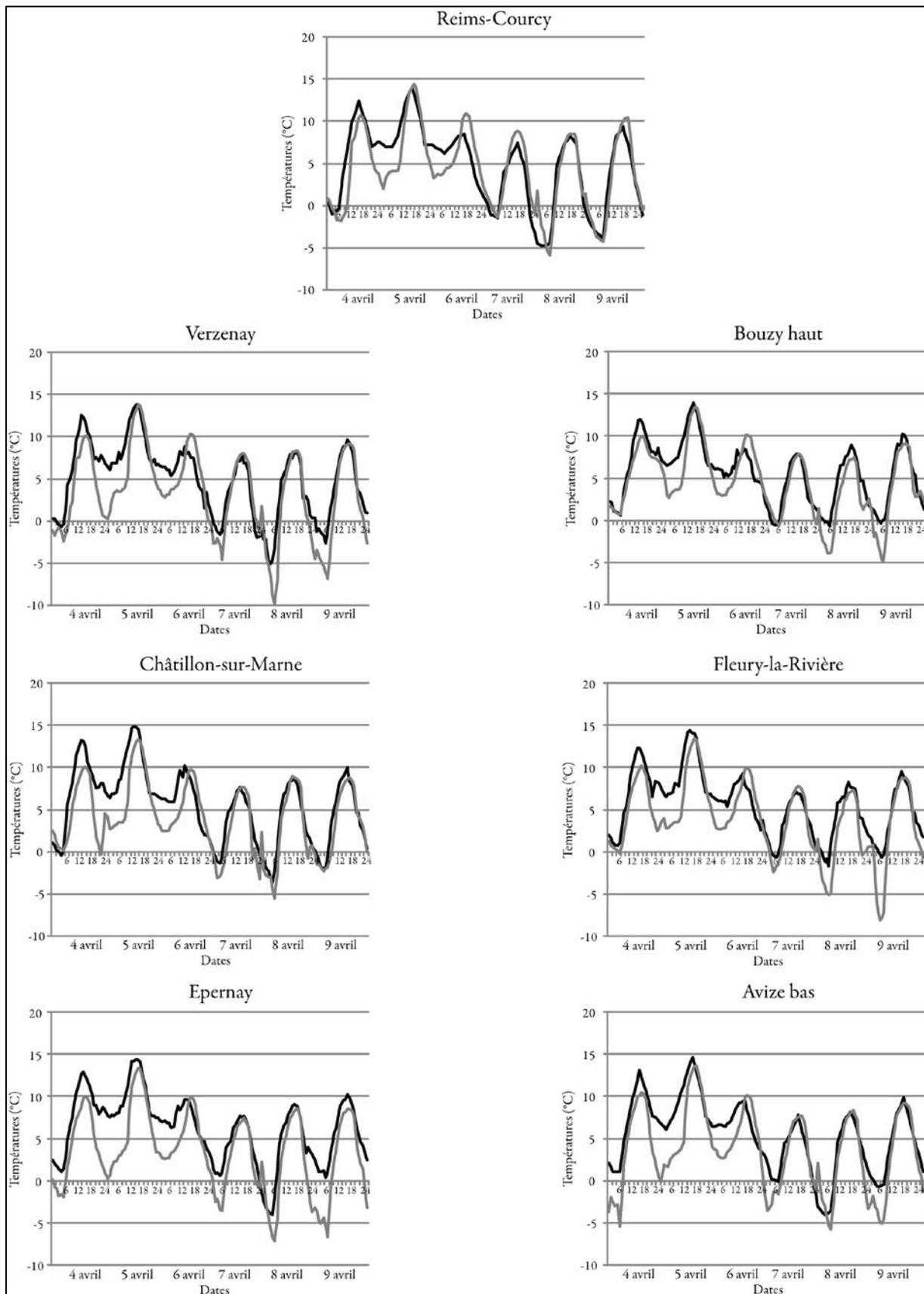


Figure 10.8 : Températures horaires observées pour les stations sélectionnées et simulées (en gris la courbe simulée, en noir la courbe observée) par le modèle RAMS sur la période du 4 au 9 avril 2003 avec une résolution à 200 m (Données : RAMS ; Réalisation : E. Briche, 2011).

10.2.1.2 Tests statistiques sur les distributions des températures horaires sur la période simulée par le modèle du 4 au 9 avril 2003

Sur la période du 4 au 9 avril, le test de comparaison des moyennes pour les stations de Verzenay, Fleury, Epernay, Châtillon, Bouzy haut et Avize bas est statistiquement significatif à 5% : les moyennes sont statistiquement différentes pour toutes les stations sauf Reims-Courcy alors que les températures moyennes sur les journées simulées sont relativement proches quantitativement entre les données simulées et observées.

Même si les chroniques sont bien représentées dans le temps comme en témoignent les coefficients de corrélation, le modèle présente des biais validé par le test de Kolmogorov-Smirnov qui montre que les distributions sont statistiquement différentes à 5% pour les 7 stations étudiées. Ceci est dû aux extrêmes et la forte dispersion des valeurs du modèle notamment lors de l'extrême thermique de la nuit à 5h du matin : en effet, sur les dates simulées, sur les 7 stations confondues, les écarts entre la température observée et la température simulée sont entre $-0,8^{\circ}\text{C}$ et $7,2^{\circ}\text{C}$, sachant que la plupart des biais froids sont quantifiés d'environ $2,6$ à $4,5^{\circ}\text{C}$ ce qui n'est absolument pas négligeable. Cela témoigne des limites du modèle : il ne parvient pas à reproduire les conditions locales de situation d'extrêmes et accentue les températures minimales ; elles sont plus négatives qu'en réalité. Les biais proviennent certainement d'erreurs sur l'état de la végétation, sur la convection, etc. ou tout simplement de la difficulté à reproduire les mécanismes de refroidissement nocturnes. Pour le modèle, le seuil des -2°C dommageable pour la vigne, au moment du débourrement est atteint plus rapidement.

10.2.1.3 Simulation journalière pour chaque date avec les marges d'incertitude issues du modèle RAMS à 200 m de résolution

Les simulations par date pour chaque station sont obtenues avec les marges d'incertitudes du modèle dans un rayon de 1,5 km autour de la station. L'évolution journalière pour Avize bas (Figure 10.9) sur la période est bien reflétée par le modèle avec généralement un minimum vers 5h du matin et un maximum vers 15h, ces extrêmes thermiques journaliers sont parfois décalés par le modèle : les 5 et 6 avril, les maxima sont plutôt à 16h pour le modèle et en revanche à 15h pour la station. Pour Avize bas, le modèle s'étalonne les premiers jours puis se rapproche de la réalité observée : les courbes simulées suivent celles d'Avize à partir du 7 avril 2003. On remarque également que la dispersion des températures autour de la station est beaucoup plus importante lors des minimas à 5h du matin ce qui confirme la difficulté du modèle à reproduire l'extrême thermique négatif défavorable à la vigne à peine débourrée mais aussi de la forte variabilité spatiale des températures minimales journalières, ayant lieu la nuit. Ainsi, dans un rayon de 1,5 km autour de la station, la température minimale à 5h du matin le 9 avril pour Avize bas peut varier entre -9°C et -1°C , la marge d'incertitude étant beaucoup plus forte pour les températures les plus négatives. On

peut donc constater que le modèle simule l'aléa gélif au bon moment : en effet les 8 et 9 avril, au matin, avant le lever du soleil, les températures sont négatives et sont entre les seuils de gel météorologique et agronomique pour le modèle et pour la station. Même si le modèle accentue les températures négatives de ces deux nuits gélives, il rend compte de l'ordre de grandeur du seuil thermique potentiellement dommageable pour les bourgeons. Pour le 7 avril, la station montre des températures proches de 0 avant le lever du soleil. Si l'on tient compte des marges d'incertitude du modèle dans un rayon de 1,5 km autour de la station, le modèle reproduit les mêmes tendances. Ces observations sont valables pour les autres stations étudiées (Annexes XIII).

En comparant les résultats des 7 stations sur les simulations quotidiennes, le modèle conserve les ordres de grandeur des basses températures nocturnes. Par exemple, à 5 h du matin, le 8 avril, la température simulée à Verzenay est de -9°C contre -5°C environ observée sur la courbe de la station en bas de coteau, réputée pour sa situation gélive : c'est la température la plus basse simulée pour les 7 stations, le modèle reproduit donc la variabilité spatiale des températures minimales dans le vignoble de la Marne. Le biais entre la température simulée et la température observée varie de 2 à 4°C selon les stations et les heures simulées mais la température simulée rend compte des différences spatiales entre les stations : la station en bas de coteau est plus froide que les autres stations, suivie de Reims-Courcy en plaine, les stations de la vallée de la Marne (Epernay, Fleury et Châtillon) ayant des températures plus élevées que les précédentes. Concernant les fourchettes d'incertitudes, elles varient selon les stations de quelques degrés à plus d'une dizaine de degrés d'écart comme pour Châtillon le 8 avril à 5h, l'observation enregistrée est de -3°C environ, la simulation donne $-4,5^{\circ}\text{C}$ mais avec une fourchette allant de -2°C à -11°C . Le biais froid est donc relativement faible ($1,5^{\circ}\text{C}$) mais la fourchette est conséquente. Le modèle simule donc pour Châtillon une forte variabilité spatiale de la température minimale dans un rayon de 1,5km autour de la station.

La variabilité topographique est prise en compte par RAMS même si un biais froid accentue les extrêmes thermiques pour toutes les stations au moment du minimum à 5 h du matin mais également durant la période de refroidissement nocturne.

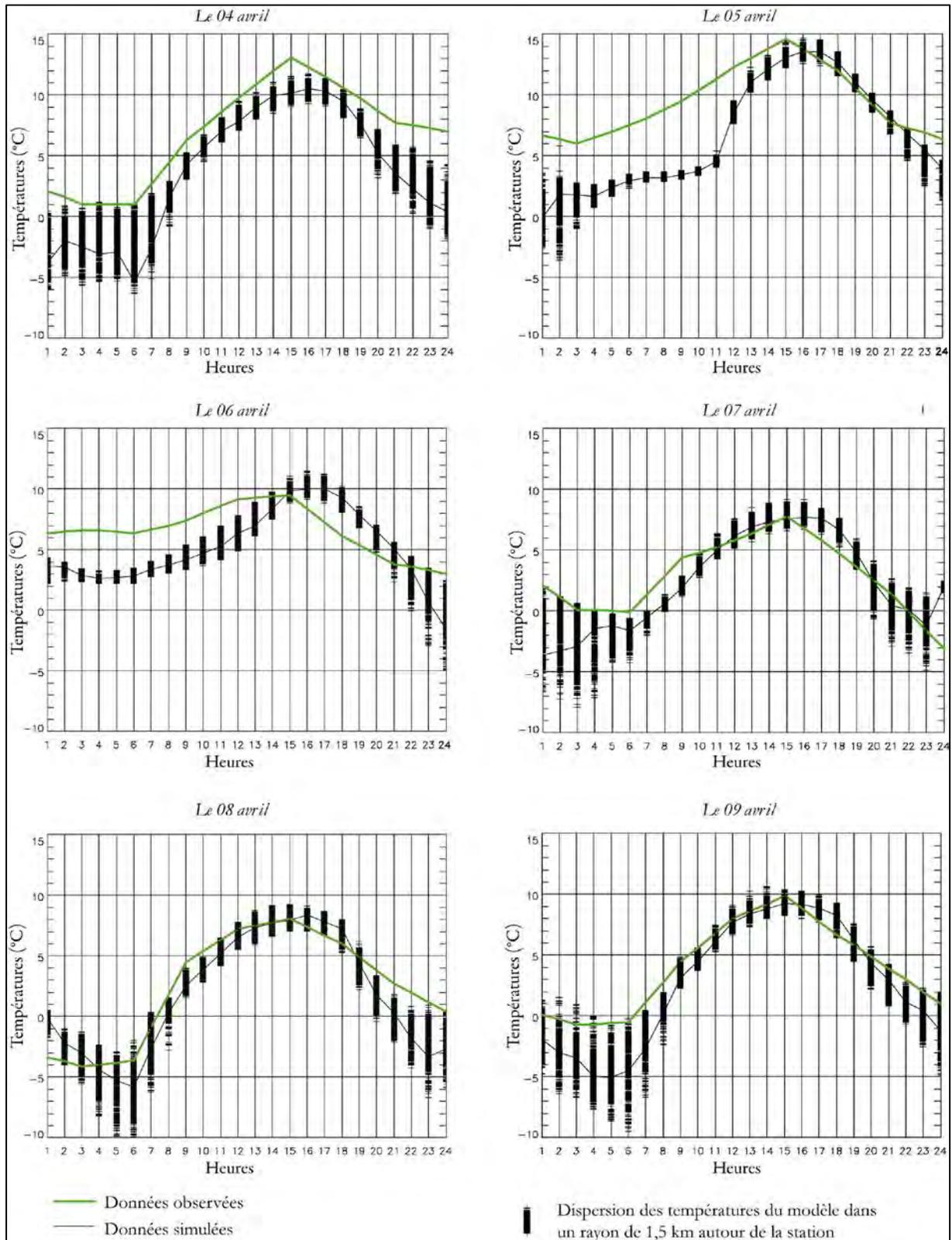


Figure 10.9 : Évolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Avize bas du 4 au 9 avril 2003 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).

10.2.1.4 Qualité du modèle RAMS sur le refroidissement nocturne

Les refroidissements nocturnes des nuits simulées sont observés pour les 7 stations servant de test pour vérifier la qualité du modèle RAMS.

Le tableau (X.II) présente les différences entre la température observée la veille, à l'heure moyenne du coucher du soleil (19h) et l'heure la plus froide en moyenne (5h). Les différences les plus importantes sont observées lors de la nuit la plus froide du 7 au 8 avril 2003) pour toutes les stations sauf Reims-Courcy, la nuit la plus froide étant celle du 8 au 9 avril. Les stations implantées sur les coteaux viticoles ont un refroidissement d'environ 7°C en moyenne entre 19h et 5h du matin la nuit du 7 au 8 avril, ce refroidissement étant plus marqué pour les stations de Châtillon et Epernay à cette date alors que le modèle simule un refroidissement d'environ 9°C en moyenne et plus marqué pour Reims-Courcy et Verzenay. Le biais froid est observé pour toutes les stations : le modèle accentue les refroidissements nocturnes d'environ 3°C en moyenne sur la période simulée. Les données observées de Châtillon sont les mieux représentées par le modèle la nuit du 7 au 8 avril et également en moyenne sur toute la période avec un biais de 1,5°C mais il faut tenir compte de la forte dispersion de la température dans un rayon de 1,5 km autour de la station vue précédemment. Les simulations RAMS montrent qu'en dépit du biais froid, les températures enregistrées par les stations sont plutôt bien reproduites avec un refroidissement nocturne de plus en plus accentué durant la phase gélive sauf pour Châtillon et Fleury où le refroidissement nocturne le plus froid est simulé dans la nuit du 6 au 7 avril 2003.

Tableau X.II. : Refroidissements nocturnes pour la période de simulation du printemps 2003 calculés à partir de la différence entre la température au coucher du soleil la veille (19h) et la température de l'heure la plus froide en moyenne (5h)

	Reims-Courcy		Avize bas		Châtillon		Fleury		Verzenay		Epernay		Bouzy haut	
	obs	sim	obs	sim	obs	sim	obs	sim	obs	sim	obs	sim	obs	sim
nuit du 4 au 5 avril	2,0	4,3	2,7	5,2	2,3	3,4	2,2	3,9	1,8	4,3	2,5	5,0	2,3	4,8
nuit du 5 au 6 avril	3,7	7,1	4,1	8,4	3,6	7,8	3,8	7,8	3,9	7,9	4,4	7,8	4,5	8,0
nuit du 6 au 7 avril	5,8	9,1	5,4	9,1	6,4	10,1	5,6	9,1	6,3	10,7	5,2	10,5	5,3	8,1
nuit du 7 au 8 avril	7,4	10,9	7,4	10,1	8,0	7,2	5,8	8,9	6,9	13,4	8,9	10,8	3,4	8,3
nuit du 8 au 9 avril	8,7	8,6	5,5	9,5	6,6	5,8	4,8	9,7	5,4	9,8	4,9	9,2	4,6	7,2
moyenne	5,5	8,0	5,0	8,5	5,4	6,9	4,4	7,9	4,9	9,2	5,2	8,7	4,0	7,3
écart (observé-simulé)	-2,5		-3,4		-1,5		-3,4		-4,3		-3,5		-3,2	

moyenne observation	moyenne simulation
2,3	5,2
4,0	8,4
5,7	9,8
6,8	9,8
5,8	8,5

moyenne	4,9	8,0
écart (observé-simulé)	-3,1	

10.2.2 Cartographie des champs de températures pour les dates simulées par le modèle RAMS à méso-échelle à 200 m de résolution

10.2.2.1 *Simulation du 4 au 9 avril 2003*

Les températures évoluent au sein du vignoble du 4 au 9 avril 2003 (Figure 10.10) avec les journées des 7, 8 et 9 avril beaucoup plus froides et surtout gélives avec des températures négatives accentuant la vulnérabilité de la vigne, à peine débourrée. La Montagne de Reims est beaucoup plus touchée par les températures négatives comme par exemple en bas de coteau où les écoulements d'air froid stagnent la nuit et provoquent « un lac d'air froid », c'est le cas à Verzenay, en bas de coteau, avec des phénomènes d'inversion thermique récurrents. Les dommages ont été observés en 2003 sur la Côte des Blancs, la plupart du temps les coteaux viticoles étant en mono-cépage chardonnay. Ce cépage est plus précoce ; de ce fait les bourgeons sont d'autant plus vulnérables au gel. La succession de nuits aux températures négatives gélives a pu contribuer à intensifier la vulnérabilité de la vigne et les ceps ont été atteints (*cf. chapitre 3*).

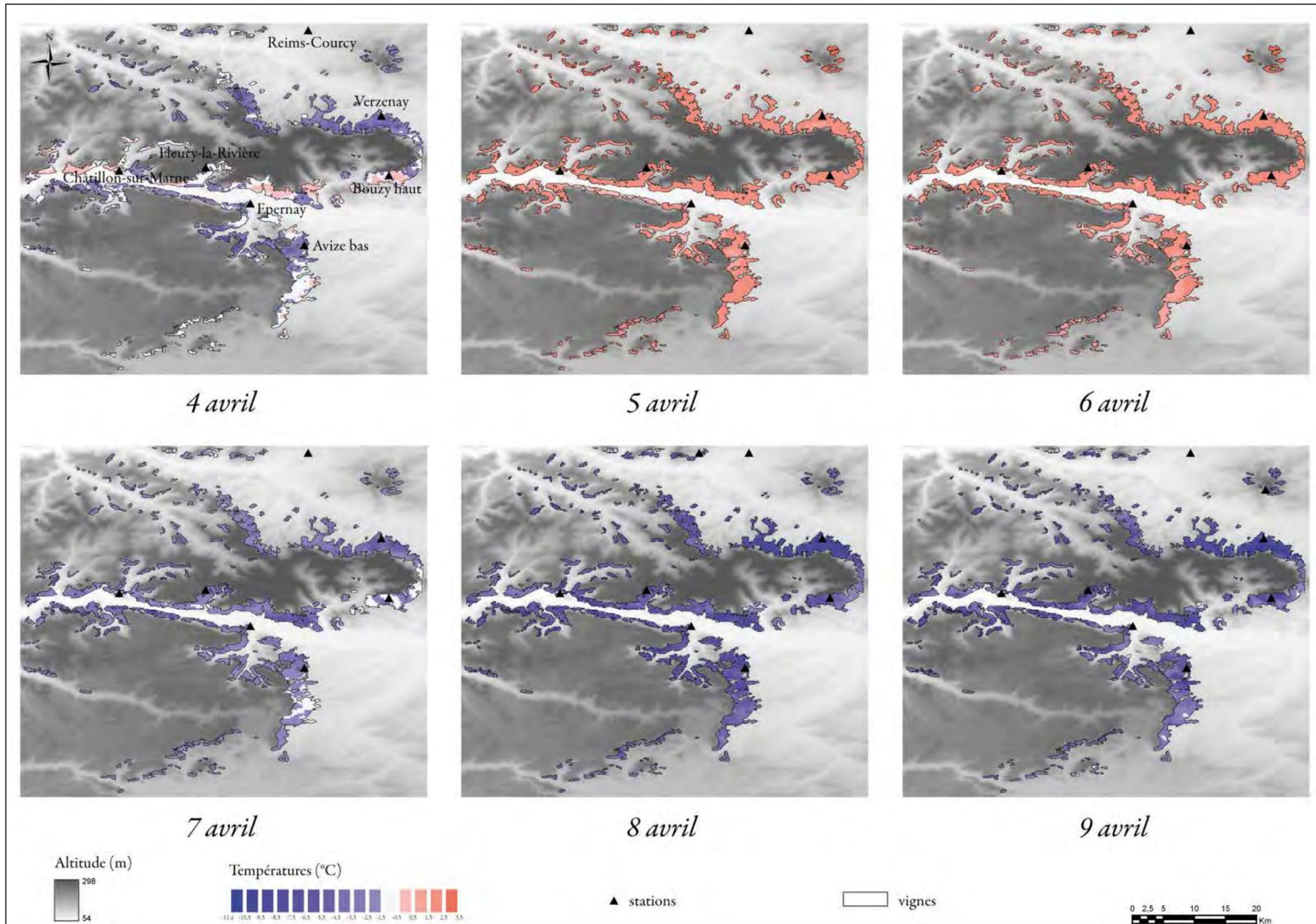


Figure 10.10 : Évolution de la température à 5h du matin du 4 au 9 avril 2003 simulée par le modèle RAMS sur les coteaux viticoles à 200 m de résolution (Données : RAMS, CIVC, BD©IGN ; Réalisation : E. Briche, 2011).

10.2.2.2 Etude de cas : la nuit du 7 au 8 avril 2003

La nuit du 7 au 8 avril a été l'une des deux nuits les plus dommageables avec celle du 10 au 11 avril exploitée avec le modèle méso-NH de Météo-France dans la thèse de Malika Madelin (2004). Ces dommages sont dus au dépassement du seuil défavorable à la vigne de -2°C qui correspond au gel agronomique mais également du fait des conditions radiatives avec un ciel clair et un vent calme lors de cette nuit gélive.

Les conditions synoptiques : champs de pressions, vents et températures sur la grille 1

Le 8 avril à 5h du matin, le modèle RAMS reproduit ces conditions radiatives sur la grille 1 du système de grilles imbriquées du modèle (Figures 10.11, 10.12 et 10.13) : le temps est anticyclonique au niveau de la Champagne avec des pressions entre 980 et 1020 mb (Figure 10.11), le vent synoptique est un flux de nord-est avec une vitesse entre 3,50 et 4,50 m/s (Figure 10.12) et une température inférieure à 0°C (Figure 10.13). L'apport d'air froid venant de la dorsale anticyclonique est bien marquée ainsi que les conditions radiatives nocturnes même si le vent est supérieur à 2 m/s. Ceci s'explique à la fois par l'échelle de la grille 1 qui représente les conditions synoptiques et non locales au sein du vignoble mais certainement aussi par le flux de NE imposé par l'advection qui impose une vitesse de vent relativement modérée.

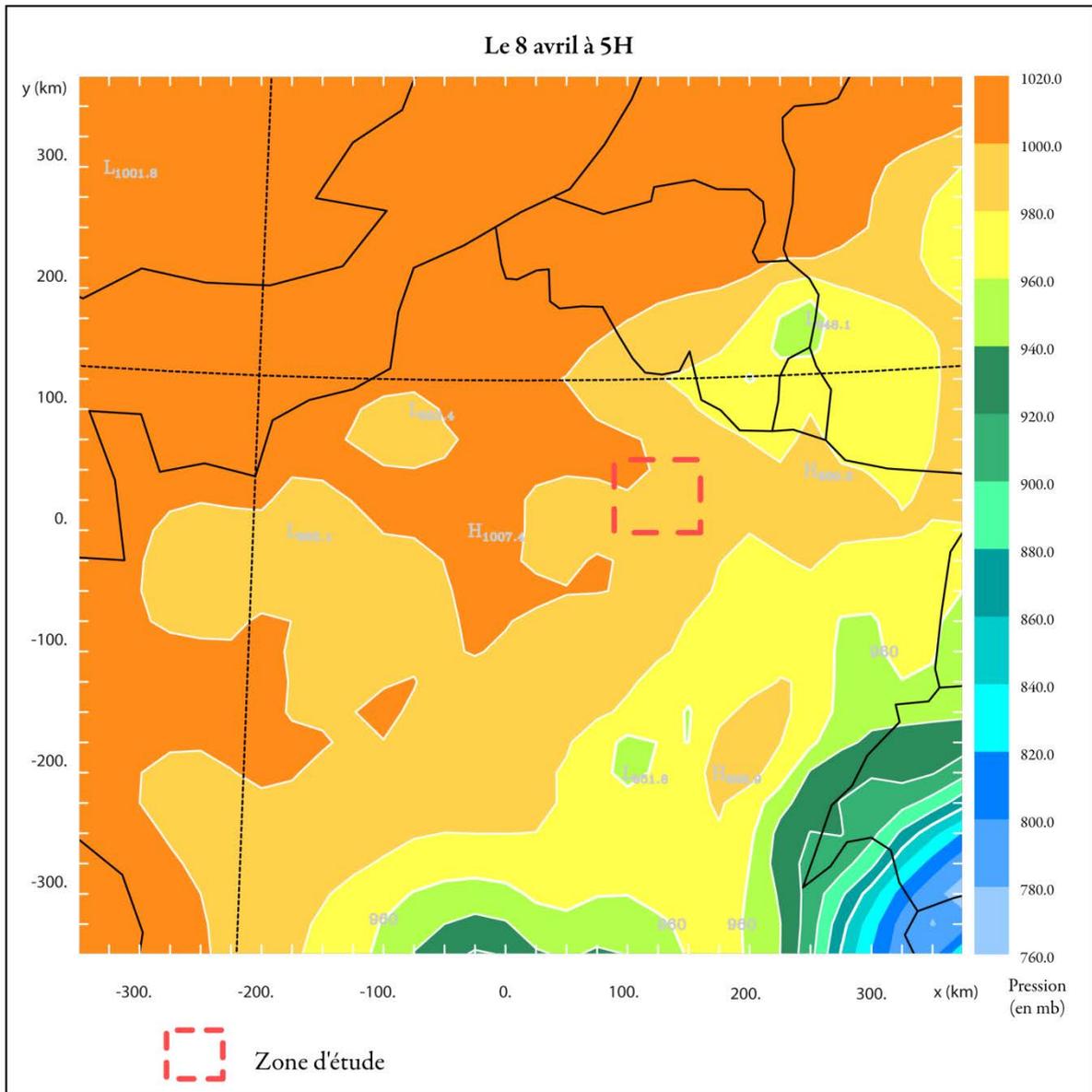


Figure 10.11 : Champ de pressions simulé par le modèle RAMS à 5h du du matin le 8 avril 2003 sur la grille 1 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).

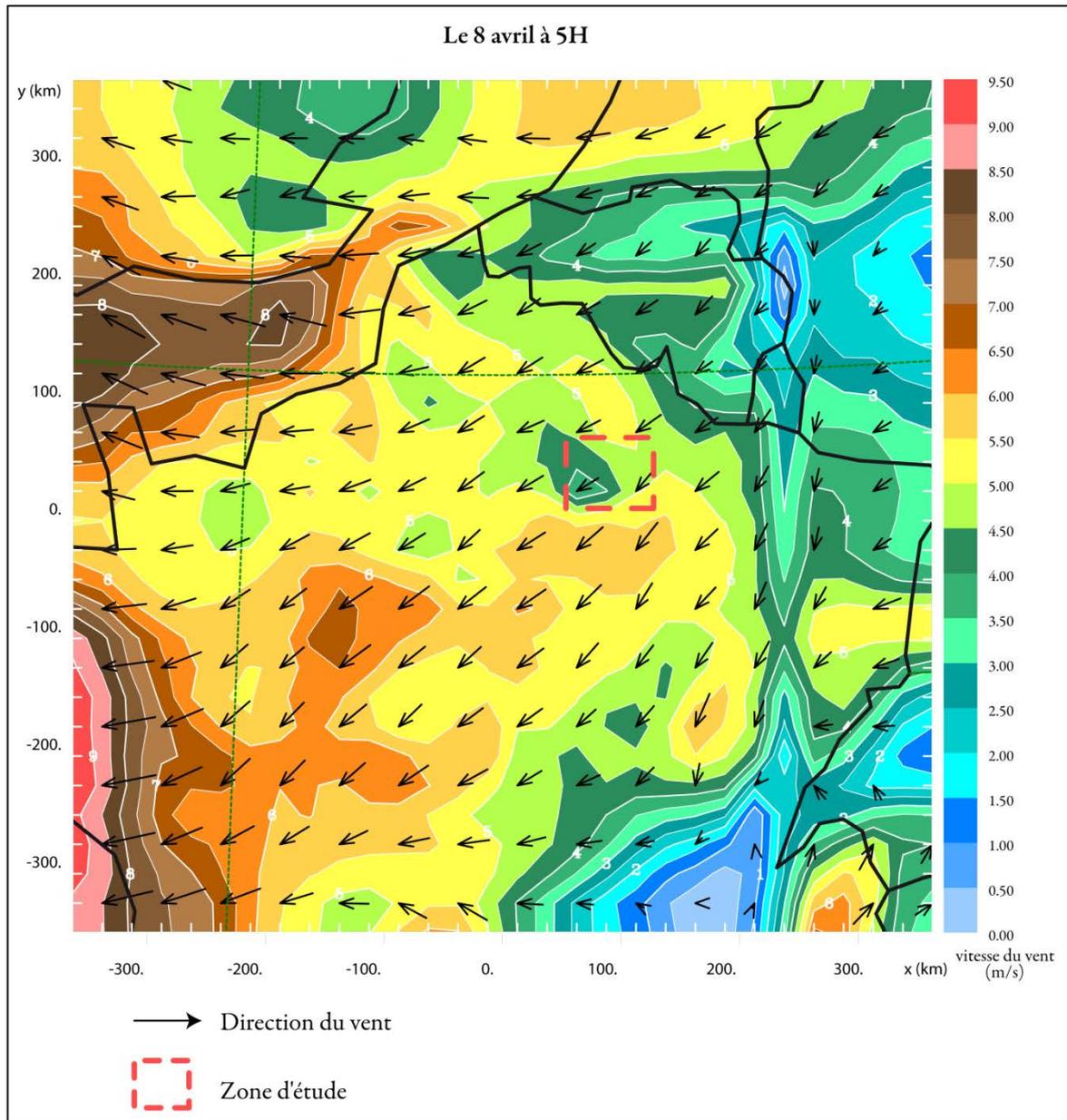


Figure 10.12 : Champ de vitesse et direction du vent simulé par le modèle RAMS à 5h du du matin le 8 avril 2003 sur la grille 1 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).

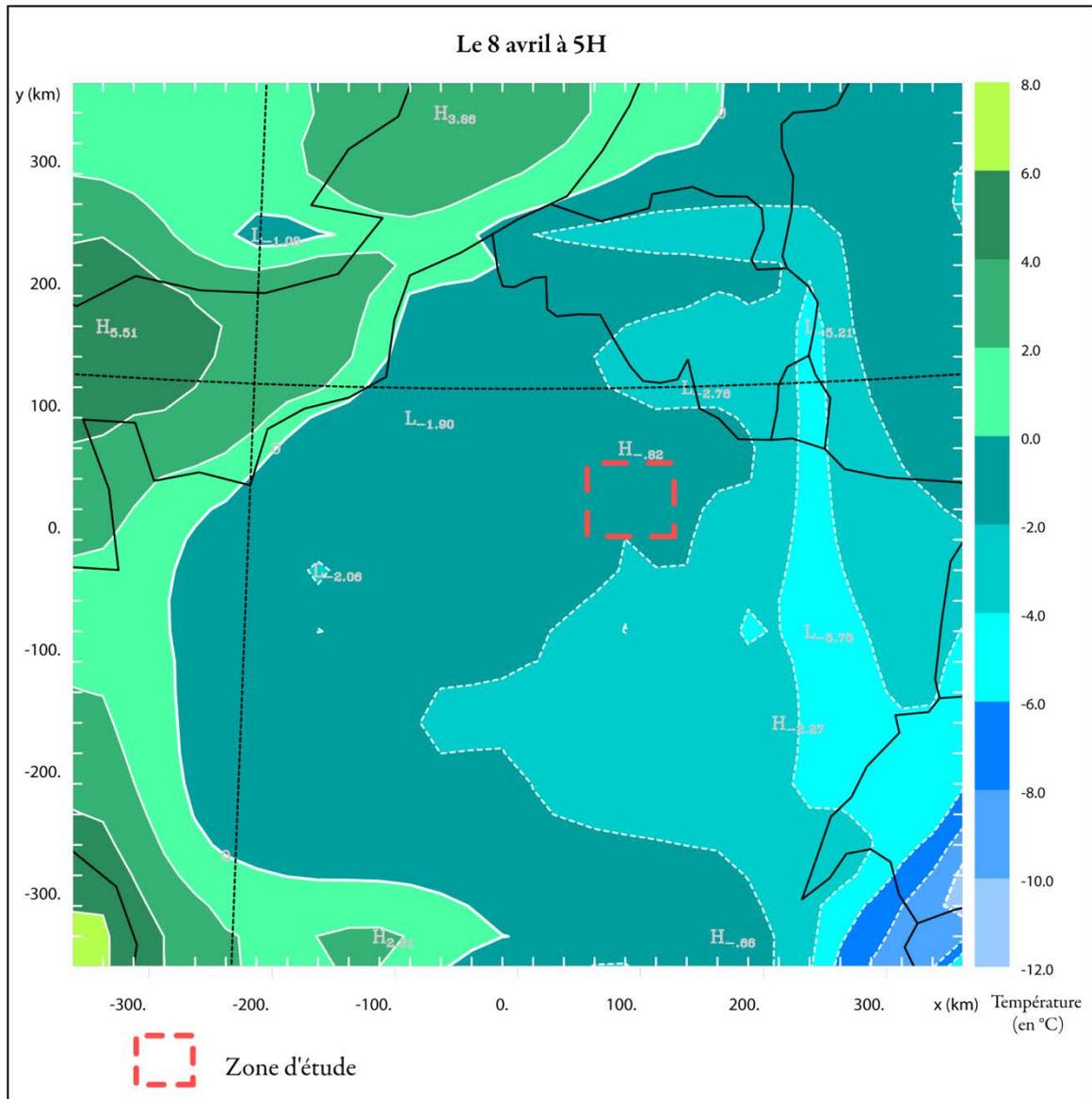


Figure 10.13 : Champ de températures simulé par le modèle RAMS à 5h du du matin le 8 avril 2003 sur la grille 1 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).

Le refroidissement nocturne du 7 au 8 avril 2003 sur les stations

La simulation du refroidissement nocturne (Figure 10.14) est variable selon les stations : un « redoux²⁷ » inexistant sur les données enregistrées est observé à minuit pour toutes les simulations. Avize bas, Epernay, Reims-Courcy, Verzenay et Châtillon présentent des températures observées très basses, en dessous du seuil de gel agronomique : les stations de Verzenay, Avize bas et Epernay sont en bas de coteau, où des lacs d'air froid se sont probablement formés en fin de nuit. En effet, dès le coucher du soleil, les températures baissent fortement jusqu'à former un palier bien visible sur ces stations qui laisse supposer que le lac d'air froid est bien installé (Madelin, 2004). En conditions radiatives, l'air froid stagne près du sol, le brassage par le vent est faible et une inversion thermique avec une augmentation de la température en haut de coteau se forme. Le froid s'est écoulé et accumulé dans les zones basses (bas de coteau, replat) par gravité : ce sont les « vents catabatiques » (Roten, 1964 ; Bouchet, 1965 ; Geiger, 1969 ; Mahrt et André, 1982 ; Bridier *et al.*, 1995 ; Fallot, 1992 ; Madelin, 2004).

Ces inversions thermiques (Figure 10.15) sont visibles sur deux couples de stations bas de coteau / haut de coteau : les couples Verzenay / Mailly et Avize bas / Avize haut montrent que la courbe de la station bas de coteau est plus froide entre 22h le 7 avril et 6h du matin le 8 avril avec un redoux entre 3 et 6h pour le premier couple et un redoux entre 1h et 6h pour le second couple ce qui témoignent bien du remplissage du lac d'air froid en bas de coteau. Le dernier couple Bouzy bas / Bouzy haut ne présente pas d'inversion thermique : ces stations sont beaucoup plus proches sur le coteau que les autres couples ; la topographie est moins propice sur ce coteau au phénomène d'inversion.

Concernant le modèle, il simule également ce type d'inversion thermique, sur un transect nord/sud passant par la station de Vernezay (Figure 10.16), le bas de coteau est plus froid : un lac d'air froid stagne sur le replat du coteau viticole et la température est plus élevée à 200 m en altitude.

²⁷ Il s'agit d'un « artefact » de la méthodologie RAMS à la reprise des calculs (Source : S. Cautenet).

