



HAL
open science

L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne. Modélisation spatiale à une échelle fine des écoulements de l'air et des températures minimales

Malika Madelin

► To cite this version:

Malika Madelin. L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne. Modélisation spatiale à une échelle fine des écoulements de l'air et des températures minimales. Géographie. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2004. Français. NNT: . tel-00008906

HAL Id: tel-00008906

<https://theses.hal.science/tel-00008906>

Submitted on 30 Mar 2005

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.

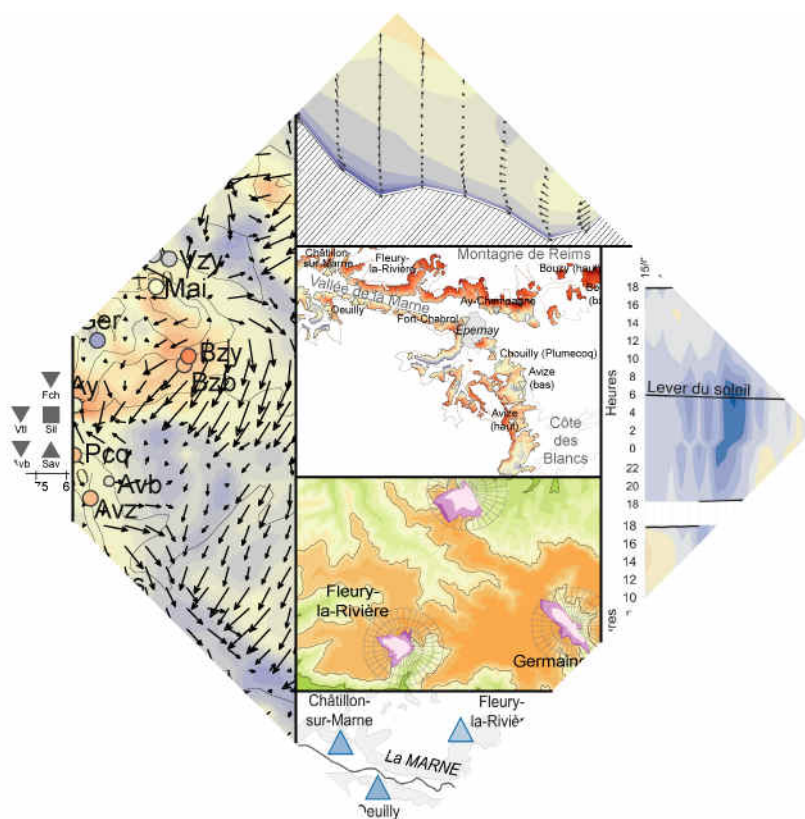
UNIVERSITE PARIS 7 DENIS DIDEROT

UFR de Géographie, Histoire et Sciences de la Société

L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne :
Modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales
et des écoulements de l'air

Malika MADELIN

Thèse de doctorat de l'Université de Paris 7
Géographie - Climatologie



Thèse de doctorat préparée au sein de l'UMR Géographie-cités et de l'UMR PRODIG.
Présentée et soutenue publiquement le 17 Décembre 2004.

Membres du Jury :

Gérard BELTRANDO

Pierre CARREGA

Claude KERGOMARD

Laurent LABBE

François LANGELLIER

Patrice PAUL

Lena SANDERS

Professeur à l'Université de Paris 7 Denis Diderot (directeur)

Professeur à l'Université de Nice Sophia Antipolis (rapporteur)

Professeur à l'ENS ULM (rapporteur)

Ingénieur à Météo France – Direction InterRegionale Nord

Ingénieur agronome au CIVC

Professeur à l'Université Strasbourg 1 Louis Pasteur

Directrice de Recherche au CNRS (co-directrice)

À Vincent,
À mes parents,

REMERCIEMENTS

Au cours de ce travail de recherche, j'ai pu bénéficier du soutien et de l'appui de nombreuses personnes que je souhaiterais remercier ici.

En tout premier lieu, je tiens à remercier chaleureusement mes deux directeurs de thèse, Gérard Beltrando et Lena Sanders. Par leurs qualités humaines et scientifiques, ils ont fait de cette thèse une expérience inoubliable. Je les remercie aussi vivement pour toute leur aide et pour la confiance qu'ils m'accordent depuis plusieurs années.

Merci ensuite à Pierre Carrega, Claude Kergomard, Laurent Labbé, François Langellier et Patrice Paul pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de faire partie de mon jury de thèse et pour leur intérêt porté à ce travail.

Cette thèse n'aurait pas été aussi aboutie sans l'aide précieuse et les lectures de plusieurs personnes : Claire Cunty, François Durand-Dastès, Eugénie Dumas, Marianne Guerois, Hervé Quenol... Tous mes remerciements pour leurs encouragements, leur investissement et leur disponibilité.

Je tiens à remercier les membres de l'équipe Paris qui m'ont accueillie et m'ont permis d'effectuer cette thèse dans d'excellentes conditions. Merci également aux membres du laboratoire de Géographie Physique et à l'équipe enseignante de Paris 7.

J'adresse mes sincères remerciements à Météo France et au CIVC pour m'avoir fourni les données et pour nos échanges constructifs. Un merci tout particulier et amical à Martine Camblan et à François Langellier.

Au cours de cette thèse, j'ai eu l'occasion d'interagir de près ou de loin, scientifiquement ou non, avec de nombreuses personnes que je tiens à remercier ici : Antonine, Bertrand, Caroline, Cécile, Céline, Clarisse, Claude, Fabien, France, Hélène, Joël, Karine, Ky, Martine, Sandra, Sandrine, Sébastien... et tous les autres.

Merci également à Auster, Brahem, FIP, Higelin, Jarrett, Le Clézio, Mozart, Radiohead et tant d'autres pour m'avoir accompagné tout au long de ce travail.

Enfin, merci à mes amis, à mes parents et à Vincent, à qui cette thèse est dédiée, pour m'avoir soutenue et encouragée patiemment durant ces années. Un merci tout particulier à Alice et Flo pour leur patience, à Aline pour ces bleues du vendredi soir à refaire le monde et à Elodie pour sa bonne humeur.

Belle et heureuse vie à tous les bouts-d'chou nés pendant cette thèse...

RESUME

Par sa situation septentrionale, le vignoble champenois est particulièrement sensible aux événements gélifs se produisant au printemps juste après le débourrement des bourgeons. Pour se protéger de cette contrainte climatique, dont les répercussions économiques et sociales sont parfois considérables, certains vigneron disposant de moyens de lutte sont intéressés par une estimation de l'aléa gélif à court terme. Pour appréhender ce phénomène climatique aux échelles spatiales topo-climatiques, pertinentes dans le cas d'un vignoble, nous avons utilisé les données climatiques (température, nébulosité et vent) provenant d'un réseau dense de 23 stations implantées dans le vignoble marnais (pour 6 printemps 1998-2003) ainsi que des données d'altitude et d'occupation du sol.

Nous étudions dans un premier temps les variabilités spatiale et temporelle des températures minimales et des écoulements de l'air. En utilisant diverses méthodes statistiques (univariées à multivariées), nous caractérisons le topoclimat nocturne printanier du vignoble marnais. Nous mettons ainsi en évidence l'influence de la topographie, par exemple la position des stations sur les coteaux viticoles, sur la répartition spatiale des températures minimales. De plus, nous montrons l'existence de brises de pente, qui se développent progressivement au cours de la nuit.

Dans un second temps, nous utilisons des méthodes d'interpolation spatiale géostatistique puis multicritère, afin de spatialiser l'aléa gélif. L'approche multicritère se révèle plus performante dans la mesure où elle permet de prendre en compte l'environnement des stations. Les modèles construits expliquent assez bien la répartition spatiale des températures minimales. Enfin, dans le but d'intégrer les écoulements de l'air dans nos modèles, nous réalisons une simulation du modèle numérique Meso NH pour une date représentative des conditions radiatives, favorables à un fort refroidissement et une variabilité spatiale importante. Les sorties, qualitativement en accord avec les observations, illustrent bien les interactions entre les brises de pente et le vent général et permettent de localiser les zones d'accumulation d'air froid.

Mots clés : vignoble de Champagne, risque de gel, températures minimales, modélisation spatiale, système d'information géographique.

ABSTRACT

Due to its northern location, the Champagne vineyard is particularly sensitive to frosts occurring in spring just after the restart of the buds. To protect against this climatic constraint, which can dramatic social and economical consequences, some wine growers who have invested in fighting methods are interested in a short term estimate of the frost risk. In order to understand this climatic phenomenon at the topoclimatic scales, which are relevant for a vineyard, we used climatic data (temperature, cloud cover and wind) coming from a dense network of 23 meteorological stations in the Marne vineyard (for the six springs 1998-2003) as well as altitude and land cover data.

Firstly, we study the spatial and temporal variabilities of minimum temperatures and winds. By the mean of different statistical methods (univariate to multivariate), we characterize the spring night topoclimate of the Marne vineyard. We observe the role of topography, for example the position of the stations on the hillsides, on the spatial distribution of minimum temperatures. Moreover, we show the existence of slope winds which develop gradually during the night.

We apply then several interpolation methods (geostatistic and multicriteria) to our data in order to obtain a frost risk estimate for the whole vineyard. The multicriteria approach is the most efficient due to its ability to take into account the station environment. The built models explain quite well the spatial distribution of minimum temperatures. Finally, with the aim of integrating the wind effects in our models, we simulate the Meso NH numerical model for one day corresponding to radiative conditions which yield a strong cooling and variability. The outputs, in qualitative agreement with the observations, illustrate well the interactions between slope winds and the general wind and allow locating the cold air accumulation zones.

Key words : Champagne vineyard, frost risk, minimum temperatures, spatial modelling, geographical information system

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
PARTIE I – CADRE DE L’ETUDE	9
Chapitre I - Les relations entre la vigne et le climat	11
Chapitre II - Le phénomène des gelées	35
Chapitre III - Le vignoble champenois	57
PARTIE II – DONNEES ET APPROCHE METHODOLOGIQUE	75
Chapitre IV - Les données climatiques	77
Chapitre V - La base de données environnementales	101
Chapitre VI - L’approche méthodologique	117
PARTIE III – VARIABILITES SPATIALE ET TEMPORELLE DES TEMPERATURES MINIMALES ET DES ECOULEMENTS DE L’AIR	127
Chapitre VII - Les températures minimales printanières	129
Chapitre VIII - Les écoulements de l’air, les nuits de printemps	151
Chapitre IX - L’influence des conditions atmosphériques	169
Chapitre X - Les nuits de gel	187
PARTIE IV – MODELISATIONS SPATIALES DES TEMPERATURES MINIMALES	199
Chapitre XI - Amélioration de l’adaptation statistique de Météo France	201
Chapitre XII - Quelques références sur la spatialisation des données ponctuelles	209
Chapitre XIII - Analyse spatiale du champ thermique	221
Chapitre XIV - Prise en compte des facteurs locaux	237
Chapitre XV - Spatialisations des températures minimales	255
Chapitre XVI - Apport des simulations du modèle Meso NH (16-17/03/03)	273
CONCLUSION	301
BIBLIOGRAPHIE	307
TABLES	331
Table des figures	333
Table des cartes	337
Table des tableaux	339
Table des encadrés	341
Table des matières	343
ANNEXES	

Introduction

Dans un monde où il n'y a pas deux lieux identiques, la géographie s'efforce de découvrir des types et des organisations, bref de l'ordre dans le complexe. Il en va de même pour la géographie des climats : mais pour celle-ci, à l'infinie diversité des lieux s'ajoute, plus que dans d'autres domaines, la succession sans trêve des instants, et la recherche de l'ordre revêt donc des aspects particuliers dans un domaine qui est, en apparence du moins, celui de l'éphémère et du passager.

F. Durand-Dastès, 1995

L'étude du climat passe nécessairement par les notions d'**échelles de temps et d'espace** qui sont elles-mêmes étroitement liées. Plusieurs échelons, interdépendants, sont classiquement retenus : du plus vaste, le *macroclimat*, défini sur une centaine de kilomètres ou plus, pour lequel les facteurs astronomiques et les grandes circulations atmosphériques et océaniques sont déterminants, au *microclimat*, sur quelques dizaines ou centaines de mètres, fortement influencé par les caractéristiques du sol. Entre ces deux limites, se trouve l'échelon du climat dit *local*, pour lequel la topographie, la proximité littorale ou encore l'urbanisation contribuent à modifier le bilan d'énergie à la surface terrestre et engendrent une **variabilité climatique** importante. Lorsqu'il est fortement influencé par la topographie, ce climat local est appelé **topoclimat**. Les caractéristiques du relief, telles l'altitude, la pente ou encore l'exposition, modifient alors les différents paramètres du climat que sont l'ensoleillement, les températures ou encore le vent. À cet échelon se développent des phénomènes atmosphériques bien particuliers, telles les brises de pente s'écoulant le long d'une pente et accumulant l'air froid dans les zones plates.

Les dimensions du topoclimat varient selon la complexité du relief. D'une manière générale, la topoclimatologie s'intéresse à des espaces de l'ordre de la dizaine de kilomètres. Ce niveau d'observation est particulièrement pertinent pour décrire et expliquer les **interactions entre le climat et les activités humaines**. Divers travaux de recherche appliquée en topoclimatologie ont ainsi été entrepris dans de nombreux domaines, à l'exemple de l'agriculture, de l'habitat, des voies de communication, des activités touristiques. À cette échelle locale, la répartition spatiale des variables climatiques est conditionnée par les interactions entre l'atmosphère et la surface terrestre, à travers le bilan radiatif et la caractérisation de la couche-limite atmosphérique. Décrire cette répartition et comprendre ses conditions sont des questions qui intéressent les géographes-climatologues.

Cette approche des phénomènes à des échelles spatio-temporelles fines est celle adoptée dans ce travail de thèse portant sur le vignoble marnais en Champagne. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'aléa gélif printanier, c'est-à-dire aux basses températures pouvant conduire à des dommages sur les bourgeons de la vigne.

Le **vignoble champenois**, par sa situation septentrionale proche de la limite de la viticulture, est particulièrement sensible aux **événements gélifs** qui surviennent au **printemps** après le débourrement des bourgeons, c'est-à-dire au moment de la reprise de croissance végétative de la vigne. Les basses températures sont alors une **contrainte climatique**, qui pèse lourdement sur l'activité viticole de cette région. Les dégâts occasionnés par ces gelées préoccupent depuis longtemps les viticulteurs, car, certaines années, les répercussions économiques peuvent être considérables. S'il s'avère que, par expérience, les viticulteurs ont une certaine connaissance des zones plus ou moins gélives (par exemple, les bas de coteau), tout point du vignoble peut *a priori* être touché, comme l'ont révélé les gelées importantes d'avril 2003. **Aussi la connaissance la plus fine et la plus complète possible de la répartition des températures minimales printanières est-elle primordiale.**

La **vulnérabilité** de cet espace, où les **enjeux économiques et sociaux** sont prononcés, a incité les acteurs du vignoble à développer des moyens de prévention des gelées printanières, à travers la protection et la prévision. Ainsi, de nombreuses études ont été entreprises sur le vignoble champenois, d'une part pour prévoir le risque de gel dommageable dans le vignoble, d'autre part pour améliorer les moyens de lutte antigel. Plusieurs organismes (en particulier Météo France, le Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne – CIVC et l'Institut National de la Recherche Agronomique – INRA) ont mis au point un **système de prévision** des températures minimales permettant d'optimiser la protection des vignobles à risque. Opérationnel depuis 1990 au Centre Départemental de Météo France Marne, il donne une estimation à court terme des indices actinothermiques (thermomètres à l'air libre, à 10 centimètres du sol, assez proches de la température des bourgeons) pour quatre points du vignoble marnais à partir de la température minimale prévue à Reims. Il permet ainsi d'aider les viticulteurs souhaitant protéger leurs parcelles de cette contrainte.