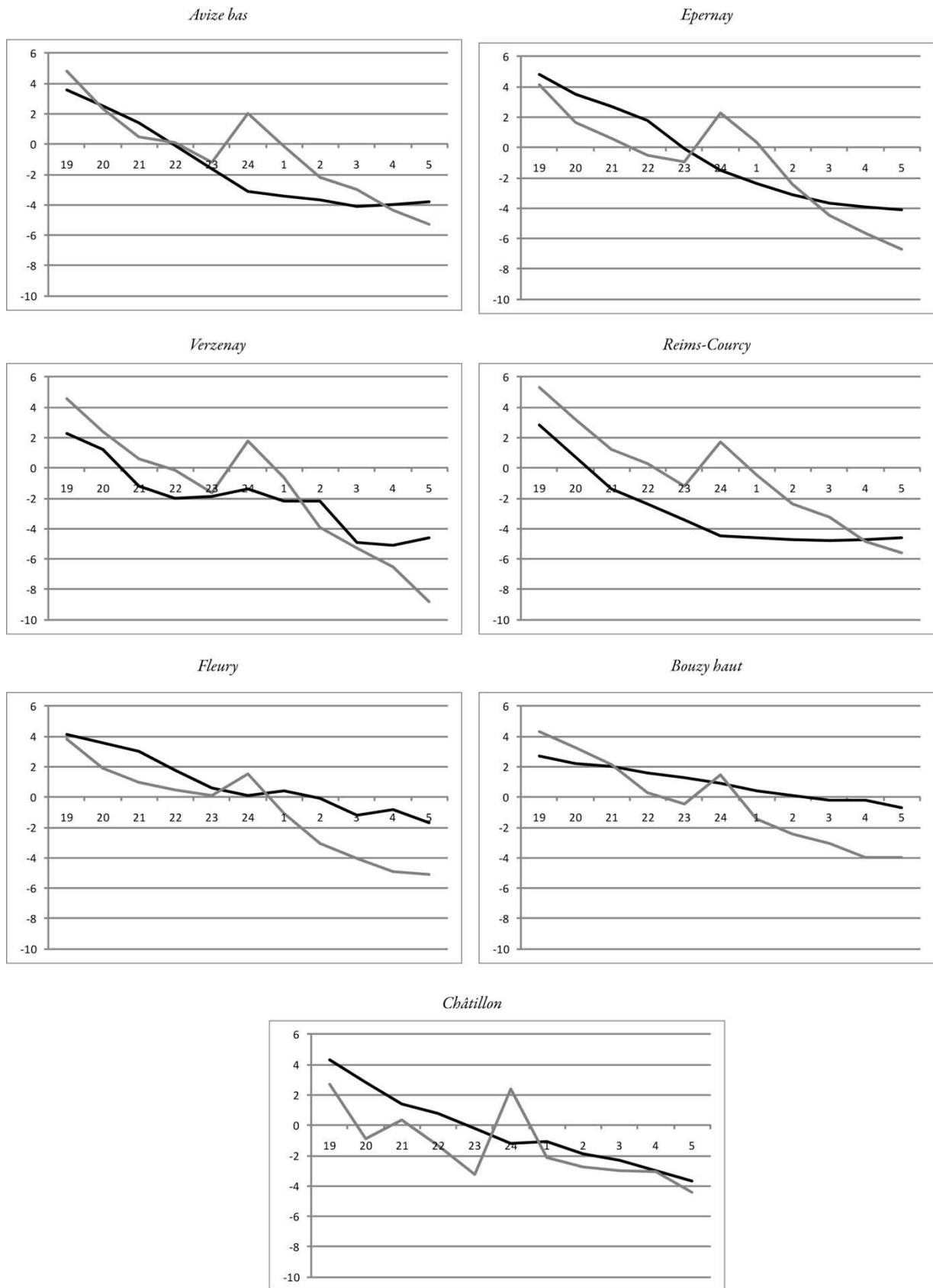


Figure 10.14. : Refroidissement nocturne de la nuit du 7 au 8 avril 2003 pour les stations de référence en noir et les simulations RAMS en grisée (Réalisation : E. Briche, 2011).

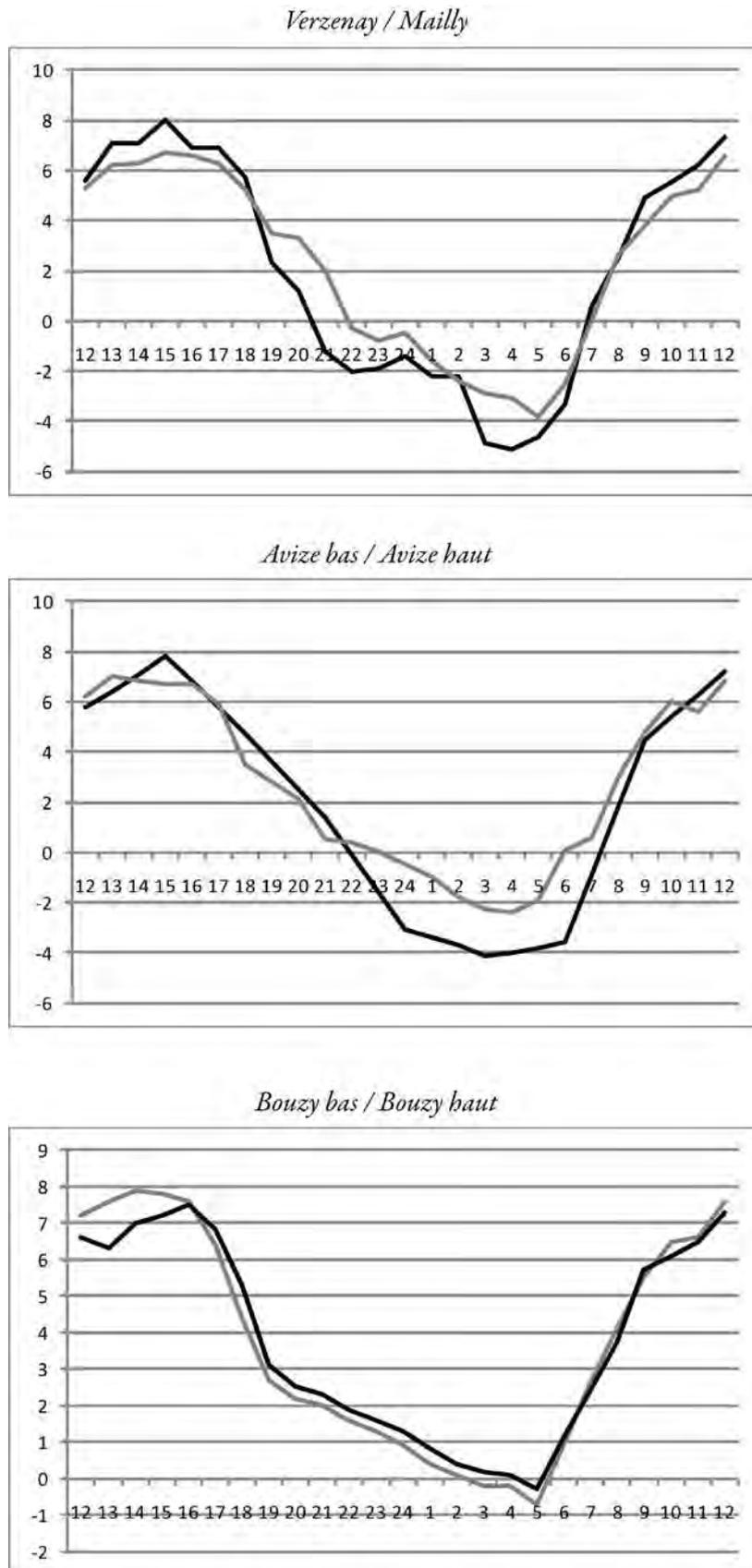


Figure 10.15 : Courbes des températures du 7 avril à midi au 8 avril à midi pour trois couples de stations bas de coteau (en noir) et haut de coteau (en gris) (Données : CIVC ; Réalisation : E. Briche, 2011).

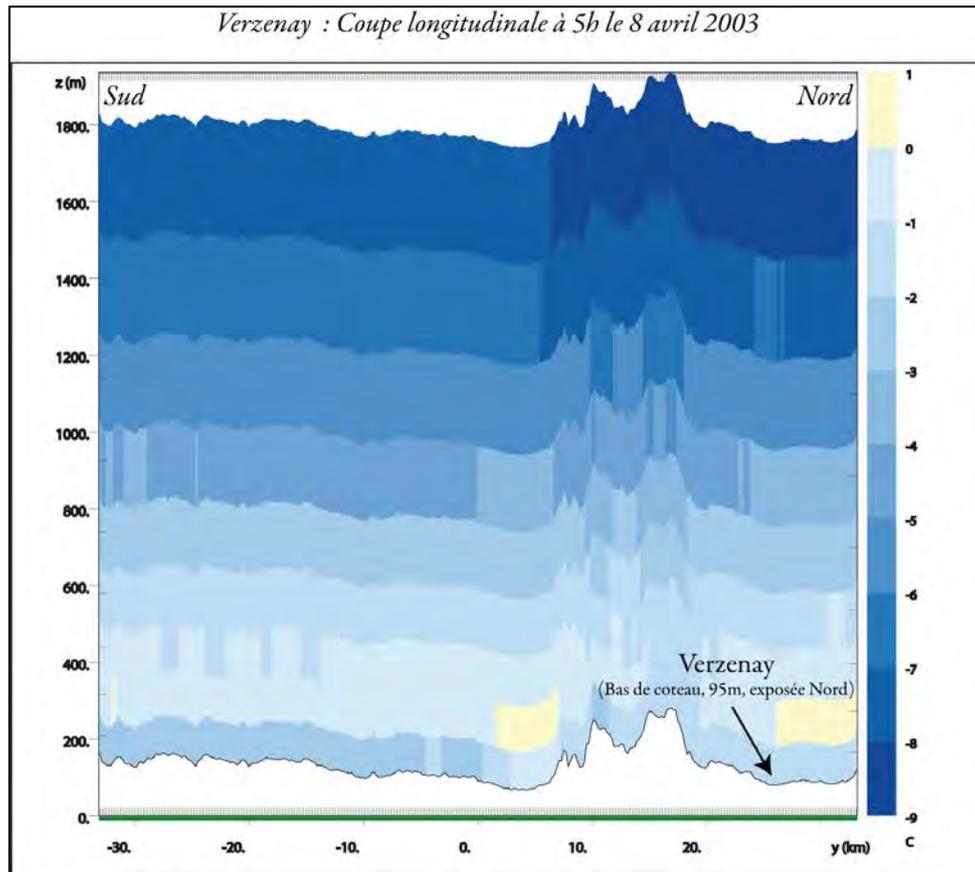


Figure 10.16 : Transect longitudinal issu de la simulation RAMS permettant d'observer les températures de l'atmosphère le 8 avril 2003 pour la station de Verzenay (Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011)

Champ thermique sur la grille 4 le 8 avril à 5h du matin

Le 8 avril à 5h du matin, la répartition spatiale de la température est hétérogène et tributaire de la topographie (Figure 10.17) : le nord-est de la Montagne de Reims présente les températures les plus gélives, la vallée de la Marne est plus fraîche ainsi que le sud de la Côte des Blancs. De plus, les pentes exposées à l'est de la Montagne de Reims et de la Côte des Blancs ont les températures les plus basses du fait de l'arrivée de l'air froid.

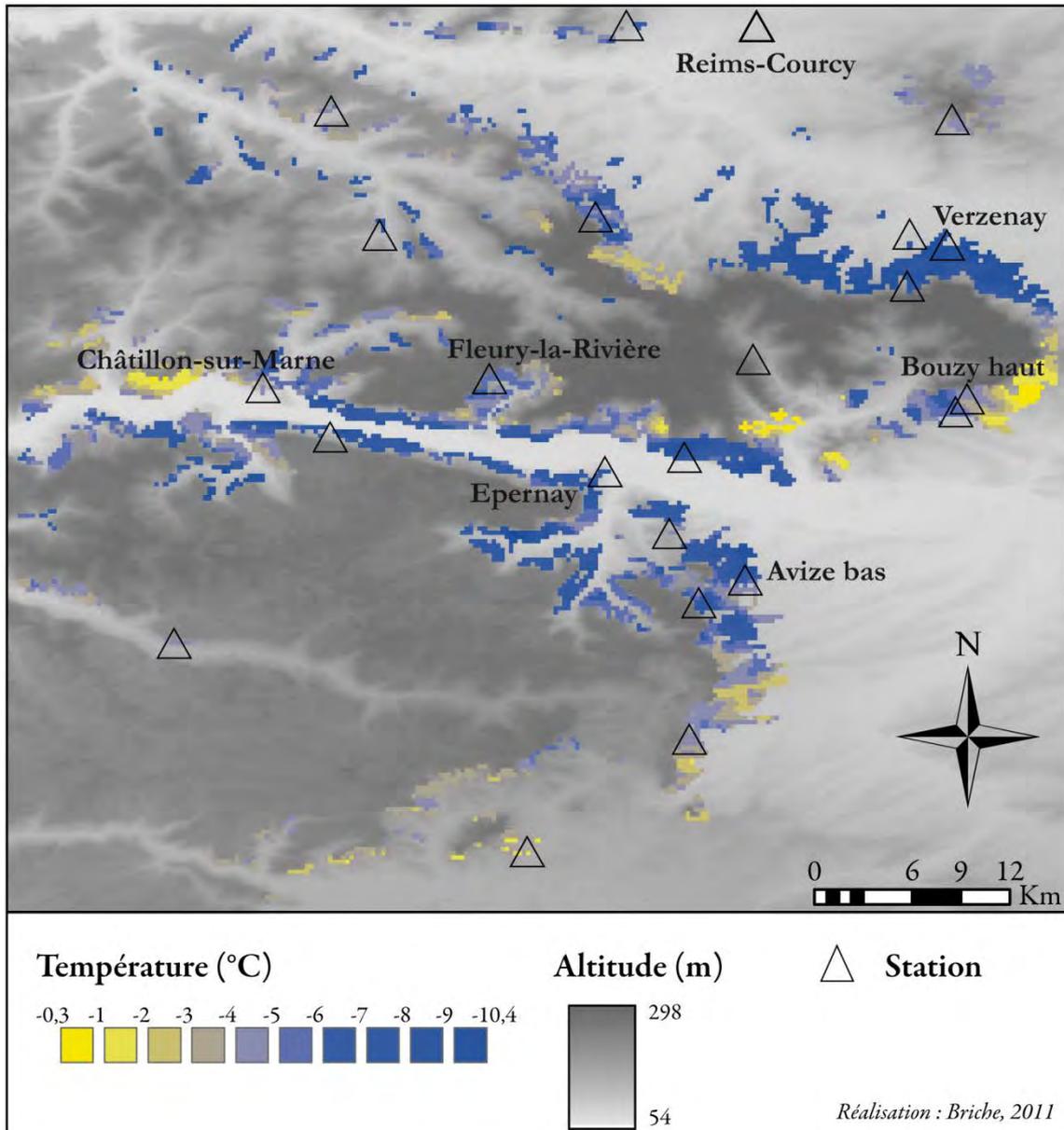


Figure 10.17 : Champ thermique à 5h du matin le 8 avril 2003 dans le vignoble de Champagne (Données : RAMS, SRTM, CIVC)

Le modèle parvient à simuler les inversions thermiques à 5h du matin. Ainsi, la température est plus basse en bas de coteau qu'en haut de coteau pour le couple de stations Mailly/Verzenay avec un gradient thermique évident (Figure 10.18). Cette inversion apparaît également pour les stations Bouzy haut/ Bouzy bas alors que sur les données observées, il n'y a pas d'inversion thermique à 5h du matin (Figure 10.15). L'inversion thermique n'est pas vraiment marquée sur la Côte des Blancs où le bas de coteau n'est pas beaucoup plus froid que le haut de coteau au niveau d'Avize haut/ Avize bas.

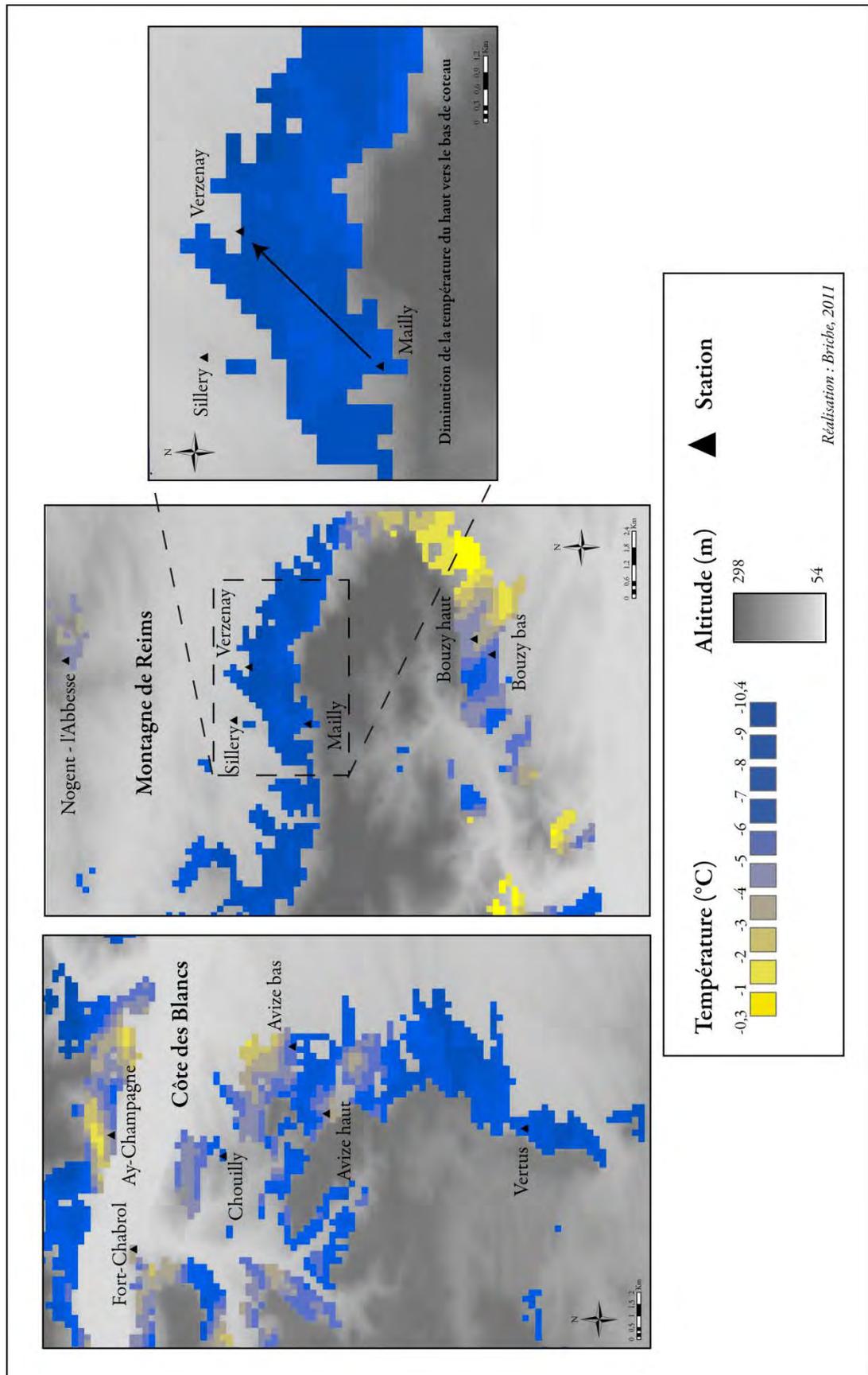


Figure 10.18 : Zoons réalisés sur le champ thermique du 8 avril à 5h (Données : RAMS, SRTM, CIVC).

CONCLUSION DU CHAPITRE 10

Ce chapitre sur l'aléa gélif 2003 montre que la simulation RAMS rend compte de l'hétérogénéité de la variabilité spatiale des températures sur les coteaux viticoles champenois, notamment lors de conditions radiatives favorisant un refroidissement nocturne à l'origine de températures gélives dommageables sur les bourgeons de la vigne. Le modèle parvient à bien reproduire le cycle journalier des températures, les phénomènes tels que les inversions thermiques et rend compte des phases extrêmes même si les extrêmes thermiques nocturnes sont bien souvent accentués par un biais froid du modèle.

Ces biais, essentiellement froids, sont dus au fait qu'il est extrêmement difficile de rendre compte des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes du fait de leur temporalité et échelle bien souvent très fines et surtout car ils sont issus de mécanismes complexes simplifiés par les équations du modèle RAMS, même à cette échelle de 200 m de résolution. De plus, des marges d'incertitudes sont inhérentes également à ce type de modélisation du fait :

- de la dispersion des températures autour d'une maille de 200 m ;
 - d'une possible mauvaise prise en compte de l'état de la végétation par le modèle à partir des données MODIS au moment du débourrement ;
 - des processus de downscaling dynamique entre les grilles imbriquées aux incertitudes inhérentes : les processus physico-chimiques sont par exemple simplifiés par le modèle ;
 - du temps de latence nécessaire pour l'étalonnage du modèle sur les premières dates de simulation.
-

Chapitre 11

Observation, validation et simulation de la canicule estivale

La seconde phase extrême de l'année 2003 est la canicule estivale. En effet, le mois d'août 2003 est marqué par une canicule généralisée sur toute la France et à caractère exceptionnel. Cette canicule dure du 4 au 13 août dans la plupart des régions françaises. Elle pourrait préfigurer des conditions thermiques futures estivales récurrentes dans le contexte du changement climatique (André et al., 2004 ; Bessemoulin et al., 2004 ; Agenis-Nevers, 2006, Seguin, 2010).

11.1 La canicule estivale 2003 dans le vignoble marnais

11.1.1 La canicule 2003 au sein d'un temps plus long (1981-2010)

Sur la normale trentenaire (1981-2010), la station synoptique de Reims-Courcy met en évidence la canicule estivale, observée sur toute l'Europe aux échelles synoptiques. La canicule 2003 est exceptionnelle sur cette normale avec une moyenne de 13,9°C pour les températures minimales des trois mois d'été contre 12,1°C en moyenne (Figure 11.1.A) ; cela s'observe également pour les températures maximales des trois mois d'été de 26,6°C contre 23,6°C sur la normale (Figure 11.1.B), soit 3°C de hausse reflétant le caractère exceptionnel de l'évènement très largement diffusé dans la presse de vulgarisation mais également dans la communauté scientifique.

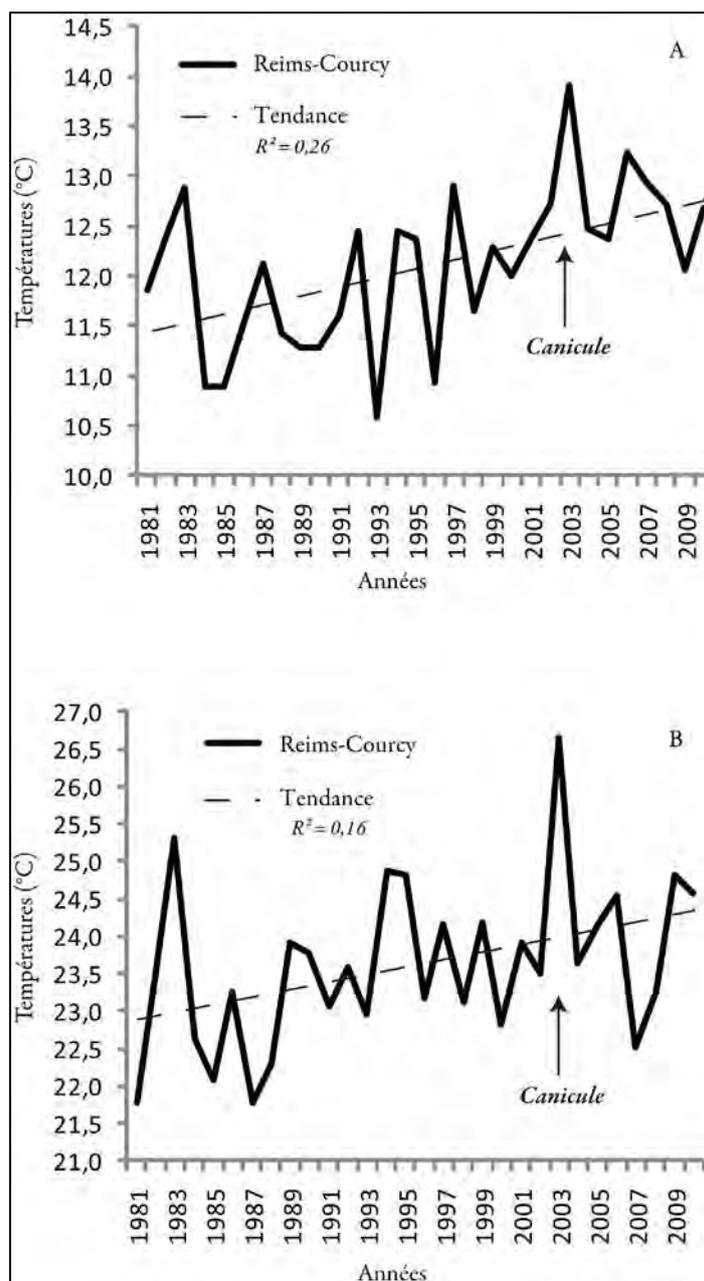


Figure 11.1 : A : Température minimale moyenne et B : Température maximale moyenne sur les trois mois d'été de 1981 à 2010 pour la station Reims-Courcy (Données : Météo-France).

11.1.2 La canicule en 2003

11.1.2.1 Détermination de la période caniculaire estivale

La canicule est enregistrée en Champagne du 4 au 13 août avec des maxima atteints de températures les 7 et 12 août selon les stations (Figure 10.2). Fort-Chabrol, en mi-coteau, exposée à l'est, présente une phase caniculaire plus intense avec deux phases extrêmes début août sur les thermo-isophlètes.

Malgré quelques différences locales, la canicule de 2003 est commune à tout le vignoble car résultante de grandes circulations atmosphériques à l'échelle de l'Europe (André *et al.*, 2004). La plupart des stations ont enregistré des températures supérieures à 35°C en août.

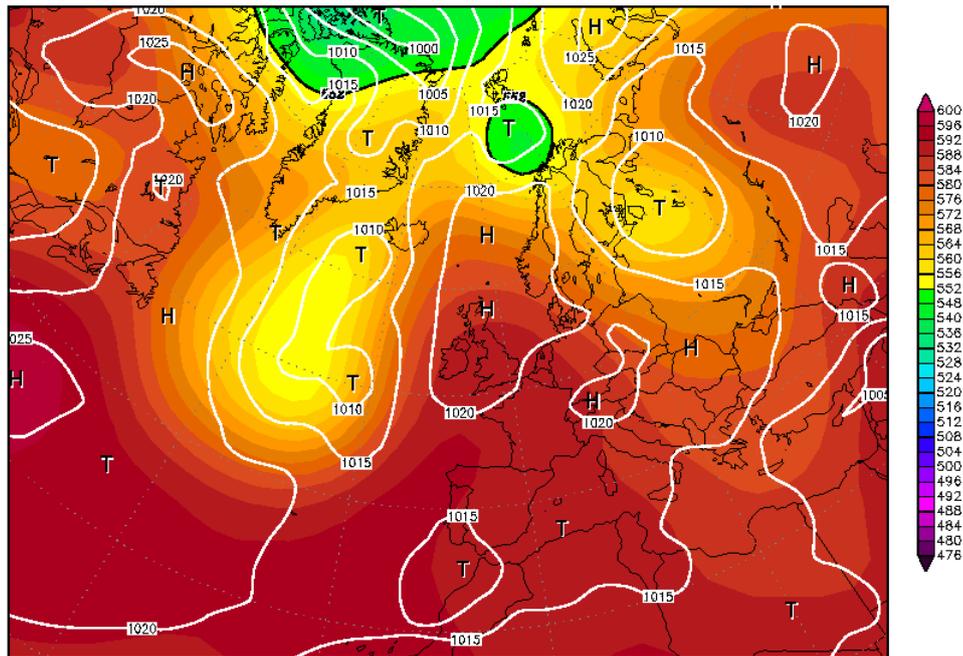
11.1.2.2 Les conditions météorologiques de la canicule estivale 2003

La canicule estivale 2003 est due à une dorsale d'altitude qui s'est développée de Gibraltar aux Pays-Bas puis qui s'est renforcée sur la France ce qui a apporté de l'air très chaud et sec en Méditerranée. Cette situation en altitude est complétée par des conditions anticycloniques de surface avec un air très sec et stable sur la France (Bessemoulin *et al.*, 2004).

Le 8 août, par exemple, la dorsale anticyclonique des jours précédents est toujours bien marquée (Figure 11.2) et les températures sont caniculaires (Figure 11.3) aboutissant à une journée sèche et caniculaire dans le nord-est et en Champagne avec des températures de 36,6 °C à Reims-Courcy, et 37,8°C à Avize bas par exemple. Le 12 août, plusieurs stations ont enregistré des températures proches de 40°C au moment du maximum à 15h comme Chambrecy, Sillery et Orbais-l'Abbaye.

L'été 2003 fait suite à de nombreux dégâts provoqués par le gel printanier : les températures maximales sont très élevées en juillet et caniculaire la première quinzaine d'août (Langellier *et al.*, 2003). Des températures jamais observées auparavant en Champagne sont enregistrées ; pourtant les vignes ne souffrent pas de la sécheresse hydrique grâce à la capacité de stockage des sols calcaires ; les réserves d'eau dans le sol des précipitations de l'automne précédent ont suffi. Les vignes souffrent davantage d'un stress thermique que d'un stress hydrique (Langellier *et al.*, 2003) et sur certaines parcelles, des pertes importantes sont dues à l'échaudage des baies lors de la maturité.

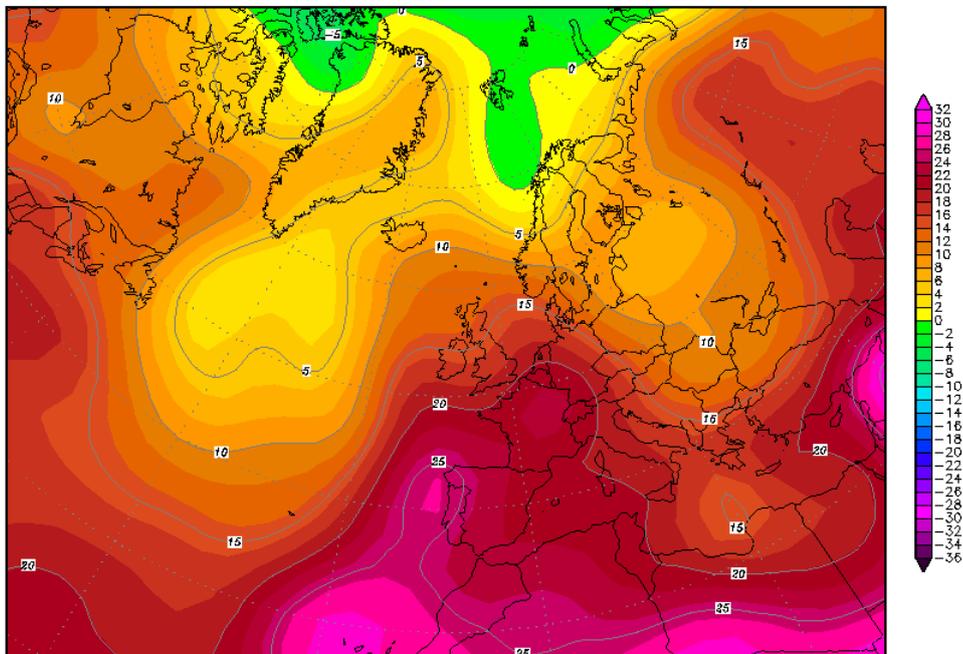
08AUG2003 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)

Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figure 11.2 : Géopotentiels à 500hPa issues des réanalyses NCEP du 8 août 2003 (Source : www.wetterzentrale.de)

08AUG2003 00Z

850 hPa Temperatur (Grad C)

Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figure 11.3 : Températures en °C sur l'Europe Occidentale à 850 hPa le 8 août 2003 issues des réanalyses NCEP (Source : www.wetterzentrale.de)

11.2 Comparaison modèle/stations lors de la phase caniculaire à partir des données horaires

11.2.1 Simulations du 4 au 8 août 2003 entre RAMS et les stations de référence

11.2.1.1 Les corrélations linéaires sur les données horaires du 4 au 8 août 2003

Pour toutes les stations étudiées, les corrélations de Bravais-Pearson sont statistiquement significatives à 5 % : les courbes simulées sont fortement corrélées aux courbes observées avec des coefficients supérieurs à 0,89. Le coefficient de détermination est également utilisé afin de mesurer la qualité du modèle: pour les 7 stations, le modèle est en adéquation avec les stations à p plus de 75% ; les chroniques temporelles sont assez bien représentées par la modélisation RAMS.

11.2.1.2 Tests statistiques sur les distributions des températures horaires sur la période simulée par le modèle du 4 au 8 août 2003

Des tests statistiques sont effectués comme pour les températures horaires d'avril, pour Avize bas, Bouzy haut et Fleury uniquement, la comparaison de moyennes avec le test de Student montre que les résultats obtenus sont statistiquement différents de manière significative. Les autres stations présentent des moyennes semblables entre le modèle et la station ce qui n'est pas observé sur les tests d'avril.

Partant de la même hypothèse que précédemment, c'est-à-dire que les moyennes sont statistiquement différentes du fait des extrêmes thermiques simulés par la station, le test de Kolmogorov-Smirnov permet de tester les distributions statistiques. Pour Avize bas uniquement, les distributions statistiques sont identiques de manière significative. Toutes les autres stations présentent des distributions différentes du modèle. Ceci peut s'expliquer par le fait que pour toutes les stations, le modèle tend à sous-estimer le maximum journalier, souvent observé à 15h, le biais sur la comparaison du maximum de chaque journée de la station et du modèle (même si l'heure est différente) peut être de 4°C. Par contre, les minimas journaliers sont souvent surestimés par le modèle. Les simulations RAMS, en août, réduisent l'amplitude thermique journalière en ne reproduisant pas correctement les extrêmes journaliers du matin et de l'après-midi (Figure 11.4) même si toutes stations et journées confondues, le biais est plutôt froid et très faible (environ -0,2°C).

Beaucoup de paramètres précis influencent les relevés des stations automatiques et les paramètres locaux sont sans doute difficiles à modéliser et sont simplifiés. Le modèle présente certainement une « cascade » d'incertitudes lors du passage d'une échelle à l'autre avec le système de grilles imbriquées et ne traduit certainement pas les mécanismes complexes topoclimatiques et microclimatiques.

Les simulations s'éloignent des distributions des stations au fur et à mesure de la période. Le modèle ne simule pas parfaitement l'extrême maximum journalier et ce plus, les journées se réchauffent. Ainsi, le biais est plus important le 8 août, journée la plus chaude de la période étudiée.

11.2.1.3 Simulation journalière pour chaque date avec les marges d'incertitude issues du modèle RAMS à 200 m de résolution

Sur la planche (Figure 11.5), les biais énoncés précédemment sont d'autant plus visibles. Cependant si l'on tient compte des marges d'incertitude de 1,5km autour de la station, le modèle reproduit plutôt bien les cycles journaliers des stations (Annexe XIV).

De plus, il n'existe pas de différences majeures entre les stations : la canicule a bien touché toutes les stations retenues et elle est plutôt homogène sur tout le vignoble.

Par exemple, le 8 août, à 15h, les stations enregistrent des températures entre 37°C et 38°C (Annexe XIV) ; les simulations présentent des biais froids compris entre 2°C pour Epernay et 6°C pour Bouzy haut et Châtillon. Cependant, même si ces biais sont élevés, si l'on tient compte de la dispersion des températures dans un rayon de 1,5 km autour de la station, toutes les fourchettes d'incertitudes englobent la température observée. Pour Verzenay, la température observée est de 37°C, celle simulée de 33°C et la fourchette va de 32 à 38°C.

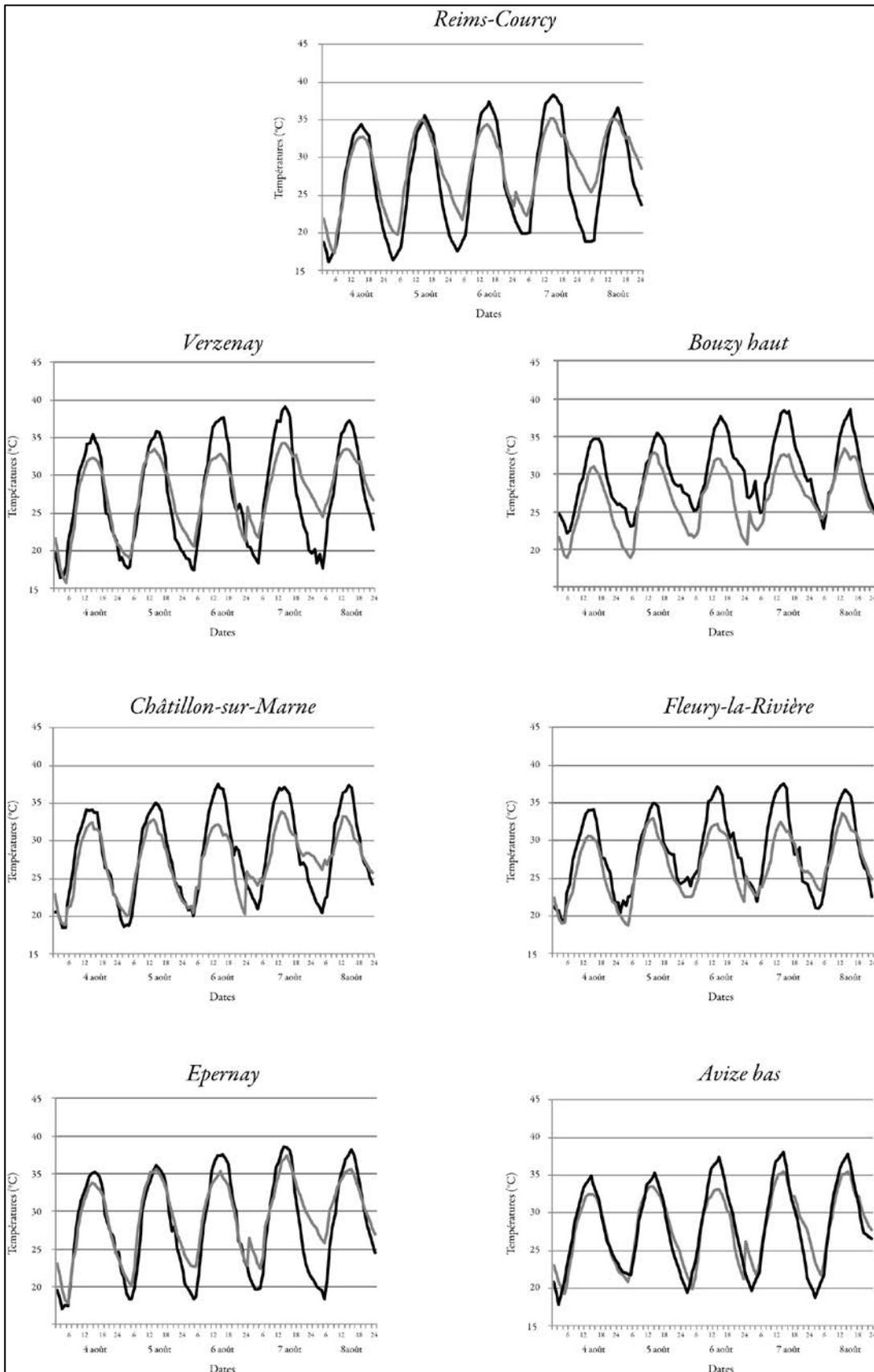


Figure 11.4 :Températures horaires observées pour les stations sélectionnées et simulées par le modèle RAMS sur la période du 4 au 8 août 2003 avec une résolution à 200 m (en gris la courbe simulée, en noir la courbe observée).

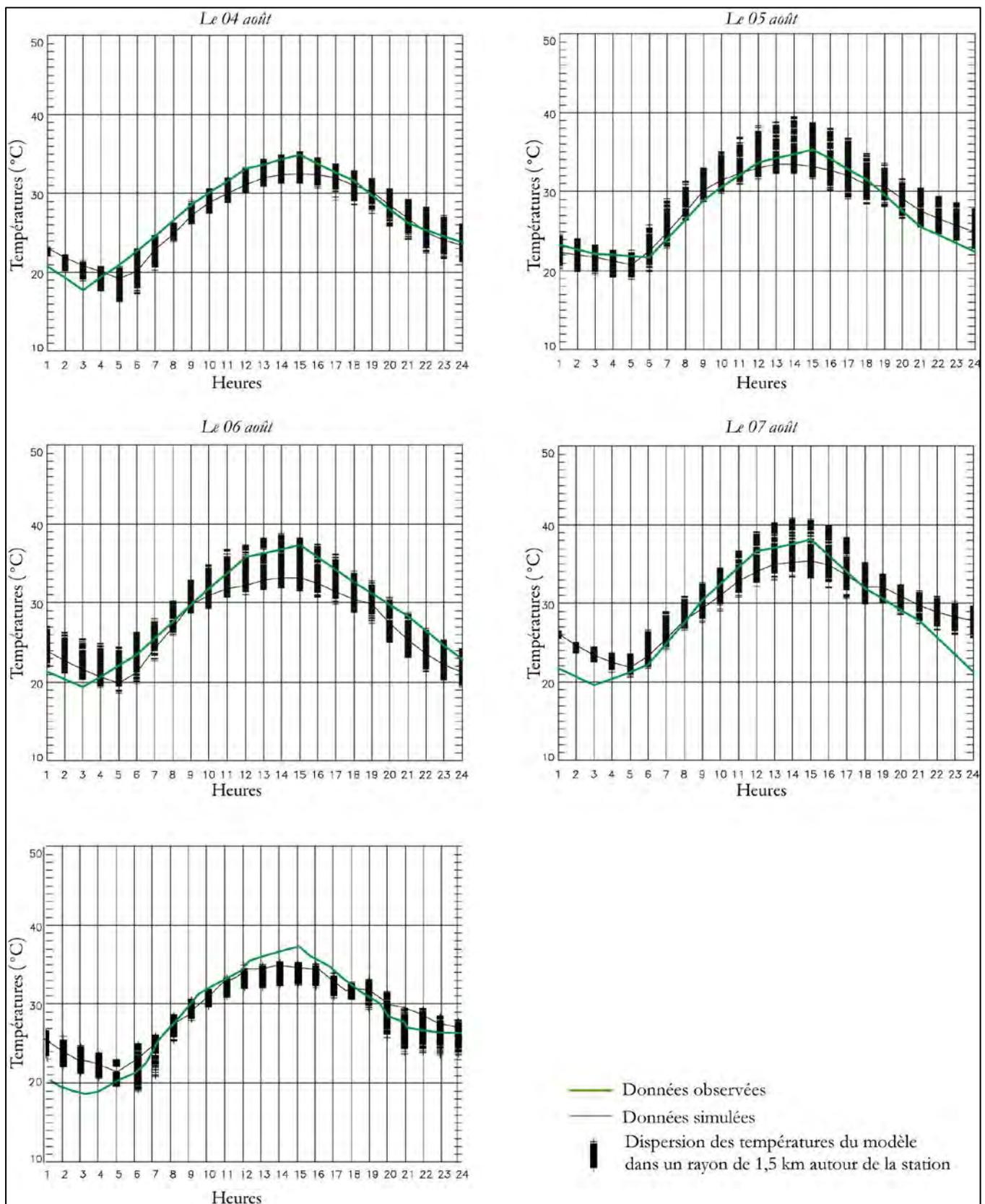


Figure 11.5 : Évolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Avize bas du 4 au 8 août 2003 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).

11.2.1.4 Évaluation des refroidissements nocturnes nécessaires pour la bonne maturité des baies

Concernant le refroidissement nocturne, les écarts entre les profils thermiques simulés et observés entre 19h et 5h du matin sont très variables d'une station à l'autre.

Les températures baissent d'une dizaine de degrés sur les nuits estivales pour les stations tandis que le modèle simule une baisse d'environ 5°C. Les simulations ont tendance, pour toutes les stations, à surestimer les températures nocturnes et ne modélisent pas le refroidissement nocturne estival nécessaire à la bonne maturation de la vigne : les températures restent très élevées toute la nuit entre 25 et 30°C.

Le biais correspond certainement en partie à la difficulté pour le modèle de bien prendre en compte les caractéristiques locales du vignoble telles que les aspérités de surface : modéliser les températures à cette échelle d'espace et de temps est complexe même avec ce type de modélisation intégrant les paramètres du terrain.

Pour les stations, le profil général correspond à une baisse légère des températures entre 19h et 20h, avec un léger redoux autour de 21h puis une chute importante de températures jusqu'au lever du soleil. Les simulations, présentent, quant à elles, un profil sensiblement différent avec des températures équivalentes à celles des stations en soirée puis un redoux plus tardif et généralement plus prononcé avec une diminution des températures lente et régulière jusqu'à 5h du matin.

11.2.2 Cartographie des champs de températures pour les dates simulées par le modèle RAMS à méso-échelle à 200 m de résolution

11.2.2.1 Les conditions synoptiques simulées par RAMS sur la grille 1

Le modèle RAMS traduit bien les conditions synoptiques de la canicule estivale notamment du 8 août 2003 (Figures 11.6, 11.7 et 11.8) : la Champagne est au cœur d'un anticyclone avec des hautes pressions comprises entre 980 et 1020 m b (Figure 11.6), à l'origine d'air chaud et sec d'une température supérieure à 32°C en moyenne (Figure 11.8). Cet air est stable avec un vent très faible, inférieur à 2,5 m/s de direction variable témoin de l'ancrage de l'anticyclone (Figure 11.7). Ces conditions traduisent bien celles développées à partir des réanalyses NCEP pour le 8 août.

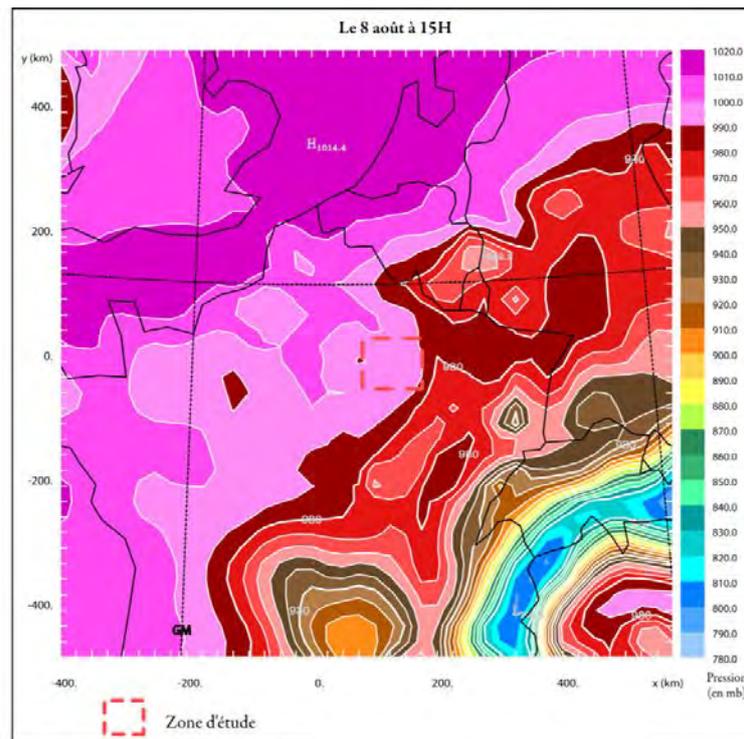


Figure 11.6 : Champ de pressions simulé par le modèle RAMS à 15h le 8 août 2003 sur la grille 1 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).

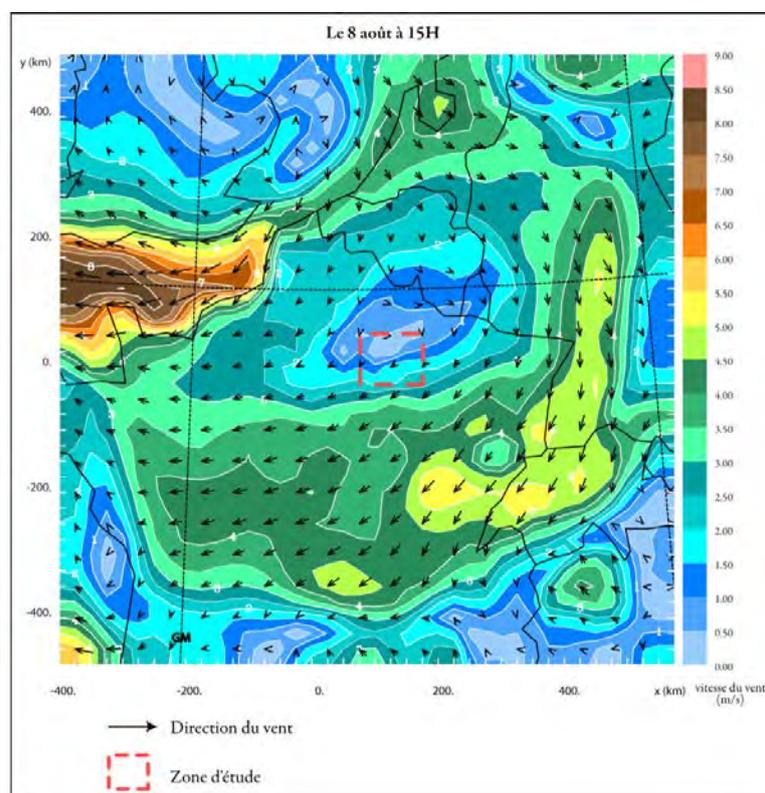


Figure 11.7 : Champs de vitesse et direction du vent simulés par le modèle RAMS à 15h le 8 août 2003 sur la grille 1 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).

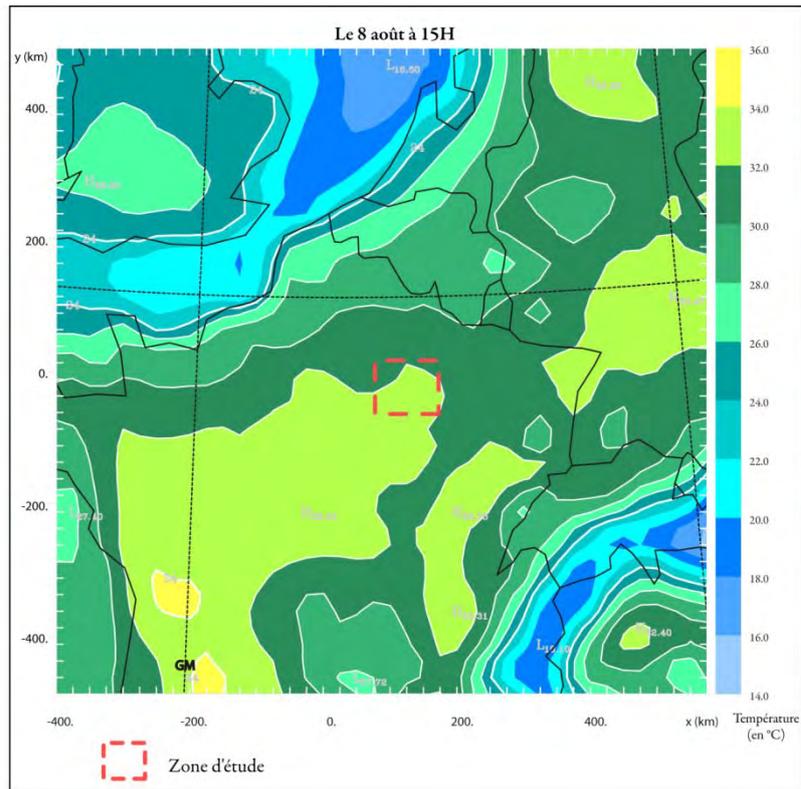


Figure 11.8 : Champs de vitesse et direction du vent simulés par le modèle RAMS à 15h le 8 août 2003 sur la grille 1 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).

11.2.2.1 *La journée du 8 août 2003*

Cette journée est la plus chaude de la période simulée avec des températures très élevées en journée. Le cycle journalier (Figures 11.9 et 11.10) est bien reproduit avec une période très chaude entre 12h et 16h. Tout le vignoble est atteint par des températures supérieures à 30°C avec des coteaux plus touchés que d'autres notamment les bas de coteaux de la vallée de la Marne. Ces planches montrent également que le refroidissement nocturne est présent. Les températures restent cependant très élevées, souvent supérieures à 25°C sur les coteaux viticoles durant la nuit ce qui est défavorable pour la maturité des raisins. La vigne a en effet besoin de fraîcheur nocturne pour une synthèse des tanins (Yamane *et al.*, 2006 ; Koshita *et al.*, 2007) optimale et les coteaux les mieux exposés, au sud, se réchauffent la journée et ne se refroidissent pas assez la nuit.

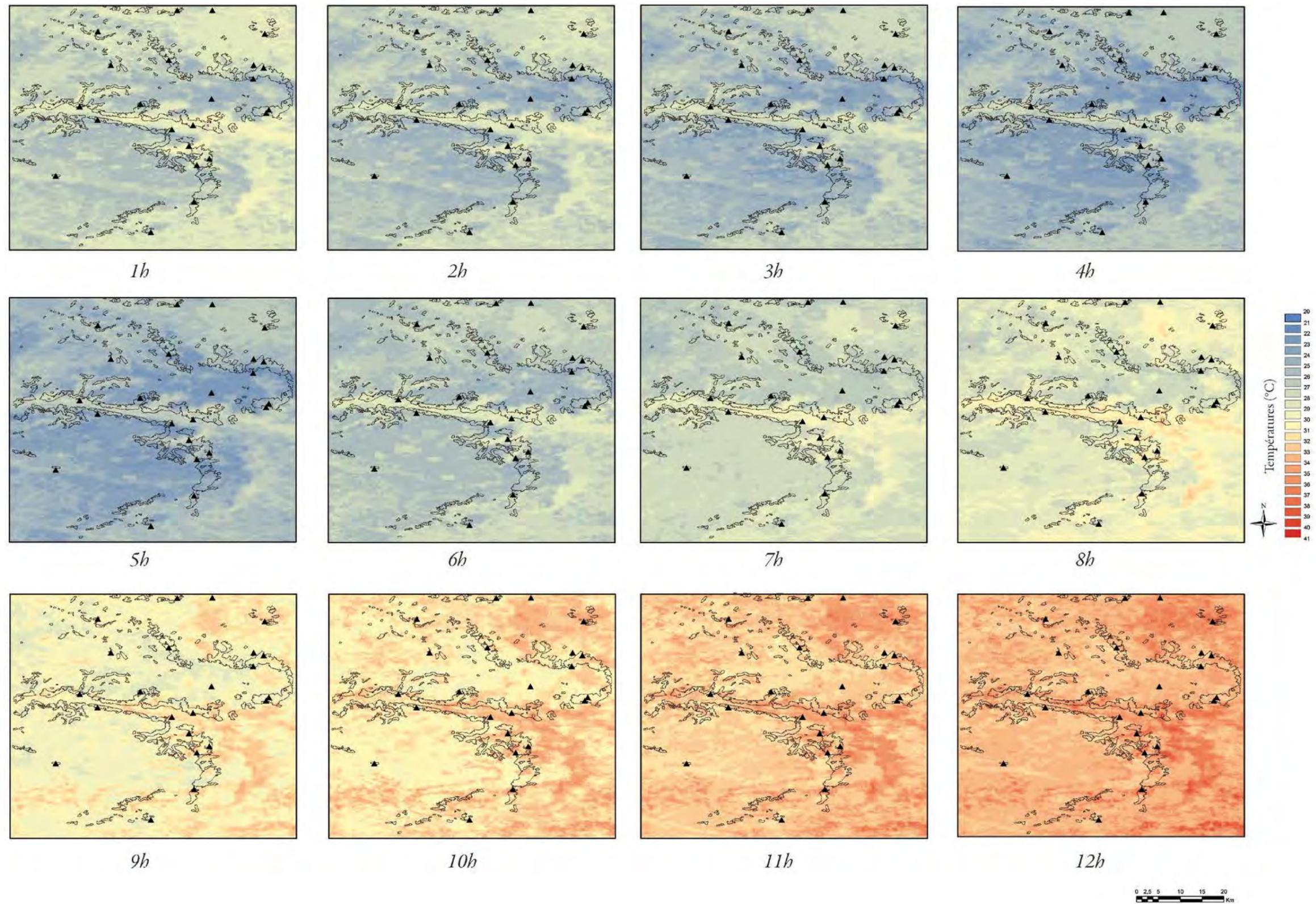


Figure 11.9 : Champs de températures au cours de la journée du 8 août 2003 de 1h à midi puis de 13h à minuit (Données : RAMS ; Réalisation : E. Briche, 2011)

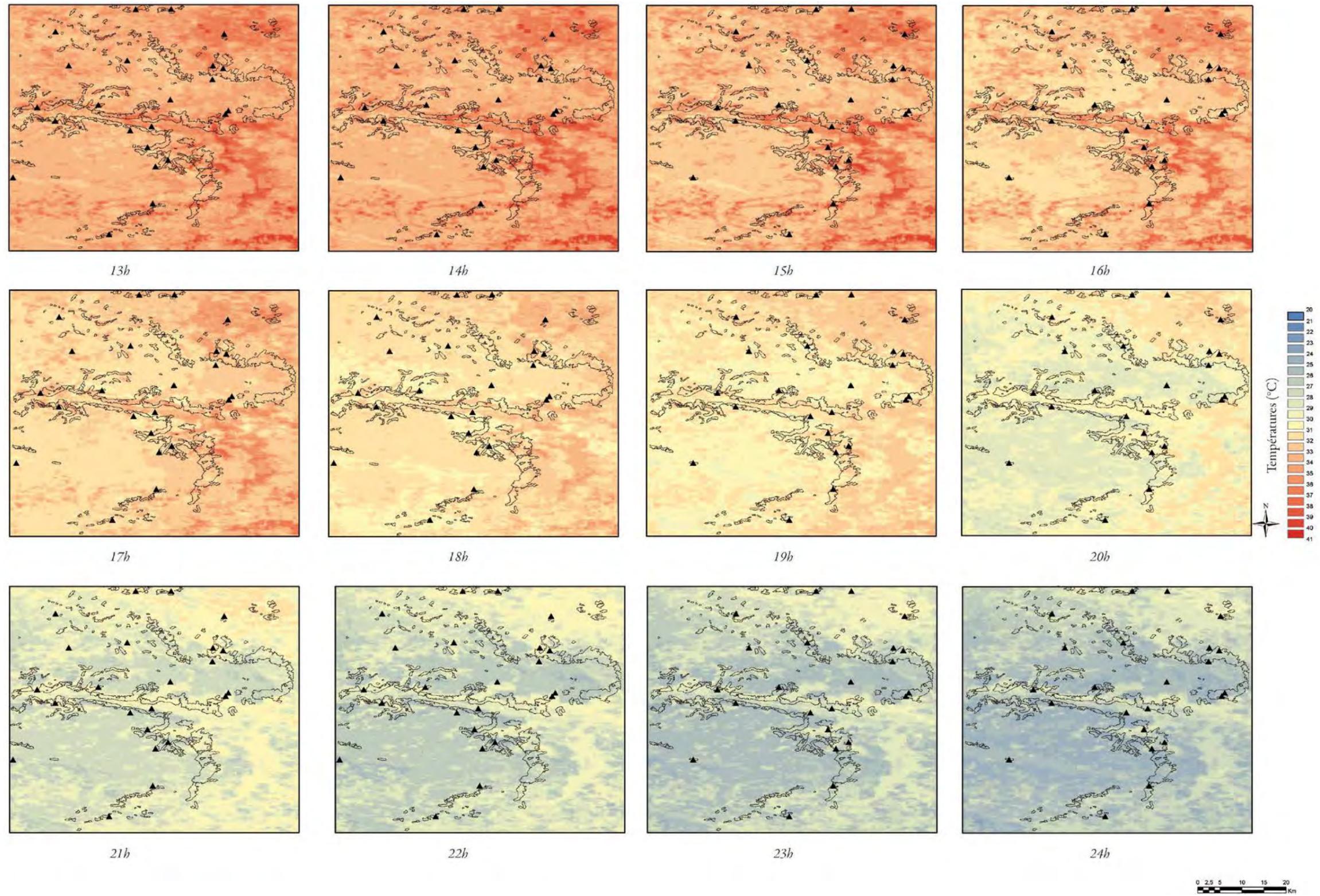


Figure 11.10 : Champs de températures au cours de la journée du 8 août 2003 de 13h à minuit (Données : RAMS ; Réalisation : E. Briche, 2011).

11.2.2.2 Le 8 août à 15h

La carte du 8 août à 15h montre que les températures sont élevées durant cette journée de canicule où les extrêmes ont été enregistrés par les stations (Figure 11.11) : la température est supérieure à 32°C sur tout le vignoble de la Marne même si le modèle a tendance à sous-estimer le maximum thermique de 15h.

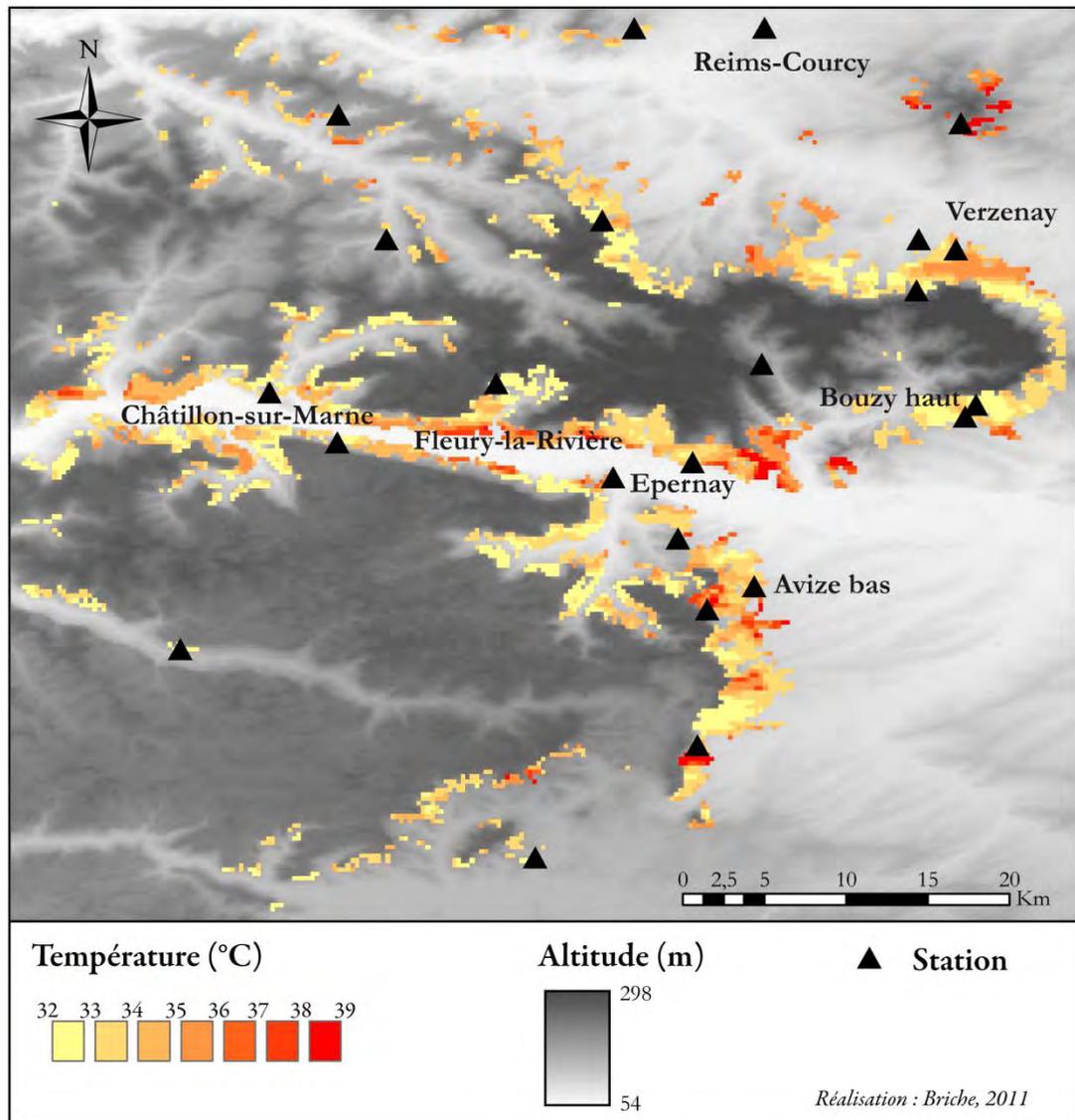


Figure 11.11 : Champ de températures à 15h le 8 août simulé par le modèle RAMS à 200 m de résolution (Données : RAMS et SRTM).

La variabilité topographique apparaît sur ce champ de températures mais la répartition spatiale des températures caniculaires est relativement homogène sur tout le vignoble.

En effet, les mailles où les stations sont en bas de coteau ou exposées au sud enregistrent les températures les plus élevées, du fait de l'exposition au sud des coteaux tels que ceux de Nogent-l'Abbesse (Figure 11.11) au sud est de Reims-Courcy en milieu d'après-

midi. En effet, sur les coteaux à Nogent-l'Abbesse, les températures sont largement supérieures à 35°C où l'échaudage des baies a pu être important.

Les coteaux viticoles de la vallée de la Marne (Figure 11.11) et la plaine de Reims-Courcy (Figure 11.12) ont des températures nettement supérieures à 35°C, favorisant l'échaudage des baies. Les bas de coteaux sont plus chauds que les hauts de coteaux notamment au nord-est de la Montagne de Reims (Figure 11.12) ainsi que dans la vallée de la Marne (Figure 11.13).

Plus généralement, les coteaux viticoles les plus touchés par des températures supérieures au seuil thermique défavorable à la vigne en été sont ceux de Nogent, ceux à proximité d'Avize haut, de Vertus pour la Côte des Blancs et ceux d'Ay-Champagne dans la vallée de la Marne.

Un gradient de chaleur est-ouest est également observé en adéquation avec la circulation atmosphérique : la dorsale anticyclonique s'est décalée au court de la période caniculaire vers l'est ce qui explique que les températures soient moins élevées à l'ouest de la zone d'étude le 8 août.

Cependant, même si le modèle rend compte de la réalité de la répartition des températures à cette date, un biais froid est nettement observé : à 15h, la température enregistrée dans les stations retenues pour la validation du modèle est en moyenne de 37,5°C contre 33°C sur les mailles simulées. Ce biais froid s'explique par la difficulté du modèle à prendre en compte tous les facteurs locaux, à la simplification de mécanismes complexes en entrée du modèle comme les nuages et certainement aussi à la propagation de biais au sein même du système de grilles imbriquées.

CONCLUSION DU CHAPITRE 11

Pour la canicule de l'été 2003, sur la période simulée du 4 au 8 août 2003, le modèle RAMS parvient à reproduire, comme pour l'aléa gélif, le cycle journalier des températures. Il s'étalonne également sur les premiers jours pour devenir plus performant à la fin de la période.

Deux types de biais sont observés sur les simulations : la sous-estimation du maximum journalier parfois de quelques degrés et la surestimation du minimum journalier même si en moyenne, le biais est faible. Cela traduit une difficulté de simulation sur les phénomènes extrêmes qui ont une fréquence faible, une intensité élevée, se produisant généralement sur des espaces relativement restreints sur un court laps de temps.

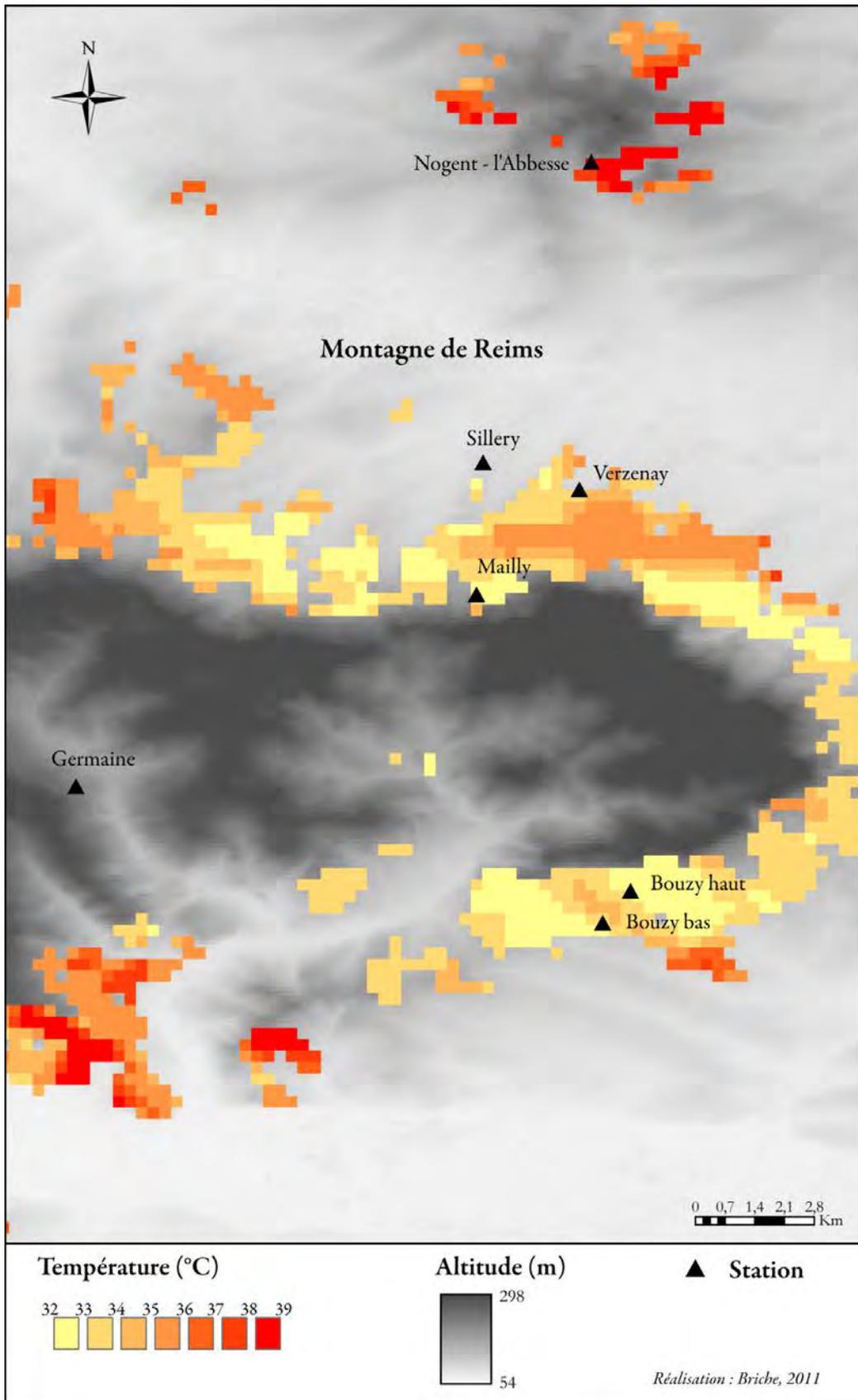


Figure 11.12 : Zoom de la Montagne de Reims réalisé à partir du champ de températures à 15h le 8 août simulé par le modèle RAMS à 200 m de résolution (Données : RAMS, SRTM)

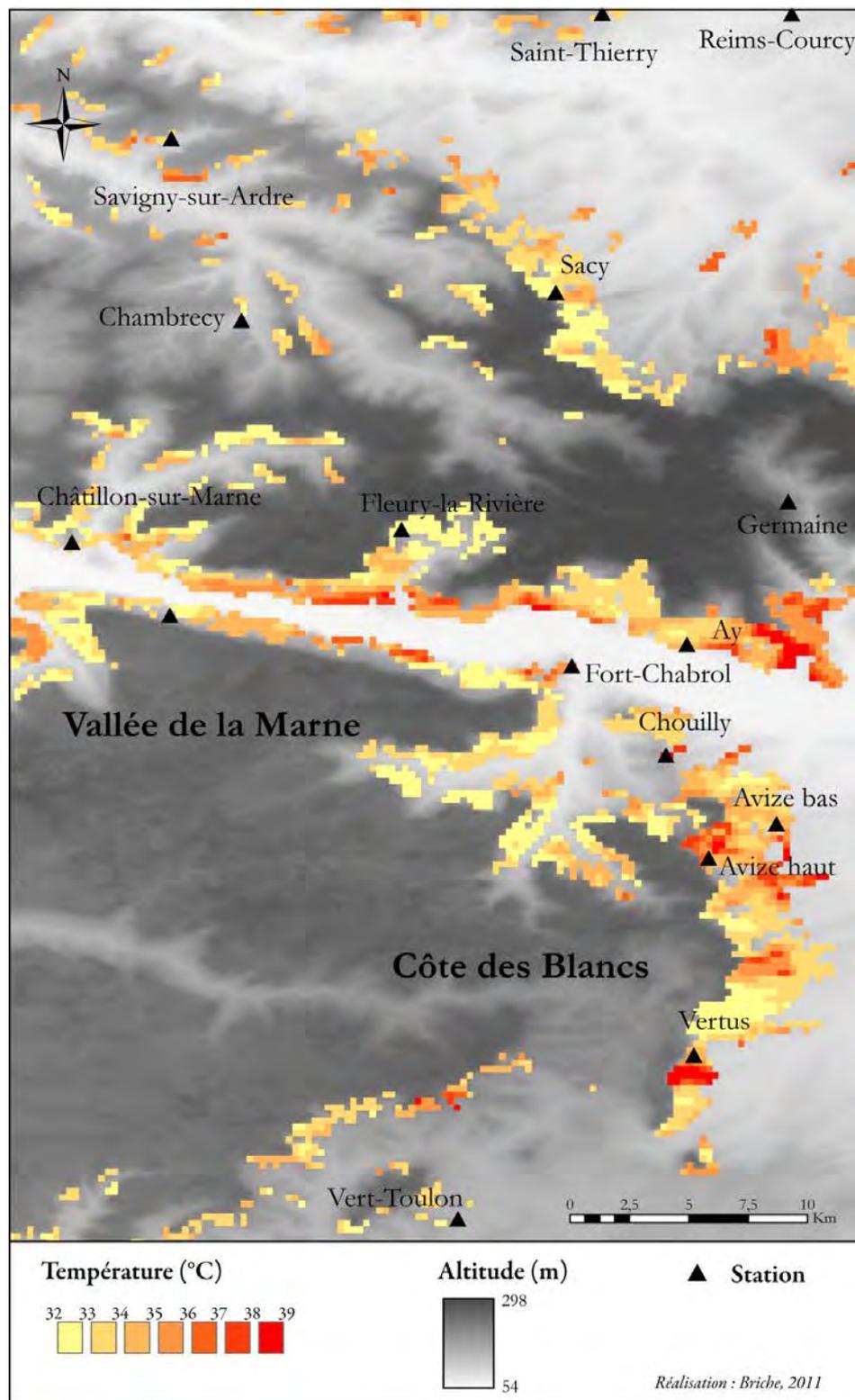


Figure 11.13 : Zoom de la Vallée de la Marne et de la Côte des Blancs réalisé à partir du champ de températures à 15h le 8 août simulé par le modèle RAMS à 200 m de résolution (Données : RAMS, SRTM)

CONCLUSION DE LA PARTIE 4

L'année 2003 se caractérise donc par un aléa gélif printanier et une canicule estivale à l'origine de dégâts sur la récolte de l'année tels que le gel de certaines parcelles ou l'échaudage des baies.

Les conditions climatiques, notamment thermiques, ont favorisé un développement phénologique plus précoce : une quinzaine de jours d'avance sur le débourrement, la pleine floraison et le début de la véraison ainsi que des vendanges très précoces (à partir du 27 août) ont été observés. Concernant la qualité de la vendange 2003, elle a donné un degré moyen annuel de 10,6 contre 9,6 en moyenne, une acidité totale ($\text{gH}_2\text{SO}_4/\text{L}$) de 5,8 contre 8,3. Une baisse d'acidité peut entraîner une diminution de la composition aromatique du vin. Le rendement a baissé avec 8256 kg/ha contre environ 11 400 kg/ha en moyenne les autres années. Cependant, malgré ces petits rendements, de nombreuses maisons et vigneronnes ont millésimé cette année particulière du fait de l'obtention de moûts très aromatisés (Langellier *et al.*, 2003).

Le modèle RAMS rend bien compte des conditions thermiques au sein du vignoble notamment pour la canicule estivale, où les températures élevées sont relativement homogènes sur tout le vignoble.

Concernant les biais du modèle, ce dernier a tendance à accentuer les extrêmes printaniers nocturnes gélifs, à surestimer les températures minimales en août et à sous-estimer les maximales. La modélisation des extrêmes est complexe même à cette échelle topoclimatique où les données locales telles que la topographie, l'occupation du sol, l'état de la végétation, etc ont été intégrés en entrées de RAMS. Ces simulations sur l'année 2003 ont permis d'identifier les biais thermiques notamment en termes d'extrêmes et présentent un réel intérêt quand à la modélisation spatiale des champs thermiques.

Conclusion

Un des objectifs de cette thèse était d'établir une prospective des conditions thermiques futures au sein du vignoble de Champagne à partir de données simulées de sorties de modèles du climat en insistant sur les fréquences possibles d'extrêmes défavorables à la vigne dans le futur : l'aléa gélif printanier et les canicules estivales. L'analyse devait mettre en évidence les biais inhérents aux modélisations climatiques dans une démarche critique pour ensuite déterminer des prospectives thermiques et bioclimatiques.

Concernant les **deux modèles français** à échelles globale pour le LMD (IPSL) et régionale pour ARPEGE-Climat (RETIC) de Météo-France, les sorties du second modèle s'avèrent plus adaptées pour ce type d'étude en raison de leur résolution correspondant mieux à l'échelle de la région viticole et d'une meilleure prise en compte de l'altitude.

L'étude montre que le modèle ARPEGE-Climat (RETIC) simule correctement l'allure des distributions de températures journalières sur les périodes clés étudiées (printemps et été) de la station de référence pour la validation Reims-Courcy. Cependant, il témoigne d'un biais froid et tend à accentuer les extrêmes thermiques printaniers car il est encore difficile d'estimer avec précision les interactions et processus complexes à l'origine des événements extrêmes.

Néanmoins après une mise en évidence d'un biais froid sur la période de contrôle (1950-2000), des prospectives sur les scénarios de changement climatique sont possibles :

- l'aléa gélif diminuera probablement en avril dans le futur mais le réchauffement des températures pourra provoquer l'atteinte plus précoce des sommes thermiques favorisant le débourrement d'où la nécessité d'anticiper les conditions de gel en mars qui pourront augmenter selon les scénarios,
- des canicules estivales équivalentes à celles de 2003 seront de plus en plus fréquentes dans le futur pour les trois scénarios notamment après 2070,
- la période future témoigne d'une forte variabilité interannuelle,
- les trois scénarios envisagent une tendance à la précocité de la maturité/récolte ce qui risque de perturber les équilibres traditionnels du vin et d'en changer la typicité,
- les tendances thermiques du futur ne sont pas linéaires. Vers 2071-2100, le scénario A2 traduira néanmoins la plus forte augmentation des températures maximales avec des maximales qui devraient dépasser 35°C pour 18 à 20 % des jours d'été à l'horizon 2091-2100. Les viticulteurs devront progressivement adapter de nouvelles techniques de conduite agronomiques afin d'éviter l'échaudage des vignes.