Une estimation de la température minimale pour seulement quatre points sur un vignoble aussi morcelé dans l'espace s'avère toutefois relativement insuffisante. En effet, par **situation de ciel clair et de vent calme**, favorable à un fort refroidissement nocturne et à une **forte variabilité spatiale**, des différences thermiques importantes (de plusieurs degrés) entre des stations distantes de quelques kilomètres, voire entre deux relevés sur un même coteau, ont été observées. Ces contrastes thermiques peuvent s'expliquer par l'écoulement des **brises de pente** vers les bas de coteau où l'air froid tend alors à s'accumuler. Dans ce contexte, une estimation des températures minimales à une échelle plus fine, et non ponctuelle, présente un vif intérêt.

L'objectif de cette thèse est d'améliorer la connaissance du phénomène des gelées de printemps à l'échelle topoclimatique du vignoble marnais. Pour cela, nous étudierons les variabilités spatiales et temporelles des températures minimales et des écoulements de l'air, en nous intéressant particulièrement aux nuits de ciel clair et de vent calme. Nous proposerons ensuite des interpolations spatiales des températures minimales sur l'ensemble du vignoble marnais.

Le manuscrit de cette thèse s'articule en quatre parties :

▪ **Dans la première partie, nous dressons un état de la question du cadre scientifique dans lequel s'insère cette recherche et des enjeux que recouvre la problématique.**

Le chapitre I résume, de manière très générale, les relations qu'entretiennent climat et vigne. C'est l'occasion pour nous de rappeler quelles sont les exigences climatiques de la vigne et de montrer leur influence sur la répartition géographique des vignobles à l'échelle mondiale. Au-delà de ces conditions macroclimatiques, nous abordons les échelles spatiales plus fines et les variations des relations climat-vigne au cours du temps.

Dans le chapitre II, nous décrivons le phénomène des gelées sous ses différentes facettes : les mécanismes physiques, leurs conséquences au niveau biologique et enfin l'estimation de l'aléa gélif. Nous soulignons également, dans ce chapitre, la différence entre le *gel météorologique* et le *gel agronomique*, seul dommageable pour la plante. Nous discutons des différents types de refroidissement de l'air pouvant amener à une gelée, en insistant sur le refroidissement radiatif. Dans ce dernier cas, nous rappelons l'importance des facteurs locaux, en particulier topographiques, sur la variabilité spatiale des températures minimales. Enfin, dans le chapitre III, nous présentons les principales caractéristiques du vignoble champenois, cadre géographique de notre étude. Ce vignoble étant situé à la limite septentrionale de la viticulture, le topoclimat et le microclimat sont alors essentiels pour atténuer les effets défavorables du macroclimat. Étant données sa renommée mondiale et sa valeur économique, il fait l'objet de nombreuses recherches, notamment sur les gelées printanières, contrainte climatique majeure.

▪ **Dans la deuxième partie, nous présentons les données utilisées dans ce travail de recherche, ainsi que notre approche méthodologique.**

En raison du volume important des données climatiques, lié à la densité du réseau de stations météorologiques sur lequel nous avons travaillé (23 stations au total sur un espace de 40 x 60 km), nous consacrons un chapitre (Chapitre IV) à la description des données climatiques. Il s'agit plus précisément des données de températures, de vent et de nébulosité mesurées et observées pendant six printemps successifs (1998-2003). Nous présentons ensuite une analyse critique approfondie de ces données, étape longue et minutieuse, mais nécessaire et préalable à tout traitement.

Le chapitre V décrit la base de données environnementales que nous avons construite à partir de données d'altitude et d'occupation du sol. Cette base nous permet de caractériser l'*environnement* des stations, pour tester ultérieurement son influence sur les températures minimales. Nous terminons ce chapitre par la délimitation et la définition de notre zone d'étude.

Enfin, dans le chapitre VI, nous exposons notre approche méthodologique, en soulignant l'apport des outils statistiques et la place centrale de la modélisation dans notre recherche. Nous abordons alors la délicate question de l'intégration des dimensions temporelles et spatiales, avant de conclure sur l'utilisation et l'apport des Systèmes d'Information Géographique.

▪ **Dans la troisième partie, nous étudions les variabilités spatiale et temporelle des températures minimales et des écoulements de l'air dans le vignoble marnais au cours des nuits printanières.**

Dans cette partie, il s'agit de dresser un aperçu de la diversité climatique du vignoble marnais, à partir du réseau dense de stations décrit dans la partie précédente.

Le chapitre VII traite ainsi de la variabilité spatiale et temporelle des températures minimales. Après avoir resitué les printemps retenus dans une perspective à plus long terme, nous décrivons la variabilité temporelle des températures minimales. Pour cela, nous jouons sur les différentes échelles de temps (annuelle, saisonnière, journalière et horaire). Nous présentons ensuite la variabilité spatiale des températures minimales et proposons notamment une typologie des stations en fonction de leur comportement thermique, lors des nuits de ciel clair et de vent calme.

Étant donnée l'influence des écoulements de l'air sur la variabilité spatiale du champ thermique, nous leur consacrons le chapitre VIII, en adoptant la même démarche multi-échelle. Après une étude détaillée du vent à l'échelle synoptique (à partir de la station de référence Reims-Courcy), nous caractérisons les variabilités spatiale et temporelle du champ de vent sur l'ensemble du vignoble.

Dans le chapitre IX, nous cherchons à caractériser l'influence des conditions atmosphériques sur les températures minimales mesurées par les stations météorologiques. Cette analyse est menée selon trois entrées : le refroidissement nocturne, la variabilité spatiale des températures minimales et le phénomène d'inversion thermique.

Enfin, pour conclure cette troisième partie, dans le chapitre X, nous nous intéressons plus spécifiquement aux nuits gélives, après avoir mené une étude de cas sur les gelées importantes d'avril 2003.

▪ **Dans la quatrième et dernière partie, nous proposons des modélisations spatiales du champ des températures minimales dans le vignoble marnais, à partir desquelles nous estimons un aléa gélif pour l'ensemble du vignoble.**

Dans le chapitre XI, nous commençons par une première modélisation reposant sur l'amélioration de l'*adaptation statistique* utilisée dans le système de prévision du risque de gel de Météo France. En prenant en compte un plus grand nombre de stations, nous généralisons cette adaptation permettant d'estimer les températures minimales à la hauteur des bourgeons, pour plusieurs points du vignoble marnais. Enfin, nous apportons quelques critiques quant aux données d'entrée et quant à la qualité de cette modélisation statistique. Ceci étant, l'estimation d'un aléa gélif reste ponctuelle.

Dans le chapitre XII, nous présentons différentes méthodes utilisées pour passer d'une information ponctuelle à une information continue : les interpolations géostatistiques et les interpolations multicritères. Dans les chapitres suivants, nous appliquons ces méthodes à nos données.

Le chapitre XIII présente ainsi une analyse spatiale du champ des températures minimales en utilisant, d'une part, les surfaces de tendance puis en réalisant, d'autre part, une analyse variographique de ce champ.

Dans le chapitre XIV, nous adoptons une approche de spatialisation *multicritères* qui, par définition, suppose l'influence des facteurs locaux sur la variabilité spatiale des

températures minimales. Nous cherchons alors à identifier et à définir ces facteurs, ici essentiellement topographiques, en jouant sur des fenêtres spatiales de taille croissante. Les relations entre chacun de ces descripteurs et les températures minimales sont testées.

Dans le chapitre XV, nous proposons une spatialisation des températures minimales en réalisant, au préalable, une modélisation des températures des stations par régression multiple. Cette modélisation est appliquée à différentes échelles temporelles (printanière, journalière) et la significativité des facteurs est discutée. Par une analyse détaillée des modèles journaliers, nous cherchons des récurrences dans les modèles contruits, que nous confrontons aux conditions atmosphériques.

Enfin, dans un dernier chapitre, nous présentons les résultats d'une simulation des champs de températures et de vent, à l'aide du modèle numérique Meso NH, pour une nuit représentative des conditions de ciel clair et de vent calme favorable à une forte variabilité spatiale. Cette simulation vise à améliorer la connaissance du champ de vent sur notre zone d'étude, afin d'affiner les modélisations spatiales précédentes. Nous cherchons, par exemple, à montrer les interactions entre les brises de pente nocturne et le vent général, ainsi qu'à délimiter les zones d'accumulation d'air froid. Les sorties du modèle sont ensuite confrontées aux mesures des stations. Cette étude, encore en cours, revêt un caractère d'étude préliminaire, mais laisse envisager des perspectives prometteuses.

Première partie

Cadre de l'étude

Des relations vigne-climat aux gelées printanières dans le vignoble champenois

Cette partie présente, à travers une synthèse bibliographique, le cadre thématique dans lequel s'inscrit cette thèse.

Nous dressons, en premier lieu, un panorama des relations entre la vigne et le climat, en insistant sur les échelles spatiales et temporelles.

Puis, nous décrivons le phénomène des gelées printanières qui peuvent fragiliser la viticulture dans les régions septentrionales, tel le vignoble de Champagne. Après une brève présentation des mécanismes physiques, nous discutons l'influence de divers facteurs sur la répartition de ces gelées, ainsi que les méthodes de prévision et de prévention de l'aléa gélif printanier.

Enfin, nous présentons le vignoble champenois, qui constitue le cadre géographique de cette recherche. Situé à la limite septentrionale de la viticulture, ce vignoble de renommée mondiale est particulièrement sensible aux gelées printanières.

Chapitre I - LES RELATIONS ENTRE LA VIGNE ET LE CLIMAT

Le vin est un produit qui suscite beaucoup d'intérêt : nombreux sont les guides, les ouvrages, les revues ou les chroniques dans la presse traitant du vin et des vignobles. Cette littérature généraliste est surtout orientée pour le consommateur, à travers des descriptions œnologiques, touristiques et historiques des vignobles, en particulier des plus prestigieux.

Dans *In vino veritas: an introduction to the geography of wine*¹, J.P. Dickenson et J. Salt [1982] vantent la variété des perspectives que l'étude des vignobles offre aux géographes :

« [...] we would argue that the geography of wine provides a refuge for the geographer who still sees his subject in holistic terms. It may be studied from a variety of perspectives and encompasses the influence of the physical environment, historical diffusion of the vine and viticulture, economic geographies of cultivation and marketing, political influences on trade and production, and cultural perceptions of landscapes, product and people. »²

L'objet *vignoble*, très fréquent dans la géographie française (Encadré I.1), peut donc être abordé à travers plusieurs champs de recherche. Celui adopté ici est l'influence du milieu physique sur la culture de la vigne et plus particulièrement celle du climat, qui est souvent décrit selon trois niveaux [Geiger, 1965 ; Huglin et Schneider, 1998 ; Reynier, 1991] :

- le macroclimat (ou climat régional) influencé en grande partie par la localisation géographique, voire par la proximité d'une large surface d'eau ;
- le mésoclimat (ou climat local ou topoclimat) lié essentiellement à des facteurs topographiques ;
- le microclimat relatif à des superficies plus réduites, à l'intérieur et autour des vignes³.

Dans un premier temps, nous nous placerons à une échelle macroclimatique. Nous montrerons comment les exigences de la vigne vis-à-vis du climat déterminent les potentialités viticoles d'une région. Nous décrirons alors la répartition mondiale des vignobles à travers les relations macroclimat-vigne à une échelle annuelle. Nous nuancerons ensuite ces conditions générales permettant le développement et le maintien d'un vignoble, en montrant l'influence du méso- et du microclimat. En outre, même si les conditions moyennes annuelles du climat influencent la viticulture, nous montrerons les variations de la relation climat-vigne au cours d'une année à travers la description de la phénologie. Enfin, nous aborderons les événements extrêmes, réelles contraintes climatiques, pouvant altérer sensiblement la production et la qualité viticoles.

1. J.P. Dickenson et J. Salt [1982] ont réalisé une étude quantitative et qualitative des articles géographiques traitant de la vigne, du vin et des vignobles (à partir de la littérature principalement anglophone et française).

2. « [...] on pourrait dire que la géographie du vin constitue une sorte de refuge pour le géographe qui considère encore son sujet d'étude en termes holistiques. On peut aborder son étude à partir d'un grand nombre d'approches et elle englobe l'influence de l'environnement physique, l'essor historique du vin et de la viticulture, les géographies économiques de la culture et les influences économiques et politiques sur le marché et la production, ainsi que sur la perception culturelle. »

3. A. Carbonneau (1984) cité par [Huglin et Schneider, 1998] propose de considérer deux types de microclimat : le microclimat naturel (maillage de l'ordre de 10 à 100 m) et le microclimat de la plante.

Encadré I.1 : Les géographes français et l'objet vignoble

Un *vignoble* définit une plantation de vignes et par extension l'ensemble des vignes d'une région ou d'un pays (le *vignoble italien*) [Brunet *et al.*, 1993 ; Clément, 1981]. Il est abordé par de multiples disciplines scientifiques (agronomie, économie, etc.) et, par son implantation spatiale, constitue un objet intéressant pour les géographes. L'objectif de cet encadré est de présenter très brièvement les liens entre les géographes français et le vignoble.

La littérature géographique française sur les vignobles est assez importante et explore de nombreuses facettes [Dickenson et Salt, 1982], ce qui est sans doute lié à l'importance des vignobles en France (champ d'étude proche). Pour E. Meillan [1997], même si les géographes n'en font pas leur thème de recherche principal, le vignoble est « une figure de style évidente dans le parcours d'un géographe français de la première moitié du siècle [le XX^e] », avec un style littéraire souvent *lyrique**. Cette géographie de la vigne et du vin est fondamentalement imprégnée par l'héritage de Paul Vidal de la Blache [Schirmer, 2000], le vignoble étant alors un objet emblématique du rapport homme-nature. Les travaux de géographie viticole, essentiellement des monographies idiographiques, adoptent des démarches régionales avec une vocation encyclopédique [Meillan, 1997 ; Schirmer, 2000] : un vignoble y est décrit principalement à travers son histoire et son milieu physique, mais aussi ses aspects humains, sociologiques voire œnologiques. Citons les travaux de Dion, 1990 ; Gadille, 1967 ; Huetz de Lempis *et al.*, 1978 ; Marres, 1950 ; etc. Ces études descriptives visent souvent à expliquer la qualité du vin**, débat à controverses sur les rapports entre la nature et la culture : les uns privilégient l'influence du milieu naturel (sol, exposition, climat), les autres les facteurs

humains comme le commerce*** (cf. le chapitre « Querelle des anciens et des modernes sur les facteurs de la qualité du vin » de R. Dion [1990]).

À partir des années 1950-1960, les géographes se tournent, peu à peu, plus vers la géographie humaine, laissant de côté la géographie physique pure et l'histoire, tout comme l'ensemble de la « géographie agraire » qui devient progressivement une « géographie agricole » [Meillan, 1997]. De nouvelles approches sont mises en œuvre, telle la géographie économique (reconversion qualitative des vignobles de masse, délimitations AOC), l'analyse systémique, la géographie sociale et culturelle, etc. La variété des perspectives qui était mise en avant par J.P. Dickenson et J. Salt en 1982 est toujours actuellement valable, si ce n'est même plus :

« Ainsi, la nouvelle planète des vins est un monde en pleine recomposition, vaste champ de recherches originales pour les géographes, puisque les techniques performantes qu'il met en œuvre sont plus que jamais situées aux confins de la nature et de la culture, de la mondialisation et de la différenciation spatiale. » [Pitte, 2000]

* Un exemple à propos de la localisation des vignobles tourangeaux à proximité de la Loire, du Cher et de la Vienne : « la vigne est une grande coquette qui aime à se mirer dans les cours d'eau » (J.-B. Martin, 1923 cité par [Meillan, 1997]).

** « Quête essentielle de la géographie de la vigne et du vin » pour R. Schirmer [2000].

*** « Il est hors de doute que, dans le choix de ses emplacements de prédilection, la viticulture de qualité a, autant que le permettait le climat, fait prévaloir les exigences du commerce du vin sur celles de la culture de la vigne. » [Dion, 1990].

I.1 - Les exigences climatiques de la vigne influencent la géographie mondiale des vignobles

Le développement et le maintien de la vigne dans une région sont souvent résumés par trois facteurs : le sol, le climat et l'homme (Encadré I.2), qui participent à la définition de la notion de *terroir* (Encadré I.3). Ici, le parti pris est de s'intéresser principalement aux travaux traitant des relations climat-vigne. Quelles sont les exigences climatiques de cette plante ? Peut-on s'appuyer sur ces exigences pour définir les potentialités viticoles d'un espace ? Enfin, comment peut-on lire la géographie des vignobles à travers ces facteurs macroclimatiques ?