Même si les approches du changement climatique par les modélisateurs du climat sont aujourd'hui encore trop approximatives pour apporter des réponses aux échelles locales, elles favorisent à l'échelle d'une région viticole l'anticipation des changements thermiques et bioclimatiques possibles et donne une vision prospective en s'intéressant aux modifications futures des extrêmes thermiques auxquels la vigne est particulièrement sensible selon une gamme d'incertitudes matérialisée par les scénarios. Pour les viticulteurs, l'objectif est de pérenniser leur culture en vue d'une production de qualité, typique d'un terroir viticole donné et de connaître les fréquences probables de ces extrêmes dommageables pour en anticiper les répercussions.

Le **modèle à méso-échelle RAMS** a permis de compléter les résultats obtenus à partir des modèles précédents.

Ce modèle prend en compte les caractéristiques locales en entrées du modèle et sa résolution locale de 200 m permet l'obtention de sorties de modèles aboutissant à une modélisation spatiale de la température ce qui était impossible avec un seul point de grille de modèle d'une résolution de 50 km. Quelques dates clés de la période gélive et de la canicule 2003 ont permis d'évaluer la capacité du modèle à reproduire les phénomènes extrêmes et de dégager des structures spatiales dans la répartition des températures minimales pour une des nuits gélives dans le vignoble de la Marne et des températures maximales lors des dates caniculaires. Ce modèle ne reproduit que partiellement les extrêmes thermiques qui sont surestimés ou sous-estimés : même à une résolution locale, les sorties de modèles présentent des marges d'incertitudes liées ici à la complexité de prendre parfaitement en considération les phénomènes météorologiques et climatique à cette échelle d'analyse.

En 2003, l'aléa gélif a causé des dommages sévères pour la vendange en gelant les nouveaux bourgeons et les températures caniculaires ont provoqué l'échaudage des baies dans certaines parcelles faisant souffrir les vignes d'une sécheresse thermique. Il était donc intéressant de considérer une année exceptionnelle comme étalonnage du modèle à méso-échelle mais surtout car cette année 2003 est représentative des conditions probables dans le futur comme l'a confirmé l'étude à l'échelle régionale.

Les biais du modèle RAMS sont donc mis en évidence et seront pris en compte dans la modélisation avec le scénario A2 en cours de réalisation afin de poursuivre la méthodologie qui vise à valider les sorties de modèles sur une période de contrôle puis à obtenir une prospective future à partir de scénarios. Le modèle RAMS va en effet être forcé à ses bornes par le scénario A2 d'ARPEGE-Climat afin d'obtenir des simulations à 5 km de résolution sur quelques décades futures notamment autour de 2030 afin de prendre en considération la durée de vie d'un cep de vigne (environ 30 ans) dans un premier temps puis des dates extrêmes seront sélectionnées afin d'être analysées. Une phase préliminaire a permis de comparer les données ARPEGE-Climat aux données RAMS sur une période de contrôle de 1990 à 2000.

Par ailleurs, des tests et validations ont déjà été effectués sur une période dite de référence (1991-2000) sur les données quotidiennes des mois d'avril, juillet et août. Les biais entre les données observées de quatre stations : Reims-Courcy, Bouzy haut, Avize bas et Epernay (Fort-Chabrol) et les données simulées RAMS ont été mis en évidence :

- 0,6°C de biais froid sur le mois d'avril,
- 1°C de biais chaud pour le mois de juillet,
- et 0,4°C de biais chaud pour le mois d'août.

Ces validations ont été réalisées également sur les données thermiques ARPEGE-Climat obtenues pour la France dans le cadre de la modélisation RAMS effectuées sur plusieurs vignobles du projet TERVICLIM. Sur 1991-2000, le biais est plus important pour ARPEGE-Climat, d'environ 2°C.

Les sorties ARPEGE-Climat obtenues pour le forçage de RAMS, sont légèrement différentes de celles obtenues dans le cadre de la thèse :

- celles de la thèse sont issues de la version 4.6 du modèle dans le cadre du programme RETIC,
- celles du projet et des travaux en cours sont issues de la version 3 du projet PRUDENCE.

Ces simulations futures vont permettre de compléter les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse afin d'analyser la probable répartition spatiale des températures extrêmes dans le futur lors des seuils thermiques défavorables à la vigne.

Ce type d'étude, au carrefour entre les sciences de la modélisation climatique et de l'agronomie, met en évidence les limites inhérentes à l'utilisation de sorties de MCG. Malgré les incertitudes qui en résultent, il apparaît une tendance robuste à l'augmentation de la fréquence probable d'aléas extrêmes dommageables pour le cycle végétatif et à la récolte, qui se superposera à l'évolution lente du climat moyen. La disponibilité de projections climatiques avec des résolutions spatiales fines est donc une nécessité de plus en plus forte pour préparer les mesures d'adaptation nécessaires dans le vignoble. Ces mesures d'adaptation aux changements climatiques sont d'ailleurs actuellement la préoccupation majeure des nouveaux contrats de recherche.

Une des perspectives de ce travail de recherche est de développer un travail à échelles plus fines avec des mesures de terrain complémentaires, voire même itinérantes pour compléter la modélisation spatiale obtenue avec le modèle RAMS et ainsi affiner l'analyse et la comparaison aux données observées. Cela permettrait d'obtenir un jeu de données, à l'échelle non plus du topoclimat mais du terroir viticole avec des parcelles expérimentales comme terrain de recherche, il s'agira de prendre en considération les autres variables que la température et de poursuivre plus en détails le travail de validation et comparaison modèle-terrain sur les extrêmes.

L'étude réalisée dans le cadre de ce doctorat pourrait être également complétée par une étude ciblée non plus sur l'aléa mais sur la perception du changement climatique et de ses répercussions sur les parcelles viticoles par les acteurs de la communauté viti-vinicole dans le but de les mettre en relation avec les données quantitatives thermiques et d'établir des champs d'actions possibles sur les parcelles. En effet, la qualité du vin est fortement tributaire du climat de l'année et dans le futur, vraisemblablement, il y aura encore des fluctuations avec des années précoces, des années tardives concernant le cycle végétatif de la vigne mais également des années chaudes, d'autres plus fraîches, etc cependant ces années fluctueront autour d'une nouvelle année moyenne à l'origine plus précoce et plus chaude (Seguin, 2010). La typicité des vins pourraient changer avec les modifications engendrées par le changement climatique d'où la nécessité de développer des stratégies d'adaptation au changement climatique souvent dans une volonté de mettre en place des systèmes de production agricole durable (AVC, 2010). Cela permettrait également d'évaluer les zones vulnérables en termes de dommages socio-économiques et de mettre en place des stratégies de prévention pour réduire la vulnérabilité de l'économie viticole mais également d'adaptation aux modifications futures. Il s'agit de mettre en place des outils de diagnostic spatialisé en concertation avec les professionnels. Dans cet esprit, le projet Terradclim (<http://www2.gip-ecofor.org/publi/>) fait suite à l'ANR Terviclim et cible le Val de Loire et l'Argentine. Il a pour but de définir des stratégies d'adaptation à partir de simulations telles que celles réalisées avec le modèle RAMS, à échelles fines afin de tenir compte des conditions de surface mais aussi des capacités des viticulteurs en termes de moyens économiques et de pratiques agro-culturelles. Les stratégies d'adaptation des vins de terroir pourront être élaborées avec une plateforme de système multi-agents (S.M.A.).

Parmi les adaptations envisagées, à mettre en relation avec ces futurs travaux, certaines concernent les pratiques viticoles :

- à court terme, pour éviter l'échaudage des grappes en été, l'effeuillage peut être réduit mais cela peut poser des problèmes sur la vigueur de la vigne,
- à long terme, de nouveaux porte-greffes des cépages traditionnels pourraient être implantés afin de jouer sur la précocité. Il existe ainsi un conservatoire génétique sur le domaine de Plumecoq (AVC, 2010) où la variabilité génétique des cépages champenois est conservée : ce matériel végétal pourrait être utilisé dans le cas de pratiques d'adaptation s'il correspond mieux aux nouvelles conditions thermiques.
- la désalcoolisation pourrait être également envisagée avec des modifications des techniques de vinifications (Seguin, 2010).

La géographie du vignoble pourrait être ainsi modifiée pour planter les vignes là où l'exposition n'est pas la meilleure comme dans des zones de cuvette ou au nord, plus fraîches pour limiter les dommages estivaux sur la maturité des grappes quitte à risquer le gel. Ces transformations territoriales à l'échelle des terroirs pourraient impliquer des mutations socio-économiques nécessitant une expertise basée sur la confrontation des acteurs dans la

recherche de stratégies d'adaptation tenant compte des contraintes locales à la fois climatiques, économiques et politiques.

Bibliographie

A.V.C. (Association Viticole Champenoise), 1991 : Les gelées de printemps. *Le vigneron Champenois*, hors-série, 63 p.

A.V.C., 2010 : *Viticulture durable en Champagne*. Guide pratique, 220 p.

AGENIS-NEVERS M., 2006 : Impacts du changement climatique sur les activités vitivinicoles. *Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique*. Note technique n°3, 20 p.

ALLARD P., FOX D., PICON B., 2008 : *Incertitude et environnement. La fin des certitudes scientifiques*. Aix-en-Provence : Edisud, collection : « Ecologie humaine », 478 p.

AMERINE M.A., WINKLER A.J., 1944: Composition and quality of musts and wines of California grapes. *Hilgardia*, **15**, pp. 493-673.

ANDRÉ J.-C., DÉQUÉ M., ROGEL P., PLANTON S., 2004 : La vague de chaleur de l'été 2003 et sa prévision saisonnière. *Comptes rendus Geosciences*, **336**, pp. 491-503.

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.

BARBEAU G., 2007 : Climat et vigne en moyenne vallée de la Loire, France. *Congrès sur le climat et la viticulture*, Saragosse, Espagne, 10-14 avril, seconde session «climat et terroir », pp. 96-101.

BECKER N.J., 1978 : Recherches expérimentales sur l'influence du microclimat sur la composition des baies de raisin et de la qualité de la récolte. *Symposium International « Ecologie de la Vigne »*, Constantza (Roumanie), pp. 113-121.

BELLIA S., DOUGUEDROIT A., SEGUIN B., 2008 : Impacts du réchauffement sur les étapes phénologiques du Grenache et de la Syrah dans les Côtes du Rhône et les Côtes de Provence (1976-2000). Journées de Climatologie, Climat et Société : Climat et végétation, Nantes, 13-14 mars, pp. 45-54.

BELTRANDO G., 1997 : *La climatologie, une science géographique : Réflexion à partir d'expériences à des échelles spatiales et temporelles différentes*. Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Université Paris 7 Denis Diderot, 193 p.

BELTRANDO G., 1998 : Les gelées printanières en Champagne viticole : Quelques résultats obtenus à partir d'un nouveau réseau de stations automatiques. *La Météorologie*, **8**, 21, pp. 30-44.

BELTRANDO G., 2004 : *Les climats - Processus, variabilité et risques*. Armand Colin, Paris, 266 p.

BELTRANDO G., BRICHE E., 2010 : Changement climatique et viticulture, du constat actuel aux prévisions des modèles pour le XXI^e siècle : l'exemple champenois. *Echogéo*, <http://echogeo.revues.org/12216>.

BELTRANDO G., CHÉMERY L., 1995 : *Dictionnaire du climat*. Larousse, Paris, 344 p.

BELTRANDO G., LECOMPTE M., SARMIR I., 1992 : Le gel dans le vignoble champenois : itinéraires topoclimatiques pour la mesure de l'infra-rouge thermique. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **5**, pp. 335-342.

BENISTON M., 2004: The 2003 Heat Wave in Europe: a shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters*, **31**, L02202, 4 p.

BENISTON M., STEPHENSON D. B., CHRISTENSEN O. B., FERRO C. A. T., FREI C., GOYETTE S., HALSNAES K., HOLT T., JYLHA K., KOFFI B., PALUTIKOF J., SCHOLL R., SEMMLER T., WOTH K., 2007: Future extreme events in European climate : an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, **81**, pp. 71-95.

BERGQVIST J., DOKOOZLIAN N., 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. *American Journal of Enology and Viticulture*, **52**, 1, pp. 1-7.

BESSEMOULIN P., BOURDETTE N., COURTIER P., MANACH J., 2004 : La canicule d'août 2003 en France et en Europe. *La Météorologie*, **46**, 25-33.

BIGOT S., CHARABI Y., BELTRANDO G., 2002 : Evolution des températures de la métropole lilloise entre 1950 et 2000. *Hommes et Terres du Nord*, **1**, pp. 3-14.

BINDI M., FIBBI L., GOZZINI B., ORLANDINI S., MIGLIETTA F., 1996: Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. *Climate Research*, **7**, 3, pp. 213-224.

BINDI M., HOWDEN M., 2004 : Challenges and opportunities for cropping systems in a changing climate. *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*, Brisbane Australia, pp. 1-13.

BLOUIN J., 2007 : *Le dictionnaire de la vigne et du vin*. Dunod, Paris, 351 p.

BOÉ J., 2007 : *Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France*. Université Paul Sabatier, Toulouse III, 256 p.

BOÉ J., TERRAY L., 2008 : A weather type approach to analyzing winter precipitation in France in twentieth century trends and the role of anthropogenic forcing. *Journal of Climate*, **21**, pp. 3118-3133.

BOÉ J., TERRAY L., HABETS F., Martin E., 2006 : A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *Journal of Geophysical Research*, **111**, 12 p.

BOIS B., 2007 : *Cartographie agroclimatique à méso-échelle : méthodologie et application à la variabilité spatiale du climat en Gironde viticole. Conséquences pour le développement de la vigne et la maturation du raisin*. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux II, 210 p.

BOIS B., VAN LEEUWEN C., 2008 : Variabilité climatique dans la zone de production des vins de Bordeaux. *Terroirs viticoles*, ENITA Bordeaux, pp. 45-50.

BONNARDOT V., CAREY V., PLANCHON O., CAUTENET S., 2001 : Sea breeze mechanism and observations of its effects in the Stellenbosch wine producing area. *Wynboer*, pp. 113-117.

BONNARDOT V., CAREY V., 2008: Observed climatic trends in South African wine regions and potential implications for viticulture. *Proceedings VIIth International Viticultural Terroir Congress*, 19-23 May 2008, Nyon, Switzerland, **1**, pp. 216-221.

BONNARDOT V., CAREY V.A., ROWSWELL D.I., 2011 : Observed climatic trends in Stellenbosch : update and brief overview. *Wynboer*, (in press).

BONNARDOT V., CAUTENET S., 2009: Mesoscale Atmospheric Modeling Using a High Horizontal Grid Resolution over a Complex Coastal Terrain and a Wine Region of South Africa. *Journal of Applied Meteorology*, **48**, 2, pp.330-348.

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

BONNARDOT V., PLANCHON O., CAUTENET S., 2005 : The sea breeze development under an offshore synoptic wind in the South Western Cape and implications for the Stellenbosch wine producing area. *Theoretical and Applied Climatology*, **81**, pp. 203-218.

BONNARDOT V., CAREY V., MADELIN M., CAUTENET S., QUÉNOL H., 2010: Using atmospheric and statistical models to understand local climate and assess spatial temperature variability at fine scale over the Stellenbosch wine district, South Africa. *Proceedings of the Eighth International Terroir Zoning Congress*, Soave, Italy, **1**, 2, pp 14-19.

BONNEFOY C., MADELIN M., CASTEL T., 2009 : Régionalisation d'un indice agroclimatique viticole en Bourgogne. *9Ième rencontres Theoquant*, 8 p.

BONNEFOY C., QUÉNOL H., PLANCHON O., BARBEAU G., 2010 : Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique, EchoGéo [En ligne], numéro 14 | 2010, mis en ligne le 13 décembre 2010, consulté le 14 février 2011. <http://echogeo.revues.org/12146>

BOUCHET R. J., 1965 : Problèmes de gelées de printemps. *Agricultural Meteorology*, **2**, pp. 167-195.

BRANAS J., 1974 : *Viticulture*, Dehan, Montpellier, 990 p.

BRANAS J., BERNON G., LEVADOUX L., 1946 : *Eléments de viticulture générale*. Ecole Nationale d'Agriculture de Montpellier. Montpellier, 400 p.

BRICHE E., 2007 : *Changement climatique et viticulture en Champagne*. Mémoire de master 2, Université Paris Diderot, 80 p.

BRICHE E., BELTRANDO G., KERGMARD C., QUÉNOL H., 2009a : Utilisation des sorties du modèle numérique ARPEGE-Climat pour la simulation d'un indice bioclimatique jusqu'à la fin du X^{VI}ème siècle dans le vignoble de Champagne. *IX^{ème} Rencontres Théoquant*, <http://thema.univ-fcomte.fr/theoq/pdf/2009/TQ2009%20ARTICLE%2033.pdf>

BRICHE E., BONNEFOY C., CAUTENET S., BONNARDOT V., BELTRANDO G., MADELIN M., QUÉNOL H., 2011b : Simulations du modèle à méso-échelle RAMS à résolution fine lors des épisodes extrêmes de 2003 : application à deux vignobles du Nord de la France. *XXIV^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, sous presse.

BRICHE E., MADELIN M., BELTRANDO G., KERGMARD C., 2009b : Analyse diagnostique des températures extrêmes de 1950 à 2000 issues du modèle ARPEGE-Climat : Intérêt pour l'activité viticole champenoise. *Actes du XXII^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, pp.91-96.

BRICHE E., MADELIN M., BELTRANDO G., KERGMARD C., 2010 : Analyse comparative des températures extrêmes de 1950 à 2100 issues du modèle ARPEGE-Climat et LMD : Intérêt pour l'activité viticole champenoise. *La Climatologie*, pp. 9-19.

BRICHE E., QUÉNOL H., BELTRANDO G., 2011a, Changement climatique dans le vignoble champenois : l'année 2003, préfigure-t-elle les prévisions des modèles numériques pour le XXI^e siècle ? *Espace Géographique*, **2**, pp. 164-175.

BRIDIER S., 2001 : *Modélisation de la répartition des brises et des températures en situation radiative*. Thèse de doctorat de Géographie, Université Denis Diderot (Paris 7), 189 p.

BRIDIER S., QUÉNOL H., 2010 : Analyse climatologique des vignobles de l'AOC Sainte-Victoire dans la perspective de l'élévation des températures. *23ième Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes 2010, pp. 89-94.

BRIDIER S., QUÉNOL H., BELTRANDO G., 1995 : Evaluation de l'influence d'un ouvrage linéaire en remblai – le TGV Est – sur l'écoulement de l'air froid dans le vignoble champenois. *Publications de l'Association Internationale de climatologie*, **8**, pp. 233-240.

BRIDIER S., QUÉNOL H., BELTRANDO G., 2004 : Cartographie du potentiel de refroidissement en situation radiative : application aux terroirs de fonds de Sillery dans le vignoble de Champagne. *Revue Internationale de Géomatique*, **14**, 1, pp. 119-132.

BUTTROSE M.S., HALE C.R., 1973: Effect of temperature on development of the grapevine, *American Journal of Enology and Viticulture*, **24**, pp. 14-16.

CALAME F., ROCHAIX M., SIMON J.L., 1977 : Observations phénologiques et mesures bioclimatiques dans plusieurs sites viticoles valaisans à différentes altitudes en vue de la délimitation de l'aire viticole. *Bulletin de l'Office International de la Vigne et du Vin*, Paris, **50**, pp. 601-616.

CARBONNEAU A., 1976 : Analyse de la croissance des feuilles du sarment de vigne: estimation de sa surface foliaire par échantillonnage. *Connaissance vigne vin*, **10**, pp. 141-159.

CARBONNEAU A., 1980 : *Recherche sur les systèmes de conduite de la vigne : essai de maîtrise du microclimat et de la plante entière pour produire économiquement du raisin de qualité*. Thèse doctorat, Université de Bordeaux II, 240 p.

CARBONNEAU A., 1992 : *Météorologie et viticulture*. Rapport pour le WMO/TD 484, 72 p.

CARBONNEAU A., 1996 : Interactions "Terroir x Vigne", facteurs de maîtrise du micro-environnement et de la physiologie de la plante en rapport avec le niveau de maturité et les éléments de typicité. *Actes de Colloque " Terroirs viticoles – Concept, Produit, Valorisation "*, Angers 17-18/07/1996, URVV-Angers /ISVV-Montpellier, pp. 147-153.

CARBONNEAU A., 2003 : *Architecture de la vigne et système de conduite*, Paris, Dunod, Editions La Vigne, 188p.

CAREY V.A., 2001: *Spatial characterization of terrain units in the Bottelaryberg / Simonsberg / Helderberg winegrowing area*. MS Agriculture, Departement of Viticulture, University of Stellenbosch, Matieland, South Africa, 90 p.

CARREGA P., 1994 : Topoclimatologie et habitat. Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée. *Revue de Géographie du laboratoire d'analyse spatiale Raoul Blanchard*, UFR Espace et Culture, Université de Nice Sofia Antipolis, 408 p.

CARREGA P., 2008 : « Le changement climatique : incertitudes structurelles et incertitudes propagées ». In ALLARD P., FOX D., PICON B., 2008 : *Incertitude et environnement. La fin des certitudes scientifiques*. Aix-en-Provence : Édisud, collection « Écologie humaine », pp. 209-218.

- CELLIER P., 1989 : *Mécanismes du refroidissement nocturne : application à la prévision des gelées de printemps*. Édition INRA, 175 p.
- CERESTA, 1986 : *Aide-mémoire pratique des techniques statistiques pour ingénieurs et techniciens supérieurs*. Paris, 273 p.
- CERTU (Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques), IGN (Institut Géographique National), 1998 : *BD Carto, structure utilisateur METL v98 : spécifications et descriptif de contenu*. METL, CERTU, IGN, Lyon, 106 p.
- CHABIN J.-P., MADELIN M., BONNEFOY C., 2007 : Les vignobles beaunois face au réchauffement climatique. Colloque *Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ?* Dijon et Beaune, 28-30 mars 2007, 13 p.
- CHAMPAGNOL F., 1984 : *Éléments de Physiologie de la vigne et de viticulture générale*. Saint-Gely-du-Fesc, France, 351 p.
- CHEVET J.-M., SOYER J.-P., 2006 : Phénologie et climat dans le Haut-Médoc (1800-2005). *VIe Congrès International Des Terroirs Viticoles*, pp. 46-51.
- CHOISNEL E., 2002 : Agrométéorologie. **1**, Encyclopaedia Universalis, Paris, pp. 601-605.
- CHRISTENSEN P., 1969: Seasonal changes and distribution of nutritional elements in Thompson Seedless grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, **20**, pp.176-190.
- CHUINE I., YIOU P., VIOVY N., SEGUIN B., DAUX V., LE ROY LADURIE E., 2004 : Historical phenology : Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, **432**, pp. 289-290.
- CONCEIÇÃO M.A.F., TONIETTO J., 2005: *Climatic potential for wine grape production in the tropical north region of Minas Gerais State, Brazil*, Revista Brasileira de Fruticultura, **27**, 3, p.404-407.
- CONRADIE W.J., CAREY V.A., BONNARDOT V., SAAYMAN D., VAN SCHOOR L.H., 2002 : Effect of Natural "Terroir" Units on the Performance of Sauvignon Blanc Grapevines in the Stellenbosch/Durbanville Districts of South Africa. I. Geology, Soil, Climate, Phenology and Grape Composition. *South African Journal of Enology and Viticulture*, **23**, 2, pp. 78-91.
- CONSTANTINESCU G., 1967 : Méthodes et principes de détermination des aptitudes viticoles d'une région et du choix des cépages. *Bulletin de l'OIV*, **441**, pp. 1179-1205
- COOMBE BG, DRY PR., 1998 : *Viticulture. Volume 1 Ressources*. Ed. Winetitles: Adelaide, 211 p.
- COTTON W.R., PIELKE R.A, WALKO R.L., LISTON G.E., TREMBACKC.J., JANG H., MCANELLY R.L., HARRINGTON J.-Y., NICHOLLS M.E., CARRIO G.G., MCFADDEN J.P., 2003 : RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **82**, pp.5-29.
- CRESPY A., 1987 : *Viticulture d'aujourd'hui*. Tec & Doc (Collection Agriculture d'aujourd'hui), Paris, 176 p.
- CRESPY A., 1992 : *Viticulture d'aujourd'hui*. 2ème édition, Lavoisier, 240p.
- DE PARCEVAUX S., HUBER L., 2007 : *Bioclimatologie - Concepts et applications*. Editions Quae, 336 p.

DELECOLLE R., SOUSSANA J.F., LEGROS J.P., 1999 : Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. *Compte-Rendu de l'Académie d'Agriculture de France*, **85**, pp. 45-51.

DELOIRE A., VAUDOUR E., CAREY V., BONNARDOT V., VAN LEEUWEN C., 2005 : Les réponses de la vigne au terroir : une approche globale. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, **39**, 4, pp. 149-162.

DÉQUÉ M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, **57**, pp.16-26.

DÉQUÉ M., DREVETON C., BRAUN A., CARIOLLE D., 1994: The ARPEGE-IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics*, **10**, pp. 249-266.

DÉQUÉ M., JONES R., WILD M., GIORGI F., CHRISTENSEN J.H., HASSELL D., VIDALE P. L., ROCKEL B., JACOB D., KJELLSTROM E., DE CASTRO M., KUCHARSKI F., VAN DEN HURK B., 2005 : Global high resolution versus limited area model climate change projections over Europe : quantifying confidence level from PRUDENCE results. *Climate dynamics*, **25**, 6, pp. 653-670.

DÉQUÉ M., LI L., 2007 : La prévision climatique : régionalisation et extrêmes. *La Météorologie*, **57**, PP. 28-31.

DÉQUÉ M., MARQUET P., JONES R.G., 1998 : Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. *Climate Dynamics*, **14**, pp. 173-189.

DÉQUÉ M., PIEDELIEVRE J.P., 1995: High-Resolution climate simulation over Europe. *Climate Dynamics*, **11**, pp. 321-339.

DÉQUÉ M., ROWELL D.P., LÜTHI D., GIORGI F., CHRISTENSEN J. H., ROCKEL B., JACOB D., KJELLSTROM E., DE CASTRO M., KUCHARSKI F., VAN DEN HURK B., 2007 : An intercomparison of regional climate simulations for Europe : assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, **81**, 1, pp. 53-70.

DÉQUÉ M., SOMOT S., 2010: Weighted frequency distributions express modeling uncertainties in the ENSEMBLES regional climate experiments. *Climate research*. **44**, pp. 195-209

DOBESCH H., DUMOLARD P., DYRAS I., 2008: *Spatial Interpolation for Climate Data: Use of GIS in Climatology and Meteorology*. Vol. Geographical Information Systems Series (ISTE-GIS), Ed J. & Wiley, 290 p.

DOKOOLZIAN N.K., BERGQVIST J.A., 2001: Influence of sunlight exposure on the berry growth and composition of two reds cultivars. *In Proceedings of the 12th GESCO Conference (Montpellier)*, **1**, pp. 77-84.

DOLEDEC A.-F., 1995 : *Recherche des composantes principales des terroirs viticoles afin d'élaborer un outil d'aide à la gestion au moyen d'observatoires et traitements statistiques de données spatialisées. Application au vignoble champenois*. Thèse de doctorat de l'INA-PG, 218 p.

DOUGUEDROIT A., 2008 : Le changement climatique, incertitude majeure pour la gestion de l'environnement au XXIème siècle. *In ALLARD P., FOX D., PICON B., 2008 : Incertitude et environnement. La fin des certitudes scientifiques*. Aix-en-Provence : Édisud, collection « Écologie humaine », pp. 209-218.

DUCHÊNE E., SCHNEIDER C., 2004: Grapevine and climatic changes : a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development*, 25, pp. 93-99.

DUCHÊNE E., SCHNEIDER Ch., 2007 : Conséquences écophysologiques des évolutions climatiques au cours du cycle de développement de la vigne en Alsace. *Colloque Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ?* Chaire UNESCO, Dijon et Beaune, 28-30 mars.

http://www2.ubourgogne.fr/chaireunescovinetculture/Actes%20clima/Actes/Article_Pdf/Duchene.pdf

DUE G., MORRIS M., PATTISON S., COOMBE B.G., 1993 : Modelling grapevine phenology against weather : considerations based on a large data set. *Agricultural and Forest Meteorology*, 65, pp. 91-106.

DUFRESNE J.-L., ROYER J.-F., 2007 : Simulation de l'évolution du climat aux échelles globales et régionales. *Congrès SHF-29 Journées de l'Hydraulique : 'Variation climatiques et hydrologie'*, Lyon, 14 p.

DUFRESNE J.L., SALAS Y MÉLIA D., DENVIL S., TYTECA S., ARZEL O., BONY S., BRACONNOT P., BROCKMANN P., CADULE P., CAUBEL A., CHAUVIN F., DÉQUÉ M., DOUVILLE H., FAIRHEAD L., FICHEFET T., FOUJOLS M.A., FRIEDLINGSTEIN P., GRANDPEIX J.Y., GUÉRÉMY J.F., 2006 : Simulation du climat récent et futur par les modèles du CNRM et de l'IPSL. *La Météorologie*, 55, pp. 45-59.

ENDLICHER W., 1980 : L'utilisation de mesures itinérantes et de thermographies comme moyens d'étude du mésoclimat. *Recherches Géographiques à Strasbourg*, n°13-14, pp. 127-133.

FALLOT J.-M., 1992 : *Etude de la ventilation d'une grande vallée préalpine (la vallée de la Sarine en Gruyère)*. Thèse de l'Université de Fribourg, Suisse, 475 p.

FOLBERTH G., HAUGLUSTAINE D. A., CIAIS P., LATHIÈRE J., 2005: On the role of atmospheric chemistry in the global CO₂ budget. *Geophysical Research Letters*, 32, 4 p.

GALET P., 2000 : *Précis de viticulture : à l'usage des ingénieurs agronomes, des étudiants en agronomie et en œnologie, des techniciens des lycées agricoles et des professionnels de la viticulture*, Dehan, Montpellier, 602 p.

GADILLE R., 1967 : *Le vignoble de la Côte Bourguignonne. Fondements physiques et humains d'une viticulture de haute qualité*, Paris, Les Belles Lettres, 686 p.

GANICHOT B., 2002 : Évolution de la date des vendanges dans les Côtes du Rhône méridionales. in *Actes des 6e Rencontres rhodaniennes*, Institut Rhodanien, Orange, pp. 38-41.

GARCÍA DE CORTÁZAR ATAURI.I., 2006 : *Adaptation du modèle STICS à la vigne (Vitis vinifera L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France*. Montpellier, Thèse de doctorat de L'Ecole Supérieure Nationale d'Agronomie, 349 p.

GARCÍA DE CORTÁZAR ATAURI.I., BRISSON N., 2007 : Comment utiliser STICS sur une nouvelle culture? L'exemple d'adaptation à la vigne (Vitis Vinifera L.). *Actes Séminaire STICS*, Reims, p. 4.

GARCIA DE CORTÁZAR ATAURI I., BRISSON N., SEGUIN B., 2004 : *Estimation de l'impact du changement climatique sur les résultats agronomiques de la vigne avec le modèle STICS*, Cahier Technique Mondiaiviti, ed.ITV, France, p.151-159.

- GARCÍA DE CORTÁZAR ATAURI I., BRISSON N., SEGUIN B., GAUDILLERE J.P. ET BACULAT B., 2005: Simulations of budbreak date for the vine. The BRIN model. Some applications in climate change study. *Proceedings GESCO*, Aout 2005, Geisenheim. pp. 23-27.
- GEIGER R., 1969: Topoclimates, in *World survey of climatology*, **2**, General Climatology, Elsevier, pp. 105-138.
- GEIGER R., 1965: *The climate near the ground*. Harvard University Press, Cambridge, 611 p.
- GIBELIN A-L., DÉQUÉ M., 2003: Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate dynamics*, **20**, pp. 327-339.
- GIEC, 2001: *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the third assessment report of IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge.
- GIEC, 2007: *Climate Change: The Physical Science Basis*. Summary for Policymakers, Contribution of the Working Group I to the Fourth Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat (<http://www.ipcc.ch/>).
- GLADSTONES J., 1992: *Viticulture and environment*. Winetitles, Underdale, South Australia, 310 p.
- GROUPE CHADULE, 1997 : *Initiation aux pratiques statistiques en géographie*. Armand Colin, Paris, 203 p.
- GUILLOIN J.-M., 1905 : *Etude générale de la vigne*, Masson, 452 p.
- HALL A., JONES G., 2010: Spatial analysis of climate in winegrape-growing regions in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **16**, pp. 389-404.
- HALLEY V., ERIKSSON M., NUNEZ M., 2003: Frost prevention and prediction of temperature variations and cooling rates using GIS. *Australian Geographical Studies*, **41**, 3, pp. 287-303.
- HEINO R., 1996: Metadata and their role in homogenization. *Proceedings Seminar on Homogenization of Surface Instrumentation Data*, Budapest, pp. 5-8.
- HINNEWINKEL J. -C., 2004 : *Les terroirs viticoles. Origines et devenirs*. Paris, Féret, 228 p.
- HOWDEN S.M., SOUSSANA J.F., TUBIELLO F.N., CHHETRI N., DUNLOP M., MEINKE H., 2007: Adapting agriculture to climate change. *PNAS*, **104**, 5, pp. 19691-19696.
- HUBERT P., CARBONNEL J.-P., CHAUCHE A., 1989 : Segmentation des séries hygrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110, pp. 349-367.
- HUFTY A., 2001 : *Introduction à la climatologie*. De Boeck. 546 p.
- HUGLIN P., 1978 : Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *CR de l'Académie d'Agriculture de France*, **64**, 13, pp. 1117-1126
- HUGLIN P., 1986 : *Biologie et écologie de la vigne*, Paris, Ed. Payot, TEC & DOC, Lausanne, 371 p.

- JACKSON D.I., CHERRY N.J., 1988: Prediction of a district's grape-ripening capacity using a latitude-temperature index. *American Journal of Enology and Viticulture*, **39**, 1, pp. 19-28.
- JONES G., 2006: Climate change and wine: observations, impacts and future implications, *Wine Industry Journal*, **21**, 4, pp. 21-26.
- JONES G.V., 2007: Climate Change: Observations, Projections, and General Implications for Viticulture and Wine Production. *Practical Winery and Vineyard*, pp.44-64.
- JONES G.V., D. E., 2005: Changes in European winegrape phenology and relationships with climate. *International GESCO Viticulture Congress (14)*, Geisenheim (Germany), p. 6.
- JONES G.V., Davis R.E., 2000: Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France. *American Journal of Enology and Viticulture*, **51**, 3, pp. 249-261.
- JONES G.V., STORCHMANN K.H., 2001: Wine market prices and investment under uncertainty : an econometric model for Bordeaux Crus Classés. *Agricultural economics*, **26**, pp. 115-133.
- JONES G.V., WHITE M.A., COOPER O.R., STORCHMANN K., 2005 : Climate and Wine : quality issues in a warmer world. *Climatic change*, **73**, 3, pp. 319-343.
- JOUZEL J., 2011 : *Scénarios climatiques : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ARPEGE-Climat et LMDz et quelques projections pour les DOM-COM*, Rapport de Mission, ONERC, 140 p.
- KENNY G.J., SHAO J., 1992: An assessment of a latitude-temperature index for predicting climate suitability for grapes in Europe. *Journal of Horticultural Science*, **67**, 2, pp. 239–246.
- KHARIN V. V., ZWIERS F. W., 2000: Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled Atmosphere-Ocean GCM. *Journal of Climate*, pp. 3760-3788.
- KLIEWER W.M., 1977: Influence of temperature, solar radiation, and nitrogen on coloration and composition of Emperor grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, **28**, pp. 96-103.
- KOSHITA Y, ASAKURA T, FUKURA H, TSUCHIDA Y. 2007. Nighttime temperature treatment of fruit clusters of “Aki Queen” grapes during maturation and its effect on the skin color and abscisic acid content. *Vitis*, **46**, 4, pp. 208-209.
- KOSHITA Y., ASAKURA T., FUKURA H., TSUCHIDA Y., 2007: Nighttime temperature treatment of fruit clusters of ‘Aki Queen’ grapes during maturation and its effect on the skin color and abscisic acid content. *Vitis*, **46**, 4, pp. 208-209.
- KOUNDOURAS S., MARINOS V., GKOU LIOTI A., KOTSERIDIS Y., VAN LEEUWEN C., 2006 : Influence of Vineyard Location and Vine Water Status on Fruit Maturation of Nonirrigated Cv. Agiorgitiko (*Vitis vinifera* L.). Effects on Wine Phenolic and Aroma Components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **54**, pp. 5077-5086.
- KRINNER G., VIOVY N., DENOBLET N., OGEE J., POLCHER P., FRIEDLINGSTEIN P., CIAIS P., SITCH S., PRENTICE I., 2005: A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochemistry Cycles*, **19**, 1, GB101510.1029/2003GB002199.
- LABORDE J. P., 2009 : *Éléments d'hydrologie de surface*. Ecole Polytechnique de Nice-Sophia Antipolis, 197 p.

- LANGELLIER F., 1985 : *Situation du vignoble champenois en 1985*, Notes interne des services techniques viticulture du CIVC, Epernay, 10 p.
- LANGELLIER F., 2003a. : *Meteo. Mars 2003 : Le Vigneron Champenois*, **4** pp. 15-18.
- LANGELLIER F., 2003b. Dans les vignes. Extraordinaires gelées de printemps. *Le Vigneron Champenois*, **5**, pp. 2-13.
- LASSERRE F., 2001 : L'essor du vignoble au Québec. Histoire de climats et de goûts. *Cybergéo*, Politique, Culture, Représentations, 190, pp. 1-10.
- LAUFFENBURGER M., 2007 : *Estimation du réchauffement climatique dans le sud-est de la France (à l'est du Rhône) à la fin du XXIème siècle (2071-2100)*. Aix-en-Provence, Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille 1, 285 p.
- LE TREUT H., 2010 : Modèles climatiques : certitudes, incertitudes et impacts locaux. *Actes du XXIIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes pp. 7-10.
- LEBON E., 2002 : Changements climatiques : quelles conséquences prévisibles sur la viticulture. *Actes des 6e Rencontres rhodaniennes*, Institut rhodanien, Orange, pp. 31-36.
- LEDDET C., DEREUDDRE J., 1989 : La résistance au gel des bourgeons, in *Actes de séminaires de la Commission d'agrométéorologie de l'INRA « Le gel en agriculture »*, Paris, INRA, pp. 113-128.
- LEE A.F.S., HEGHINIAN S.M., 1977: A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables – A Bayesian approach. *Technometrics*, 19, 4, pp. 503-506.
- LÉMOND J., DANDIN Ph., PLANTON S., VAUTARD R., PAGÉ C., DÉQUÉ M., FRANCHISTÉGUY L., GEINDRE S., KERDONCUFF M., LI L., MOISSELIN J.-M., NOEL T., TOURRE Y.M., 2011: DRIAS – A step toward French Climate Services. *Advanced Sciences Research*, 6, pp. 179–186.
- LI L., BOZEC A., SOMOT S., CRÉPON M., 2006 : Modelling regional-scale climate change of the Mediterranean. *CLIVAR newsletter Exchanges*, **11**, 2, pp. 24-27.
- LIGER-BELAIR G., ROCHARD J., 2008 : *Les vins effervescents. Du terroir à la bulle*. Dunod, Editions La Vigne, Paris, 272 p.
- LOBELL D.L., FIELD C.B., CAHILL K.N., BONFILS C., 2006: Impacts of future climate change on California perennial crop yields : Model projections with climate and crop uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology*, **141**, pp. 208-218.
- LUBES H., MASSON J.-M., 1991 : Méthode des moments de probabilité pondérés : Application à la loi de Jenkison. *Hydrologie Continentale*, **6**, 1, pp. 67-94.
- LUBES H., MASSON J.M., SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAME B., BOYER J.F., 1994 : Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Etude bibliographique. *Programme ICCARE. Rapport n°3*. ICCARE. ORSTOM, Montpellier, France.
- MADÉLIN M., 2004 : *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : Modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air*. Paris, Thèse de doctorat, Université Paris 7 Denis Diderot. 412 p.
- MADÉLIN M., BELTRANDO G., 2005: Spatial interpolation based mapping of spring frosts hazard in the Champagne vineyard. *Meteorological Applications*, **12**, 1, pp. 51-56.