Encadré I.2 : Influences des composantes édaphiques et humaines sur la culture de la vigne

La qualité d'une récolte viticole dépend des interactions entre des facteurs humains, édaphiques et climatiques, qui définissent la notion de *terroir* :

« L'expression des vins a trois origines : le sol, qui apporte au vin son style ; le climat qui lui assure une silhouette ; l'homme qui, par sa conduite du vignoble, de la vinification et de l'élevage, confère au vin l'esprit et sa justesse » [Puisais, 1987]

Dans ce premier chapitre, nous nous limitons aux relations entre climat et vigne. Aussi, cet encadré nous permet-il de revenir brièvement sur l'influence des facteurs édaphiques et humains sur le développement et le maintien de la viticulture.

▪ *Composante édaphique* :

La littérature portant sur les rapports entre la vigne, la roche en place et le sol* est abondante. On peut lire que la vigne s'accommode de tout type de roche en place (sédimentaires, métamorphiques ou éruptives) [Dion, 1990 ; Pomerol, 1984] :

« La viticulture, sous les climats qui la tolèrent, s'accommode (...) des terrains les plus divers. La Moselle, le Rhin, l'Anjou, Bordeaux et bien d'autres lieux fameux par leurs vins attestent qu'elle peut donner sur les roches cristallines, les schistes primaires ou les alluvions siliceuses d'aussi nobles produits que sur les calcaires. Aussi le rôle du terrain, dans l'élaboration d'un grand cru, ne va-t-il guère au-delà de celui de la matière dans l'élaboration d'une œuvre d'art. » [Dion, 1990]

De plus, la vigne se contente de sols très pauvres [Galet, 2000]. Leur influence sur la qualité du vin est très souvent mise en exergue dans la littérature vitivinicole [Clément, 1981 ; Dion, 1990 ; Pomerol, 1984]. P. Huglin et C. Schneider [1998] soulignent que cette image classique d'un rendement moindre associé à une meilleure qualité de la vendange est maintenant remise en cause avec l'existence de vignobles productifs et avec l'extension de la viticulture à des climats chauds (où sont pratiqués des systèmes d'irrigation).

Plus spécifiquement à propos de l'influence du sol sur la typicité des vins, certains auteurs mettent l'accent sur la composition chimique du sol (Branas, 1984)**, sur les propriétés physiques du sol (Saayman, 1977)** ou encore sur l'état de drainage du sol (Mériaux, Chrétien, Vermi et Leneuf, 1981)**. Par exemple, Broadbent (1975, cité par [Dickenson et Salt, 1982]) affirme que la craie améliore la qualité des vins blancs en apportant fraîcheur et acidité.

En France, la classification de la centaine d'aires de production AOC (Appellation d'Origine Contrôlée) repose en grande partie sur la composante édaphique [Galet, 2000 ; Huglin et Schneider, 1998], alors qu'actuellement, la plupart des vignobles ont des sols profondément modifiés par l'homme [Huglin et Schneider, 1998].

▪ *Composante humaine* :

L'action humaine est essentielle. En premier lieu, les hommes ont permis le développement et le maintien

de la viticulture dans une région donnée, en adaptant leurs pratiques culturelles au milieu physique [Dion, 1990] :

« Comme toutes les plantes cultivées, la vigne subit des contraintes écologiques mais, dans les limites de son aire de culture, elle présente de remarquables facultés d'adaptation : il existe des centaines de variétés de la seule espèce *Vitis Vinifera*, que l'Homme a patiemment individualisées, sélectionnées, créées au cours des millénaires ; dans chaque région, il a su choisir les cépages les mieux adaptés au milieu naturel. Pour surmonter les adversités climatiques, il a adopté à chaque fois le mode de conduite le plus favorable [...] » (conclusion de A. Huetz de Lemps dans [Le Gars et Roudié, 1996])

De plus, la vigne cultivée est une plante exigeante en main-d'œuvre (par exemple, pour la taille), même si de plus en plus de travaux sont mécanisés [Clément, 1981]. Enfin le vin présente une dimension culturelle, sociale et économique dans les activités humaines. J. Maby [1997] postule que l'action humaine (historiquement, économiquement et socialement) « augmente la valeur d'un terroir, donne un sens à sa nature et exalte son potentiel productif ».

Selon leur discipline, les auteurs mettent en avant l'influence d'un facteur en particulier, sans pour autant rejeter les autres. Par exemple, pour les œnologues J. Ribéreau-Gayon et É. Peynaud [1971], les facteurs naturels prédominent :

« Les facteurs naturels ont donc joué un rôle prépondérant dans la réussite que connaissent aujourd'hui les grandes régions viticoles. Si des facteurs historiques, géographiques, commerciaux et humains ont présidé à l'établissement et à l'amélioration des grands vignobles français, si de nos jours le rôle de l'homme est encore considérable, il faut cependant admettre que les caractères des vins sont étroitement liés à la nature du cru que l'on peut définir comme l'association, en un point donné, du sol, du microclimat et de la plante. » [Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971]

Pour d'autres [Delmas, 1971 ; Huglin et Schneider, 1998], l'influence du climat sur la qualité de la vendange est évidente, alors que celle du sol sur la typicité des vins est seulement constatée :

« D'une façon générale, l'emplacement de zones viticoles répond d'abord à des impératifs climatiques ou micro-climatiques, voire historiques ou économiques, ensuite à des conditions pédologiques ou agronomiques qui ont été plus ou moins bien définies par l'empirisme séculaire. Aussi est-il toujours difficile, en matière viticole, de se référer à des conditions pédologiques ou agronomiques spécifiques. » [Delmas, 1971]

Retenons que les trois composantes combinées, le climat, le sol et l'homme, font un vignoble.

* Le sol « va résulter de l'interaction entre roches en place, activité biologique et pratiques culturelles » [Pomerol, 1984].

** Pour les références, se reporter à l'ouvrage de P. Huglin et C. Schneider [1998].

Encadré I.3 : La notion de terroir

« La mode est au terroir. Le terroir fait vendre [...] »
[Pitte, 1999]

Le *terroir* est une notion très complexe et polysémique. Partons de l'origine étymologique :

« Le mot latin *territorium* a donné naissance à plusieurs mots français, parmi lesquels territoire, qui désigne l'espace approprié, en particulier d'un point de vue politique, et terroir, qui désigne la terre considérée par rapport à l'agriculture. À propos de terroir, le dictionnaire agricole Larousse* évoque plus précisément, quant à lui, 'des aptitudes agricoles particulières dues à la nature du sol, au microclimat local, à l'exposition des coteaux', point de vue strictement naturaliste, fréquent chez les agronomes et chez les propriétaires de parcelles produisant des crus réputés dans les vignobles de qualité. » [Pitte, 1999]

Les définitions du *terroir* sont variables selon les disciplines. A.-F. Doledec [1999] propose une revue bibliographique de ces différents contenus du terme *terroir* :

« La notion de terroir prend en compte, selon les auteurs, un nombre variable de paramètres :

- sol, sous-sol, position topographique (pente, orientation) pour Virgile cité par Falcetti (1994) ;
- sol, sous-sol, position topographique (pente, orientation), (méso)climat, c'est-à-dire les aptitudes agricoles, les facteurs du milieu naturel (Girard, 1992 ; Yravedra Lotis, 1983 ; Dubos, 1984 ; Morlat, 1989 ; Cotentin *et al.*, 1992 ; dictionnaires Larousse et Robert) ;
- sol, sous-sol, position topographique (pente, orientation), climat et matériel végétal (de Serres, 1984) ;
- sol, sous-sol, position topographique (pente, orientation), climat, matériel végétal, techniques culturales (Laville, 1990 et 1993, Audier, 1993, Branas, 1993 ; Carbonneau, 1995). La notion de terroir acquiert alors une envergure historique avec l'intervention de l'homme. » [Doledec, 1999] (pour les références, se reporter à l'article)

Par exemple, le terroir pour J. Dubos [1984] est une « aire naturelle, caractérisée au sein de l'ensemble d'une région par ses aptitudes agricoles, perçues à travers les particularités du milieu édaphique et du climat », définition où l'influence de l'homme est exclue. À l'inverse, J.-R. Pitte [1999] élargit le contenu d'un terroir avec « un savoir-faire paysan, perfectionné de génération en génération ou récent, mais révélant toujours une facette des potentialités de l'espace considéré ». J. Maby [1997] propose d'ajouter à la définition du terroir des « critères d'ordre humain », telles la valeur esthétique paysagère, la valeur d'évocation historique, la valeur patrimoniale d'attachement social et la valeur médiatique de notoriété.

Cette question de la définition est importante, car la notion de *terroir*, étroitement associée à la maîtrise de la qualité du vin**, sous-tend les délimitations

AOC*** [Vaudour, 2001]. Son pouvoir et son importance économique sont donc non négligeables. Par exemple, mettre en avant le terroir physique valorise la valeur du capital-terre et donc justifie le prix de la terre dans certaines appellations prestigieuses [Pitte, 1999]. Dans les pays traditionnellement viticoles, le terroir est souvent mis en avant pour valoriser la typicité, l'originalité d'un vin vis-à-vis d'une concurrence mondiale assez récente, associée à une réduction globale de la consommation.

Plusieurs recherches portent sur l'influence des différentes composantes, essentiellement du milieu physique, sur le terroir et plus généralement la qualité des vins : É. Lebon [1993] sur le vignoble d'Alsace ; J. Astruc, J. Héritier et J.-C. Jacquinet [1980] sur le zonage des terroirs viticoles de l'Aude ; C. Riou, R. Morlat et C. Asselin [1995] sur les vignobles d'Anjou (Val de Loire).

Ces derniers proposent le concept d'*unité terroir de base* (UTB), représentant « un territoire viticole d'extension géographique variable, défini comme l'association des composantes géologique, pédologique et paysagère, et dans lequel la réponse de la vigne est considérée comme reproductible, pour un climat annuel donné » [Riou *et al.*, 1995]. L'UTB est repris par A. Jacquet et R. Morlat [1997] pour définir un zonage climatique des terroirs viticoles sur le même espace. Ils proposent et valident des « indicateurs paysagers synthétiques, facilement cartographiables et représentatifs du climat local de l'UTB » (relations entre facteurs physiques de l'environnement paysager et variables climatiques).

* [Clément, 1981]

** Notons que dans les pays anglo-saxons, le cépage prime sur le terroir comme facteur de qualité. Ainsi les vins du *Nouveau Monde* portent le nom des cépages alors que ceux des pays « traditionnels » sont identifiés essentiellement par le lieu faisant référence au terroir. Dans cette optique d'une qualification essentiellement géographique, « le vin n'est pas seulement un liquide, mais une boisson qui renvoie à l'espace où elle a été produite » [Maby, 2002]. En outre, A. Bailly [2000] avance l'idée de la *marque* : « [...] lorsqu'une marque ou un cépage aromatique, impose son image sur divers territoires, par exemple le Chardonnay, que l'on consomme et retrouve dans le monde entier ». On assiste alors, d'après lui, à une lutte entre géographie et marketing. En Champagne, la *marque*, notamment celle des grandes Maisons, est très souvent mise en avant.

*** Actuellement les européens cherchent à étendre le système des AOC, alors que d'autres pays (USA, Australie, Canada, Brésil, Chili, ...) souhaitent privilégier la protection des marques [Dupont, 2002].

I.1.1 - Exigences climatiques de la vigne

La vigne, plante vivace⁴, est une liane comprenant plusieurs éléments : un système racinaire puissant⁵, un tronc frêle et flexible, des feuilles et des bourgeons se développant à partir des nœuds du tronc, et des fruits sous forme de grappes (Figure I.1). Elle appartient à la famille botanique des *vitacées* qui se divise en plusieurs genres, dont le *Vitis*, originaire des zones tempérées de l'hémisphère nord (Amérique, Europe et Asie) [Reynier, 1991]. L'espèce la plus cultivée, *Vitis vinifera*, se compose de plusieurs milliers de variétés ou cépages, dont seule une centaine est exploitée pour la production du vin, de raisins de table et de raisins secs. D'autres espèces, américaines, telles *Vitis rupestris* ou *riparia*, sont plus résistantes au phylloxéra⁶ et sont alors utilisées comme porte-greffes⁷ des *Vitis vinifera*.

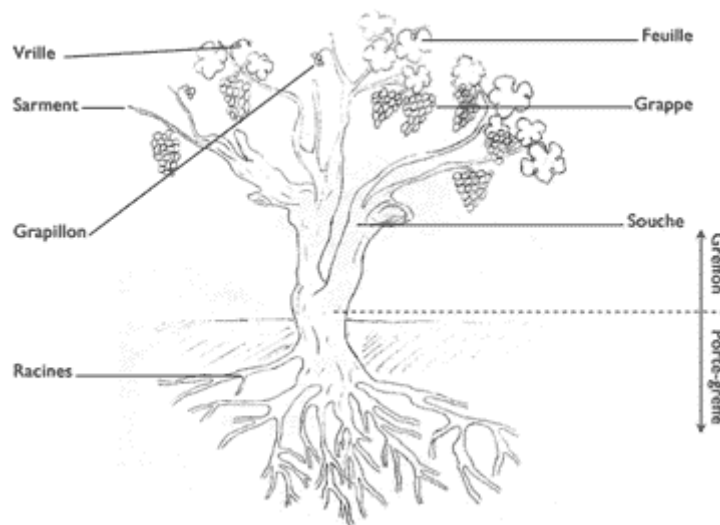


Figure I.1 : Schéma d'un cep de vigne

Source : [www.onivins.fr]

Pour vivre, la vigne, comme toute plante, a besoin d'énergie, d'eau et de substances chimiques. Plus spécifiquement, vis-à-vis du climat, les trois principales exigences sont le rayonnement solaire intercepté par le feuillage, la température pour le développement de la plante et l'eau, essentiellement pour sa croissance⁸ [Choisnel, 2002b]. Certains auteurs [Galet, 2000 ; Huglin et Schneider, 1998] résument l'influence du climat par celle du seul rayonnement solaire : essentiel à la vie sur terre, il agit directement sur la lumière et sur la

4. Elle vit plusieurs cycles annuels, en conservant son appareil végétatif (racines et tronc) [Reynier, 1991].

5. L'extension de ses racines dans toutes les directions et jusqu'à 6 m de profondeur lui permet de s'implanter dans des terrains très ingrats [Clément, 1981].

6. Le phylloxéra est un puceron qui, se nourrissant des racines, entraîne la mort de la plante. À la fin du XIXe siècle et au début du XXe, il a détruit la plupart des vignobles européens et a provoqué une reconstitution majeure du vignoble français : disparition de vignobles (notamment ceux d'Orléans et de la région parisienne) et, à l'inverse, spécialisation pour d'autres (vignoble languedocien, par exemple). En outre, cette crise a parfois bouleversé la sociologie de la propriété foncière : par exemple, les propriétaires bourguignons ont vendu à leurs ouvriers.

7. Depuis la crise phylloxérique et après des tentatives d'hybridation peu satisfaisantes, les vignerons ont adopté la pratique culturale des porte-greffes, c'est-à-dire des plantes résistantes, destinées à recevoir des greffes d'une autre variété (assurant la production qualitative et se développant sur les racines de ce porte-greffe).

8. « Par croissance, on désigne ce qui évolue de manière continue et peut se mesurer (longueur, volume, masse...). [...] Par développement, on entend toute modification qualitative dans la forme de la plante (apparitions d'organes). Ces modifications sont jalonnées par des repères ou des stades phénologiques. Elles peuvent faire l'objet d'une notation et non d'une mesure. » [Pérarnaud et Raynal, 1991].

température et indirectement sur les facteurs hydriques (l'énergie solaire permettant les transferts d'eau atmosphère-sol-plantes-atmosphère).

La lumière et le photopériodisme

La lumière, partie visible du rayonnement solaire, agit sur la croissance d'une plante essentiellement par la photosynthèse, processus complexe permettant aux plantes de synthétiser des sucres⁹. Les espèces peuvent être plus ou moins sensibles à la durée du jour ou photopériodisme [Pérarnaud et Raynal, 1991].

La vigne est une plante qui aime le soleil (héliophile) et les jours longs¹⁰ [Galet, 2000]. Cependant, dans la grande majorité des régions viticoles actuelles, le rayonnement lumineux ne constitue pas, à proprement parler, un facteur limitant pour la réalisation de la photosynthèse :

« L'intensité [lumineuse] la plus favorable pour la vigne semble être atteinte pour des rayonnements de 400 W/m², voire dans certains cas de 300 W/m². Ceci signifie que l'intensité lumineuse n'est pas un facteur limitant pour la vigne dans sa zone de culture, même aux limites nord de sa culture. De plus ces valeurs ne représentent que la moitié du plein soleil. Enfin au-delà de ces valeurs on observe des phénomènes de saturation. » [Crespy, 1987]

Ainsi les vignobles, tel le vignoble de Champagne, situés à des latitudes septentrionales, donc exposés à un rayonnement solaire assez faible, bénéficient d'une plus grande durée du jour au printemps et en été, ce qui compense en partie le déficit lumineux [Huglin et Schneider, 1998].

En outre, l'insolation a une influence sur la richesse en sucre et sur l'acidité : les raisins exposés à la lumière solaire sont toujours plus sucrés et moins acides [Galet, 2000]. Mais, l'auteur ajoute qu'un excès de lumière et de chaleur peut nuire à la qualité en donnant des raisins insuffisamment acides.

Enfin, la lumière peut également jouer un rôle important à l'échelon du microclimat de la plante : par exemple, l'ombrage des feuilles peut gêner la maturation des raisins (la pratique culturale de l'effeuillage est alors conseillée) [Huglin et Schneider, 1998].

La température

L'influence de la température est capitale dans le développement et la croissance d'une plante. En premier lieu, une plante peut assurer son développement dans les meilleures conditions entre certaines *températures limites* où les effets sont cumulatifs (Encadré I.4), mais en évitant des *températures critiques* (qui vont provoquer la destruction d'organes) [Chapuis et Mille, 2001]. De plus, comme pour la lumière, une plante va être plus ou moins sensible à des thermopériodismes journalier et annuel¹¹. Enfin, la température a également une incidence sur les échanges hydriques [Pérarnaud et Raynal, 1991].

9. La photosynthèse ou assimilation chlorophyllienne est le processus permettant aux plantes d'utiliser l'énergie solaire pour fabriquer, à partir du gaz carbonique, les glucides qui seront la matière première de toute substance vivante [Pérarnaud et Raynal, 1991]. Outre la lumière, P. Huglin et C. Schneider [1998] soulignent le rôle important de la température, de l'eau et de la concentration en dioxyde de carbone dans ce processus.

10. Toutefois, l'espèce *Vitis vinifera* est moins sensible au photopériodisme que certaines espèces américaines [Huglin et Schneider, 1998].

11. Pour se développer, certaines espèces ont un besoin en froid pendant le repos végétatif [Pérarnaud et Raynal, 1991].

Encadré I.4 : Les notions de zéro de végétation, de températures actives et de degrés-jour

L'influence de la température sur la croissance et le développement des plantes a été démontrée depuis longtemps (déjà R.-A. Ferchault de Réaumur au XVIII^e siècle) :

« En dessous d'une certaine température appelée le *zéro de végétation* (variable selon les espèces), la plante ne se développe pas, elle est dans un état de vie latente. » [Pérarnaud et Raynal, 1991]

Concernant la vigne, ce seuil thermique qui, une fois atteint, permet la reprise de la croissance végétative, est variable selon les cépages, la latitude et les années [Galet, 2000]. Par exemple, J. Branas, G. Bernon et L. Levadoux [1946] ont observé un zéro de végétation* de 10,2°C à Montpellier et de 13,5°C à Alger (pour le cépage Aramon). Le seuil moyen de 10°C, communément admis pour la vigne, est utilisé dans le calcul des *températures actives* sur la croissance (ou *températures efficaces*) : par exemple, une température de 15°C correspondra à une température active de 5°C (en base 10°).

La vitesse de croissance d'une plante est fonction de la somme de ces températures efficaces journalières pendant la saison végétative [Chapuis et Mille, 2001] ; la réalisation d'un stade de développement nécessite une certaine somme de températures [Pérarnaud et Raynal, 1991].

Ainsi, ces sommes de températures actives, appelées *degrés-jours*, sont utilisées dans le choix des cépages et la prévision des dates d'apparition des stades phénologiques (cf. Phénologie de la vigne, p. 29), en particulier la maturité (Angot, 1985 cité par [Galet, 2000] ; [Bonnardot, 1997]). Les *degrés-jour* sont également utilisés pour définir les potentialités viticoles d'une région (indice de Winkler (1962) cité par [Huglin et Schneider, 1998]).

Pour P. Huglin et C. Schneider [1998], la température est le régulateur primordial de la photosynthèse de la vigne (la lumière, souvent en excès, n'étant pas un facteur limitant, ni l'eau). Cependant, V. Pérarnaud et N. Raynal [1991], qui qualifient les *degrés-jours* d'outil pratique et simple, apportent quelques réserves : pour eux, la température n'est pas le seul facteur ; le thermopéridisme, le photopéridisme, la sécheresse, les accidents, tel la grêle, etc. peuvent modifier le développement et la croissance de la vigne.

* Aussi appelé *seuil apparent de développement*.

L'influence de la température varie au cours de l'année. La croissance de la vigne commence au-dessus d'une température limite de 10°C, le *zéro de végétation* (Figure I.2 et Encadré I.4) [Crespy, 1987 ; Winkler *et al.*, 1974]. Aussi, pendant le repos hivernal, les températures ne jouent pas de rôle sur le développement de la vigne, excepté lorsqu'elles sont très basses (en dessous de -15°C) puisqu'elles provoquent alors la mort des tissus¹² [Carbonneau, 1992 ; Galet, 2000 ; Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971]. Au printemps, la *température critique*, en dessous de laquelle le bourgeon gèle, est de -2.5°C, mais ce seuil peut varier selon le cépage¹³, la vitesse du refroidissement, etc. Pendant la période estivale, au contraire, des températures élevées (supérieures à 42°C), alors considérées comme des *températures critiques*, entraînent le *grillage*¹⁴ des grappes [Crespy, 1987 ; Galet, 2000 ; Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971]. A. Lichine [1983] donne l'exemple du sirroco, vent chaud, sec et déshydratant, pouvant provoquer des dégâts importants pour les vignobles d'Afrique du Nord.

Entre ces températures limites (Figure I.2), l'optimum thermique moyen de la période végétative se situe, selon les auteurs, entre 25°C [Winkler *et al.*, 1974] et 30°C [Crespy, 1987]. Toutefois, l'influence de la température sur le développement de la vigne se fait surtout ressentir par accumulation : la maturité des raisins (et plus généralement la réalisation des différents stades phénologiques¹⁵) n'est possible qu'à partir d'une certaine somme de températures journalières, plus précisément de températures actives (Encadré

12. Afin de se protéger des gelées hivernales, les vigneronnes d'Europe orientale et d'Amérique du Nord enterrent les souches [Galet, 2000].

13. Par exemple, les cépages Pinot noir et Chardonnay, utilisés en Champagne, sont parmi les plus résistants au gel, à l'inverse du Sémillon (sud de la France) [Turmanidze, 1992].

14. Le grillage est le dessèchement des jeunes organes de la vigne sous l'action de températures élevées ou de vents secs et chauds [Clément, 1981].

15. Les différents stades phénologiques, tels le débourrement, la floraison, la maturité, etc., sont des étapes périodiques du développement de la vigne (cf. la note de bas de page n°8 et la partie Phénologie de la vigne, p. 28).

I.4). Par exemple, entre les stades de débourrement et de maturité, J. Ribéreau-Gayon et É. Peynaud [1971] avancent une somme optimale de températures journalières de 2 800°C pour les cépages précoces (4 000°C pour les plus tardifs).

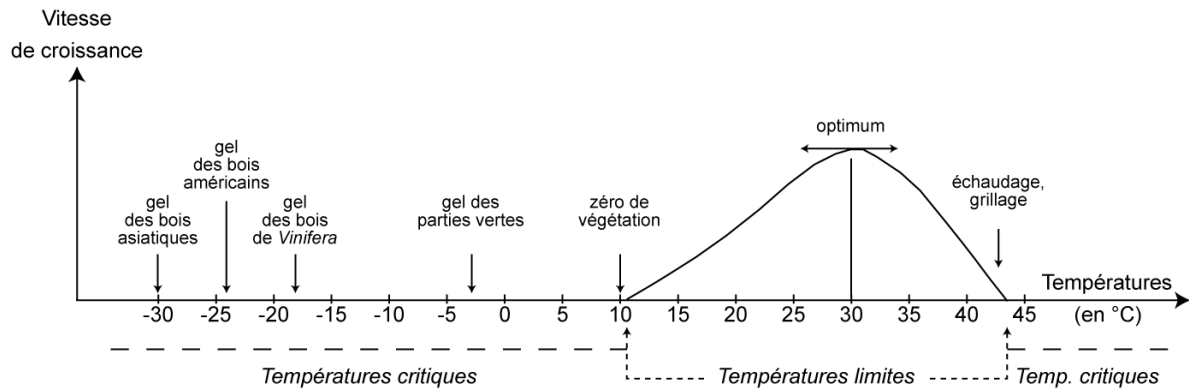


Figure I.2 : Les températures limites et critiques de la vigne

Source : d'après [Crespy, 1987]

Par ailleurs, la température va également jouer un rôle sur la qualité organoleptique¹⁶ de la vigne [Huglin et Schneider, 1998]. Ainsi, alors que la vigne ne résiste pas aux climats trop froids (gelées hivernales et printanières), les climats très chauds sont qualifiés de peu favorables à la production de grands vins ou de vins de qualité (surtout les blancs) : le raisin contiendra plus de sucre¹⁷ mais moins d'acidité. Cette acidité, en proportion raisonnable, conditionne les meilleurs bouquets [Clément, 1981 ; Fitzharris et Endlicher, 1996]. P. Huglin et C. Schneider [1998] ajoutent que le potentiel aromatique de certains cépages (gewurztraminer, sauvignon, riesling rhénan) ne peut se réaliser pleinement que sous des climats tempérés frais où la maturation est lente et prolongée. Plusieurs auteurs [Clément, 1981 ; Fitzharris et Endlicher, 1996] avancent que la plupart des vignobles de cru sont situés à proximité de la limite climatique septentrionale de la viticulture, tel le vignoble de Champagne.

Outre une forte variabilité temporelle (journalière et saisonnière), les températures dépendent, entre autres, de la latitude, de l'altitude, de la nébulosité et de l'humidité de l'air. Ces variations spatiales et temporelles des températures influencent de manière importante la distribution géographique de la viticulture.

L'eau

Constituant principal des cellules vivantes, l'eau intervient dans certaines réactions biochimiques et dans l'approvisionnement des végétaux en éléments minéraux extraits du sol, nécessaires à son développement et à sa croissance [Pérarnaud et Raynal, 1991]. De plus, elle agit dans les échanges avec le milieu ambiant : par exemple, par l'évaporation, la plante protège les organes contre l'échauffement.

16. L'adjectif *organoleptique* désigne ici l'ensemble des propriétés sapides et odorantes du vin (données par les acides tartriques et maliques, par les constituants aromatiques et par les composés phénoliques tels les tannins).

17. A. Jacquet et R. Morlat [1997] rapportent les travaux de Calo *et al.* (1995) qui ont montré, pour les vignobles nord-atlantiques, des relations entre la teneur en sucre et la température moyenne pendant tout le cycle végétatif (surtout période véraison-récolte) : relation positive jusqu'à 17°C, moins nette de 17 à 22°C et relation négative après 22°C.

Les pluies d'hiver n'ont pas une influence directe sur la vigne, mais permettent d'alimenter les nappes phréatiques (réserves pour les besoins en eau) [Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971]. Pendant le printemps et le début de l'été, la vigne exige un approvisionnement en eau suffisant pour développer son appareil végétatif. Enfin, selon P. Huglin et C. Schneider [1998], de nombreuses observations montrent qu'un léger déficit hydrique durant la période de maturation (août, septembre) est favorable à la qualité organoleptique des vins (dans les régions tempérées). D'une manière générale, la vigne exige donc peu d'eau et est plutôt résistante à la sécheresse¹⁸.

Seuils climatiques

Étant donnée l'influence de ces principaux éléments climatiques¹⁹ sur la vigne, plusieurs auteurs, à partir d'observations *in situ*, ont cherché à définir des seuils climatiques limites de la viticulture à une échelle mondiale. Ainsi, la plupart d'entre eux s'accordent sur la nécessité, pour le développement de la vigne, d'un ensoleillement supérieur à 1 500 h par an, dont 1 200 h pendant la période végétative (pour les cépages précoces)²⁰ [Clément, 1981 ; Crespy, 1987 ; Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971]. Quant aux seuils thermiques, la température moyenne annuelle doit être supérieure à 10°C, sinon la croissance végétale est réduite [Crespy, 1987 ; Winkler *et al.*, 1974], et celle du mois de juillet supérieure à 18°C [Clément, 1981 ; Marres, 1950]. En tenant compte des *températures actives*, paramètre plus pertinent (Encadré I.4), la culture de la vigne n'est possible que si leur somme est supérieure à 1 000°C [Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971]. À ces seuils, s'ajoute un minimum de 250 à 350 mm de précipitations²¹ entre le débourrement et les vendanges [Galet, 2000 ; Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971].

Dans sa thèse sur le vignoble de la côte bourguignonne, R. Gadille [1967] propose un graphique associant les facteurs climatiques essentiels au développement de la vigne : température maximale et insolation sur les ordonnées, précipitations et humidité relative sur les abscisses (Figure I.3). Lorsque le climogramme présente un losange étiré dans le sens vertical, cela traduit de bonnes conditions (températures et durées d'insolation maxima) alors qu'un étirement dans le sens horizontal correspond à des conditions peu favorables [Gadille, 1967 ; Galet, 2000]. Sur cette Figure I.3, le vignoble de Marseille connaît des conditions climatiques beaucoup plus favorables que celui de Strasbourg.

18. Cette « tendance sèche » est étudiée notamment par V. Bonnardot [1992] pour le vignoble de Bourgogne orientale à travers les bilans hydriques.

19. D'autres facteurs climatiques, non discutés ici, peuvent influencer sur la culture de la vigne : la rosée, le vent, les brumes, les brouillards, les chutes de grêle (à une échelle locale), etc. [Galet, 2000].

20. Pour les vignobles tardifs, il faut 1 600 h pendant la période végétative, ce qui représente une durée d'environ 30 jours de beau temps en fin d'été [Crespy, 1987]. Pour donner un ordre de grandeur, Paris reçoit 1 750h par an, Montpellier 2 700 et Reims 1 700 [Kessler et Chambraud, 1990].

21. Il est difficile de fixer des seuils pluviométriques, l'évapotranspiration et la réserve hydrique du sol intervenant également. Ainsi, en tenant compte des pertes par évaporation, ruissellement et percolation, ce minimum peut atteindre 600 mm (toujours pendant la phase végétative) [Crespy, 1987].