MADÉLIN M., BOIS B., CHABIN J.-P., 2010 : Modifications des conditions de maturation du raisin en Bourgogne viticole liée au réchauffement climatique : l'exemple des vignobles des Côtes et Hautes Côtes de Beaune. *Echogéo*, 14, <http://echogeo.revues.org/12176>

MADÉLIN M., CHABIN J.P., BONNEFOY C., 2008: Global warming and its consequences in the Beaune vineyards. *Enomologica*, 1, 2, pp. 9-19.

MAHFOUF J., MANZI A., NOILHAN J., GIORDANI H., and DEQUE M., 1995: The land surface scheme ISBA within the Météo-France climate model ARPEGE. *Journal of Climate*., 8, 8, pp. 2039-2057

MAHRT L., 1986: *Nocturnal topoclimatology*. WMO, 117, TD 132, Genève, Suisse, 76p.

MATUS J. T., LOYOLA R., VEGA A., PEÑA-NEIRA A., BORDEU E., ARCE-JOHNSON P., ALCALDE J. A., 2006 : Post-veraison sunlight exposure induces MYB-mediated transcriptional regulation of anthocyanin and flavonol synthesis in berry skins of *Vitis vinifera*. *Journal of Experimental Botany*, 60, 3, pp. 853-867.

MEEHL G. A., TEBALDI C., 2004 : More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305, 5686, pp. 994-997.

MESTRE O., 2000 : *Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques*. Thèse de doctorat de Mathématiques appliquées et statistiques, Université de Toulouse 3, 226 p.

MILLARDET A., 1885 : *Histoire des principales variétés et espèces de vigne*. Paris, Masson Ed., 245 p.

MOISSELIN J.-M., SCHNEIDER M., CANELLAS C., MESTRE O., 2002 : Les changements climatiques en France au XXe Siècle, Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie*, 38, août 2002, pp. 45-56.

MONCOMBLE D., PANIGAI L., VALADE M., 2007 : Résumé des années viticoles 1996 à 2005. *Le Vigneron Champenois*, pp. 32-57.

MONTEIRO A., LOPES C. M., 2007: Influence of cover crop on water use and performance of vineyard in Mediterranean Portugal. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121, 4, pp. 336-342.

MOTORINA, M.V., 1958: Photosynthesis and grapevine breathing under the conditions of Moscow region. *Izvestija Tinerjazevske poljoprivredne akademije*, 1, 20 p.

NAKICENOVIC N., SWART R., 2000 : *Rapport spécial du GIEC, Scénarios d'émissions, Résumé à l'intention des décideurs*, 27 p.

NEMANI R.R., WHITE M.A., CAYAN D.R., JONES G.V., RUNNING S.W., COUGHLAN J.C., 2001: Asymmetric climatic warming improves California vintages, *Climate Research*, 19, 1, pp. 25-34.

O.I.V., 2010 : *Définition du terroir vitivinicole*. Résolution OIV/VITI333/2010, 1p.

ORLANSKI I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56, 5, pp.527-530.

PAGÉ C., 2008 : Format des données SAFRAN et scénarios climatiques désagrégés au CERFACS. *Technical Report TR/CMGC/08/27*, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS No1875, Toulouse, France, 8 p.

PAGÉ C., TERRAY L., BOÉ J., 2008 : Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08. *Technical Report* TR/CMGC/08/64, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS, N°1875, Toulouse, France, 21 p.

PAGÉ C., TERRAY L., 2010 : Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH2010. *Technical Report* TR/CMGC/10/58, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS N°1875, Toulouse, France, 23 p.

PAGÉ C., TERRAY L., BOÉ J., 2009: dsclim: A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology. *Technical Report* TR/CMGC/09/21, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS N°1875, Toulouse, France, 58 p.

PALUTIKOF J. P., WINKLER J. A., GOODNESS C. M. et ANDRESEN J. A., 1997: The simulation of daily temperature time series from GCM output. Part 1: Comparison of model data with observation. *Journal of Climate*, 10, pp. 2497-2513.

PÉGUY C.-P., 1976 : *Précis de climatologie*. Paris: Masson., 428 p.

PÉRARNAUD V., RAYNAL N., 1991 : *Agrométéorologie*. Ecole nationale de la météorologie, Toulouse, 183 p.

PETTITT A. N., 1979: A non-parametric approach to the change point problem. *Applied Statistics*, 28, 2, pp. 126-135.

PIELKE S.R., STHOLGREN R.A., SCHELL T., PARTON L., DOESKEN W., REDMOND N., MOENY K., MCKEE J., KITTEL T.G.F., 2002 : Problems in evaluating regional and local trends in temperature : an example from the Eastern Colorado, USA, *International Journal of Climatology*, 22, pp. 421-434.

PLANCHON O., 1997 : *Les Climats Maritimes dans le Monde*. Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq, 233 p.

PLANCHON O., 1998 : La notion d'échelle en climatologie : l'exemple des climats maritimes et côtiers en Europe. *Annales de Géographie*, 602, pp. 363-380.

PLANCHON O., BONNARDOT V., CAUTENET S., 2004 : Effets de la topographie sur les circulations de brise de mer dans la province occidentale du Cap : étude d'une situation caractéristique au moyen de la modélisation méso-échelle. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología*, A, 4, pp. 115-124.

POMEROL C., 1984 : *Terroirs et vins de France : itinéraires œnologiques et géologiques*. Total-Edition-presses – Ed. du B.R.G.M. Paris, Orléans, 343 p.

PUGET J.-L., BLANCHET R., SALENÇON J., CARPENTIER A., 2010 : *Le changement climatique*. Paris, Institut de France, rapport de synthèse de l'Académie des sciences, 21 p.

QUÉNOL H., 2002 : *Climatologie appliquée aux échelles spatiales fines : influence des haies brise-vent et d'un remblai ferroviaire sur le gel printanier et l'écoulement du Mistral*. Lille, Thèse de Doctorat Lille 1, 283 p.

QUÉNOL H., BRIDIER S., BELTRANDO G., 2003 : Le TGV et le Mistral dans les espaces arboricoles : Cartographie de la perturbation du vent par un remblai. *Mappemonde*, pp. 31-37.

QUÉNOL H., MONTEIR, A., BELTRANDO G., 2007 : Évolution récente des terroirs viticoles dans la région do Entre Douro e Minho (nord du Portugal). *Revue internationale de géomatique*, 17, 1, pp. 91-106.

QUÉNOL H., MONTEIRO A., BELTRANDO G., 2004 : Mesures climatiques aux échelles fines (météorologiques et agronomiques) et variabilité spatiale du gel printanier dans le vignoble de Vinho Verde. *Noroi*, **193**, pp. 117-132.

QUÉNOL H., PLANCHON O., WAHL L., 2008 : Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, **51**, pp. 127-137.

QUINTANA-SEGUI P., LE MOIGNE P., DURAND Y., MARTIN E., HABETS F., BAILLON M., CANELLAS C., FRANCHISTÉGUY L., MOREL S., 2008 : Analysis of near surface atmospheric variables : validations of the SAFRAN analysis over France. *Journal of applied meteorology and climatology*, **47**, 1, pp. 92-107.

RABOURDIN S., 2005 : *Changement climatique. Comprendre et agir*. Delachaux et Niestlé, Paris, 286 p.

RIBÉREAU-GAYON J., PEYNAUD E., 1971 : *Sciences et techniques de la vigne : traité d'ampélogie. Tome 1 : Biologie de la vigne ; sols de vignobles*, Dunod, Paris, 725 p.

RIOU C., 1994 : *Le déterminisme climatique de la maturation du raisin: application au zonage de la teneur en sucre dans la communauté européenne*. Luxembourg, Office des Publications Officielles des Communautés Européennes. 319 p.

ROTEN M., 1964 : *Recherches microclimatiques sur la vallée du Rhône en Valais*. Gessler, SION, 195 p.

SADOURNY R., LAVAL K., 1984, January and July performance of the LMD general circulation model. In *New Perspectives in Climate Modelling*, A. Berger and C. nicolis (eds), *Developments in Atmospheric Science*, 16, Elsevier, pp 173-198.

SALAS-MÉLIA D., CHAUVIN F., DÉQUÉ M., DOUVILLE H., GUÉRÉMY J.F., MARQUET P., PLANTON S., ROYER J.F., TYTECA S., 2005: *Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model*. Note de centre n°103 du CNRM. Toulouse: Météo-France.

SARMIR I., 1995 : *Variabilité spatio-temporelle des températures minimales et des dégâts du gel printanier dans le vignoble champenois*. Thèse de doctorat, Université Paris Diderot, Paris, 285 p.

SARMIR I., LECOMPTE M., 2000 : Influence du vent sur la distribution des gelées de printemps dans le vignoble champenois en 1989 et 1990. *Le Vigneron Champenois*, 5, pp. 38-51.

SCHULTZ H.B., 2000 : Climate change and viticulture : a European perspective on climatology, carbon dioxide and UVB effects. *Australian J. of grape and wine research*, **6**, pp. 1-12.

SEGUIN B., STENGEL P., 2002 : *Changement climatique et effet de serre*. INRA Mensuel, dossier n° **113**, 20 p.

SEGUIN B., 2002 : Relation entre climat et terroir à différentes échelles spatiales : apport de nouveaux outils méthodologiques, in *Ive Symposium sur le zonage vitivinicole*, Avignon, juin 2002, éd. OIV.

SEGUIN B., 2003 : Adaptation des systèmes de production agricole au changement climatique. *Comptes rendus Geoscience*, **335**, pp. 569-575.

SEGUIN B., 2004 : *Le réchauffement climatique récent en France : impact et conséquence sur la culture des arbres fruitiers et de la vigne*. Lettre n°**16** PIGB-PMRC.

- SEGUIN B., 2010 : *Coup de chaud sur l'agriculture*. Édition Delachaux et Niestlé, Paris 2010, 206 p.
- SEGUIN B., ARROUAYS D., BALESSENT J., SOUSSANA J.-F., BONDEAU A., SMITH, P., ZAEHLE S., DE NOBLET N., VIOVY N., 2007: Moderating the impact of agriculture on climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, **142**, pp. 278-287.
- SEGUIN B., GARCÍA DE CORTÁZAR ATAURI I. 2004: Climate warning: consequences for viticulture and the notion of “terroirs” in Europe. *Acta Horticulturae*. **689**, pp. 61-70.
- SIEGEL S., CASTELLAN N. J., 1988: *Nonparametric Statistics for the Behavioural Sciences*. Mc Graw-Hill, New York, 399 p.
- SOLTNER D., 1995 : *Les bases de la production végétale : phytotechnie générale Tome 2, Le climat : météorologie, pédologie, bioclimatologie*, Sciences et techniques agricoles, Angers, 328 p.
- SOMOT S., 2005 : Régionalisation des scénarios climatiques. *Environnement, risques et santé*, 4, 2, pp. 89-94.
- SOMOT S., SEVAULT F., DÉQUÉ M., CRÉPON M., 2008: 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere-ocean regional climate model. *Global and Planetary Change*, **63**, 2-3, pp. 112-126.
- STEPHENS M. A., 1974: EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons. *Journal of the American Statistical Association*, **69**, pp. 730-737.
- STOCK M., BADECK F., GERSTENGARBE F.W., KARTSCHALL T., WERNER P. C., 2003 : Weinbau und Klima - eine Beziehung wechselseitiger Variabilität. *Terra Nostra*, **6**. Deutsche Klimatagung, pp. 422-426.
- STORCHMANN K., 2007: *Wine and global warming : a long-run simultaneous model*. Economics department, Whitman College, 36 p.
- STURMAN A., TAPPER N., 2005 : *The weather and climate of Australia and New Zealand*. Oxford Editions, 541p.
- TERRAY L., BRACONNOT P., 2007 : *Livre blanc ESCRIME, Étude des simulations climatiques*. 70 p.
- TERRAY L., PAGÉ C., DÉQUÉ M., FLÉCHER C., 2010 : L'évolution du climat en France au travers de quelques indicateurs agroclimatiques. In BRISSON N., LEVRAULT F. : Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. *Livre Vert CLIMATOR*, ADEME, pp. 19-32.
- TONDUT J.L., LAGET F., DELOIRE A., 2006 : Climat et viticulture : évolution des températures sur le département de l'Hérault : un exemple de réchauffement climatique. *Revue Française d'Oenologie*, **219**. 14p.
- TONIETTO J., 1999 : *Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mesoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France : méthodologie de caractérisation*. Montpellier, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 233 p.
- TONIETTO J., CARBONNEAU A., 2004 : A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, **124**, pp. 81-97.
- UNWIN T., 1991: *Wine and the vine. An historical geography of viticulture and the wine trade*. London, 409 p.

VAUDOUR E., 2003 : *Les terroirs viticoles. Définitions, caractérisation et protection*. Paris: Dunod-Lavigne, 294 p.

VIGNERON E., 1997 : *Géographie et statistiques*. Presses universitaires de France, Que sais-je ?, n°3177, Paris, 127 p.

VILLELE O., RIPOCHE D. CHADOEUF J., 1984 : Approche agrométéorologique du risque gélif, application aux gelées de printemps en arboriculture fruitière, in *Actes de séminaires de la Commission d'agrométéorologie de l'INRA « Le gel en agriculture »*, Paris, INRA, pp. 187-201.

WALKO R.L., BAND L.E, BARON J., KITTEL T.G.F., LAMMERS R., LEE T.J., OJIMA D., PIELKE R.A., TAYLOR C., TAGUE C., TREMBACK C.J., VIDALE P.L., 2000: Coupled Atmosphere-Biophysics-Hydrology Models for Environmental Modeling. *Journal of Applied Meteorology*, **39**, pp. 931-944.

WALKO R.L., TREMBACK C.J., 2004: RAMS Regional Atmospheric Modeling System, Version 6.0. *Model input namelist parameters*, pp. 937-953.

WEBB L., WHETTON P., BARLOW E.W., 2008a: Climate change and wine grape quality in Australia. *Climate Research*, **36**, pp. 89-98.

WEBB L., WHETTON P., BARLOW E.W., 2008b: Modeling the relationship between climate, winegrape price, and winegrape quality in Australia. *Climate Research*, **36**, pp. 89-98.

WEBB L.B., WHETTON P.H., BARLOW E.W.R., 2005: Impact on Australian Viticulture from Greenhouse Induced Temperature Change. *Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*, pp. 170-176.

WHITE M.A., DIFFENBAUGH N.S., JONES G.V., PAL J.S., GIORGI F., 2006 : Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century, *Environmental Sciences*, **103**, 30, pp. 11217-11222.

WILLIAMS D., 2001: *Weighing the Odds : a Course in Probability and Statistics*. Cambridge University Press, 548 p.

WINKLER A. J., 1962: *General viticulture*. University of California, 633 p.

WINKLER A.J., COOK J.A., KLIWER W.M., LIDER L.A., 1974 : *General Viticulture*, 2nd ed. University of California Press, California, 710 p.

YAMANE T, JEONG ST, GOTO-YAMAMOTO N, KOSHITA Y, KOBAYASHI S. 2006: Effects of Temperature on Anthocyanin Biosynthesis in Grape Berry Skins. *American Journal of Enology and Viticulture*, **57**, 1, pp. 54-59.

YOSHINO M., 1975: *Climate in small area*. Tokyo University Press, Tokyo, 549 p.

ZAHARIA I., BELTRANDO G., BIGOT S., OSZWALD J., PETRACHE R., 2002 : Pluviométrie extrême, en période chaude, dans le bassin-versant de la Putna (Roumanie) et circulation atmosphérique sur l'Europe Centrale. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **14**, pp. 236-242.

Table des Figures

Figure 1 : Echelles spatiales et temporelles utilisées dans le cadre de cette recherche sur le vignoble champenois.....	3
Figure 2 : Zone d'étude : le Vignoble de la Marne (Adapté du CIVC)	4
Figure 1.1 : Schéma simplifié du bilan énergétique en W/m^2 pour le système climatique dans un contexte de changement climatique (les étapes numérotées ont des références dans le texte).	15
Figure 1.2 : a) Émissions annuelles de GES anthropiques dans le monde, 1970–2004. b) Parts respectives des différents GES anthropiques dans les émissions totales de 2004, en équivalent - CO_2 . c) Contribution des différents secteurs aux émissions totales de GES anthropiques en 2004, en équivalent - CO_2 (Source : GIEC, 2008).....	16
Figure 1.3 : Types de régionalisation : dynamique et statistique (les encadrés avec une bordure en gras sont utilisés dans ce travail de thèse).....	22
Figure 1.4 : Famille des scénarios selon leurs orientations majeures (Source : GIEC, 2007).....	26
Figure 1.5 : Températures moyennes en été sur la période 1961-1990 simulées par le modèle ARPEGE-Climat à gauche et observées à droite (Adapté de Météo-France).	27
Figure 1.6 : Probabilités de températures minimales inférieurs à $-5^{\circ}C$ en hiver, sur le climat actuel à droite, sur le climat futur (A2) à gauche (Adapté de www.imfrefx.mediasfrance.org)	28
Figure 1.7 : Nombre de jours où la température maximale dépasse $35^{\circ}C$ pour la période 1961-1990 à gauche et pour la période 2071-2100 (scénario A2) à droite (Adapté de www.imfrefx.mediasfrance.org)	28
.....	28
Figure 2.1 : Seuils thermiques de la vigne (Adapté et modifié de Madelin (2004) d'après Crespy (1987))	35
Figure 2.2 : Limite septentrionale de la culture de la vigne en Europe (D'après Branas, Bernon et Levadoux, 1946 <i>in</i> Huglin, 1986)	37
Figure 2.3 : Répartition des vignobles à la surface du globe selon les isolignes $10^{\circ}C$ et $20^{\circ}C$ (Source : Unwin, 1991)	39
Figure 2.4 : Calendrier des stades phénologiques (avec leur durée en jaune) pour le vignoble marnais (Adapté de Huglin, 1986).....	40

Figure 2.5 : Les stades repères de la vigne (Source : Baggiolini, 1952).....	40
Figure 2.6 : Mécanismes du refroidissement nocturne à la surface de la Terre en fonction de la situation atmosphérique (adapté de A.V.C., 1991 ; Hufty, 2001 et Quénol, 2002).	47
Figure 2.7 : Différents facteurs intervenant sur le refroidissement nocturne radiatif (Source : Quénol, 2002).	49
Figure 2.8 : Sensibilité du bourgeon de vigne au gel (Adapté de Langellier, communication privée)	50
Figure 2.9 : Relations entre températures moyennes (avril – septembre) et dates de maturité – vendanges du Pinot noir à Beaune et à la Rochepot (Source : Chabin <i>et al.</i> , 2007).....	52
Figure 3.1 : Les grandes régions viticoles du vignoble de la Marne étudiées (Adapté de « Le Terroir », www.champagne.fr)	56
Figure 3.2 : Les expositions du vignoble de la Marne (Adapté de « Le Terroir », www.champagne.fr)	57
Figure 3.3 : Paysage viticole champenois (Cliché : E. Briche, 2008)	58
Figure 3.4 : Les formations lithologiques du vignoble de Champagne (Adapté de « Le Terroir », www.champagne.fr)	59
Figure 3.5 : Répartition des cépages au sein du vignoble de la Marne (Adapté de « Le Terroir », www.champagne.fr)	62
Figure 3.6 : Date des stades phénologiques et des vendanges de 1951 à 2010 (Données : CIVC et Magister).....	64
Figure 3.7 : Évolution des dates de vendanges et des températures moyennes d’avril à septembre de 1951 à 2010 (Données : CIVC et Magister).	65
Figure 3.8 : Nombre de jours entre la date moyenne du débourrement et la date moyenne de début des vendanges, par rapport à la moyenne 1951-2010, en Champagne (Données : CIVC et Magister)	66
Figure 3.9 : Évolution de l’indice de Huglin pour les stations Bouzy Haut, Avize bas, Fort-Chabrol (Epernay) et Reims-Courcy (Données : CIVC et Magister, adapté de Briche, 2007).	67
Figure 3.10 : Evolutions de 1951 à 2010 de la température moyenne annuelle d’avril à septembre et du degré potentiel moyen annuel (Données : CIVC et Magister).....	68
Figure 3.11 : Evolutions de 1951 à 2010 de la température moyenne annuelle d’avril à septembre et de l’acidité totale moyenne annuelle (Données : CIVC et Magister).	69

Figure 3.12 : Évolutions de 1951 à 2010 du degré potentiel moyen annuel et de l'acidité totale moyenne annuelle (Données : CIVC et Magister).....	70
Figure 3.13 : Dommages causés par le gel au printemps 2003 dans le vignoble de la Marne (Madelin et Beltrando, 2005).....	73
Figure 3.14 : Principaux effets du changement climatique sur le cycle phénologique et sur le végétal en Champagne.....	75
Figure 4.1 : Le réseau champenois au complet (Adapté de Madelin, 2004, Source : CIVC).....	80
Figure 4.2 : Station Enerco de Cimel électronique avec des exemples de capteurs disponibles (www.cimel.fr).....	82
Figure 4.3 : Les 23 stations de la Marne (Données : CIVC, Météo-France et IGN).....	84
Figure 4.4 : Liste des facteurs de toutes origines pouvant entraîner une modification de la température mesurée. L'intensité de gris et les cercles concentriques soulignent le caractère additif des différentes causes de variation des températures. (Source : Mitchell et Dettwiller <i>in</i> Choissnel, 2002).....	88
Figure 4.5 : Points de grille du modèle ARPEGE-Climat en maille variable, zoomé sur la Méditerranée.....	91
Figure 4.6 : Localisation du vignoble et des quatre points de grille ARPEGE-Climat (RETIC), (Données : SRTM, IGN, Météo-France <i>in</i> Briche <i>et al.</i> , 2010).....	93
Figure 4.7 : Schématisation des grilles imbriquées de RAMS avec un zoom sur la grille 1 et l'occupation dominante (Données : RAMS, Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).....	97
Figure 4.8 : Schéma récapitulatif des modèles et de leur résolution spatiale.....	99
Figure 5.1 : Triangle des textures de GEPPA (Source : www.sols-de-bretagne.fr).....	103
Figure 5.2 : Triangle des textures de Jamagne <i>et al.</i> , 1977 (Source : www.afidol.org).....	103
Figure 6.1 : Comparaison des températures moyennes annuelles entre des stations implantées sur les coteaux viticoles et Reims-Courcy (Source : Météo-France, CIVC).....	111
Figure 6.2 : Comparaison des températures moyennes annuelles entre l'indice de la Marne et Reims-Courcy (Source : Météo-France, CIVC).....	111
Figure 6.3 : Représentation graphique des lois des extrêmes (Source : Laborde Jean-Pierre, 2009)	117
Figure 6.4 : Ajustement des données de la station de Reims-Courcy au modèle issu de la loi de GEV pour une période de retour de 1 jour pour les extrêmes estivaux (A) et les extrêmes printaniers (B).	118

Figure 6.5 : Schéma récapitulatif de la méthodologie de la thèse.....	123
Figure 7.1 : Température moyenne annuelle de 1950 à 2000 pour le point de grille LMD, le point D et la station Reims-Courcy (Données : IPSL et Météo-France).....	128
Figure 7.2 : Température moyenne annuelle d'avril à septembre de 1950 à 2000 pour la station Reims-Courcy, pour le point de grille LMD et le point D (Données : IPSL et Météo-France).....	129
Figure 7.3 : Distributions statistiques des températures minimales journalières en avril pour Reims-Courcy, les points de grille LMD et D de 1950 à 2000 (Données : CIVC, LMD et Météo-France – CNRM)	131
Figure 7.4 : Distributions statistiques des températures maximales journalières en juin, juillet et août pour Reims-Courcy, les points de grille LMD et D de 1950 à 2000 (Données : CIVC, LMD et Météo-France – CNRM).....	132
Figure 7.5 : Températures moyennes minimales (A) et maximales (B) annuelles sur 2001-2010 pour Reims-Courcy, les trois scénarios simulés pour le point LMD et le point D au centre du vignoble (Données Météo-France – CNRM, IPSL- LMD et CIVC).....	135
Figure 7.6 : Evolution décennale future des extrêmes printaniers (avril) inférieurs ou égaux à -2°C de 2001 à 2100 pour les deux modèles étudiés (point D ARPEGE-Climat et point LMD) et pour les trois scénarios de simulations (Données : Météo-France -CNRM ; IPSL-LMD <i>in</i> Briche <i>et al.</i> , 2010)	137
Figure 7.7 : Évolution décennale future des extrêmes estivaux (J/J/A) supérieurs ou égaux à 35°C de 2001 à 2100 pour les deux modèles étudiés (point D ARPEGE-Climat et point LMD) et pour les trois scénarios de simulations (Données : Météo-France - CNRM ; IPSL – LMD <i>in</i> Briche <i>et al.</i> , 2010).....	139
Figure 8.1 : Températures maximales annuelles pour le point de grille ARPEGE-Climat et la station Reims-Courcy (Données : Météo-France – CNRM, CIVC).....	142
Figure 8.2 : Températures minimales annuelles pour le point de grille ARPEGE-Climat et la station Reims-Courcy (Données : Météo-France – CNRM, CIVC).....	143
Figure 8.3 : Occurrences des températures maximales (A) et minimales (B) moyennes annuelles. Station de Reims- Courcy et point de grille sur la période de contrôle de 1950 à 2000 (Données : CIVC et Météo-France – CNRM <i>in</i> Briche <i>et al.</i> , 2009a).....	144
Figure 8.4 : Distributions statistiques des températures minimales en avril pour la station de référence et les points de grille de 1950 à 2000 (Données : CIVC et Météo-France – CNRM).....	146

Figure 8.5 : Distributions statistiques des températures maximales estivales (moyenne des trois mois : juin, juillet et août) pour la station de référence et le point de grille de 1950 à 2000 (Données : CIVC et Météo-France – CNRM)	147
Figure 8.6 : Calendrier de probabilités des températures chaudes durant le cycle végétatif de la vigne (avril à septembre) entre la station Reims-Courcy et le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) de 1950 à 2000 (Données : CIVC et Météo-France – CNRM <i>in</i> Briche <i>et al.</i> , 2009a)..	148
Figure 8.7 : Distributions statistiques des températures minimales journalières en avril de 1950 à 2000 de la station Reims-Courcy et du point ARPEGE-Climat avant et après correction altitudinale (Données ARPEGE-Climat (RETIC) et CIVC).	149
Figure 8.8 : Distributions statistiques des températures maximales journalières en été de 1950 à 2000 de la station Reims-Courcy et du point ARPEGE-Climat avant et après correction altitudinale (Données ARPEGE-Climat (RETIC) et CIVC).	149
Figure 8.9 : Indice de Winkler de 1950 à 2000 pour la station Reims-Courcy et le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) (Données : Météo-France – CNRM, CIVC).....	151
Figure 8.10 : Cumul moyen des degrés-jours du 1er avril au 31 octobre sur la période 1950-2000 pour la station Reims-Courcy et le point de grille ARPEGE-Climat (RETIC) (Données : Météo-France - CNRM, CIVC).....	151
Figure 8.11 : Comparaison du cumul de degrés-jours de 1950 à 2000 pour le point de grille et la station de Reims-Courcy ; date des stades phénologiques en moyenne (Données : Météo-France – CNRM, CIVC).....	152
Figure 8.12 : Évolution de l'indice de Huglin de 1950 à 2000 pour le point de grille et la station Reims-Courcy (Données : Météo-France – CNRM).....	153
Figure 8.13 : Evolution de l'indice de fraîcheur des nuits de 1950 à 2000 (A) et calculé de mi-août à mi-septembre (B) pour le point de grille et la station Reims-Courcy (Données : Météo-France – CNRM).	154
Figure 9.1 : Indices bioclimatiques de Huglin de 2001 à 2010 pour le point de grille ARPEGE-Climat (RETIC) sur les trois scénarios de simulations futures et pour la station Reims-Courcy sur les données observées (Données : Météo-France – CNRM et CIVC).....	158
Figure 9.2 : Comparaison de l'indice de Huglin pour la station Reims-Courcy et du point de grille au sein du vignoble (à partir des données de la période dite de « contrôle ») de 1971 à 2000 avec les	

simulations futures pour les trois scénarios du point de 2071 à 2100 (Données : Météo-France – CNRM, CIVC).....	159
Figure 9.3 : Comparaison des cumuls de degrés-jours moyennés du 1 ^{er} avril au 31 octobre sur les périodes 2001-2100 et 2071-2100 pour le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) pour les trois scénarios de simulations futures (Données : Météo-France – CNRM).	160
Figure 9.4 : Évolution de l'indice de fraîcheur des nuits de mi-août à mi-septembre sur la périodes 2001-2100 pour le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) pour le scénario de simulation future A2 (Données : Météo-France – CNRM).....	160
Figure 9.5 : Comparaison entre la station Reims-Courcy et le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) pour les températures minimales journalières (A) au printemps (mars-avril) et maximales journalières (B) estivales (juin, juillet et août) pour des périodes de retour d'un jour (Données : Météo-France – CNRM, CIVC).....	162
Figure 9.6 : Moyennes mobiles pondérée sur cinq ans des températures inférieures à -2°C en mars (A) et en avril (B) pour le point de grille sur les trois scénarios de simulation future (Données : Météo-France – CNRM).....	163
Figure 9.7 : Températures gélives extrêmes printanières (mars-avril) obtenues sur la période 2001-2100 à partir d'une loi de GEV pour les trois scénarios de simulations futures avec des périodes de retour de 1 jour (A) et 7 jours (B), (Données : Météo-France – CNRM).....	164
Figure 9.8 : Fréquences des températures estivales supérieures à 35°C et moyenne mobile pondérée sur cinq ans pour le point de grille (Données : Météo-France CNRM).....	165
Figure 9.9 : Fréquences des températures journalières estivales (juin, juillet et août) au-delà de certains seuils et moyennes mobiles sur 10 ans pour le point de grille, sur la période simulée 2001-2100, avec le scénario A1B (Données : Météo-France – CNRM <i>in</i> Briche <i>et al.</i> , 2009).....	167
Figure 9.10 : Fréquences de non-dépassement des températures extrêmes estivales obtenues sur la période 2001-2100 à partir d'une loi de GEV pour les trois scénarios de simulations futures avec des périodes de retour de 1 jour (A) puis 7 jours (B), (Données : Météo-France – CNRM).....	168
Figure 9.11 : Simulation de l'indice de Winkler de 2001 à 2100 pour le point de grille du modèle ARPEGE-Climat (RETIC) pour les trois scénarios de simulations futures (Données : Météo-France – CNRM).....	170
Figure 10.1 : Température minimale moyenne du mois d'avril 2003 de la station Reims-Courcy de 1981 à 2010 (Source : Météo-France et CIVC).....	176

Figure 10.2. : Observations des températures horaires d'avril à septembre 2003 (discrétisation en moyenne et écart-type) pour deux stations du vignoble (Données : CIVC).....	177
Figure 10.3 : Bulletin Hebdomadaire d'Etudes et de Renseignements de Météo-France, du 8 avril 2003 en surface et en altitude, 12H UTC.	179
Figure 10.4 : Vitesse et direction maximales quotidiennes du vent à Reims-Courcy du 4 avril au 11 avril 2003 (Données : CIVC et Météo-France).....	179
Figure 10.5 : Vitesse et direction maximales horaires du vent à Fleury-la-Rivière du 4 au 11 avril 2003 (Données : CIVC).	180
Figure 10.6 : Analyse synoptique du 10 avril (Source : www.wetterzentrale.de).....	181
Figure 10.7 : Minimas horaires thermiques observés le 8 avril (entre 2h et 6h du matin) pour les 23 stations du vignoble marnais (données : CIVC, SRTM, BDCarto©IGN).....	182
Figure 10.8 : Températures horaires observées pour les stations sélectionnées et simulées (en gris la courbe simulée, en noir la courbe observée), par le modèle RAMS sur la période du 4 au 9 avril 2003 avec une résolution à 200 m (Données : RAMS ; Réalisation : E. Briche, 2011).	184
Figure 10.9 : Évolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Avize bas du 4 au 9 avril 2003 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011)..	187
Figure 10.10 : Évolution de la température à 5h du matin du 4 au 9 avril 2003 simulée par le modèle RAMS sur les coteaux viticoles à 200 m de résolution (Données : RAMS, CIVC, BD©IGN ; Réalisation : E. Briche, 2011).....	190
Figure 10.11 : Champ de pressions simulé par le modèle RAMS à 5h du du matin le 8 avril 2003 sur la grille 1 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).....	192
Figure 10.12 : Champ de vitesse et direction du vent simulé par le modèle RAMS à 5h du du matin le 8 avril 2003 sur la grille 1 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).	193
Figure 10.13 : Champ de températures simulé par le modèle RAMS à 5h du du matin le 8 avril 2003 sur la grille 1 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).	194
Figure 10.14. : Refroidissement nocturne de la nuit du 7 au 8 avril 2003 pour les stations de référence en noir et les simulations RAMS en grisée (Réalisation : E. Briche, 2011).	196
Figure 10.15 : Courbes des températures du 7 avril à midi au 8 avril à midi pour trois couples de stations bas de coteau (en noir) et haut de coteau (en gris) (Données : CIVC ; Réalisation : E. Briche, 2011).....	197

Figure 10.16 : Transect longitudinal issu de la simulation RAMS permettant d'observer les températures de l'atmosphère le 8 avril 2003 pour la station de Verzenay (Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011)	198
Figure 10.17 : Champ thermique à 5h du matin le 8 avril 2003 dans le vignoble de Champagne (Données : RAMS, SRTM, CIVC)	199
Figure 10.18 : Zooms réalisés sur le champ thermique du 8 avril à 5h (Données : RAMS, SRTM, CIVC).....	200
Figure 11.1 : A : Température minimale moyenne et B : Température maximale moyenne sur les trois mois d'été de 1981 à 2010 pour la station Reims-Courcy (Données : Météo-France).....	204
Figure 11.2 : Géopotentiels à 500hPa issues des réanalyses NCEP du 8 août 2003 (Source : www.wetterzentrale.de).....	206
Figure 11.3 : Températures en °C sur l'Europe Occidentale à 850 hPa le 8 août 2003 issues des réanalyses NCEP (Source : www.wetterzentrale.de)	206
Figure 11.4 : Températures horaires observées pour les stations sélectionnées et simulées par le modèle RAMS sur la période du 4 au 8 août 2003 avec une résolution à 200 m (en gris la courbe simulée, en noir la courbe observée).....	209
Figure 11.5 : Évolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Avize bas du 4 au 8 août 2003 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011)..	210
Figure 11.6 : Champ de pressions simulé par le modèle RAMS à 15h le 8 août 2003 sur la grille 1 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).....	212
Figure 11.7 : Champs de vitesse et direction du vent simulés par le modèle RAMS à 15h le 8 août 2003 sur la grille 1 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).....	212
Figure 11.8 : Champs de vitesse et direction du vent simulés par le modèle RAMS à 15h le 8 août 2003 sur la grille 1 (Données : RAMS ; Réalisation : S. Cautenet et E. Briche, 2011).....	213
Figure 11.9 : Champs de températures au cours de la journée du 8 août 2003 de 1h à midi puis de 13h à minuit (Données : RAMS ; Réalisation : E. Briche, 2011).....	215
Figure 11.10 : Champs de températures au cours de la journée du 8 août 2003 de 13h à minuit (Données : RAMS ; Réalisation : E. Briche, 2011).....	216
Figure 11.11 : Champ de températures à 15h le 8 août simulé par le modèle RAMS à 200 m de résolution (Données : RAMS et SRTM).....	217

Figure 11.12 : Zoom de la Montagne de Reims réalisé à partir du champ de températures à 15h le 8 août simulé par le modèle RAMS à 200 m de résolution (Données : RAMS, SRTM)	219
Figure 11.13 : Zoom de la Vallée de la Marne et de la Côte des Blancs réalisé à partir du champ de températures à 15h le 8 août simulé par le modèle RAMS à 200 m de résolution (Données : RAMS, SRTM)	220

Table des Tableaux

Tableau II.I : Zonage viticole mondial d'après Winkler (1962), Source : Huglin (1986).....	37
Tableau IV.I : Variables et descriptifs des capteurs	83
Tableau IV.II : Principaux résultats horaires et quotidiens.....	83
Tableau IV.III : Principales causes de ruptures d'homogénéité statistique en fonction de leur intensité sur différents paramètres météorologiques (d'après Heino, 1996).....	89
Tableau IV.IV : Récapitulatif des scénarios de simulations futures utilisés dans le cadre de l'étude (adapté du <i>Rapport Spécial du GIEC, Scénario d'émissions, Résumé à l'intention des décideurs</i> , Nakicenovic et Swart, 2000 ; <i>in</i> Briche <i>et al.</i> , 2009a ; 2010 ; 2011a).....	98
Tableau IX.I : Dispersion par rapport à la moyenne (écart-type) pour la station Reims-Courcy de 1971 à 2000 et pour le point de grille sur les trois scénarios par période de 30 ans des fréquences de températures maximales extrêmes (supérieures à 35°C) estivales (Données : CIVC, Météo-France – CNRM, <i>in</i> Briche <i>et al.</i> , 2011a).....	166
Tableau X.I : Températures minimales moyennes en °C par quinzaine sur le printemps pour la station Reims-Courcy.....	176
Tableau X.II : Refroidissements nocturnes pour la période de simulation du printemps 2003 calculés à partir de la différence entre la température au coucher du soleil la veille (19h) et la température de l'heure la plus froide en moyenne (5h).....	189