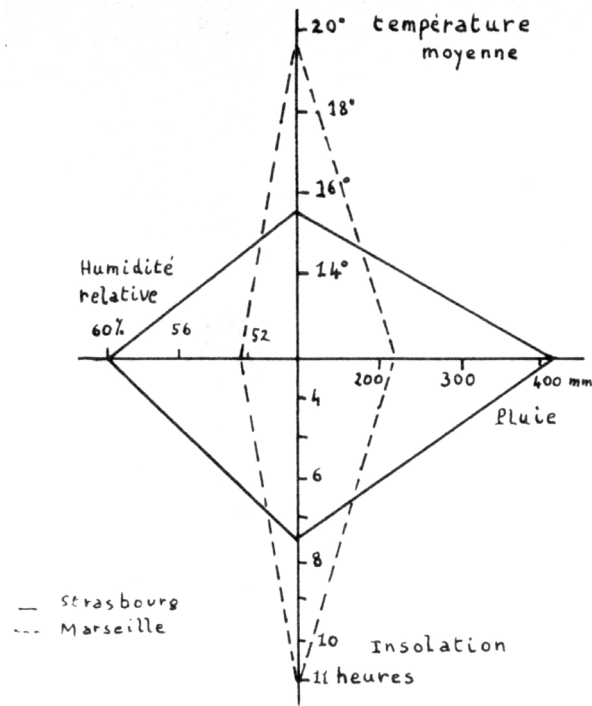


Figure I.3 : Climogramme de Marseille et de Strasbourg

Source : [Gadille, 1967]

Cela étant, les seuils généraux, rappelés ci-dessus, n'empêchent pas des particularités locales. On peut citer, par exemple, les vignes du Québec qui ont une période de croissance végétative courte et qui connaissent un climat plutôt froid (la température moyenne annuelle est de 6°C [Lasserre, 2001]). Dans ce cas, les étés chauds et bien ensoleillés, ainsi que des techniques culturales particulières (notamment dans le choix des cépages), permettent de compenser ces conditions limites de culture. L. Deshaies et J.-M. Dubois [1996] vantent l'intérêt d'étudier ces vignobles septentrionaux :

« [...] car la culture de la vigne au Québec peut être considérée jusqu'à un certain point comme un défi à la "géographie" ou à la nature. »

I.1.2 - Potentialités (macro)climatiques d'une région viticole à l'aide d'indices bioclimatiques

Nous venons d'exposer les liens entre la vigne et le climat, en mentionnant notamment les seuils climatiques nécessaires à la culture de cette plante. S'il ne faut pas négliger d'autres facteurs (Encadré I.2), ces exigences climatiques limites influencent la répartition de la viticulture. En prenant en compte ces exigences, plusieurs auteurs ont alors cherché à élaborer des *indices bioclimatiques* permettant de définir les potentialités, les aptitudes viticoles d'une région, d'un point de vue climatique. Nous reprendrons ici l'énumération des principaux indices à une échelle mondiale, faite par P. Huglin et C. Schneider [1998]²².

22. Les auteurs choisissent de les exposer par « ordre croissant des facteurs pris en compte » (repris ici). Les références mentionnées dans cette partie sur les indices climatiques sont indiquées dans l'ouvrage [Huglin et Schneider, 1998].

Les degrés-jour de Winkler (1962)

À l'origine, les *degrés-jour* proposés par Winkler (1962) ont été pensés pour définir des types de régions viticoles en Californie, à partir de la somme des températures moyennes journalières supérieures à 10°C enregistrées d'avril à octobre²³ (Encadré I.4). Par la suite, étendue à l'ensemble des vignobles mondiaux, cette méthode a permis de définir cinq zones : des conditions climatiques les moins optimales aux meilleures (Tableau I.1). Dans le cas de la France, Reims, dont la somme des températures actives est de 993°C [Galet, 2000], se classe dans le premier type de région viticole, tout comme Bordeaux. Pourtant le vignoble bordelais ne connaît pas le même climat que celui de Champagne. Cet exemple illustre une limite de cette typologie portant sur les *aptitudes thermiques* d'un milieu viticole²⁴.

Tableau I.1 : Les cinq zones viticoles définies à partir de l'indice de Winkler (1962)

	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...

Source : d'après [Huglin et Schneider, 1998 ; Galet, 2000]

Le produit héliothermique de Branas

D'autres critiques de la méthode des degrés-jour, certes d'utilisation simple, sont mentionnées, telle la non prise en compte de la durée du jour [Huglin et Schneider, 1998]. Celle-ci est, par contre, intégrée dans l'indice héliothermique de Geslin (1944) adapté à la vigne par J. Branas, G. Bernon et L. Levadoux [1946]. Appelé alors le *produit héliothermique de Branas*, cet indice, plus adapté aux vignobles de climat tempéré froid, est fonction des températures actives et de la durée moyenne du jour²⁶. Donnons sa valeur pour quelques villes situées à proximité de vignobles français : 2.9 à Angers, 4 à Bordeaux, 5.2 à Montpellier [Ribèreau-Gayon et Peynaud, 1971]. L'isohéliotherme 2.6 est souvent retenu comme la limite septentrionale de la viticulture en Europe occidentale et centrale (Carte I.1). Avec une des plus faibles valeurs des vignobles français, le vignoble champenois est situé sur cette limite [Personnic, 1999].

23. Cette somme est calculée à partir des moyennes mensuelles [Huglin et Schneider, 1998].

24. P. Galet [2000] propose de scinder en deux cette première classe.

25. Les seuils indiqués peuvent légèrement différer selon les ouvrages (par exemple, pour P. Galet [2000] : 1370, 1649, 1927 et 2204°C).

26. L'équation est $XH.10^{-6}$ où X est la somme de ces températures actives et H la somme des longueurs des jours, pendant la période où les températures moyennes journalières sont supérieures à 10°C [Huglin et Schneider, 1998].

L'indice de Huglin (1978)

Une amélioration du produit héliothermique de Branas a été proposée par Huglin (1978) qui ajoute une information relative aux températures maximales et un coefficient de longueur du jour²⁷. La limite inférieure des possibilités de viticulture est atteinte pour un indice d'à peu près 1 400 [Huglin et Schneider, 1998] et la valeur pour Reims (1 500) est la plus faible des vignobles français [Personnic, 1999].

Signalons qu'il existe d'autres indices bioclimatiques de la vigne : ceux de Constantinescu [1967] et de Hidalgo (1980), référencés dans [Huglin et Schneider, 1998].



Carte I.1 : Limite septentrionale de la culture de la vigne en Europe d'après l'indice de Branas, Bernon et Levadoux (1946)

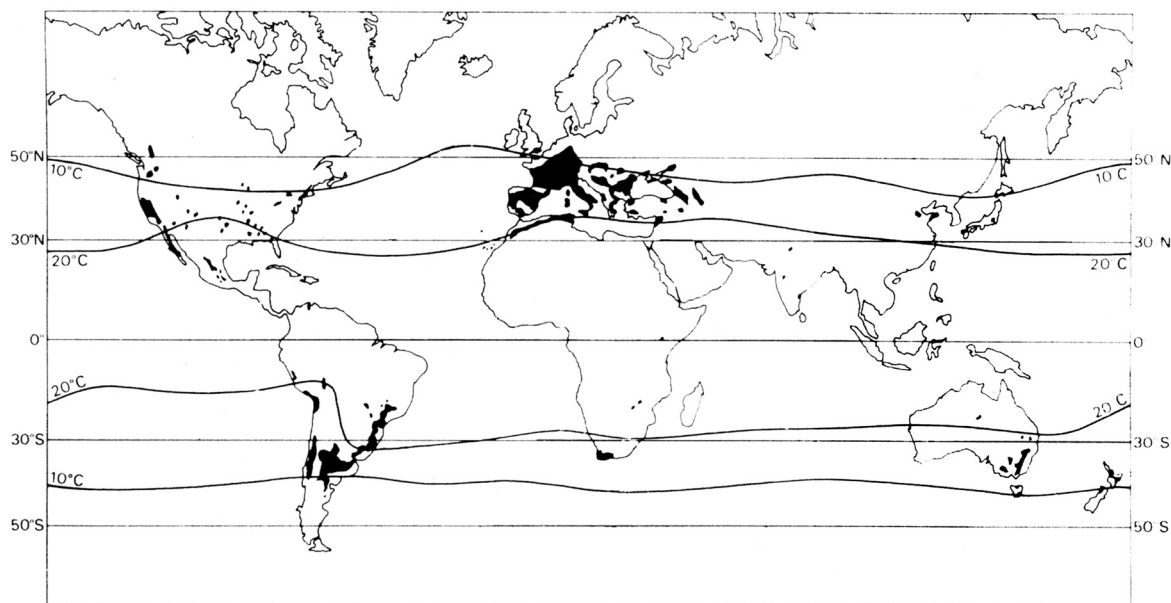
Source : [Galet, 2000]

Les trois indices bioclimatiques de la viticulture, les degrés-jour de Winkler, le produit héliothermique de Branas et l'indice de Huglin, inscrivent le vignoble champenois à la limite septentrionale de la viticulture.

27. L'indice est $\sum_{01/04}^{30/09} \frac{(T_m - 10) + (T_x - 10)}{2} \cdot K$ 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 (variant de 1.02 à 1.06 entre 40 et 50° de latitude) [Huglin et Schneider, 1998]. Pour exemple : Angers 1 650, Colmar 1 730, Bordeaux 2 100, Montpellier 2 250, Perpignan 2 350.

I.1.3 - Répartition mondiale des vignobles

Dans la première édition de son *Atlas mondial du vin*, H. Johnson [1979] indique que 1% de la population mondiale travaille dans la culture de la vigne ou dans l'élaboration et la commercialisation du vin²⁸. Actuellement, les vignobles représentent un peu moins de huit millions d'hectares, soit environ 0.5% des surfaces cultivées dans le monde [Données FAOSTAT, année 2002²⁹]. Situés, à l'origine, sur le pourtour méditerranéen, les vignobles sont présents actuellement dans plus de 60 pays et sur tous les continents, mais restent très localisés comme le montre la carte de répartition des vignobles dans le monde (Carte I.2³⁰).



Carte I.2 : La répartition mondiale des vignobles au début des années 1990

Source : [Unwin, 1991]
Avec les isolignes de températures moyennes annuelles 10 et 20°C.

Compte tenu des exigences climatiques des plantes et de la répartition des climats, des aires de culture s'individualisent à l'échelle planétaire [Gilbank, 1974]. Nous avons vu précédemment que la vigne nécessite une température et un ensoleillement suffisants pour assurer la maturation de ses raisins. Par conséquent, la viticulture n'est pas possible à toutes les latitudes. Ainsi, il est courant de lire que les zones viticoles s'organisent en deux bandes parallèles : l'une entre les latitudes 30° et 50°N et l'autre entre les 30° et 40°S³¹ (Carte I.2). Sur cette carte, T. Unwin [1991] a rajouté les isolignes des températures moyennes annuelles de 10 et 20°C afin de souligner leur caractère limitant. En dessous d'une moyenne annuelle de 10°C, la vigne peine à se maintenir en raison des gelées hivernales ou printanières et de l'apport insuffisant de chaleur pour atteindre le stade de la maturité. À l'inverse, la limite sud dans l'hémisphère nord (nord dans l'hémisphère sud) de la

28. Pour Lichine [1983], le vin est un moyen d'existence pour 37 millions d'individus (soit 0.8% de la population de 1983 ; ONU, 1993).

29. [<http://apps.fao.org/faostat/>], dernière mise à jour : mai et juillet 2004.

30. Cette carte mentionne la localisation des vignobles et non leur importance. Par exemple, le vignoble sud-africain, pourtant huitième producteur mondial en 1999 [Dutruc-Rosset, 2001], ne se distingue pas fortement ici (localisation restreinte).

31. P. Galet [2000] donne l'exemple de vignobles situés à la limite de la viticulture : en Allemagne, au sud de Bonn (50°40'N) ; dans la vallée de l'Okanagan au Canada (50°N) ; en Tasmanie (42°S).

viticulture s'explique par la fréquence du grillage et également par l'absence de repos hivernal qui, en augmentant le nombre et la rapidité des cycles végétatifs, ne permet pas une maturation complète du raisin [Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971].

Toutefois, les facteurs de la répartition des vignobles mondiaux sont multiples : les contextes historiques³², économiques, sociaux, culturels, religieux ou encore l'environnement physique sont souvent mentionnés dans la littérature. Ch. Pomerol [1984] cite le climat, l'exposition, la nature du terrain et la tradition pour expliquer l'origine du maintien ou de la disparition d'un vignoble. Pour R. Crist (1960) cité par J.P. Dickenson et J. Salt [1982], le développement de l'industrie du vin a été influencé moins par l'environnement physique que par une large palette de facteurs historico-politiques, comme c'est le cas en Champagne. Ainsi, les formes spatiales actuelles de la production de vin peuvent être expliquées par la diffusion de la viticulture en association avec les conquêtes, la religion et les échanges commerciaux.

Au-delà de ces limites très générales de la viticulture à l'échelle du globe, le macroclimat permet d'expliquer également la répartition des cépages, de certaines pratiques œnologiques et des types de vin [Galet, 2000]. Par exemple, les vins rouges sont élaborés dans les régions plutôt chaudes, alors que les vins blancs le sont dans des régions plus froides (vignobles d'Alsace, de Champagne, d'Allemagne) :

« Ceci s'explique par le fait que la couleur demande davantage d'énergie solaire pour se former que le sucre ; de plus les vins blancs doivent conserver une certaine acidité qui leur confère une note de fraîcheur, or les acides ont tendance à se brûler rapidement en cours de maturité sous les climats chauds. » [Crespy, 1987]

Ainsi, les besoins thermiques des cépages sont l'élément le plus important de leur répartition dans les différentes régions viticoles [Huglin et Schneider, 1998]. De plus, le macroclimat explique certaines pratiques culturelles et œnologiques. On citera, par exemple, la chaptalisation³³ qui permet de compenser la baisse de la teneur en sucre entraînée par le retard de la maturation, la hauteur des vignes, le moment de la taille ou encore l'espacement des ceps pour favoriser l'apport énergétique du soleil [Johnson, 1979].

En somme, le macroclimat définit les espaces où la viticulture est possible. D'ailleurs, les divers indices climatiques exprimant les potentialités viticoles d'une région, énumérés précédemment, ont été définis et sont valables à cette échelle macroclimatique. Cependant, la carte de la répartition mondiale des vignobles (Carte I.2) montre qu'à l'intérieur de ces bandes latitudinales où la viticulture est possible, toutes les régions ne produisent pas du vin. La localisation des vignobles dans des régions bien délimitées s'explique, en partie, par l'influence du mésoclimat et du microclimat [Crespy, 1987].

32. Se reporter aux ouvrages de R. Dion [1990], de J.-F. Gautier [1996] ou encore de H. Johnson [1990].

33. La chaptalisation est une pratique œnologique qui consiste à ajouter du sucre dans le moût, avant ou pendant la fermentation, pour augmenter la teneur en alcool d'un vin. Depuis 1972, l'INAO définit chaque année le taux de sucre admis par région viticole.

I.2 - Facteurs méso et micro-climatiques de la répartition des vignobles

Même si la viticulture n'est possible que sous certains types de climat, compte tenu des exigences climatiques de la vigne, cette plante a de grandes facultés d'adaptation aux conditions climatiques [Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971]. Aussi, est-elle cultivée sous divers climats : tempéré océanique (Bordeaux), tempéré froid (Tokay), méditerranéen (Chianti), de montagne, etc. Par exemple, les vignobles bourguignon, californien ou encore de la région d'Auckland (en Nouvelle-Zélande) ne rencontrent pas les mêmes conditions climatiques (Figure I.4). Le diagramme ombrothermique de Dijon montre des températures hivernales beaucoup plus froides. Quant à la Californie, elle connaît une sécheresse estivale alors que Auckland est sous l'influence d'un climat humide et chaud. Cette diversité des climats où est cultivée la vigne conduit à une diversité des cépages, des types de vin ou encore des pratiques culturales.

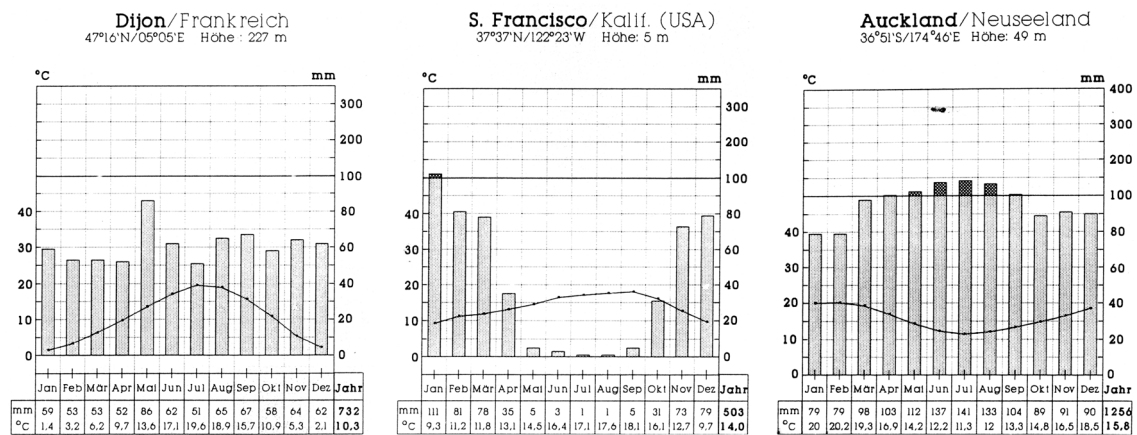


Figure I.4 : Diagrammes ombrothermiques de Dijon, de San Francisco et d'Auckland (moyennes sur 1961-1990)

Source : [Strässer, 1998-1999]

Pour Auckland, l'échelle des précipitations n'est pas la même que pour les deux autres villes.

Pour les vignobles situés à la limite de la viticulture (à l'échelon macro), tel le vignoble champenois, seul un climat local particulier va rendre possible leur implantation [Branas *et al.*, 1946]. Ce climat local est créé par l'altitude, la topographie et l'exposition du terrain, par la proximité des fleuves, des nappes d'eau et des forêts, ou encore par la nature du sol [Reynier, 1991 ; Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971]. Nous souhaitons rappeler ici l'influence de ces différents facteurs.

I.2.1 - Les facteurs topographiques

L'altitude

L'altitude modifie le climat puisqu'elle s'accompagne d'un rayonnement solaire plus élevé, de températures plus basses, de vents plus forts et de brouillards moins fréquents. Plus le vignoble s'approche de la limite climatique septentrionale de culture, plus l'influence de l'altitude devient importante. Ainsi, J.-M. Clément [1981] indique que la limite altitudinale de la viticulture se situe en France et en Suisse (aux latitudes tempérées) à environ 900 m,

alors que les vignobles en Équateur sont situés entre 2 500 et 3 500 m (0-2°S). L'altitude, facteur limitant des vignobles établis sous climats tempérés frais, est donc bénéfique pour les vignobles sous climats chauds et corrige les effets de la latitude (augmentation de l'acidité du vin ; rétablissement de la périodicité des phases végétatives) [Galet, 2000 ; Huglin et Schneider, 1998].

L'exposition

L'exposition d'un coteau viticole intervient à travers trois sortes d'action : les effets héliothermiques, c'est-à-dire la quantité et l'intensité des rayons solaires reçus par la vigne, les risques de gelées et ceux de grillage [Reynier, 1991]. De ce fait, au-delà du 46°N, P. Huglin et C. Schneider [1998] précisent que le développement et le maintien de la vigne ne peuvent se faire qu'avec une bonne exposition (permettant d'améliorer la réception du rayonnement solaire). Ainsi, les orientations nord peuvent contrarier la viticulture dans les régions septentrionales, alors que dans les régions plus chaudes, elles peuvent diminuer les risques de grillage [Galet, 2000]. Les orientations sud-est, bien ensoleillées et dès le matin, sont réputées très favorables à la vigne :

« Les premiers rayons du soleil boivent la rosée et l'humidité des grappes, préviennent le froid qui résulte de l'évaporation à l'apparition de la chaleur diurne, colorent les grains sans les griller, tandis que, le soir, leur ardeur est masquée de bonne heure. » [Marres, 1950]

Outre son influence vis-à-vis du rayonnement solaire, l'orientation d'un coteau peut créer des positions d'abri face aux vents dominants. P. Galet [2000] mentionne ainsi la position nord des grands crus (Mailly, Verzenay, Rilly...) de la Montagne de Reims qui les soustrait à la fréquence des vents d'ouest et de sud-ouest.

Les formes topographiques

Les vignobles mondiaux sont localisés sur différentes formes du relief : vallées étroites, amphithéâtres (microclimats abrités), cuvettes et dépressions, plaines et coteaux. Chacune de ces formes topographiques va influencer sur le climat local des vignobles. Par exemple, pour la situation des vignobles sur les coteaux³⁴ :

« Les côtes forment souvent le versant d'une vallée où coule un fleuve ou une rivière ou le versant d'un massif. Leurs caractéristiques générales tiennent à la pente, à l'altitude et à l'orientation, mais elles sont modifiées par les vallées transversales, les combles, les ravins ou les changements de pente qui déterminent des microclimats plus ou moins favorables. Le sol y est moins fertile qu'en plaine, les récoltes sont donc moins abondantes et plus sucrées. L'ensoleillement y est meilleur et plus long, car les brumes matinales s'y dissipent plus rapidement que dans le fond des vallées ; enfin les coteaux sont moins sensibles aux gelées printanières et aux brouillards de l'automne. » [Galet, 2000]

Ainsi en France, les vignobles septentrionaux, tel celui de la Champagne, sont très souvent implantés sur les coteaux afin de maximiser l'apport énergétique du rayonnement solaire et de minimiser l'aléa gélif, alors que dans les régions méditerranéennes où le climat est beaucoup plus favorable à la viticulture, les plaines y facilitent les pratiques culturales.

34. La citation de Virgile *Bacchus amat colles* (la vigne aime les coteaux) est souvent reprise pour affirmer que les vignobles de coteaux produisent les meilleurs vins [Galet, 2000].

I.2.2 - La végétation

D'une manière générale, la végétation peut influencer sur plusieurs variables climatiques [Guyot, 1997]. Par exemple, les forêts diminuent l'amplitude de la variation diurne de la température et peuvent parfois abaisser de 1°C la température de l'air [Galet, 2000]. Enfin, le voisinage de forêts et de crêtes boisées, qui entretiennent les réserves en eau, peut s'avérer favorable à la vigne en climat sec et, à l'inverse, néfaste en climat humide [Reynier, 1991].

I.2.3 - La proximité des surfaces en eau

Les mers ou océans

La présence d'un océan ou d'une mer à proximité augmente l'humidité relative, ce qui favorise les risques phytosanitaires (oïdium) [Galet, 2000]. Quant aux températures, cette proximité diminue leur amplitude des variations annuelle et quotidienne, ce qui peut atténuer ainsi les rigueurs de l'hiver. En outre, l'abaissement de la température moyenne en été (très souvent défavorable pour la vigne) peut favoriser le climat des vignobles aux basses latitudes (par exemple les vignobles sur les côtes espagnoles, italiennes, algériennes, ou encore une partie du vignoble du Pérou le long du Pacifique³⁵) [Galet, 2000].

Les lacs et cours d'eau

De la même manière que les océans, la proximité de cours d'eau et de lacs régularise la température (diminution des amplitudes) et ralentit les refroidissements nocturnes [Reynier, 1991 ; Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971]. Pour de nombreux auteurs, cette proximité est considérée comme un facteur favorable à la production de vins de qualité :

« On constate d'ailleurs que les meilleurs crus du Médoc sont situés sur les croupes bordant la vallée de la Gironde ou le cours des jalles. L'importance de cette situation privilégiée est connue empiriquement depuis fort longtemps. On a coutume de dire dans le pays que, pour donner du bon vin, "la vigne doit voir la rivière". Si c'est pour des raisons historiques et commerciales que les vignobles se sont autrefois établis le long des fleuves (Dion, 1959 ; Enjalbert, 1954), si de nos jours on considère que les plans d'eau jouent un rôle important dans la régulation des températures, c'est aussi par leur rôle dans le drainage des sols que les cours d'eau ont, du moins en Médoc, une influence sur la qualité des vins. » [Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971]

On pourra citer comme exemple les vignobles près du lac Ontario au Québec, situés très au nord mais bénéficiant d'une amplitude thermique bien moins grande que dans des régions aux mêmes latitudes [Deshaies et Dubois, 1996].

I.2.4 - Le sol

D'autres facteurs peuvent encore influencer sur le climat à une échelle plus fine, microclimatique. Par exemple, le sol, notamment en fonction de sa nature, de sa conductivité thermique ou encore de sa couleur, modifie les températures. J. Ribéreau-

35. Dans ce dernier exemple, la diminution de la température de l'air due à la présence de l'Océan Pacifique est renforcée par le courant froid de Humboldt (alors que le dérive nord-atlantique réchauffe les côtes occidentales françaises) [Clarke, 1995].

Gayon et É. Peynaud [1971] donnent l'exemple des sols clairs (certains sol calcaires, sols graveleux) qui absorbent peu de chaleur mais en réfléchissent beaucoup : les températures maximales diurnes y sont élevées et les risques de grillage importants.

Les caractéristiques du sol influent donc sur la répartition des vignobles mais aussi sur les pratiques culturales [Crespy, 1987]. Par exemple, dans les vignobles septentrionaux, la culture de la vigne au ras du sol permet de maximiser l'apport en chaleur [Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971] : la température de l'air mesurée en été à 0.5 m au dessus du sol peut être supérieure de 2°C à celle mesurée à 1.5 m [Branas *et al.*, 1946]. Notons que ce choix de pratiques culturales augmente dans le même temps l'aléa gélif lors des situations radiatives (*quasi*-absence de vent, ciel clair).

Enfin signalons que les conditions édaphiques sont très souvent mentionnées lorsque la qualité d'un vin est évoquée (Encadré I.2) :

« Chaque cru possède un microclimat particulier qui, associé à différents types de sols et de cépages, donne au vin sa personnalité. » [Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971]

En résumé, la répartition des vignobles, à l'échelle planétaire, est liée aux conditions climatiques moyennes : les exigences de la vigne vis-à-vis des températures, de l'ensoleillement et de l'apport hydrique délimitent grossièrement les zones où la culture de la vigne est *a priori* possible [Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971]. À l'intérieur de ces bandes, plusieurs facteurs influençant le climat local expliquent la localisation des grandes régions viticoles. Signalons que nous n'avons pas évoqué les facteurs microclimatiques au niveau de la parcelle, voire des ceps. Ce domaine est celui des agronomes (par exemple, P. Personnic [1999] sur la variabilité microclimatique induite par le relief en Champagne).

Enfin, il est important de mentionner que l'homme peut modifier les effets du milieu climatique [Gilbank, 1974], par exemple en irriguant ses cultures, en les protégeant des gelées ou des vents dominants, ou encore en choisissant les variétés les plus adaptées au milieu physique.

1.3 - Viticulture et variations temporelles

Comme nous venons de l'évoquer précédemment, des paramètres méso- et microclimatiques modifient la répartition, à une macro-échelle, des vignobles. Ici, nous souhaitons aborder les relations entre la vigne et le climat en fonction de l'échelle de temps. En effet, outre les grandeurs climatiques moyennes délimitant la répartition de la viticulture, les conditions météorologiques de l'année jouent également un rôle sur la maturation des raisins et plus généralement sur la qualité d'une récolte [Pomerol, 1984 ; Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971] :

« Le temps, qui varie sans cesse, est le facteur capital de la viticulture. Presque tous les autres sont plus ou moins constants et prévisibles. C'est donc le temps qui fait le succès ou la ruine de la vendange... » [Johnson, 1979]

Ainsi, le profil climatique d'une année influe sur la composition de la vendange et donc sur les caractéristiques sensorielles du vin [Jacquet et Morlat, 1997], d'où l'importance des *millésimes*.

Nous aborderons ici cette variabilité interannuelle à travers la description de la phénologie de la vigne. Puis, nous insisterons sur les contraintes climatiques pouvant modifier sensiblement le rendement et la qualité d'une récolte.

I.3.1 - Phénologie de la vigne

La *phénologie* est l'étude des phénomènes périodiques³⁶ de la vie végétale en rapport avec le climat [Soltner, 1995]. La première étude quantitative sur les effets cumulés des températures sur la croissance d'une plante est attribuée à R.-A. Ferchault de Réaumur en 1735 :

« [...] de deux années où les pluies auront été distribuées en égale quantité, & à peu près de la même manière, & cela dans les mois où elles font les plus nécessaires, de ces deux années, dis-je, la plus précoce pour les grains [blé] & pour les fruits [vigne] fera celle qui pendant les mois d'Avril, Mai & Juin aura eu une plus grande somme de degrés de chaleur. » [Réaumur, 1735]

Depuis, de nombreux chercheurs s'y sont intéressés. D'après G.V. Jones et R.E. Davis [2000], comprendre la phénologie d'une plante permet de déterminer la capacité d'une région à produire cette culture. Il est également possible d'estimer les rendements ou encore de prévoir les alertes sanitaires (ex : allergies au pollen).

Le cycle végétatif annuel de la vigne débute au printemps, après la période hivernale de repos végétatif (Figure I.5). Cette levée de dormance³⁷ se produit généralement en avril, la date variant selon les régions, les années et les cépages. À ce stade repère appelé le *débourrement*, le bourgeon latent initié l'année précédente éclate et se développe progressivement, laissant sortir la *bourre* [Carbonneau, 1992]. Pour que cette transformation du bourgeon d'hiver en bourgeon *dans le coton* apparaisse (Figure I.6), plusieurs auteurs [Branas, 1974 ; Carbonneau, 1992 ; Winkler *et al.*, 1974] avancent que la température journalière moyenne (sous abri) pendant les jours précédents doit être comprise entre 8 et 12°C (selon les cépages et les conditions de repos hivernal). Durant la phase de croissance qui suit, la vigne puise dans le sol les sels minéraux et l'eau nécessaires. Pendant cette période printanière, les bourgeons de la vigne sont particulièrement sensibles à des températures froides. Des vignobles situés au nord, comme la Champagne, peuvent alors connaître des dégâts gélifs importants.

36. Très souvent, les études sont relatives à l'année. Toutefois, plusieurs auteurs, dont Carbonneau [1992], insistent également sur les effets pluri-annuels des conditions climatiques.

37. La dormance est l'état des organes végétaux caractérisé par un arrêt de la croissance alors que les activités physiologiques se poursuivent.

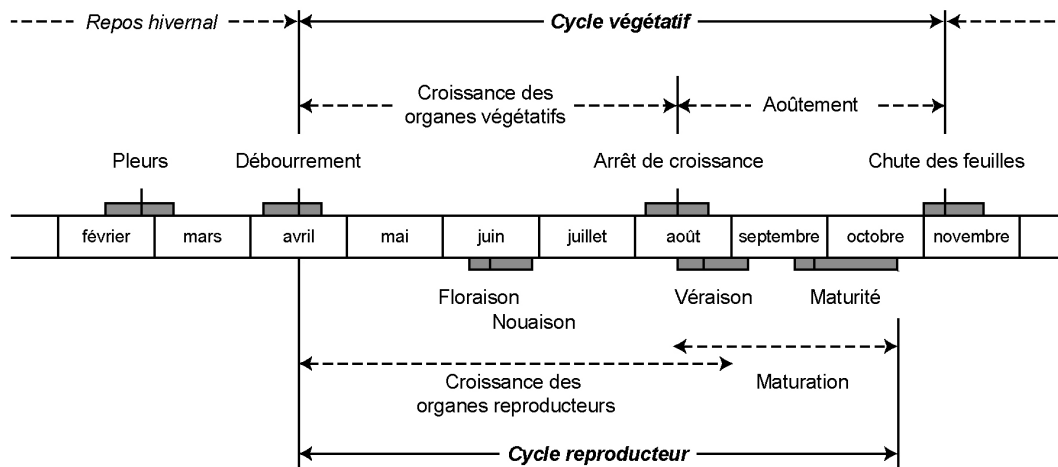


Figure I.5 : Les cycles végétatif et reproducteur de la vigne

Source : [Reynier, 1991]