Table des Matières

Sommaire.....	a
Première partie : Etat de l'art	9
Chapitre 1 : Du changement climatique à la modélisation numérique	11
1.1 <i>Le changement climatique.....</i>	11
1.1.1 Origine du phénomène et du débat	11
1.1.1.1 Les premières interrogations	11
1.1.1.2 Une prise de conscience concrète ?	12
1.1.1.3 Définitions	12
1.1.2 Effet de serre naturel et effet de serre additionnel	13
1.1.2.1 Mécanisme de l'effet de serre.....	13
1.1.2.2 Les gaz à effet de serre dans l'atmosphère	16
1.2 <i>La modélisation numérique du climat.....</i>	17
1.2.1 La modélisation numérique : des MCG aux modèles régionaux.....	17
1.2.1.1 Définition d'un modèle de circulation générale.....	17
1.2.1.2 Des modèles globaux de circulation générale aux modèles régionaux.....	18
1.2.2 Désagrégation d'échelles, méthodologies et incertitudes	20
1.2.2.1 Les méthodes de désagrégation d'échelles.....	20
1.2.2.2 Les incertitudes des sorties de modèles.....	23
1.2.2.3 Fiabilité de la régionalisation ?	24
1.2.3 Les scénarios climatiques.....	25
1.3 <i>L'évolution possible des températures en France</i>	26
1.3.1 Les températures moyennes : comparaison modèle-observation	27
1.3.2 L'évolution des températures extrêmes.....	28
<i>Conclusion du Chapitre 1.....</i>	29
Chapitre 2 : Impacts du changement climatique sur la viticulture	31
2.1 <i>Evolutions observées à la surface du globe dans les régions viticoles</i>	31
2.1.1 Principaux facteurs explicatifs de répartition spatiale de la vigne	31
2.1.1.1 La latitude : facteur limitant de la culture de la vigne	31
2.1.1.2 La lumière et le photopériodisme	32
2.1.1.3 L'eau : nouvelle inquiétude de la communauté viticole ?	32
2.1.1.4 La vigne tributaire des conditions thermiques	32
2.1.2 Evolution des indices bioclimatiques et du zonage macro-climatique viticole	36
2.1.2.1 Les indices utilisés en agroclimatologie	36
2.1.2.2 Une évolution du zonage viticole observée à partir des indices bioclimatiques.....	38
2.2 <i>Evolution de la phénologie : un cycle végétatif raccourci ?.....</i>	39
2.2.1 Les stades phénologiques.....	39
2.2.2 Un cycle raccourci dans la plupart des vignobles : exemples en France	42
2.2.3 La modélisation agronomique pour anticiper les changements phénologiques	43
2.3 <i>Des facteurs locaux déterminants pour la croissance de la vigne</i>	44
2.3.1 L'exposition en coteaux : gage d'un bon ensoleillement ?.....	44
2.3.2 Couverture du sol et texture du sol.....	44
2.3.2.1 Proximité de lacs ou de forêts.....	44

2.3.2.2 La texture du sol.....	44
2.3.3 Les facteurs d'intensification du refroidissement nocturne et du réchauffement diurne.....	45
2.3.3.1 Le refroidissement nocturne	45
2.3.3.2 Le réchauffement diurne.....	50
2.3.4 Modifications vitivinicoles déjà observées.....	51
2.3.4.1 Des changements de typicité ?.....	51
2.3.4.2 Des changements de qualité du vin ?.....	52
<i>Conclusion du Chapitre 2.....</i>	<i>54</i>
Chapitre 3 : Le changement climatique dans le vignoble champenois	55
3.1 <i>Caractéristiques géographiques et spécificités.....</i>	55
3.1.1 Un vignoble de coteaux	56
3.1.2 Les roches en surface	58
3.1.3 Un climat septentrional océanique de transition	59
3.2 <i>Une Appellation d'Origine Contrôlée renommée.....</i>	60
3.2.1 De la naissance du Champagne.....	60
3.2.2 ...à l'Appellation Champagne.....	60
3.2.2.1 Définition de l'AOC.....	61
3.2.2.2 Les cépages champenois.....	61
3.2.2.3 Les terroirs champenois.....	62
3.3 <i>Premiers constats du changement climatique en Champagne.....</i>	63
3.3.1 Evolution des stades phénologiques et des vendanges	63
3.3.1.1 Précocité des stades phénologiques	63
3.3.1.2 Avancée du ban des vendanges.....	64
3.3.1.3 Raccourcissement de la période débourrement-vendanges.....	65
3.3.2 Evolution de l'indice bioclimatique de Huglin	66
3.3.3 Evolution du taux d'alcool et de l'acidité totale moyens par an.....	68
3.3.3.1 Influence de la température sur le degré d'alcool potentiel.....	68
3.3.3.2 Influence de la température sur l'acidité totale moyenne	68
3.3.3.3 Evolution du degré d'alcool potentiel et de l'acidité	69
3.4 <i>Un vignoble menacé dans le futur ?.....</i>	70
3.4.1 Un vignoble sensible au gel.....	70
3.4.2 Un vignoble sujet à l'aléa gélif et aux vagues de chaleur : l'année 2003, annonciatrice d'un futur probable ?	72
3.4.3 Jeux et enjeux du vignoble de Champagne dans un contexte de changement climatique.....	74
<i>Conclusion du Chapitre 3.....</i>	<i>74</i>
Deuxième partie : Données et méthodes	77
Chapitre 4 : Les données de températures observées et simulées	79
4.1 <i>Données climatiques thermiques du réseau Champagne.....</i>	79
4.1.1 Historique des données thermiques	79
4.1.2 Stations et données	81
4.1.2.1 Le matériel météorologique.....	81
4.1.2.2 Les données thermiques retenues.....	83
4.1.3 Validité et fiabilité des données thermiques	85
4.1.3.1 Traitement et remplacement des données lacunaires	85
4.1.3.2 Détection des ruptures par les tests statistiques d'homogénéité	85
4.1.3.3 L'origine des ruptures	87

4.2 Les trois modèles du climat choisis.....	89
4.2.1 Le modèle du LMD à résolution dite « globale »	89
4.2.1.1 Résolution du modèle LMD	89
4.2.1.2 Données thermiques du LMD.....	90
4.2.1.3 Origine des données LMD	90
4.2.2 Le modèle ARPEGE-Climat (RETIC) à résolution dite « régionale »	90
4.2.2.1 Résolution du modèle ARPEGE-Climat (RETIC)	90
4.2.2.2 Données thermiques du modèle ARPEGE-Climat (RETIC)	91
4.2.2.3 Origine des données ARPEGE-Climat (RETIC)	92
4.2.3 Différences entre les deux modèles français	93
4.2.4 Le modèle RAMS à résolution dite « locale »	94
4.2.4.1 Résolution du modèle RAMS	94
4.2.4.2 Données thermiques du modèle RAMS	95
4.2.4.3 Origine des données RAMS	95
4.3 Les trois scénarios du GIEC retenus.....	98
Conclusion du Chapitre 4.....	98
Chapitre 5 : Les données environnementales et agronomiques.....	101
5.1 Les données environnementales.....	101
5.1.1 Le SRTM et la BD Alti.....	101
5.1.1.1 Le SRTM.....	101
5.1.1.2 La BD Alti de l'IGN.....	101
5.1.2 La BD Carto de l'IGN	102
5.1.3 La base de données RAMS à 200 m	102
5.1.3.1 Les images MODIS	102
5.1.3.2 La texture du sol.....	102
5.2 Données agronomiques	104
5.2.1 Stades phénologiques	104
5.2.2 Données de maturité et dates de vendanges.....	105
5.2.3 Pourcentages des parcelles gelées	105
Conclusion du Chapitre 5.....	105
Chapitre 6 : Approches méthodologiques	107
6.1 La question du temps.....	107
6.1.1 La base de données quotidienne (1950-2000 et 2001-2100)	107
6.1.2 La base de données horaire (2003).....	108
6.1.2.1 Les dates retenues :	108
6.1.2.2 Comparaison de l'évolution des températures simulées et observées au cours de la nuit	109
6.2 Choix des stations suivant la résolution des modèles.....	110
6.2.1 A l'échelle régionale : la station de Reims-Courcy comme représentative du climat de la région viticole de la Marne.....	110
6.2.1.1 Critique de la représentativité de la station Reims-Courcy	110
6.2.1.2 Choix d'un seul point de grille ARPEGE-Climat (RETIC)	112
6.2.2 A l'échelle topoclimatique : les stations du vignoble.....	112
6.3 Les outils statistiques utilisés	112
6.3.1 Statistiques univariées et bivariées.....	112
6.3.1.1 Le coefficient de Bravais-Pearson (R).....	113
6.3.1.2 L'écart-type et le coefficient de variation	113
6.3.1.3 La fréquence.....	113

6.3.1.4 La moyenne mobile	114
6.3.2 Tests statistiques	114
6.3.2.1 Le test de Student	114
6.3.2.2 Le test d'Anderson-Darling.....	114
6.3.2.3 Le test de Kolmogorov-Smirnov.....	115
6.3.3 Statistiques et extrêmes thermiques : lois statistiques des extrêmes	115
6.3.3.1 Définition d'une loi de probabilité	116
6.3.3.2 Etapes de la démarche.....	116
6.3.3.3 Prétraitements réalisés	116
6.4 Les SIG : de la cartographie à la modélisation spatiale	119
6.4.1 La cartographie ponctuelle.....	119
6.4.2 Le modèle conceptuel de données pour obtenir la modélisation des températures.....	119
<i>Conclusion du Chapitre 6.....</i>	<i>121</i>

Troisième partie : Les sorties régionales de modèles du climat : Du climat passé à la prospective climatique et bioclimatique future au sein du vignoble champenois.....125

Chapitre 7 : Comparaison thermique entre les observations et les simulations de 1950 à 2100 pour les modèles numériques LMD et ARPEGE-Climat (RETIC)..... 127

7.1 <i>Comparaison des températures des sorties de modèles du LMD et ARPEGE-Climat (RETIC) avec la station Reims-Courcy.....</i>	<i>127</i>
7.1.1 Comparaison thermique entre les simulations des deux modèles et les observations de la station Reims-Courcy sur les températures moyennes annuelles de 1950 à 2000	128
7.1.2 Comparaison thermique entre les simulations des deux modèles et les observations de la station Reims-Courcy sur les températures moyennes d'avril à septembre de 1950 à 2000.....	129
7.2 <i>Comparaison des sorties thermiques journalières extrêmes entre les sorties de modèles ARPEGE-Climat (RETIC) et LMD avec la station Reims-Courcy.....</i>	<i>130</i>
7.2.1 Des aléas gélifs printaniers redoutés.....	130
7.2.2 Des extrêmes estivaux dommageables peu fréquents	131
7.2.3 Synthèse critique	132
7.3 <i>Prospective sur les températures de 2001 à 2100 pour les deux modèles retenus.....</i>	<i>134</i>
7.3.1 Comparaison modèles / station sur les trois scénarios sur la période 2001-2010	134
7.3.2 Comparaison des simulations futures des extrêmes thermiques journaliers de 2001 à 2100	136
7.3.2.1 Extrêmes froids printaniers probables.....	136
7.3.2.2 Extrêmes chauds estivaux probables	138
<i>Conclusion du Chapitre 7.....</i>	<i>140</i>

Chapitre 8 : Comparaison entre ARPEGE-Climat (RETIC) et la station sur la période de contrôle (1950-2000) : Aspects thermiques et bioclimatiques..... 141

8.1 <i>Validité des températures des sorties de modèles sur la période de contrôle 1950-2000.....</i>	<i>141</i>
8.1.1 Températures moyennes annuelles minimales et maximales	141
8.1.1.1 Les températures maximales moyennes annuelles.....	141
8.1.2 Les températures minimales moyennes annuelles	143
8.1.3 Comparaison des distributions statistiques des températures moyennes maximales et minimales annuelles	143
8.2 <i>Températures optimales et extrêmes (à partir des données mensuelles et/ou journalières).....</i>	<i>145</i>

8.2.1	Températures extrêmes gélives printanières	145
8.2.2	Températures optimales et extrêmes estivales	146
8.3	<i>Discussion sur le biais froid : proposition d'une correction empirique par l'altitude</i>	148
8.4	<i>Comparaison modèle / station à partir d'indices bioclimatiques</i>	150
8.4.1	Observation de l'évolution du cumul des degrés-jours et comparaison de l'indice de Winkler.....	150
8.4.2	Observation et comparaison de l'évolution de l'indice de Huglin sur la période de contrôle 1950-2000 pour la station de référence et le point de grille ARPEGE-Climat (RETIC)	152
8.4.3	Observation et comparaison de l'évolution de l'indice de fraîcheur des nuits sur la période de contrôle 1950-2000 pour la station de référence et le point de grille ARPEGE-Climat (RETIC).....	153
	<i>Conclusion du Chapitre 8</i>	155

Chapitre 9 : Analyse prospective climatique et bioclimatique avec ARPEGE-Climat (RETIC) de 2001 à 2100

9.1	<i>Comparaison entre la station Reims-Courcy et les simulations futures (2001-2100)</i>	157
9.1.1	Températures et indices bioclimatiques sur 2001-2010	157
9.1.1.1	Les températures minimales et maximales de 2001 à 2010.....	157
9.1.1.2	L'indice bioclimatique de Huglin de 2001 à 2010.....	157
9.1.2	Comparaisons 1971-2000 / 2071-2100	158
9.1.2.1	Sur l'indice de Huglin.....	159
9.1.2.2	Sur les cumuls de degrés-jours	159
9.1.2.3	Sur l'indice de fraîcheur des nuits.....	160
9.1.2.4	Sur les extrêmes thermiques défavorables à la vigne pendant son cycle végétatif	161
9.2	<i>Simulations des températures extrêmes futures</i>	162
9.2.1	Observation des températures gélives printanières futures	162
9.2.1.1	Fréquences des températures extrêmes gélives futures.....	163
9.2.1.2	Fréquences de non-dépassement des températures extrêmes gélives futures.....	164
9.2.2	Observation des températures optimales et extrêmes estivales futures.....	164
9.2.2.1	Températures estivales extrêmes de plus en plus fréquentes.....	164
9.2.2.2	Evolution des seuils de températures estivaux optimaux et extrêmes	166
9.2.2.3	Fréquences de non-dépassement des températures estivales journalières extrêmes	167
9.2.3	Année 2003, représentative des températures futures ?	168
9.3	<i>Prospective bioclimatique</i>	169
9.3.1	Simulations de l'indice bioclimatique de Winkler	169
9.3.2	Simulations de l'indice bioclimatique de Huglin.....	170
	<i>Conclusion du Chapitre 9</i>	172
	<i>Conclusion de la Partie 3</i>	172

Quatrième partie : Modélisation spatiale à méso-échelle RAMS en 2003

Chapitre 10 : Observation, validation et simulation de l'aléa gélif printanier

10.1	<i>L'aléa gélif printanier 2003 dans le vignoble marnais</i>	175
10.1.1	La période gélive 2003 au sein d'un temps plus long (1981-2010)	175
10.1.1.1	Observation des températures minimale d'avril	175
10.1.1.2	Observation et comparaison du printemps 2003 par quinzaine	176
10.1.2	L'aléa gélif 2003 en Champagne	177
10.1.2.1	Détermination et isolation de la période gélive printanière	177
10.1.2.2	Les conditions météorologiques des nuits gélives	178
10.1.2.3	La nuit du 8 avril 2003	181
10.2	<i>Comparaison modèle/stations lors de la phase gélive à partir des données horaires</i>	183

10.2.1 Simulations du 4 au 9 avril 2003 entre RAMS et les stations de référence	183
10.2.1.1 Les corrélations linéaires sur les données horaires du 4 au 9 avril 2003	183
10.2.1.2 Tests statistiques sur les distributions des températures horaires sur la période simulée par le modèle du 4 au 9 avril 2003	185
10.2.1.3 Simulation journalière pour chaque date avec les marges d'incertitude issues du modèle RAMS à 200 m de résolution	185
10.2.1.4 Qualité du modèle RAMS sur le refroidissement nocturne	188
10.2.2 Cartographie des champs de températures pour les dates simulées par le modèle RAMS à méso-échelle à 200 m de résolution	189
10.2.2.1 Simulation du 4 au 9 avril 2003	189
10.2.2.2 Etude de cas : la nuit du 7 au 8 avril 2003	191
<i>Conclusion du Chapitre 10</i>	201
Chapitre 11 : Observation, validation et simulation de la canicule estivale	203
11.1 <i>La canicule estivale 2003 dans le vignoble marnais</i>	203
11.1.1 La canicule 2003 au sein d'un temps plus long (1981-2010)	203
11.1.2 La canicule en 2003	204
11.1.2.1 Détermination de la période caniculaire estivale	204
11.1.2.2 Les conditions météorologiques de la canicule estivale 2003	205
11.2 <i>Comparaison modèle/stations lors de la phase caniculaire à partir des données horaires</i>	207
11.2.1 Simulations du 4 au 8 août 2003 entre RAMS et les stations de référence	207
11.2.1.1 Les corrélations linéaires sur les données horaires du 4 au 8 août 2003	207
11.2.1.2 Tests statistiques sur les distributions des températures horaires sur la période simulée par le modèle du 4 au 8 août 2003	207
11.2.1.3 Simulation journalière pour chaque date avec les marges d'incertitude issues du modèle RAMS à 200 m de résolution	208
11.2.1.4 Evaluation des refroidissements nocturnes nécessaires pour la bonne maturité des baies	211
11.2.2 Cartographie des champs de températures pour les dates simulées par le modèle RAMS à méso-échelle à 200 m de résolution	211
11.2.2.1 Les conditions synoptiques simulées par RAMS sur la grille 1	211
11.2.2.1 La journée du 8 août 2003	213
11.2.2.2 Le 8 août à 15h	217
<i>Conclusion du Chapitre 11</i>	218
<i>Conclusion de la Partie 4</i>	221
Bibliographie	229
Table des Figures	245
Table des Tableaux	255
Table des matières	257
Liste des Acronymes	263
Table des Annexes	I

Liste des Acronymes

A.V.C. : Association Viticole Champenoise

AGREMAM : Association de Gestion du REseau Météo Automatisé de la Marne

C.I.V.C. : Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique

CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique

DRIAS : Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements

ESCRIME : Etude des scénarios climatiques réalisés par l'IPSL et du CNRM

G.I.E.C. : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat

GES : Gaz à Effet de Serre

IPSL : Institut Pierre Simon Laplace

LMD : Laboratoire de Météorologie Dynamique, appellation par "LMD" de la composante atmosphérique du modèle couplé dont les données traitées sont issues

MCG : Modèle de Circulation Générale

MCR : Modèle de Circulation Régionale

PCMDI: Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison

RAMS: Regional Atmospheric Modeling System

RETIC : Réseau d'Etudes et de Transfert Interne des Connaissances

SAFRAN : Analyse des variables météorologiques de surface

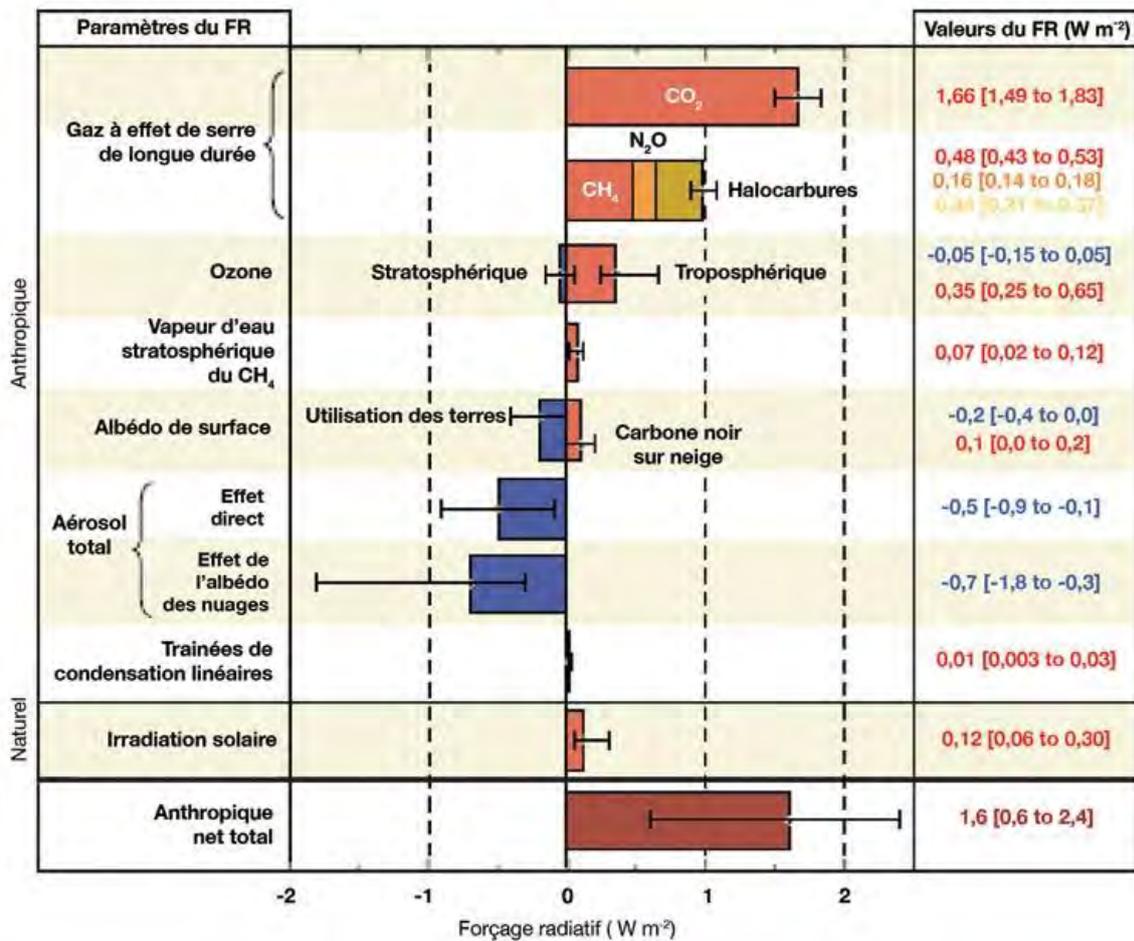
SCRATCH08 : Scénarios désagrégés

Table des Annexes

Annexe I.....	III
Annexe II.....	IV
Annexe III.....	V
Annexe IV.....	VII
Annexe V.....	VIII
Annexe VI.....	IX
Annexe VII.....	XII
Annexe VIII.....	XIII
Annexe IX.....	XIV
Annexe X.....	XV
Annexe XI.....	XVI
Annexe XII.....	XVII
Annexe XIII.....	XVIII
Annexe XIV.....	XXIV

Annexe I

Forçage radiatif moyen à l'échelle du globe (FR) en 2005 (valeurs les plus probables et intervalles d'incertitude de 5 à 95 %) par rapport à 1750 pour le CO₂, le CH₄, le N₂O et d'autres agents et mécanismes



(Source : http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/fr/mains2-2.html)

Annexe II

Tableau des classes de types de climat viticole à partir des indices utilisés dans le Système de Classification Climatique Multicritère (SCCM)

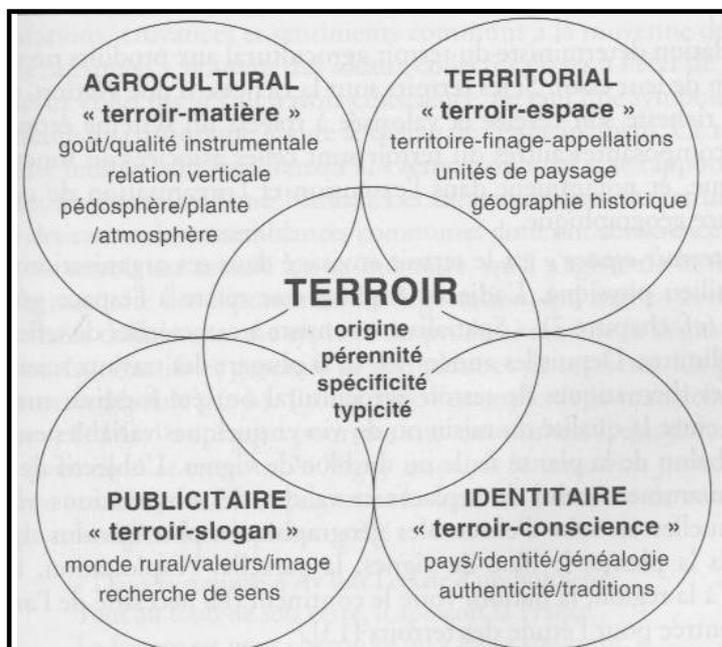
Indices	Classes de climat viticole	Acronyme	Intervalles
Indice héliothermique de Huglin IH (degrés-jours)	Très chaud	+ 3	>3000
	Chaud	+ 2	>2400 ≤ 3000
	Tempéré chaud	+ 1	>2100 ≤ 2400
	Tempéré	- 1	>1800 ≤ 2100
	Froid	- 2	>1500 ≤ 1800
	Très froid	- 3	≤ 1500
Indice de fraîcheur des nuits IFN (°C)	Nuits très fraîches	+ 2	≤ 12
	Nuits fraîches	+ 1	>12 ≤ 14
	Nuits tempérées	- 1	>14 ≤ 18
	Nuits chaudes	- 2	>18
Indice de sécheresse IS (mm)	Très sec	+ 2	≤ - 100
	Modérément sec	+ 1	≤ 50 > - 100
	Sub-humide	- 1	≤ 150 > 50
	Humide	- 2	>150

(Source : Tonietto et Carbonneau, 2004)

Annexe III

E. Vaudour, 2003, *Les terroirs viticoles, définitions, caractérisation et protection*, Editions La Vigne, Dunod, Paris, 293p.

Extraits de : A- Les notions de terroir, 1- Diversité de sens et d'usages, 1-2- Les différentes notions de terroir :



Typologie des notions de terroir

« Il est opportun de proposer une typologie des notions signifiées par le « terroir ». La notion de « terroir » peut-être décomposée en 4 notions types : « terroir-matière », « terroir-espace », « terroir-conscience », « terroir-slogan ». L'origine, la pérennité, la spécificité, la typicité, sont des traits communs à ces notions types, et en principe synonymes de non-reproductibilité (...)

1-2-1 Le terroir agro-cultural

Le « **terroir-matière** », que l'on nommera « agro-cultural » se rapporte à l'aspect technologique et agronomique du terroir. Il désigne l'ensemble des potentialités naturelles du milieu donné pour faire naître une production spécifique (...).

1-2-2 Le terroir territorial

(...) Le « **terroir-espace** » est le terroir envisagé dans ses organisations spatiales au sein du milieu physique (...).

Cependant le « **terroir-espace** » se réfère surtout à des lieux de production peuplés, conquis, exploités au cours d'une longue histoire, inscrits dans des finages (...).

1-2-3 Le terroir identitaire

Le « **terroir-conscience** », ou terroir « identitaire », se réfère aux significations ethnologique, sociologique et culturelle de l'origine, en lien avec la mémoire et la conscience identitaires. Il se rapporte aux méandres de la conscience collective, de ces représentations, croyances et

sentiments communs à la moyenne des membres d'une société, auxquels s'ajoutent des idéaux collectifs érigés à l'état de valeur (...).

1-2-4 Le terroir publicitaire

Le « **terroir-slogan** », ou terroir « publicitaire », terroir évoqué sous la forme de formules brèves et frappantes, apparaît comme un vecteur de communication à forte valeur symbolique. A travers les documents de vulgarisation ou de promotion des vignobles et de leurs produits, la signification du terroir apparaît sous la forme squelettisée du slogan (...). Outre, le repère symbolisant la quête de valeurs du monde rural, le terroir publicitaire place le rêve à la portée du verre de vin défini comme vin de terroir (...) ».

Annexe IV

Récapitulatif des données thermiques des stations de la Marne

Stations	Réseau	Départ des séries manuelles	Mise en service des stations automatiques	Situation	Orientation	Altitude en m
Avize (bas)	Agrenam	01/01/1976	24/07/1992	Bas de coteau	E	108
Avize (haut)	CIVC		19/05/1992	Mi-coteau	E	180
Aÿ-Champagne	CIVC		27/05/1994	Bas de coteau	S	80
Bouzy (bas)	Agrenam		19/05/1992	Bas de coteau	S	125
Bouzy (haut)	Agrenam	01/01/1979	05/04/1993	Mi-coteau	S	155
Chambrecy	Agrenam	01/01/1976	25/01/1993	Bas de coteau	O	125
Châtillon-sur-Marne	Agrenam		16/04/1994	Mi-coteau	S	165
Chouilly (Plumecoq)	CIVC		12/07/1997	Mi-coteau	E	160
Epernay (Fort-Chabrol)	Agrenam	01/01/1961	12/07/1997	Bas de coteau	E	85
Fleury-la-Rivière	CIVC		02/03/1993	Mi-coteau	E	175
Germaine	CIVC		01/10/1996	Bas de coteau	O	175
Mailly-Champagne	Agrenam	01/01/1976	02/06/1993	Mi-coteau	N	150
Nogent-l'Abbesse	CIVC		19/05/1992	Mi-coteau	S	195
Oeuilly	CIVC		01/01/1993	Mi-coteau	N	150
Orbais-l'Abbaye	CIVC		16/10/1994	Bas de coteau	S	160
Reims	Météo-France	01/01/1947	01/01/1989	Plaine	HRZ	95
Sacy	CIVC		14/08/1993	Mi-coteau	N	155
Saint-Thierry	CIVC		15/07/1992	Mi-coteau	S	135
Savigny-sur-Ardre	CIVC		18/06/1992	Mi-coteau	S	125
Sillery	CIVC		15/08/1993	Plaine	HRZ	105
Vert-Toulon	CIVC		19/04/1994	Bas de coteau	E	150
Vertus	CIVC		26/05/1992	Mi-coteau	E	135
Verzenay	CIVC		01/01/1998	Bas de coteau	N	95

Annexe V

Résumé des caractéristiques des modèles du CNRM et de l'IPSL

	<i>CNRM-CM3</i>	<i>IPSL-CM4</i>
Atmosphère: Référence: Résolution horizontale (en ° de latitude et longitude): Nombre de niveaux verticaux:	ARPEGE-Climat v4 [Déqué et al., 1994]. 1,9°x1,9° (T63) 45	LMDZ-4 [Hourdin et al., 2006] 2,5°x3,75° 19
Surface-végétation: référence Résolution horizontale identique à celle de l'atmosphère	ISBA [Mahfouf et al., 1995]	ORCHIDEE [Krinner et al., 2005].
Océan: Référence: Résolution horizontale (en ° de latitude et longitude): Nombre de niveaux verticaux:	OPA [Madec et al., 1998] 2°x2° (avec raffinement près de l'équateur) 31	ORCA [Madec et al., 1998] 2°x2° (avec raffinement près de l'équateur) 31
Glace de mer: référence Résolution horizontale identique à celle de l'océan	GELATO [Salas-Mélia, 2002]	LIM [Fichefet et Maqueda, 1997]

(Source : Dufresne *et al.*, 2006)

Annexe VI

Dynamique et équations des trois modèles utilisés

1) Les équations des modèles : des équations aux dérivées partielles.

Un modèle météorologique ou climatique, quelle que soit son échelle spatiale (modèle local, régional ou global), est essentiellement constitué par un ensemble d'équations. Ces équations décrivent le comportement, dans le temps et dans l'espace, des variables atmosphériques. Ces variables sont principalement la vitesse du vent, la température, l'humidité de l'air, la pression, etc.

Ces variables sont des inconnues dont il faut résoudre les équations. Ces équations sont presque toutes des équations différentielles, qui dépendent des coordonnées d'espace, mais aussi du temps. La forme typique d'une équation différentielle est :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = F(X)$$

Où :

- X est l'une de ces inconnues. *Par exemple, X est la vitesse. Le terme F(X) au second membre représente toutes les forces qui peuvent influencer sur la vitesse (le frottement sur la surface, la turbulence, la pression, l'apport de chaleur par le courant de fluide, ...etc....).*
- le symbole $\frac{\partial X}{\partial t}$ représente ce que l'on appelle la « **dérivée partielle** » de X par rapport au temps, c'est-à-dire sa tendance locale. On considère ce calcul en un point donné fixe, un point qui ne bouge pas dans l'espace (par exemple une station météo).

On dit que ces équations sont « prédictives » ou « pronostiques », car elles contiennent un terme situé dans le futur ($X(t+\Delta t)$). $\frac{\partial X}{\partial t}$ est la dérivée partielle de X par **rapport au temps**, mais il y a aussi, dans ces équations, des dérivées partielles par **rapport à l'espace** : par exemple, par rapport à la coordonnée verticale que l'on appellera z.

L'espace est rapporté à un repère fixe, dont l'origine est au sol. Il s'agit d'un repère comportant trois axes perpendiculaires. L'origine du repère est appelée O (par exemple, le centre de la grille principale de RAMS). De là, on a les axes Ox (ouest-est, par ex) et Oy (sud-nord, par ex). Le 3^e axe : Oz, c'est la verticale locale, orientée du bas vers le haut.

2) Représentation eulérienne et représentation lagrangienne.

Représentation eulérienne de l'atmosphère

On dit que l'on utilise une représentation **eulérienne** des phénomènes lorsque chaque variable (vitesse, ou toute autre grandeur) est définie en un point de coordonnées (x,y,z) de l'espace et à chaque instant t.

Les champs de vitesse, de température, etc sont définis en chaque point de ce système d'axes et à chaque instant. Cette représentation eulérienne a été introduite en mécanique des fluides.

Représentation lagrangienne de l'atmosphère

Il existe une autre représentation, dite **lagrangienne**. Cette représentation est plutôt utilisée dans la mécanique des solides qui s'intéresse à la trajectoire d'objets bien isolés or l'air est un fluide par exemple. Les mécaniciens des fluides utilisent un peu cette représentation lagrangienne le temps pour eux d'établir leurs équations du mouvement des fluides : ils matérialisent (fictivement) l'isolation d'une certaine particule de fluide (par exemple quelques cm^3 , ou quelques m^3) en utilisant l'équation fondamentale de la dynamique (due à Newton) : pour tout corps donné (solide, liquide ou gazeux), la somme des forces appliquées à ce corps est égale au produit de la masse du corps par son accélération. Pour un fluide, les forces appliquées sont les forces de pression, les frottements des particules les unes sur les autres (viscosité) ou avec les parois (ou la surface du sol...), le poids. Ils raisonnent sur un très court intervalle de temps et d'espace, et cela leur permet de trouver les équations différentielles du mouvement des fluides. Très précisément, cette étape ne sert qu'à mettre en place les équations puis tout est traduit en représentation eulérienne. Leurs équations, dont les inconnues sont la vitesse, la pression, etc utilisent le repère eulérien.

3) Discrétisation des équations

Les équations de l'atmosphère sont en gros toujours les mêmes, quel que soit le modèle. Plus précisément, un type de modèle donné, par exemple des modèles à méso-échelles tels que RAMS ou MesoNH utilisent à peu près le même ensemble d'équations.

Chaque modèle, cependant, peut avoir ses particularités, qui tiennent notamment à la façon de résoudre les équations. La difficulté de ces modèles est qu'on ne sait pas résoudre analytiquement une équation aux dérivées partielles, sauf cas particuliers ultra simplifiés. Pour des équations du troisième degré et au-dessus, il n'y a plus de solution analytique en général. La résolution est possible par le calcul numérique...

Les équations sont donc résolues **numériquement**, en **discrétisant** les variables :

- On découpe les 3 axes Ox , Oy et Oz en intervalles plus ou moins grands (petits pour un maximum de précisions). *Par exemple, la grille fine de RAMS est découpée en segments $\Delta x = \Delta y = 200\text{m}$, et la verticale Oz est découpée aussi, mais en général on fait de petits intervalles près du sol ($\Delta z = 30\text{m}$, par exemple), et ça augmente quand on prend de l'altitude.*
- On dit que l'on a **discrétisé** l'espace (et le temps). *Une représentation continue du champ de vitesse, par exemple, supposerait que l'on puisse connaître la vitesse au point M , et aussi en un point infiniment voisin M' . En réalité, la vitesse est connue en des points situés sur les sommets de petits parallélépipèdes de côtés (Δx , Δy et Δz), et aux instants t , $t+\Delta t$, $t+2\Delta t$, etc.*

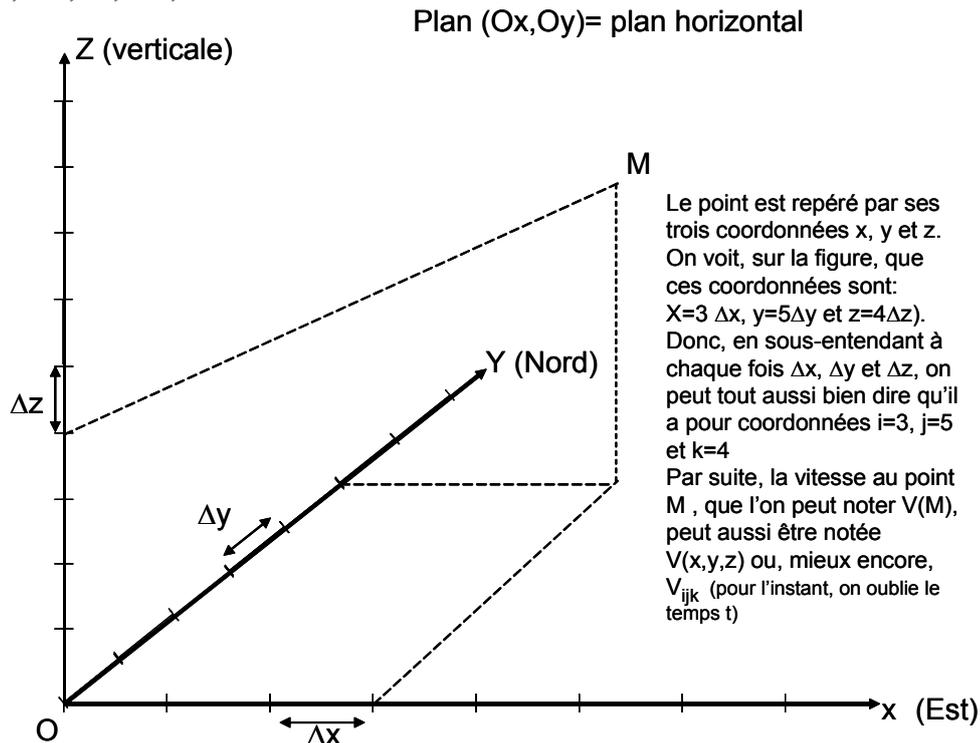
4) Les schémas explicites et les schémas implicites.

On dit que l'on a un schéma explicite il n'y pas plus d'une inconnue dans l'équation discrétisée et de méthode implicite dès lors que, dans l'expression discrétisée, il y a plus d'une inconnue ce qui nécessite plus de temps de calcul mais le résultat est plus précis.

Il existe différentes méthodes pour discrétiser les équations : des **méthodes explicites** et des **méthodes implicites**.

Chaque point M de l'espace est représenté par un jeu de trois coordonnées (Figure 1) : x , y et z , mais plus précisément par 3 nombres entiers i , j et k . A l'origine O , on a $i = j = k = 0$. Tout point $M(x,y,z)$ sera donc noté $M(i,j,k)$. Toute variable X en ce point (la vitesse, par exemple) pourra être notée X_{ijk} . (i , j et k sont « en indice »). Comme de plus la variable dépend du temps t et que le temps est découpé en intervalles Δt , le temps s'écoule par sauts :

$t = 0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, n\Delta t, \text{ etc.}$



L'axe des x correspond à l'indice i , celui des y à l'indice j , et l'axe des z à l'indice k .