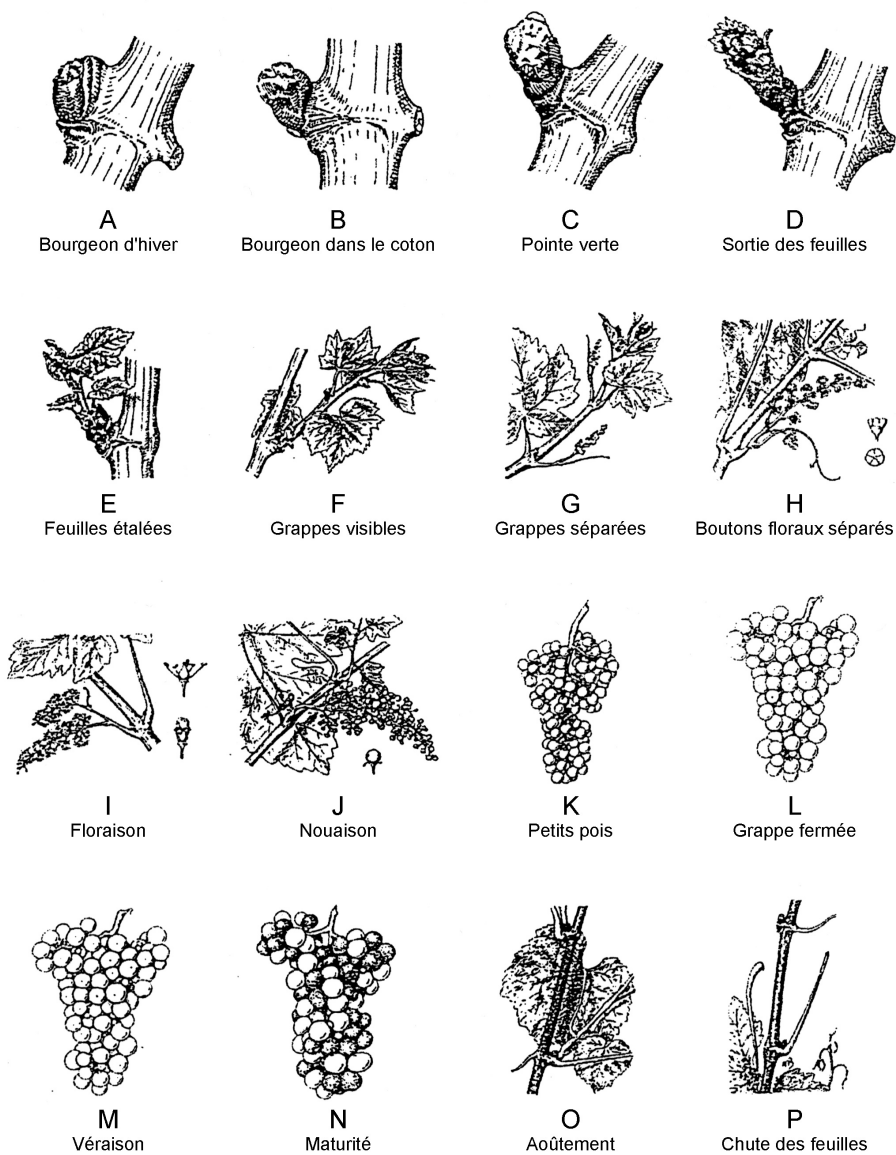


Figure I.6 : Les stades repères de la vigne

Source : [Baggiolini, 1952]

Le stade phénologique suivant, la *floraison*, constitue également un stade critique du cycle végétatif : si le temps est humide et froid en juin (température moyenne inférieure à 15°C [Winkler *et al.*, 1974]), il peut se produire un défaut de *nouaison*³⁸ des grappes qui correspond à une *coulture* (disparition totale d'une partie des baies) ou à un *millerandage* (nouaison incomplète) [Clément, 1981]. Les conditions climatiques optimales pour la floraison sont un temps assez chaud et sec au mois de juin, les seuils thermiques variant selon les auteurs : 18-25°C [Crespy, 1987] ; 20-30°C [Carbonneau, 1992] ; seuil moyen de 17,2°C [Branas, 1974] ; températures supérieures à 10°C pendant 7 jours au moins [Buttrose et Hale, 1973].

La croissance des organes de la plante se poursuit jusqu'en août, jusqu'au stade de la *véraison* où, sous l'action nécessaire d'une bonne exposition solaire et d'une sécheresse relative³⁹, les grappes changent de couleur [Carbonneau, 1992]. Alors vient la période de *maturation* caractérisée par la synthèse des sucres et la dégradation des acides (Figure I.5) [Clément, 1981]. Les températures et les précipitations jouent encore un rôle primordial : il doit faire au moins 20°C pour que l'augmentation de la teneur en sucre augmente et les pluies ne doivent pas dépasser 1.5 mm par jour pour éviter une dilution des sucres [Huglin et Schneider, 1998]. La maturité annonce les vendanges et précède de quelques semaines la chute des feuilles, marquant la fin du cycle végétatif et le début du repos hivernal de la plante.

Au-delà de l'étude des relations climat-vigne au cours de l'année, les études phénologiques sont également utilisées pour prévoir la date d'apparition d'un stade phénologique. Par exemple, on estime très souvent des délais moyens de 165 jours avec une moyenne des températures de 18°C entre les stades de débourrage et de maturité (vendanges), de 100-108 jours entre floraison et maturité (avec une moyenne de 19°C) et de 40 jours entre véraison et maturité [Clément, 1981 ; Marres, 1950]. D'autres chercheurs ont pris en compte les sommes de température (Encadré I.4) nécessaires à l'apparition des stades phénologiques (A. Angot en 1885 cité par P. Galet [2000] ; B. Besselat [1987], V. Bonnardot [1997] M.S. Buttrose et C.R. Hale [1973] ou encore A. Carbonneau [1992]).

I.3.2 - Contraintes climatiques

Plusieurs facteurs climatiques peuvent limiter la production viticole ou encore sa qualité. En premier lieu, des *anomalies climatiques*⁴⁰ persistantes ont des répercussions importantes sur les récoltes : par exemple, des températures froides sur une longue période empêcheront la vigne de parvenir à sa maturité.

« À côtés de ses effets cumulés, un autre type de risque, plus spécifiquement lié à la météorologie au jour le jour et directement lié à un phénomène météorologique paroxystique, est susceptible de provoquer des dégâts irréversibles sur les récoltes. » [Choisnel, 2002a]

38. La nouaison est le stade où se forme le fruit qui succède à la fleur.

39. Le viticulteur champenois craint plus une pluviosité importante pendant la véraison qu'une sécheresse [Personnic, 1999].

40. Une anomalie climatique est souvent définie comme un écart important, positif ou négatif, des valeurs d'un paramètre par rapport à la moyenne ou à la normale.

Ces *contraintes climatiques « dynamiques »* [Marchand, 1980]⁴¹, appelés *phénomènes paroxystiques* [Choisnel, 2002b], *accidents climatiques* ou encore *calamités atmosphériques* [Pérarnaud et Raynal, 1991], sont la grêle (effets très localisés dans le temps et dans l'espace)⁴², les vents forts (causant des dégâts mécaniques), la sécheresse, les fortes chaleurs et à l'inverse les basses températures. La sensibilité de la plante varie, comme nous l'avons évoqué précédemment, selon le stade de développement et le type de culture (pour la vigne : Figure I.7).

		DEVELOPPEMENT DU VEGETAL				ELABORATION ET DEVELOPPEMENT DES BAIES				REPOS						
		F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J			
		Pleurs		Débourrement				Floraison		Croissance des baies		Vendanges				
								Nouaison		Véraison		Chute des feuilles				
Températures	contrainte climatique négative	T < -2,5°		T < -1,6°		T > 40° grillage						T < -1,8° gel des rameaux				
	contrainte climatique positive	11° < T au sol < 14°		7j : T < 10°		T air > 17°		5-7j > 15° ou qqs h 25-32°		amplitude thermique forte		bonne synthèse des tanins				
Ensoleillement	contrainte climatique négative	épuisement de la réserve coulure														
	contrainte climatique positive					détermine la photosynthèse				différenciation florale bonne				bonne maturation accumulation des sucres		
Vent		brise les rameaux				dessèche les baies										
Précipitations	contrainte climatique négative					diminution de la photosynthèse				limonage des baies						
	orage					réduit retarde la floraison				maladies cryptogamiques						
	grêle	abime feuilles et fruits favorise le développement des maladies cryptogamiques														
	contrainte climatique positive	bon départ végétation				favorise la maturation										

Figure I.7 : Les principales contraintes climatiques dans le cycle végétatif de la vigne

Source : [Le Berre et Uvietta, 1989]
 Les seuils indiqués sur ce graphique sont légèrement différents de ceux mentionnés dans le texte

41. Pour J.-P. Marchand [1980], la contrainte physique est une interaction entre un élément naturel et un espace utilisé par l'homme. Il distingue les *contraintes statiques* et les *contraintes dynamiques* (en reprenant l'opposition *statique/dynamique* de É. Reclus sur les milieux et de R. Brunet sur les discontinuités). Les contraintes statiques traduisent les interactions entre l'environnement socio-économique et le milieu physique ; présentant une relative stabilité temporelle (rythme saisonnier), elles vont déterminer la culture de la vigne ou non. Les *contraintes dynamiques*, comme le gel ou la sécheresse, ne sont pas caractérisées par une régularité temporelle et sont susceptibles de variations à exprimer sous forme de probabilité ou de fréquences.

42. C'est un risque assurable. Voir la thèse de F. Vinet : *Le risque-grêle en agriculture*, 2000, Paris : Éd. Tec & doc, 237 p.

Dans le vignoble de Champagne, la principale contrainte climatique est celle des gelées tardives au printemps, entre le débourrement et la floraison. Des dégâts apparaissent lorsque les températures sous abri atteignent -2.5°C [Carbonneau, 1992 ; Crespy, 1987 ; Ribéreau-Gayon et Peynaud, 1971]. La lutte contre les gelées printanières est donc un élément capital de la maîtrise de la production en Champagne [Carbonneau, 1992]. Aussi un système de prévision du risque de gel a-t-il été mis en place par le Centre Météo France de la Marne et est opérationnel tous les printemps (III.4.2 - Le système opérationnel de prévision des gelées de printemps par Météo France, p. 70). D'une manière générale, les vignerons tentent de maîtriser les contraintes climatiques par des pratiques et des choix culturels (cépages tardifs dans les vignobles septentrionaux, lutte contre le gel à l'aide de chaufferettes) (II.2.3 - Les moyens de lutte contre le gel, p. 48).

D'autres vignobles sont soumis à des contraintes climatiques différentes : par exemple, la sécheresse en Nouvelle-Galle du Sud et en Australie, les précipitations trop importantes au nord de la Nouvelle-Zélande [Clarke, 1995], une humidité trop importante en Afrique du Sud, en Californie ou encore en Nouvelle-Zélande :

« [En Nouvelle-Zélande], les pluies trop fortes endommagent les raisins et l'humidité favorise les maladies (Mildiou, Botrytis), le gonflement des raisins et une dilution des sucres, le pourrissement et un retard de maturation. De plus les températures sont relativement basses en été par comparaison avec celles de l'hémisphère nord, ce qui est un handicap pour le mûrissement. Les vendanges "humides" donnent un moût plus dilué en sucres, donc un vin de plus faible teneur en alcool, ce qui peut entraîner par la suite des problèmes de conservation du vin » [Salomon, 1999]

L'exemple de J.-N. Salomon [1999] montre également l'influence indirecte des facteurs climatiques sur les maladies cryptogamiques et le développement de parasites animaux. Des pratiques culturales adaptées et des systèmes de prévision des risques phytosanitaires permettent alors de lutter contre ces éléments perturbateurs.

En somme, l'étude des relations climat-vigne ne peut se faire sans la dimension temporelle. En particulier, la vigne appartient aux espèces cultivées les plus sensibles aux variations climatiques interannuelles, ce qui entraîne une forte variabilité des rendements, tant qualitativement que quantitativement [Carbonneau, 1992]. Ces relations entre ces rendements et les conditions climatiques annuelles sont un sujet d'étude classique en phénologie. Nous citerons, par exemple, les travaux de N. Gerbier et P. Rémois [1977] sur le vignoble de Champagne.

Conclusion du chapitre I

Ce premier chapitre avait pour objet les relations entre la vigne et le climat. Nous avons montré que les exigences climatiques de cette plante déterminaient des zones de culture à une macro-échelle. Toutefois, cette répartition peut être nuancée par de multiples facteurs intervenant à des échelles plus fines. Enfin, nous avons décrit la temporalité de ces relations climat-vigne. D'une manière plus générale, soulignons que les informations climatologiques et météorologiques sont d'une grande utilité pour l'agriculture : pour évaluer les potentialités agroclimatiques d'une région à une macro-échelle, pour analyser la variabilité interannuelle des productions agricoles ou encore pour décider de certaines pratiques culturales (par exemple, dans la lutte contre le gel).

Chapitre II - LE PHENOMENE DES GELEES

Le gel est défini par l'état de la température lorsqu'elle s'abaisse en dessous de 0°C de l'échelle thermométrique (dans les conditions standard de pression), ce qui provoque la cristallisation/congélation de l'eau [Clément, 1981]. Même si cette définition est présente dans des ouvrages généraux ou spécialisés (agriculture, agronomie), les *gelées* ont une toute autre réalité pour le vigneron ou l'arboriculteur, qui en intègre les répercussions sur la plante. Ces deux approches nous permettent de distinguer le *gel météorologique*⁴³ (températures inférieures à un seuil, le plus souvent 0°C) du *gel agronomique* (dégâts observés sur la plante). De la même façon, on évoquera, pour définir l'intensité d'une gelée, soit la température atteinte, soit les dommages provoqués [Vazart, 1988]. Dans cette recherche, nous nous intéressons principalement au gel météorologique.

La première partie de ce chapitre sera consacrée aux mécanismes physiques des gelées dites *radiatives*, ainsi qu'aux facteurs accentuant ou non ce phénomène. Ensuite, nous aborderons la sensibilité et les répercussions biologiques sur la vigne de ces basses températures. Enfin, nous exposerons plusieurs méthodes permettant d'estimer un aléa gélif.

II.1 - Les gelées radiatives

L'origine d'un fort refroidissement nocturne, pouvant conduire au gel des bourgeons de la vigne, est souvent liée à l'arrivée sur une région d'une masse d'air froid (refroidissement advectif) ou à une déperdition calorifique du sol non compensée par un rayonnement atmosphérique (refroidissement radiatif), les deux phénomènes pouvant se combiner. Après une description très générale de ces types de refroidissement, nous nous intéresserons plus spécifiquement au refroidissement radiatif caractérisé par une forte variabilité spatiale. Nous traiterons alors les mécanismes physiques lors des gelées radiatives, par nuits de ciel clair et de vent calme. Les facteurs locaux ont dans ce cas une influence primordiale sur le refroidissement et peuvent occasionner des différences thermiques importantes dans l'espace.

43. M.-F. de Saintignon [1998-1999] l'appelle le *gel thermique*.

II.1.1 - Les différents types de refroidissement de l'air

Il existe trois grands types de refroidissement de l'air pouvant amener à des gelées.

Le refroidissement par évaporation

Le premier est dû à une évaporation de l'eau présente à la surface du sol et des végétaux et à une transpiration au niveau des stomates des plantes. Cette évapotranspiration consomme une forte quantité d'énergie, donc de chaleur, prélevée à la surface du sol et des végétaux. Toutefois, si ce mécanisme accroît le refroidissement de l'air, il reste minime⁴⁴, à lui seul, dans la formation des gelées [Cellier, 1993]. L'auteur souligne la rapidité de ce processus en début de nuit (juste après le coucher du soleil), alors qu'en fin de nuit, la température du point de rosée pouvant être atteinte, une condensation à la surface du sol et des plantes libère de l'énergie et tend donc à limiter le refroidissement. De plus, un refroidissement de l'air entraîne une baisse de sa capacité évaporante, et par conséquent une diminution du processus de refroidissement. Aussi M. Bonhomme et R. Rageau [1993] ont-ils montré que la formation des gelées par ce type de refroidissement reste un phénomène rare en France.

Le refroidissement advectif

Il est provoqué, à l'échelon synoptique, par l'arrivée sur une région d'une masse d'air froid, due au passage de fronts froids ou à l'invasion d'air polaire. Souvent qualifié de *général*, ce type de refroidissement conduit à une homogénéité spatiale des températures. Les quantités d'énergie mises en jeu sont tellement importantes qu'elles rendent inefficace la lutte contre les gelées [Kalma *et al.*, 1992]. Ce refroidissement de l'air d'origine dynamique est intense. Il se prolonge souvent sur une longue période, particulièrement lorsque se forme, en conséquence, un anticyclone thermique sur la région bloquant alors le passage des perturbations d'ouest. Ce refroidissement advectif est le mécanisme principal des gelées en hiver, mais il se produit également au printemps. Il aggrave alors fortement l'aléa gélif par radiation ou par évaporation en refroidissant l'ensemble du milieu naturel [Cellier, 1993].