Figure 1 : Discrétisation de l'espace (3 dimensions).

5) Les modèles ARPEGE-Climat (RETIC) et LMD

Le modèle ARPEGE-Climat : une dynamique semi-implicite semi-lagrangienne

Cela signifie que toutes les équations ne seront pas traitées avec le même schéma. Celles qui sont liées à des phénomènes se propageant lentement seront traitées avec le schéma explicite. Par contre, certains types de schémas implicites sont inconditionnellement stables et seront mis en jeu pour traiter les équations décrivant les phénomènes rapides. Cela peut faire gagner du temps de calcul afin d'éviter l'instabilité de calcul du modèle eulérien.

Un intérêt de ces schémas lagrangiens est que le pas de temps peut être plus long que dans les schémas eulériens, d'où un gain de temps...

Certaines variables sont donc traitées de façon eulérienne, d'autres par schémas lagrangiens. D'où le nom de semi-lagrangien.

Le Modèle LMD : une dynamique eulérienne explicite

Le modèle LMD utilise un schéma eulérien explicite appelé *leapfrog* car il utilise un double pas de temps.

(Source : Communication privée avec Guy Cautenet)

Annexe VII

Classes de texture de Rams

Numérotation Rams	Type de texture Rams (USDA)	Nomenclature française à partir de Geppa et Jamagne		Champagne	Val de Loire	Pourcentage fractions Val de Loire		
						argile	limon	sable
1	sand	S	sable			5	20	75
2	loamy sand	SL	sable limoneux			10	25	65
3	sandy loam	LS	limon sableux			15	40	45
4	silt loam	LF ou LL	limon fin					
5	loam	L	limon					
6	sandy clay loam	Lsa	loam sablo-argileux, limon sablo-argileux			22	33	45
7	silty clay loam	LAS	loam limono-argileux, limon argilo-sableux			25	50	25
8	clay loam	LA	limon argileux			25	65	10
9	sandy clay	AS	argile sableuse			35	10	55
10	silty clay	AL	argile limoneuse			40	50	10
11	clay	A	argile			40	30	30
12	peat	tourbe	tourbe					
13	heavy clay	Ala	argile lourde			55	30	15
14	sandy silt clay	Als	argile limono-sableuse					
15	sand clay	SA	sable argileux			20	15	65
16	medium sandy loam	LMS	limon moyen sableux			15	60	25

En gras, les 12 types de texture de sol RAMS,

En grisé, les types de texture présents en Champagne et/ou Val de Loire

Annexe VIII

Table de Bravais-Pearson

**Table des valeurs critiques du r de Bravais-Pearson
(Probabilités bilatérales)**

ddl	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,001	0,0001	0,00001
1	0,9512	0,9878	0,9971	0,9997	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2	0,8002	0,9002	0,9502	0,9802	0,9902	0,9992	1,0000	1,0000
3	0,6872	0,8055	0,8785	0,9345	0,9589	0,9913	0,9982	0,9997
4	0,6085	0,7294	0,8116	0,8823	0,9173	0,9742	0,9920	0,9976
5	0,5510	0,6696	0,7546	0,8330	0,8747	0,9510	0,9807	0,9924
6	0,5069	0,6216	0,7069	0,7889	0,8345	0,9251	0,9657	0,9842
7	0,4717	0,5824	0,6665	0,7499	0,7978	0,8984	0,9482	0,9734
8	0,4429	0,5495	0,6320	0,7156	0,7647	0,8723	0,9295	0,9608
9	0,4188	0,5216	0,6022	0,6852	0,7349	0,8472	0,9104	0,9470
10	0,3982	0,4974	0,5761	0,6582	0,7080	0,8235	0,8913	0,9324
11	0,3804	0,4763	0,5531	0,6340	0,6837	0,8011	0,8726	0,9176
12	0,3647	0,4577	0,5326	0,6122	0,6615	0,7801	0,8545	0,9027
13	0,3508	0,4410	0,5141	0,5924	0,6413	0,7605	0,8370	0,8879
14	0,3384	0,4261	0,4975	0,5744	0,6227	0,7421	0,8203	0,8734
15	0,3273	0,4125	0,4823	0,5579	0,6057	0,7248	0,8043	0,8593
16	0,3171	0,4002	0,4684	0,5427	0,5899	0,7086	0,7890	0,8455
17	0,3079	0,3889	0,4557	0,5287	0,5752	0,6933	0,7744	0,8322
18	0,2994	0,3785	0,4439	0,5157	0,5616	0,6789	0,7604	0,8193
19	0,2915	0,3689	0,4330	0,5035	0,5489	0,6654	0,7471	0,8068
20	0,2843	0,3600	0,4229	0,4922	0,5369	0,6525	0,7344	0,7948
21	0,2776	0,3517	0,4134	0,4817	0,5258	0,6404	0,7223	0,7832
22	0,2713	0,3439	0,4045	0,4717	0,5153	0,6289	0,7107	0,7720
23	0,2654	0,3367	0,3962	0,4624	0,5053	0,6179	0,6996	0,7612
24	0,2599	0,3299	0,3884	0,4536	0,4960	0,6075	0,6889	0,7508
25	0,2547	0,3234	0,3810	0,4452	0,4871	0,5976	0,6787	0,7408
26	0,2499	0,3174	0,3740	0,4373	0,4787	0,5881	0,6689	0,7311
27	0,2453	0,3116	0,3674	0,4298	0,4707	0,5791	0,6596	0,7217
28	0,2409	0,3062	0,3612	0,4227	0,4630	0,5705	0,6505	0,7127
29	0,2368	0,3010	0,3552	0,4159	0,4558	0,5622	0,6418	0,7040
30	0,2328	0,2961	0,3495	0,4095	0,4488	0,5543	0,6335	0,6955
31	0,2291	0,2915	0,3441	0,4033	0,4422	0,5467	0,6254	0,6874
32	0,2255	0,2870	0,3389	0,3974	0,4359	0,5394	0,6177	0,6795
33	0,2221	0,2827	0,3340	0,3917	0,4298	0,5323	0,6102	0,6718
34	0,2189	0,2787	0,3293	0,3863	0,4240	0,5256	0,6029	0,6644
35	0,2157	0,2748	0,3247	0,3811	0,4184	0,5190	0,5960	0,6572
36	0,2128	0,2710	0,3204	0,3761	0,4130	0,5128	0,5892	0,6502
37	0,2099	0,2674	0,3162	0,3713	0,4078	0,5067	0,5827	0,6435
38	0,2071	0,2640	0,3122	0,3667	0,4028	0,5009	0,5763	0,6369
39	0,2045	0,2606	0,3083	0,3622	0,3980	0,4952	0,5702	0,6306
40	0,2019	0,2574	0,3045	0,3579	0,3933	0,4897	0,5642	0,6244
50	0,1808	0,2308	0,2734	0,3219	0,3543	0,4434	0,5134	0,5708
60	0,1651	0,2110	0,2502	0,2950	0,3250	0,4080	0,4740	0,5289
70	0,1530	0,1955	0,2320	0,2738	0,3019	0,3799	0,4425	0,4949
80	0,1431	0,1831	0,2173	0,2567	0,2831	0,3570	0,4165	0,4666
90	0,1350	0,1727	0,2051	0,2424	0,2674	0,3377	0,3946	0,4427
100	0,1281	0,1639	0,1948	0,2302	0,2541	0,3212	0,3758	0,4221
200	0,0907	0,1162	0,1382	0,1637	0,1810	0,2300	0,2705	0,3054
300	0,0741	0,0950	0,1130	0,1340	0,1482	0,1886	0,2222	0,2513
400	0,0642	0,0823	0,0980	0,1161	0,1285	0,1637	0,1930	0,2185
500	0,0574	0,0736	0,0877	0,1040	0,1150	0,1466	0,1729	0,1959
1000	0,0407	0,0521	0,0621	0,0736	0,0815	0,1040	0,1227	0,1392

Annexe IX

Table de Student

valeur limite de t en fonction des degrés de liberté (en ligne) et du seuil de probabilité (en colonne)

ddl	p								
	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025	0,01	0,001
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	25,452	63,657	636,619
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,205	9,925	31,599
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,177	5,841	12,924
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,495	4,604	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,163	4,032	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	2,969	3,707	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,841	3,499	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,752	3,355	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,685	3,250	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,634	3,169	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,593	3,106	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,560	3,055	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,533	3,012	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,510	2,977	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,490	2,947	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,473	2,921	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,458	2,898	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,445	2,878	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,433	2,861	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,423	2,845	3,850
21	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,414	2,831	3,819
22	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,405	2,819	3,792
23	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,398	2,807	3,768
24	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,391	2,797	3,745
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,385	2,787	3,725
26	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,379	2,779	3,707
27	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,373	2,771	3,690
28	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,368	2,763	3,674
29	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,364	2,756	3,659
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,360	2,750	3,646
31	0,682	0,853	1,054	1,309	1,696	2,040	2,356	2,744	3,633
40	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,329	2,704	3,551
50	0,679	0,849	1,047	1,299	1,676	2,009	2,311	2,678	3,496
60	0,679	0,848	1,045	1,296	1,671	2,000	2,299	2,660	3,460
70	0,678	0,847	1,044	1,294	1,667	1,994	2,291	2,648	3,435
80	0,678	0,846	1,043	1,292	1,664	1,990	2,284	2,639	3,416
90	0,677	0,846	1,042	1,291	1,662	1,987	2,280	2,632	3,402
100	0,677	0,845	1,042	1,290	1,660	1,984	2,276	2,626	3,390
120	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,270	2,617	3,373
200	0,676	0,843	1,039	1,286	1,653	1,972	2,258	2,601	3,340
500	0,675	0,842	1,038	1,283	1,648	1,965	2,248	2,586	3,310
1000	0,675	0,842	1,037	1,282	1,646	1,962	2,245	2,581	3,300
2000	0,675	0,842	1,037	1,282	1,646	1,961	2,243	2,578	3,295

Annexe X

Méthode des moments pondérés

« On estime tout d'abord les trois premiers moments pondérés b_0 , b_1 et b_2 :

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad b_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{i-1}{n-1} x_i \quad \text{et} \quad b_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(i-1)(i-2)}{(n-1)(n-2)} x_i$$

(n étant la taille de l'échantillon et i le rang dans l'échantillon classé par ordre croissant)

On peut montrer que ces trois premiers moments pondérés b_0 , b_1 et b_2 , sont liés au trois paramètres x_0 , s et k par les relations :

$$\frac{3b_2 - b_0}{2b_1 - b_0} = \frac{1-3^{-k}}{1-2^{-k}}, \quad b_0 = x_0 + \frac{s}{k} [1 - \Gamma(1+k)] \quad \text{et} \quad 2b_1 - b_0 = \frac{s}{k} \Gamma(1+k)(1-2^{-k})$$

La première équation ne contient qu'une seule inconnue, le terme k , et on peut la résoudre par itérations successives. Dans le cas générale où $-0.5 < k < 0.5$ on peut évaluer k explicitement par la relation : on va estimer k

$$k = 7.8590c + 2.9554c^2 \quad \text{avec} \quad c = \frac{2b_1 - b_0}{3b_2 - b_0} - \frac{\ln(2)}{\ln(3)}$$

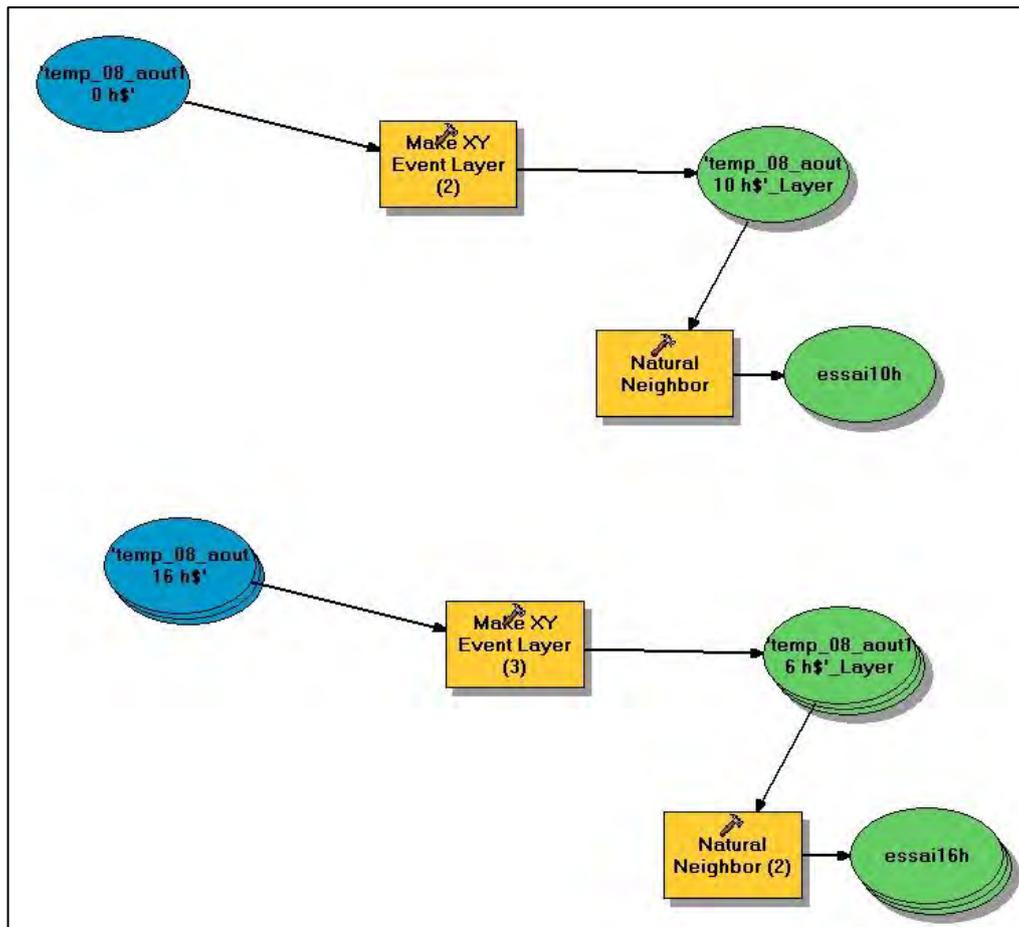
On en déduit immédiatement les valeurs de s et x_0 par :

$$s = \frac{(2b_1 - b_0)k}{(1-2^{-k}) \Gamma(1+k)} \quad \text{et} \quad x_0 = b_0 + s \frac{\Gamma(1+k) - 1}{k} \quad \gg$$

(Source : Laborde, communication privée)

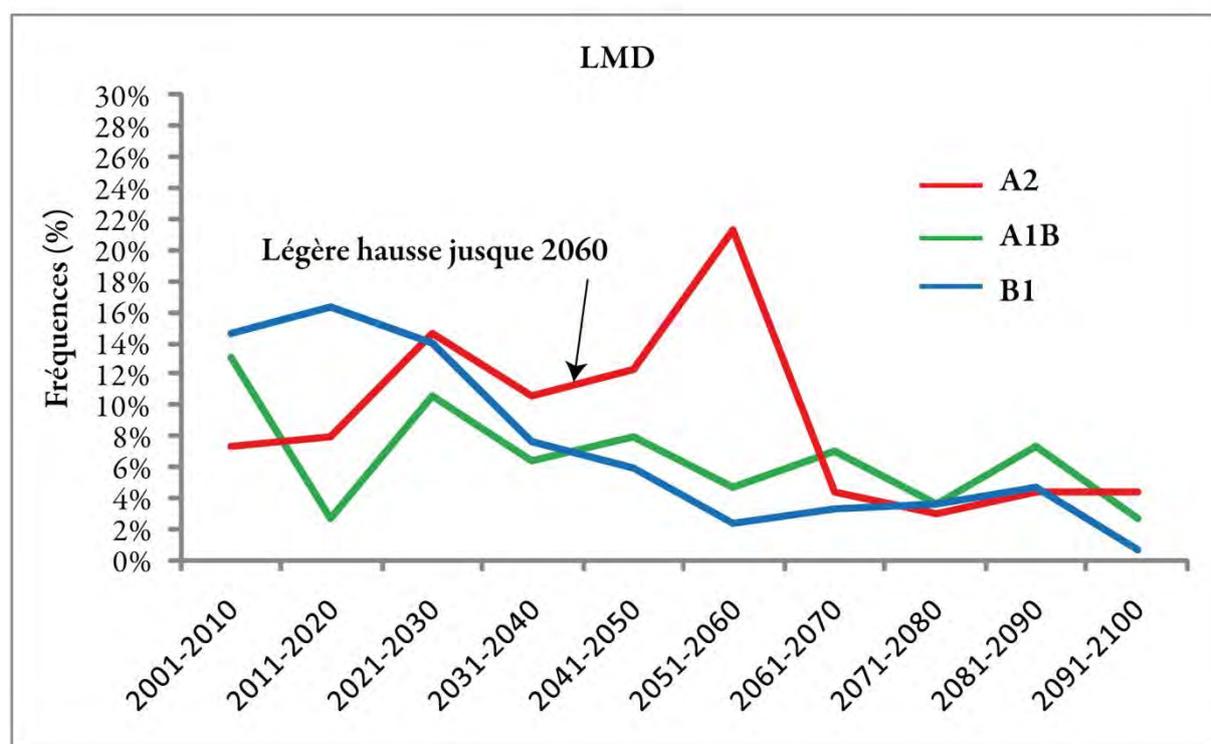
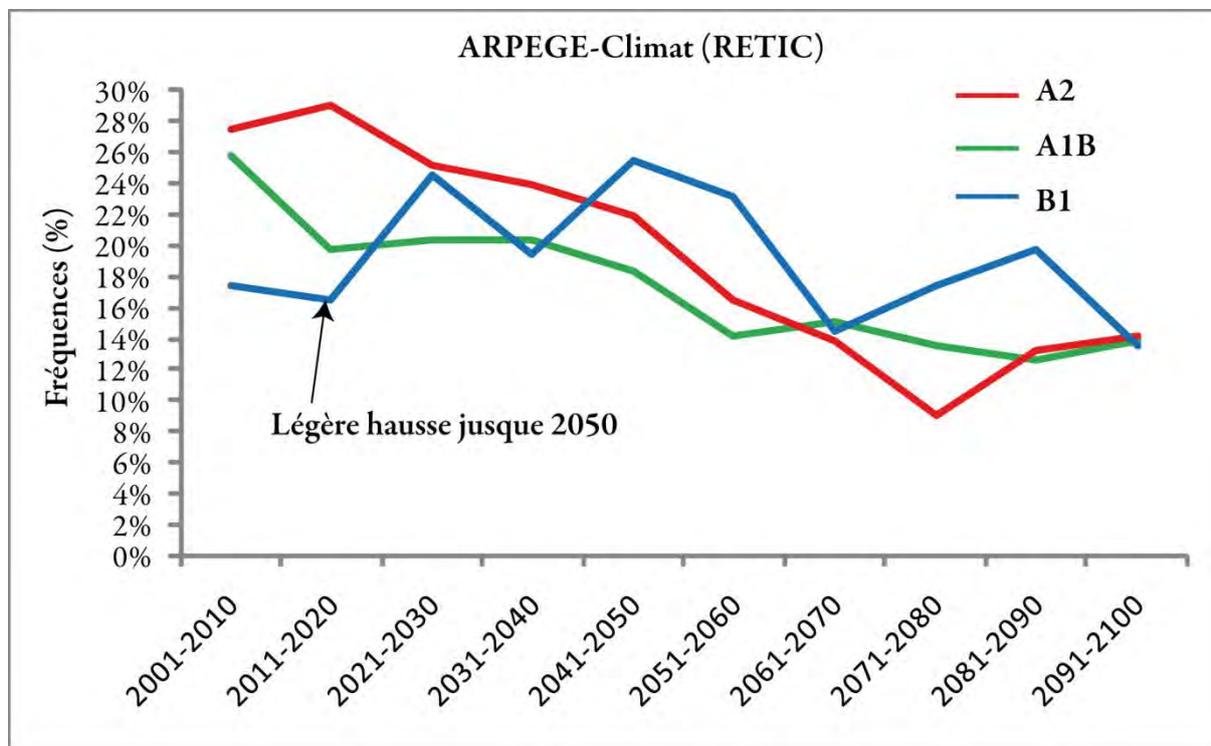
Annexe XI

Modèle conceptuel sous Arcgis en vue d'une automatisation



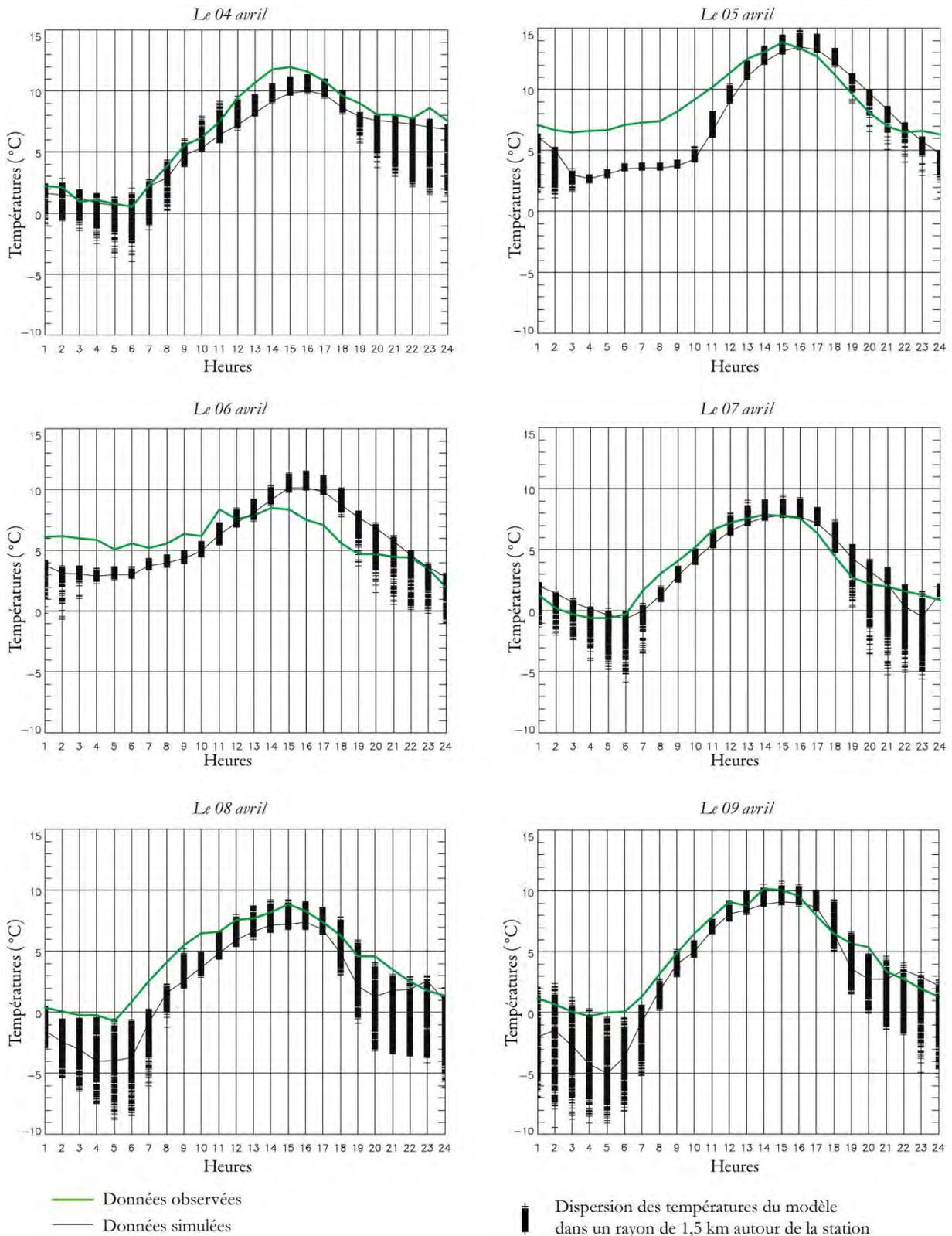
Annexe XII

Evolution décennale future des extrêmes printaniers (mars) inférieurs ou égaux à -2°C de 2001 à 2100 pour les deux modèles étudiés (point D ARPEGE-Climat et point LMD) et pour les trois scénarios de simulations (Données : Météo-France -CNRM ; IPSL-LMD)

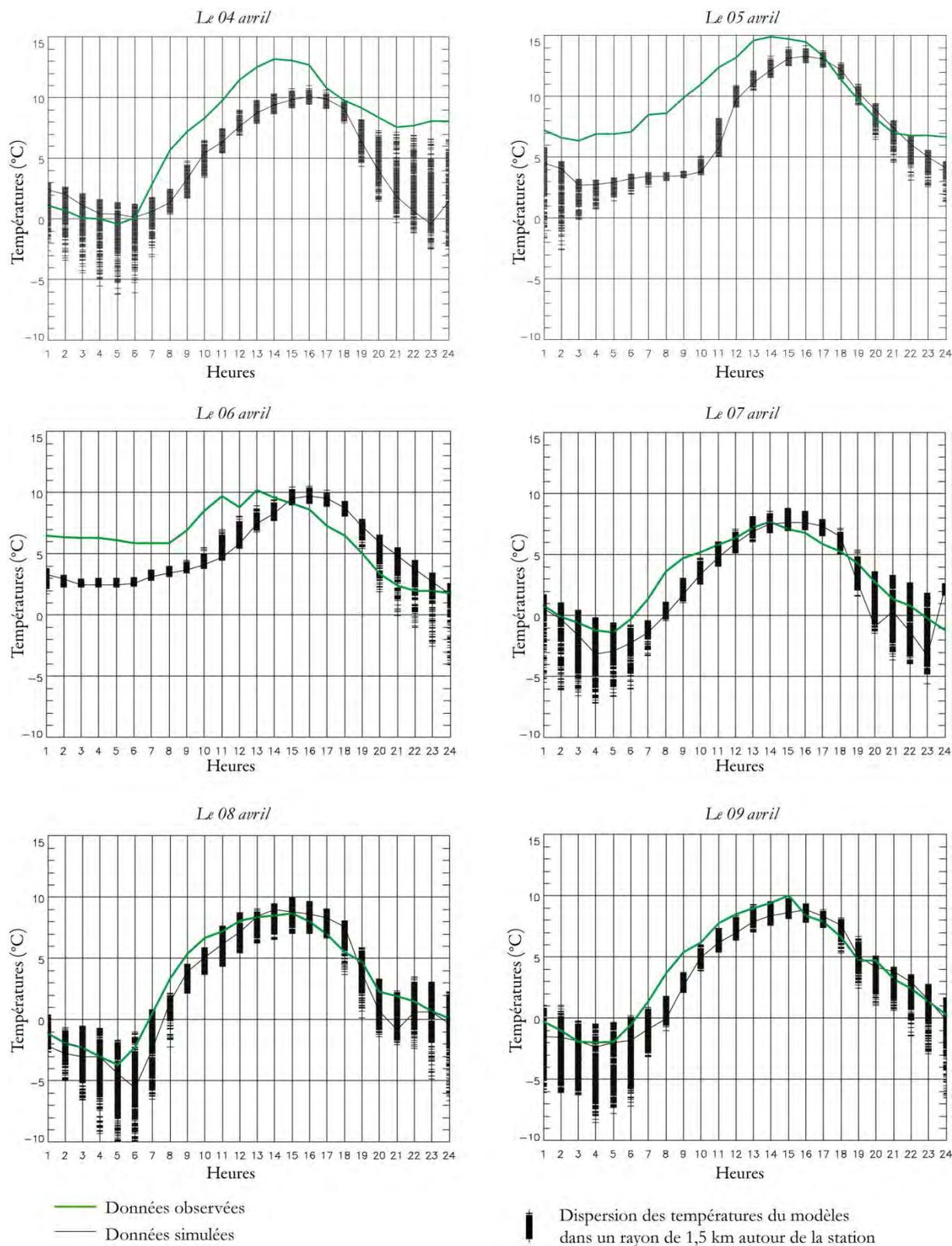


Annexe XIII

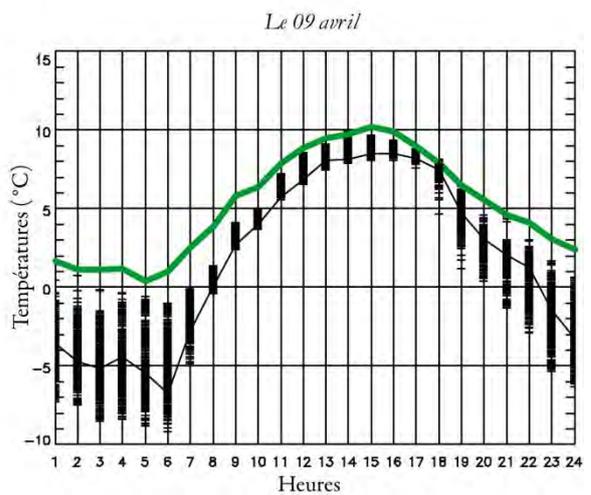
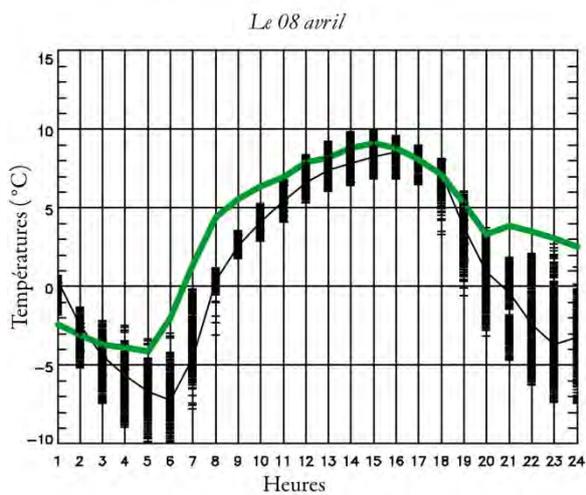
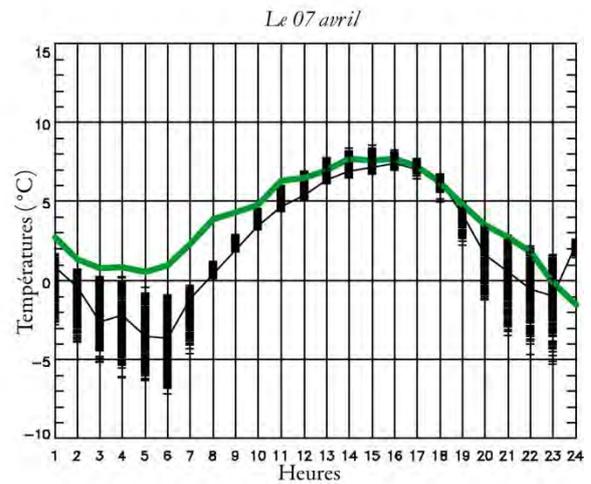
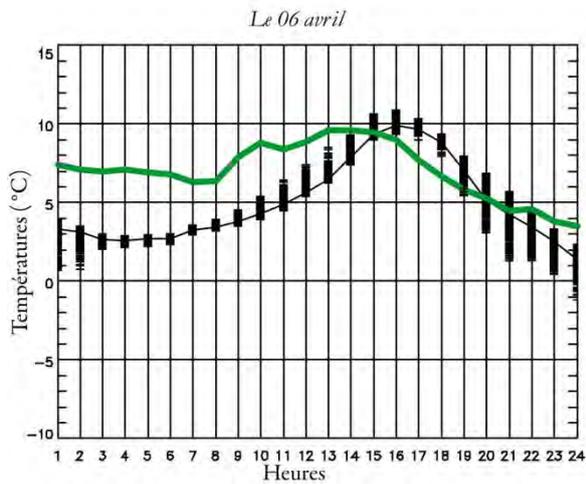
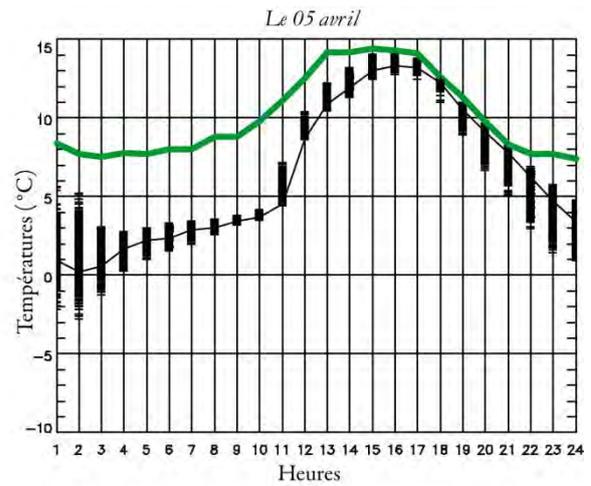
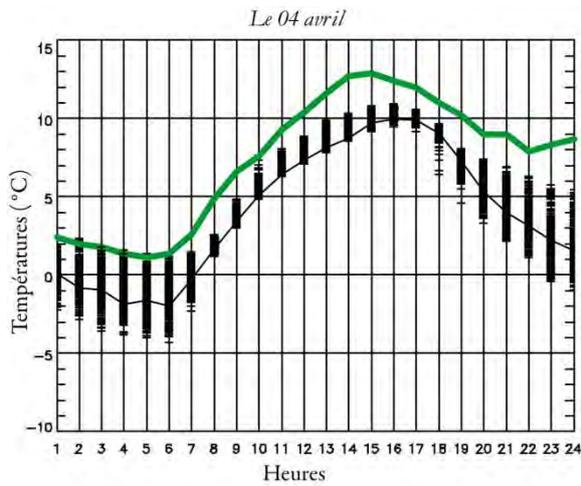
Evolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Bouzy haut du 4 au 9 avril 2003 (Données : RAMS).



Evolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Châtillon du 4 au 9 avril 2003 (Données : RAMS).



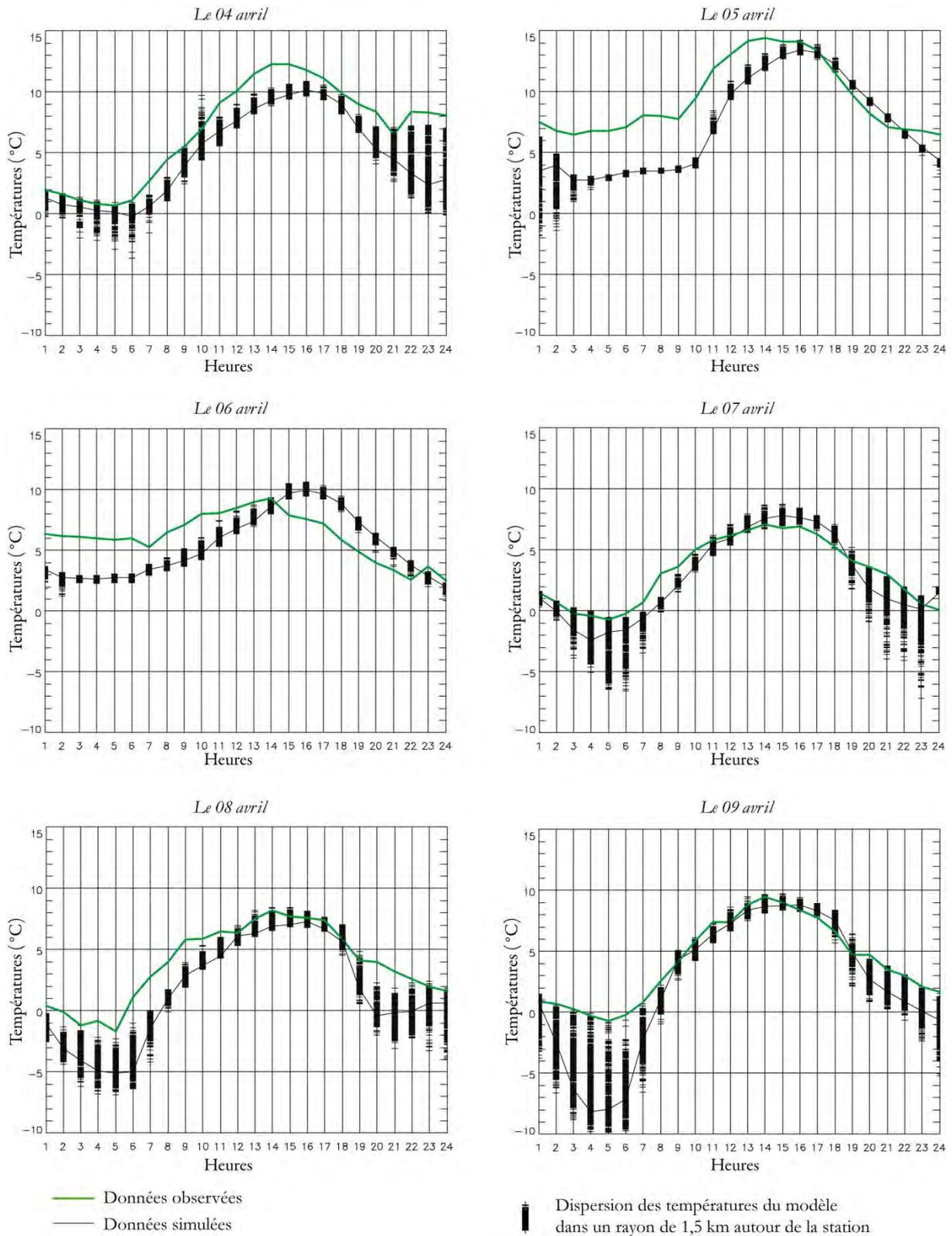
Evolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Epernay du 4 au 9 avril 2003 (Données : RAMS).



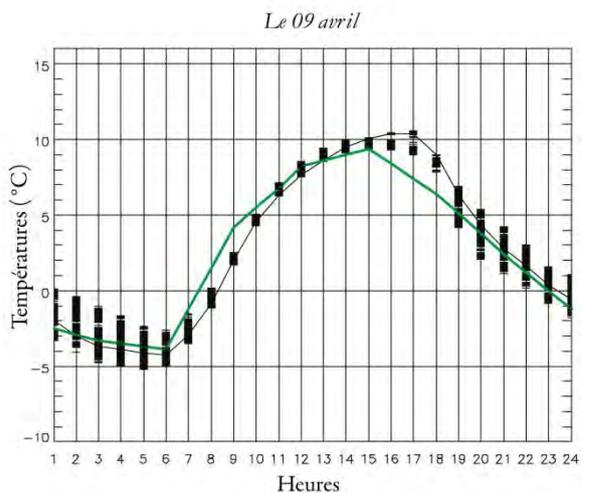
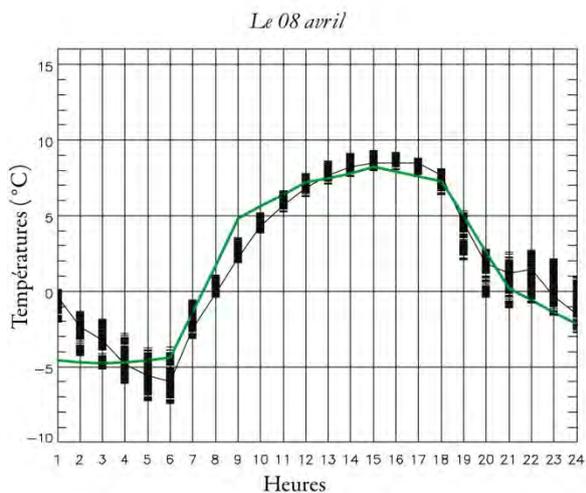
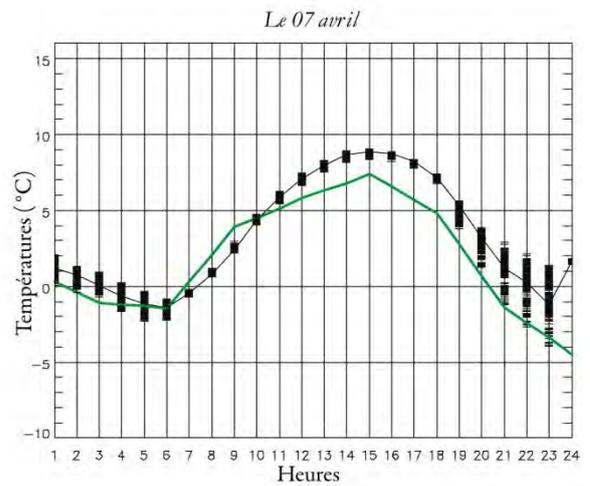
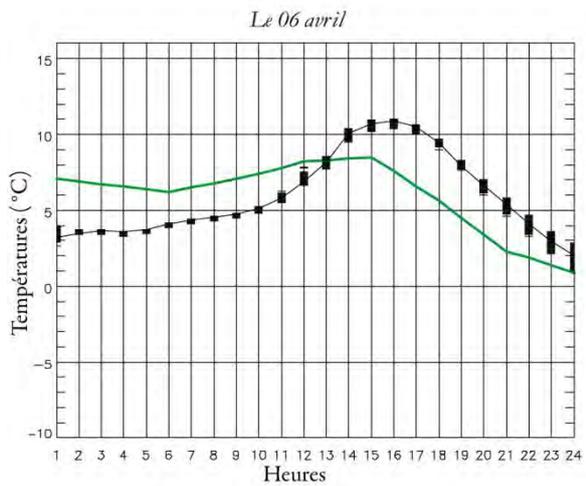
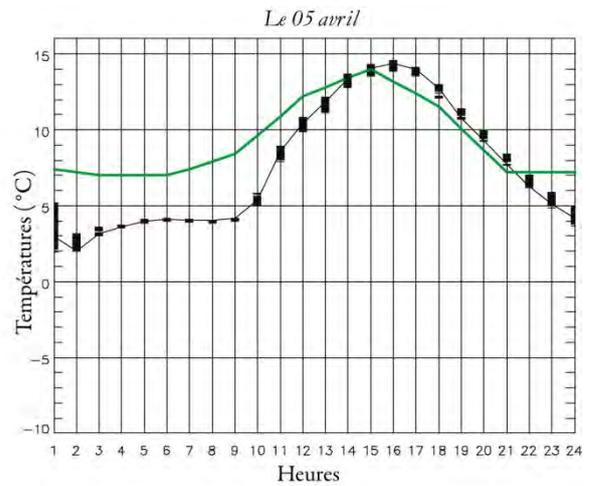
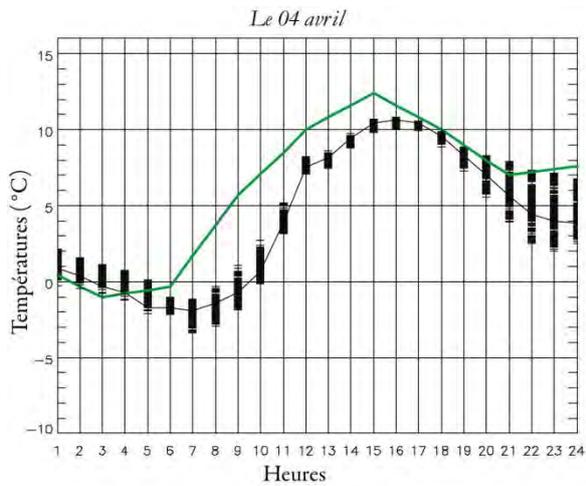
— Données observées
— Données simulées

■ Dispersion des températures du modèle
dans un rayon de 1,5 km autour de la station

Evolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Fleury du 4 au 9 avril 2003 (Données : RAMS).



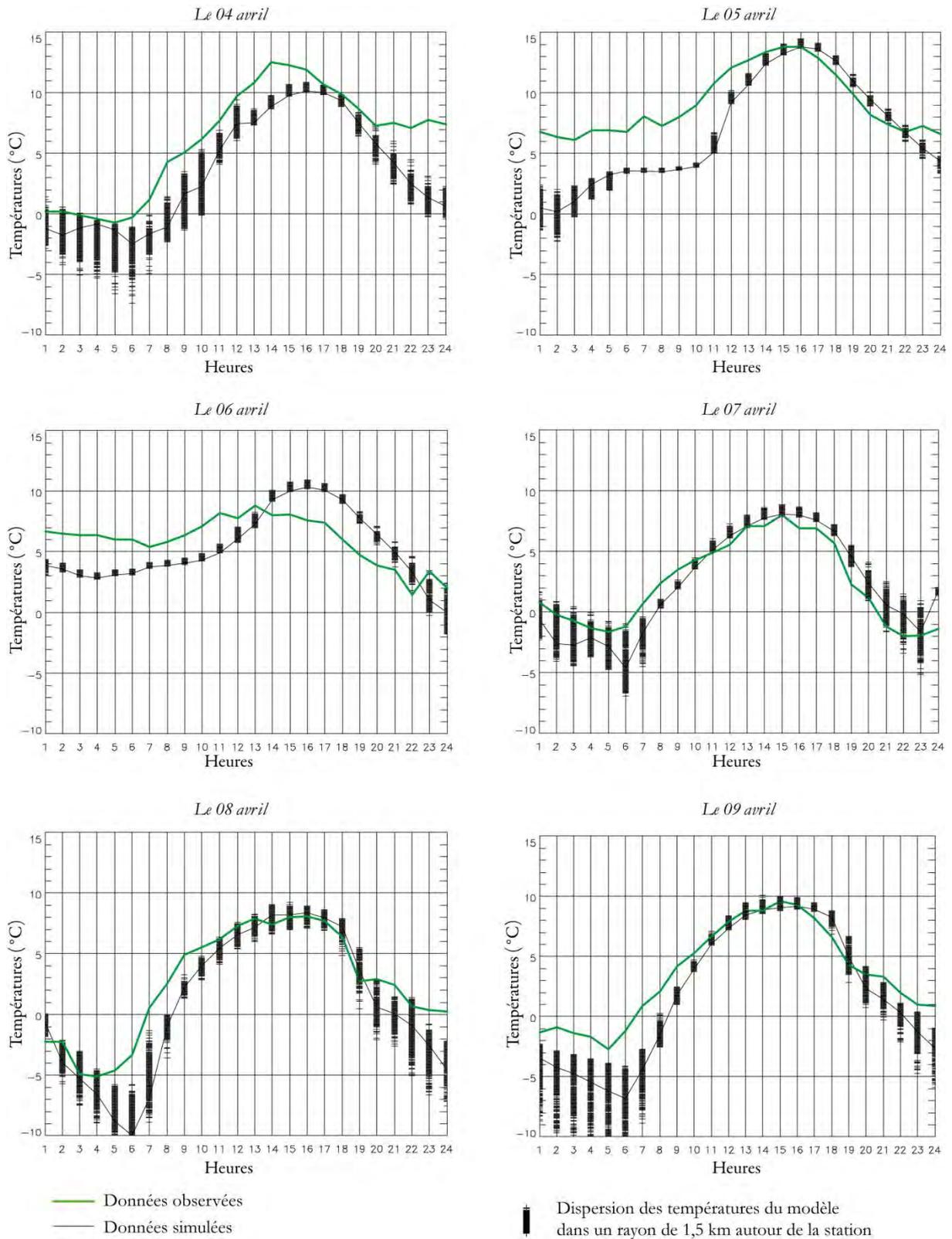
Evolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Reims-Courcy du 4 au 9 avril 2003 (Données : RAMS).



— Données observées
— Données simulées

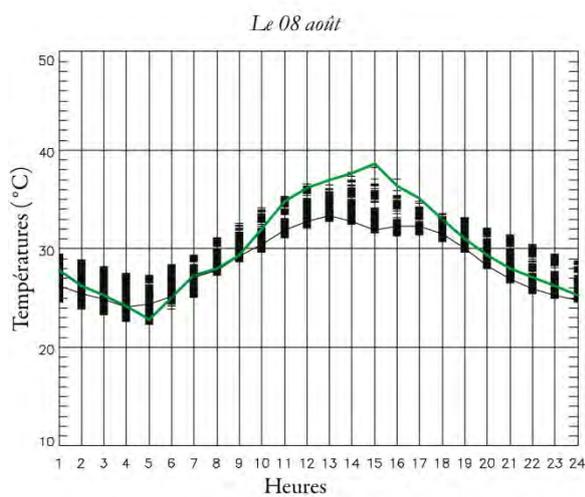
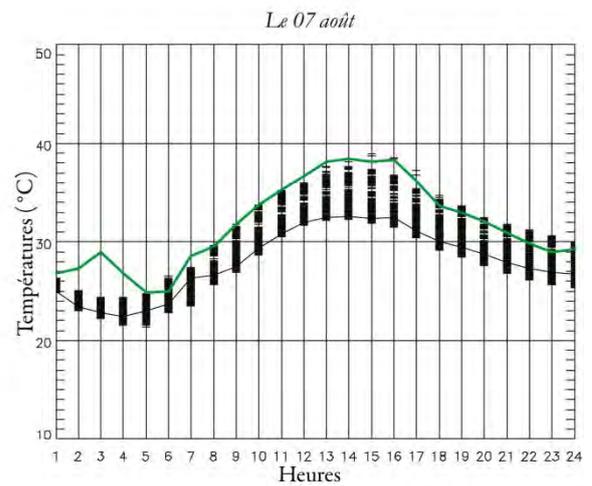
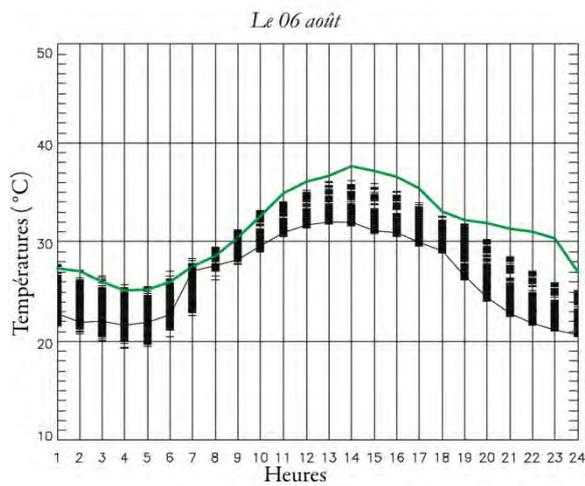
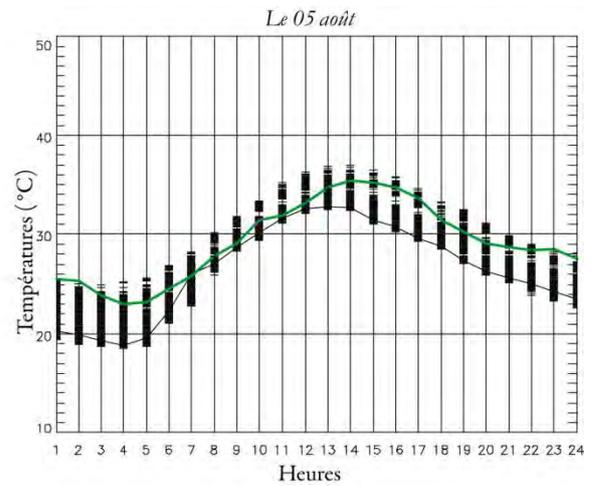
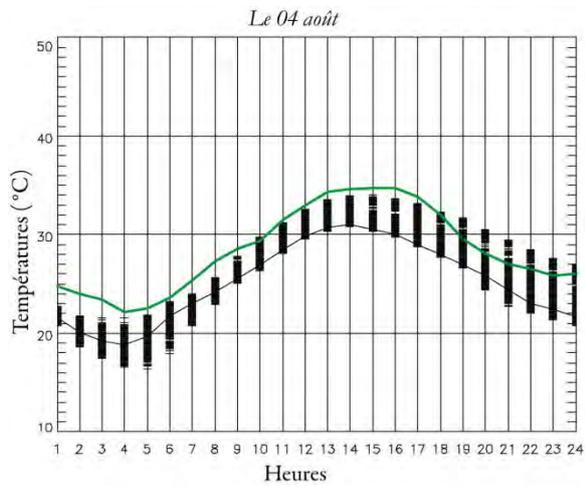
■ Dispersion des températures du modèle dans un rayon de 1,5 km autour de la station

Evolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Verzenay du 4 au 9 avril 2003 (Données : RAMS).



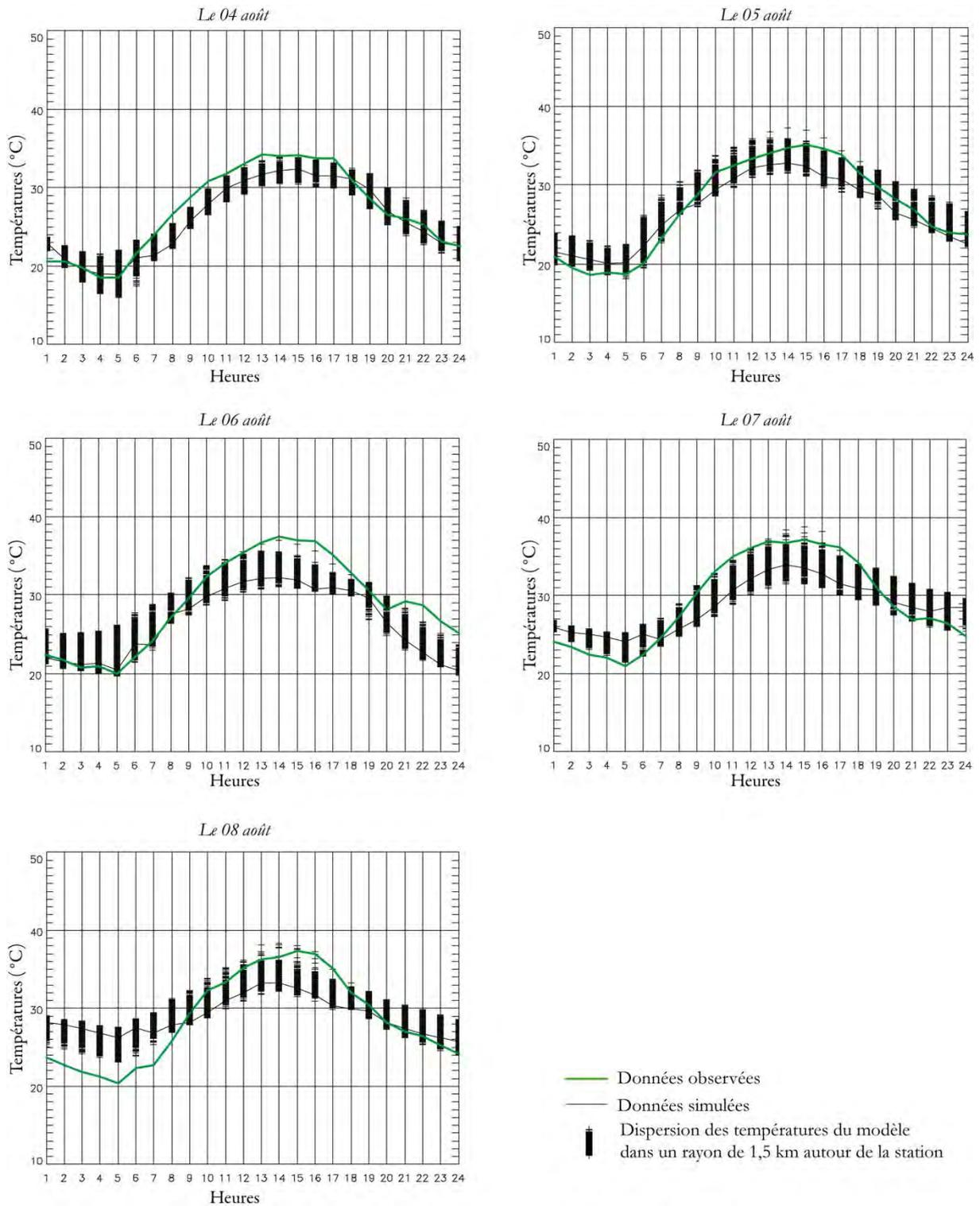
Annexe XIV

Evolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Bouzy haut du 4 au 8 août 2003 (Données : RAMS).

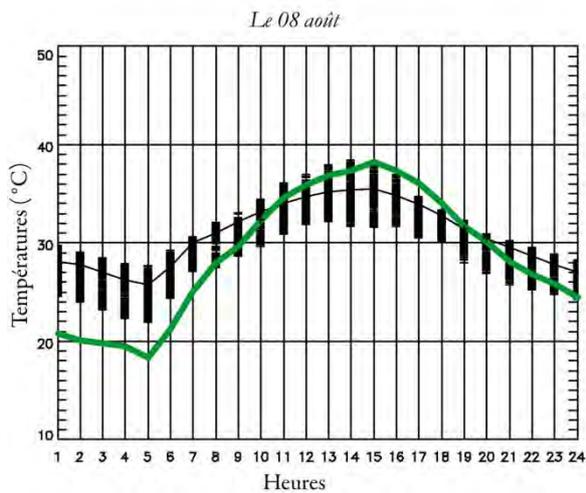
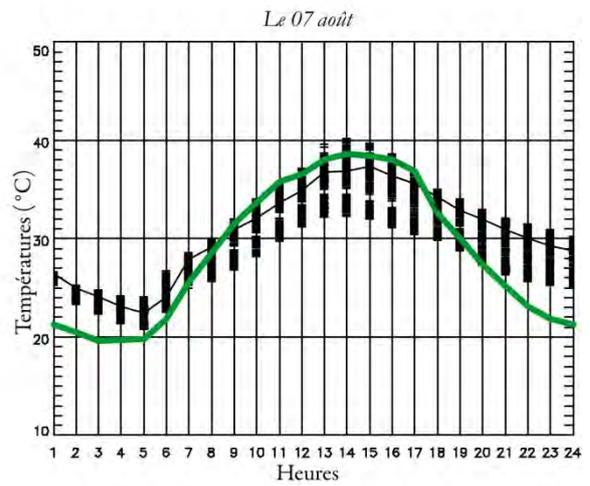
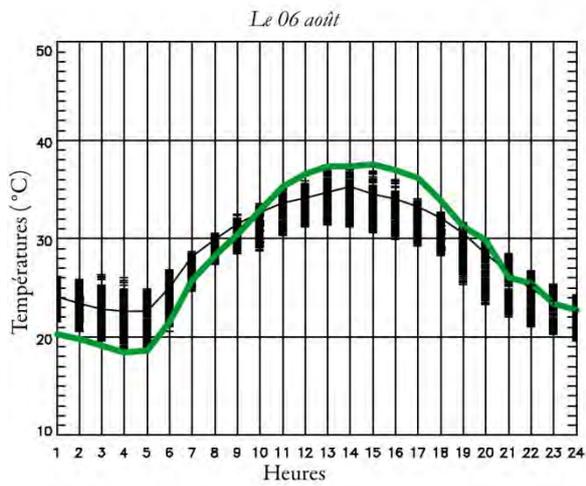
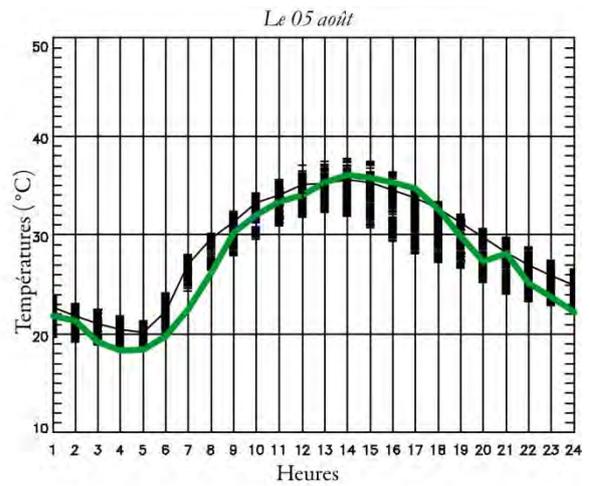
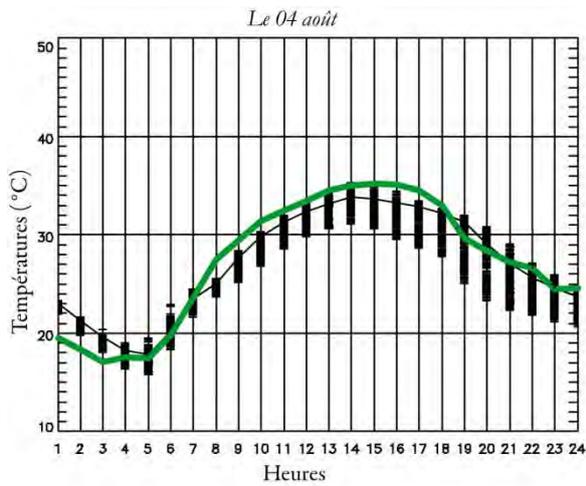


— Données observées
 — Données simulées
 █ Dispersion des températures du modèle dans un rayon de 1,5 km autour de la station

Evolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Châtillon du 4 au 8 août 2003 (Données : RAMS).

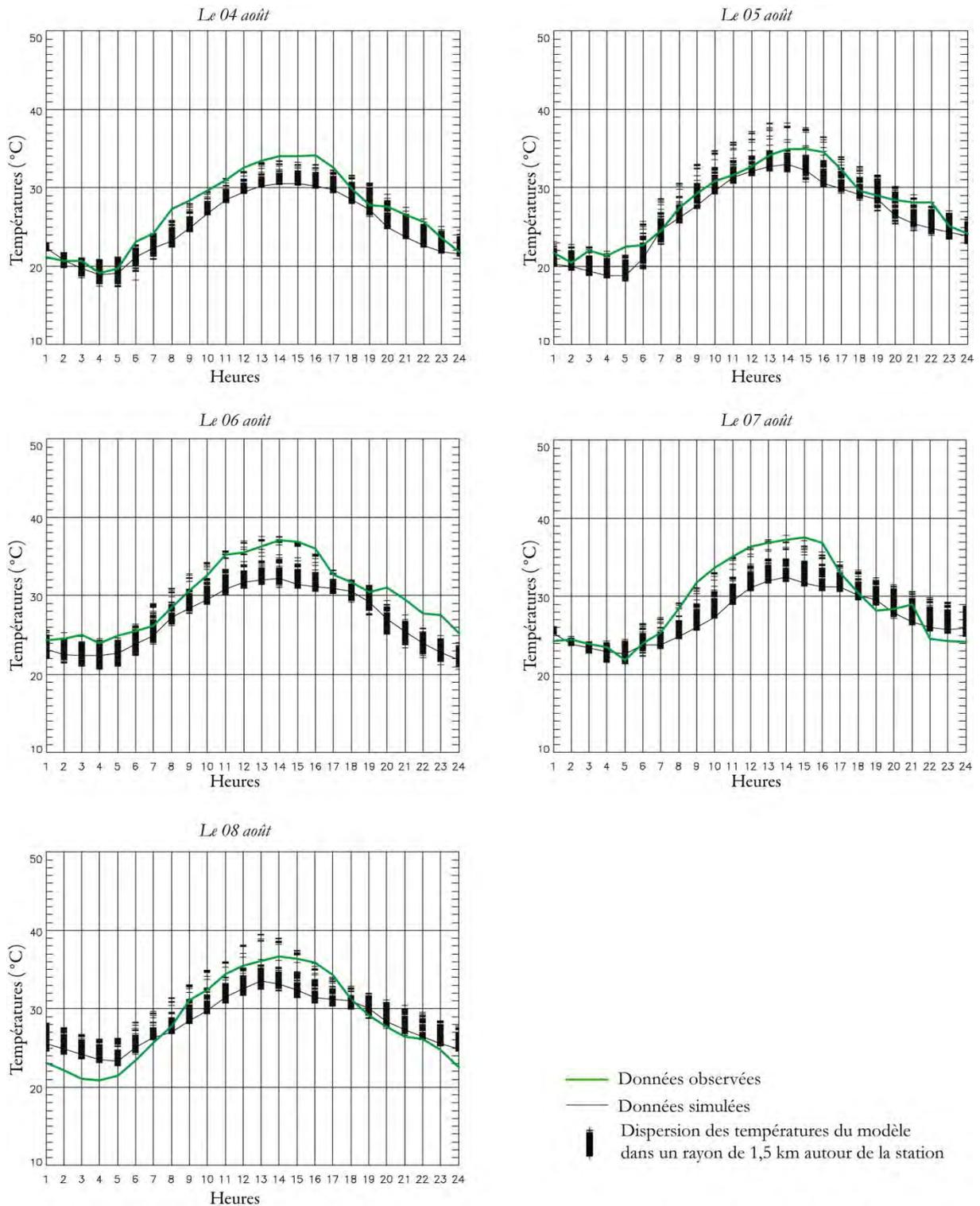


Evolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Epernay du 4 au 8 août 2003 (Données : RAMS).

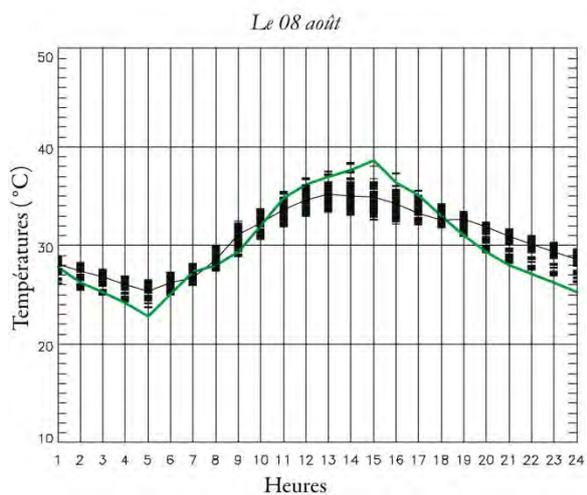
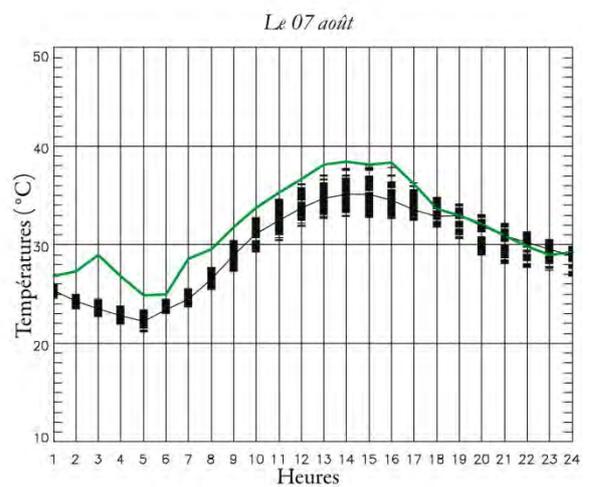
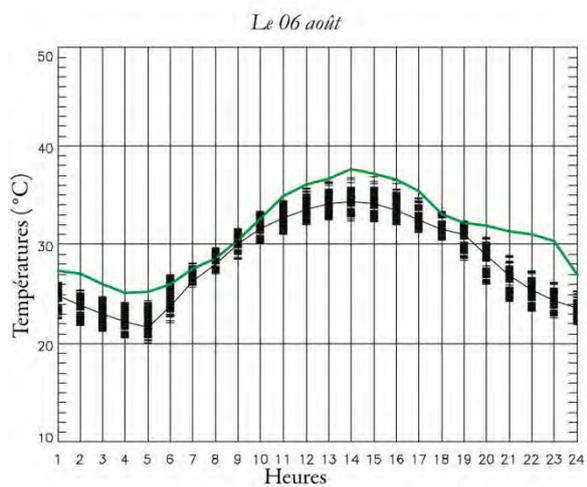
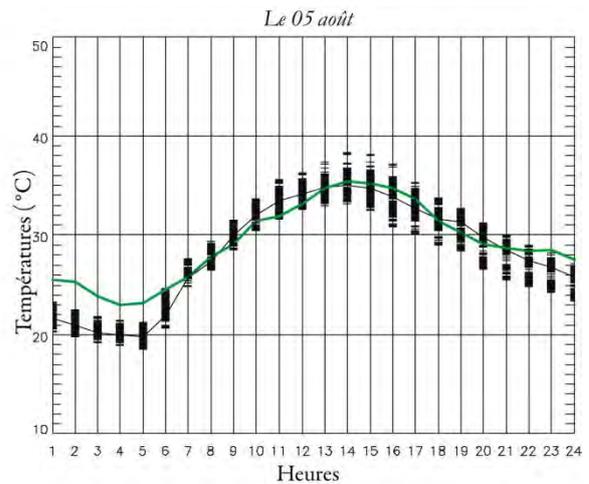
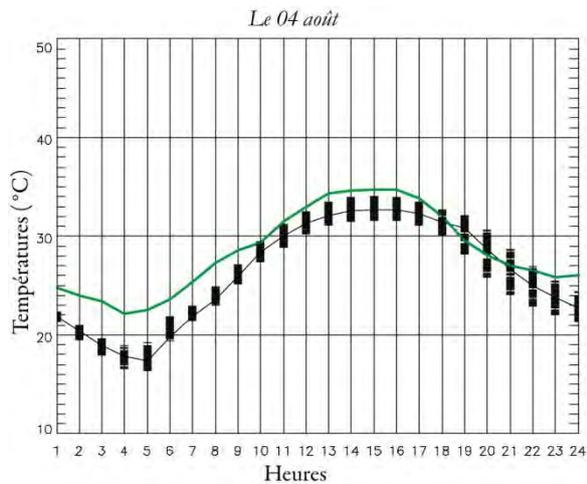


- Données observées
- Données simulées
- █ Dispersion des températures du modèle dans un rayon de 1,5 km autour de la station

Evolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Fleury du 4 au 8 août 2003 (Données : RAMS).

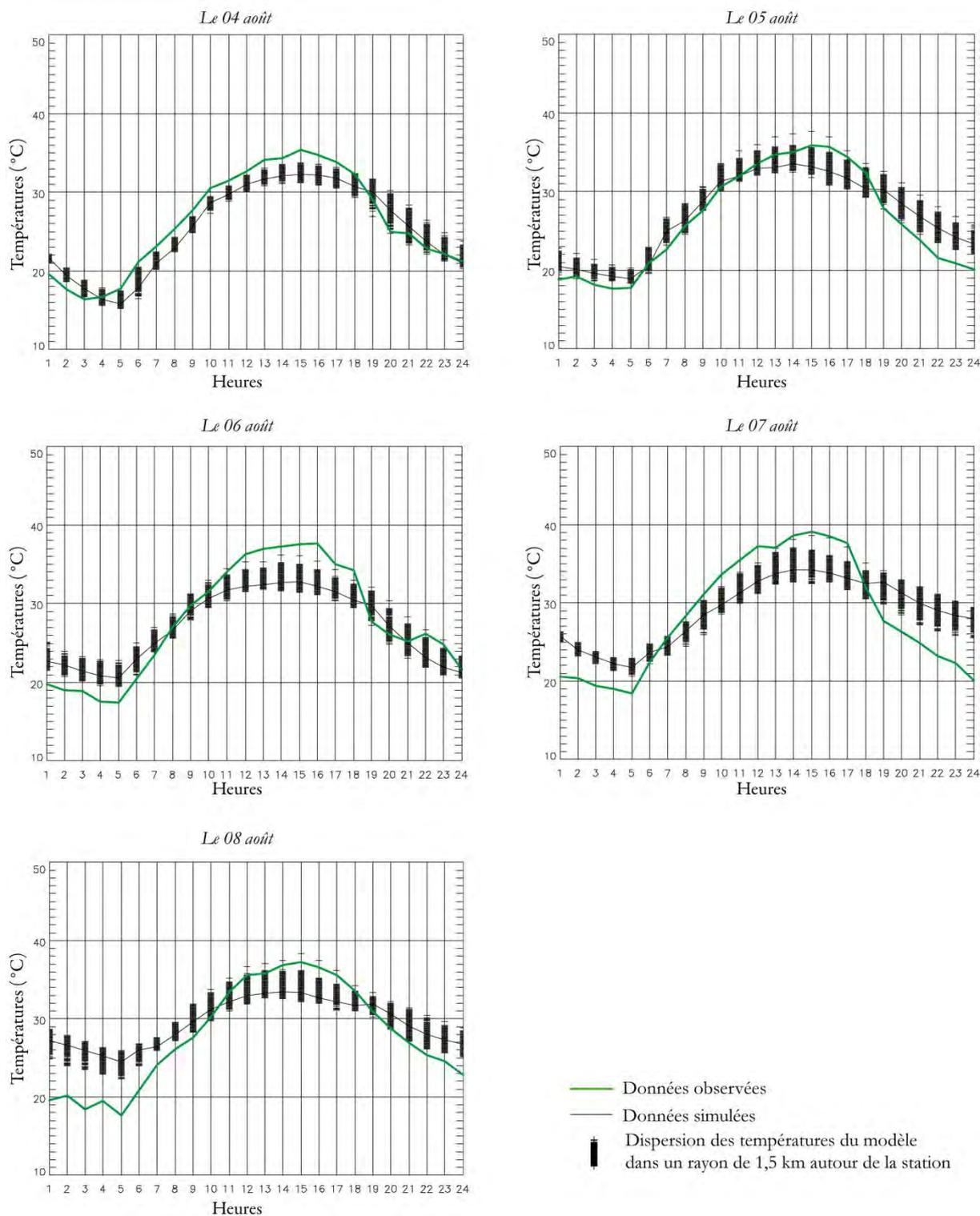


Evolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Reims-Courcy du 4 au 8 août 2003 (Données : RAMS).



— Données observées
 — Données simulées
 ■ Dispersion des températures du modèle dans un rayon de 1,5 km autour de la station

Evolution journalière de la température simulée par RAMS et observée pour la station Verzenay du 4 au 8 août 2003 (Données : RAMS).



Résumé

Changement climatique dans le vignoble de Champagne : Modélisation thermique à plusieurs échelles spatio-temporelles (1950-2100)

Les effets du changement climatique à l'échelle planétaire ont déjà des répercussions sur la viticulture et ces changements engendrent des interrogations sur son fonctionnement futur. L'évaluation des modifications possibles sur le vignoble de Champagne, notamment en termes d'extrêmes thermiques dommageables pour la vigne tels que l'aléa gélif printanier et les canicules, présente donc un intérêt pour la profession. Les températures influencent en effet le bon déroulement du cycle végétatif de la vigne et une avancée des stades phénologiques est déjà observée en Champagne. Ce vignoble présente un intérêt particulier du fait de sa position septentrionale mais aussi parce que les analyses y sont facilitées par la densité du réseau météorologique en place depuis près de 20 ans.

Pour établir une prospective des conditions thermiques possibles, des sorties des modèles du climat français LMD et ARPEGE-Climat (RETIC) respectivement, à 300 km et 50km de résolution sont validées et analysées sur une période de contrôle (1950-2000). Ils permettent ensuite de donner un aperçu des conditions thermiques et bioclimatiques futures (2001 à 2100) selon trois scénarios de changement climatique, les plus couramment utilisés : A1B, B1 et A2. La période de contrôle permet de mettre en évidence les biais froids des distributions statistiques des sorties de modèles au printemps et en été en termes d'estimation de fréquences d'extrêmes et de choisir le modèle ARPEGE-Climat (RETIC). Les sorties thermiques de ce modèle sont alors utilisées pour évaluer l'évolution jusqu'à 2100 des conditions bioclimatiques et thermiques futures. La fréquence des extrêmes gélifs printaniers au moment du débourrement devrait diminuer en avril mais dans l'hypothèse d'un débournement plus précoce, ces extrêmes devraient, d'après les modèles, rester importants en mars et provoqueraient un gel accru des bourgeons. Celle des extrêmes chauds estivaux devrait augmenter dans le futur.

L'analyse à échelle régionale est complétée par une analyse topoclimatique grâce au modèle à méso-échelle RAMS, qui permet d'obtenir une modélisation spatiale des températures. Incluant les facteurs locaux, ce modèle produit des résultats à résolution de 200m. Les simulations de validation sont réalisées sur les événements extrêmes gélifs printaniers (du 4 au 9 avril) et caniculaires estivaux (du 4 au 8 août) de l'année 2003, qui a provoqué le gel des bourgeons et l'échaudage des baies et qui est considérée ici comme exceptionnelle et représentative « du climat futur ». Les températures simulées (200m) sur la Champagne sont comparées aux températures enregistrées par des stations sur les coteaux. Le modèle reproduit bien le cycle journalier des températures avec des biais plus ou moins bien marqués notamment sur les minimas et maximas journaliers.

Mots-clés : aléa gélif printanier, canicule, températures extrêmes, changement climatique, vignoble de Champagne, modèles du climat.

Abstract

Climate change in Champagne vineyard: Thermal modeling at several spatio-temporal scales (1950-2100)

Global climatic change has already consequences on viticulture worldwide and these modifications imply some questions about future. Evaluation of possible modifications in Champagne vineyard is necessary in terms of thermal extremes for vineyard as spring frost during budbreak and heat-waves. Indeed temperature influences phenological cycle and earlier phenological stages have already been observed. This vineyard is particularly interesting to study because of its northern location and thanks to a large network of weather stations since 20 years.

To establish a prospective of thermal possible conditions, data of French climate models LMD and ARPEGE-Climate model, respectively at 300km and 50km of resolution, are validated and analyzed on a control period (1950-2000). They are also used to give an overview of bioclimatic and thermal future conditions (2001 to 2100) with three scenarios, currently used (A1B, B1 and A2). The control period shows cold biases within statistical distributions of climate models data in spring and summer, in terms of extremes frequencies estimation and better results with ARPEGE climate model. Data of this model are used to assess thermal and bioclimatic futures conditions. Summer extremes could increase in the future while cold spring extremes could decrease during budbreak. Budbreak could be earlier and spring cold extremes in March could cause more severe frost of buds.

Regional analysis is completed by a local analysis with RAMS meso-scale model, which downscales simulations at a resolution of 200m, taking into account local factors. The validation modeling is proceeded during the 2003 extreme climatic events (late spring frost and summer heat wave), this year is considered as exceptional and representative of the "future climate" which caused buds frost and berries warming. Simulated temperatures (200 m) for the Champagne vineyard were compared to recorded temperatures by weather stations located within the vineyards. The model reproduced the diurnal cycle of temperatures correctly with biases more or less marked depending dates.

Key-words: Champagne vineyard, climate change, climate model, extreme temperature, heat-wave, spring frost.