Le refroidissement radiatif

Contrairement à l'advectif, le refroidissement dit *radiatif* ne peut se produire que la nuit et ne se limite qu'à la très basse atmosphère. Il est déterminé par un déficit radiatif du sol et des végétaux : les pertes radiatives importantes dans l'infrarouge au niveau de la surface (du sol et des végétaux) ne sont pas compensées par un flux de conduction dans le sol ni par un rayonnement atmosphérique. Ce processus se manifeste en situation de vent calme (très faible brassage de l'air) et de ciel clair (peu d'effet de serre, voire absence d'un apport radiatif de l'atmosphère en retour). Aussi les gelées de rayonnement se rencontrent-elles principalement en situation anticyclonique. Fréquentes au printemps, elles présentent une hétérogénéité spatiale, même si elles peuvent concerner des étendues importantes. Des paramètres locaux (la nébulosité, l'humidité, le vent, la topographie, la couverture végétale, etc.) peuvent alors induire de fortes différences thermiques entre deux lieux proches [Kalma *et al.*, 1992].

44. Ce type de refroidissement est si négligeable dans la formation des gelées qu'il n'est parfois même pas cité (par exemple, Guyot [1997]).

Il serait inexact de rechercher une seule origine pour un événement gélif. En réalité, les trois types de refroidissement sont souvent combinés. Par exemple, des températures basses au coucher du soleil, dues à un refroidissement advectif, augmentent le risque de gel par rayonnement nocturne lors d'une nuit de ciel clair [Cellier, 1993]. Toutefois, il est bien connu que les refroidissements radiatifs accentuent fortement les contrastes thermiques à l'échelle climatique [Geiger, 1969]. Aussi avons-nous voulu détailler plus précisément les mécanismes physiques en jeu gouvernant ce type de refroidissement.

II.1.2 - Le bilan radiatif

Les gelées radiatives sont provoquées par un fort déficit radiatif, c'est-à-dire par un bilan radiatif négatif à la surface du sol et des végétaux. Ce bilan, défini par la différence entre le rayonnement solaire (direct et diffus) reçu par la terre et le rayonnement terrestre infrarouge réémis vers l'espace, est une des composantes du bilan énergétique de surface.

Le bilan énergétique de surface

Le bilan énergétique de surface dépend de quatre flux : le rayonnement net (ou bilan radiatif), le flux de chaleur latente (changements d'états des corps), le flux de chaleur sensible (ou de convection⁴⁵) et le flux de conduction⁴⁶ dans le sol. Le bilan de ces transferts de chaleur est supposé équilibré à chaque instant en appliquant le premier principe de thermodynamique (conservation de l'énergie) [Choisnel, 1977]. Ainsi, le bilan énergétique peut s'écrire selon ces différentes composantes :

$$R_N + \phi_L + \phi_C + \phi_K = 0$$

où R_N est le rayonnement net (bilan radiatif), ϕ_L le flux de chaleur latente lié à l'absorption et à la libération d'énergie lors des changements de phase (évaporation, condensation, ...), ϕ_C le flux de convection dans l'air et ϕ_K le flux de conduction dans le sol. Chaque flux est exprimé en Watt par unité de surface (m^2) et par unité de temps.

Sans entrer dans les détails de ces différents flux d'énergie, détails qui n'ont pas leur place ici⁴⁷, on peut simplement mentionner que ces flux ont une variation nyctémérale (au cours de la journée). La Figure II.1, extraite des travaux de E. Choisnel [1977], représente les courbes d'évolution de ces composantes pour deux nuits différentes par leur nébulosité et par la vitesse du vent⁴⁸. Retenons que le rayonnement net (R_N) devient positif dès le lever du soleil et négatif environ une heure avant le coucher du soleil. Il est plus important par ciel clair ($400-500 \text{ W/m}^2$) que par ciel couvert (150 W/m^2) [Choisnel, 1977]. Les cycles nyctéméraux des autres flux sont inversés.

45. La convection est définie par le transfert de chaleur dans un fluide par déplacement de celui-ci, sous l'effet d'une variation de température [Beltrando et Chémery, 1995 ; Huglin, Schneider, 1998].

46. La conduction est définie par le transfert de chaleur, de molécule à molécule, avec une vitesse variant selon la conductivité calorifique des milieux [Huglin, Schneider, 1998].

47. Pour plus de détails : [Choisnel, 1977 ; Guyot, 1997].

48. Le sol était alors sec. D'autres mesures ont été effectuées pour un sol humide (cf. [Choisnel, 1977]).

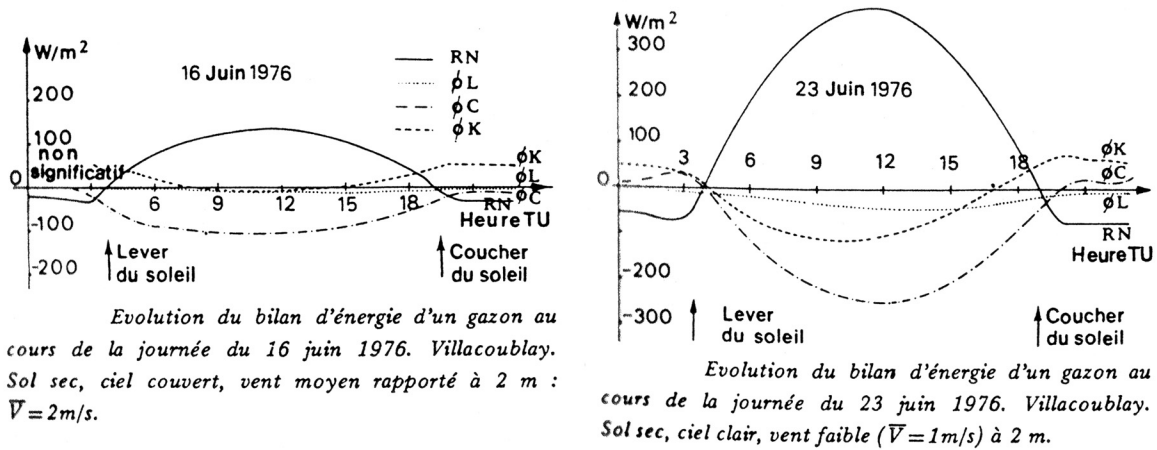


Figure II.1 : Évolution horaire des composantes du bilan énergétique de surface pour deux nuits différentes quant à leur nébulosité

Source : [Choisnel, 1977]

Un bilan radiatif négatif la nuit

Le rayonnement net, appelé également *bilan radiatif*, correspond au bilan de l'ensemble des échanges de rayonnement de courte et de grande longueur d'onde au niveau de la surface du sol [Guyot, 1997]. L'origine de ces flux radiatifs est solaire, atmosphérique et terrestre.

Le bilan radiatif peut ainsi se noter [Choisnel, 1977 ; Guyot, 1997 ; Pérarnaud, Raynal, 1991] :

$$R_N = (R_D + R_d).(1 - a) - (R_T - R_A)$$

où R_N est le rayonnement net, R_D le rayonnement solaire direct, R_d le rayonnement solaire diffus, a l'albédo du sol, R_T le rayonnement terrestre (infrarouge) proportionnel à la puissance 4 de la température du sol d'après la loi de Stephan et Boltzman (Figure II.2) et R_A le rayonnement atmosphérique parvenant au sol (infrarouge).

La nuit, par ciel clair, le rayonnement terrestre R_T est plus important que le rayonnement atmosphérique parvenant au sol R_A . Par conséquent, le rayonnement net devient négatif dans l'équation du bilan radiatif (équation 2). La surface du sol perd alors de l'énergie, donc de la chaleur. Plusieurs auteurs ont cherché à chiffrer ces pertes énergétiques : la surface d'un sol (ou d'un végétal) à 0°C réémettra un rayonnement de 300 W/m^2 , soit une perte énergétique de $2\,600\,000\text{ k cal/heure}$ [AVC, 1991]⁴⁹.

Toutefois, ces pertes peuvent être limitées par le rayonnement réémis par l'atmosphère vers la terre (Figure II.2). Celui-ci est d'autant plus important lorsque l'atmosphère présente une forte humidité. Ainsi, pour les nuits de forte nébulosité, les pertes énergétiques liées au rayonnement terrestre seront diminuées, voire annulées par le rayonnement atmosphérique vers la terre. Le bilan radiatif et énergétique sera alors proche de zéro (Figure II.3) et le refroidissement sera minime. À l'inverse, par temps sec et clair, le rayonnement atmosphérique (vers la terre) sera inférieur à celui réémis par la terre et le bilan énergétique sera négatif. En reprenant l'exemple d'un sol (ou d'une surface végétale) dont la surface est à 0°C , le rayonnement atmosphérique se limite à 200 W/m^2 . La perte par rayonnement infrarouge (terrestre) étant de 300 W/m^2 , le bilan radiatif est de -100 W/m^2 (Figure II.3) ; par conséquent la surface du sol (ou du végétal) se refroidit [AVC, 1991].

49. P. Cellier [1993] évalue cette perte d'énergie à 350 W/m^2 .

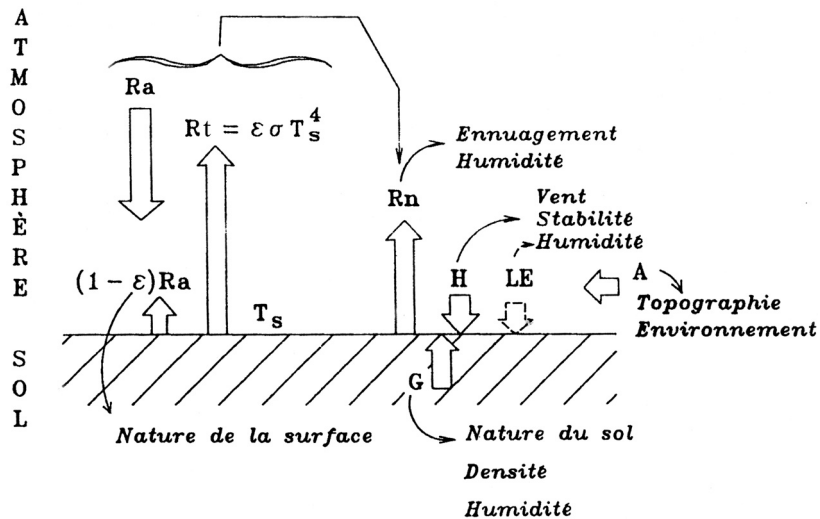


Figure II.2 : Échanges énergétiques à la surface du sol, la nuit, en conditions de gelées de printemps et les paramètres météorologiques ou agronomiques qui les influencent

Source : [Cellier, 1991]

R_a est le rayonnement atmosphérique, R_t le rayonnement émis par la surface du sol, T_s la température de la surface du sol, ϵ l'émissivité de la surface du sol, R_n le déficit radiatif nocturne, G le flux de chaleur provenant du sol, H le flux de chaleur provenant de l'atmosphère et LE le flux de chaleur latente par condensation ou congélation.

De plus, la conduction thermique dans le sol, qui s'effectue de la profondeur vers la surface, peut également pallier le déficit radiatif. Ainsi 80% des pertes sont compensées en situation normale, sans couverture herbacée ou mulch [AVC, 1991].

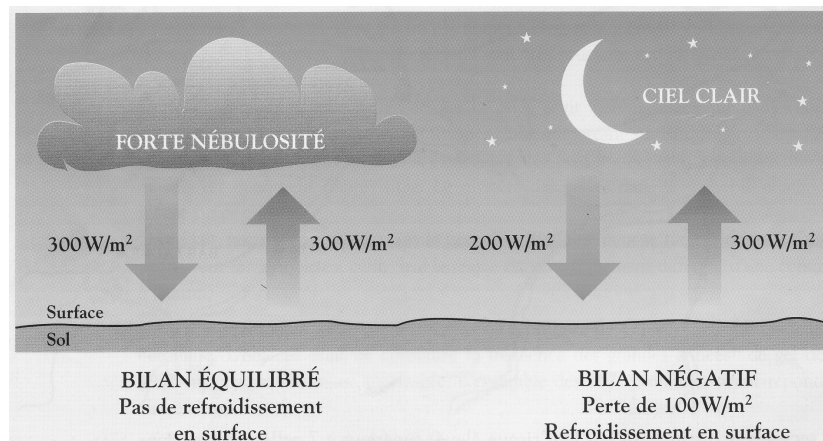


Figure II.3 : Le bilan radiatif et énergétique selon la nébulosité de la nuit

Source : [AVC, 1991]

L'inversion thermique

En l'absence d'un déficit radiatif, la température de l'air décroît avec l'altitude (dans la troposphère), ce qui s'explique par une diminution avec l'altitude de la pression atmosphérique, c'est-à-dire de la densité de l'air (ou encore de l'agitation moléculaire des gaz atmosphériques). Le refroidissement de la surface du sol et des organes végétaux lié à un déficit radiatif entraîne un abaissement de la température de l'air au voisinage de ces surfaces par convection. Ce flux reste limité verticalement, surtout si le vent est faible : l'air refroidi reste près du sol en raison de sa forte densité. Ainsi, les couches d'air proches de ces surfaces basses seront plus froides que celles situées au-dessus : ce phénomène est appelé *inversion thermique* de surface [André et Mahrt, 1982 ; Yamada, 1979]. La

température de l'air va donc s'élever avec l'altitude, jusqu'à une limite, le *plafond d'inversion*, située le plus souvent entre 10 et 20 mètres d'altitude (Figure II.4) L'intensité de l'inversion, l'écart thermique entre le sol et le plafond d'inversion, est proportionnelle au déficit radiatif et s'accroît au cours de la nuit [AVC, 1991]. Le phénomène d'inversion thermique révèle des conditions atmosphériques stables.

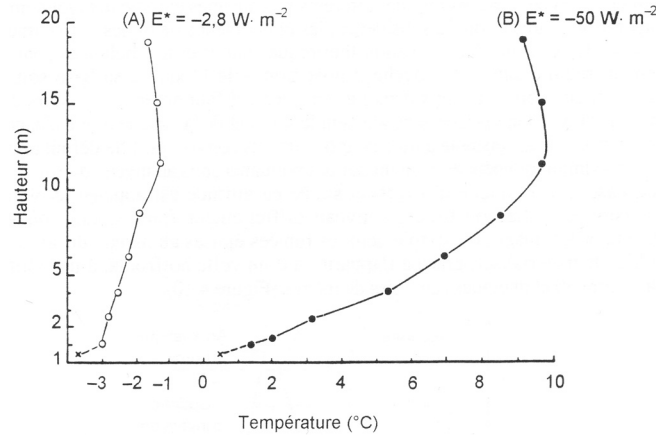


Figure II.4 : Profils verticaux de température déterminés au moment du minimum lors d'une gelée par advection (A) et par rayonnement (B)

Source : [Guyot, 1997] citant Seguin et al. (1975)
Zone de vergers située dans la vallée du Rhône au sud de Vienne ; E^* : rayonnement net.

Les termes du bilan radiatif sont différents d'un lieu à un autre. Plusieurs facteurs peuvent les modifier et donc intervenir sur la répartition spatiale et temporelle des températures minimales, à différentes échelles.

II.1.3 - Les facteurs de la variabilité des températures minimales

De nombreux facteurs, relatifs avant tout aux conditions atmosphériques, à la topographie et à l'état du sol, conduisent à des variations temporelles et spatiales des composantes du bilan radiatif précédemment rappelées et donc plus généralement à une variabilité des températures minimales.

L'humidité de l'air

Le rôle de l'humidité de l'air sur la diminution des températures est double. D'une part, la vapeur d'eau contenue dans l'air absorbe une partie du rayonnement terrestre, qu'elle réémet ensuite vers le sol. L'humidité de l'air peut alors diminuer le déficit radiatif par une augmentation du rayonnement atmosphérique en cours de nuit. D'autre part, elle élève la température du point de rosée qui, une fois atteinte, génère le phénomène de condensation (ou de congélation) à la surface du sol et des végétaux, et libère donc de l'énergie sous forme de chaleur latente de condensation. Par conséquent, la présence d'une forte humidité limite le refroidissement radiatif, alors qu'un air sec peut accentuer le refroidissement en facilitant l'évaporation à la surface du sol et des végétaux. Toutefois, les bourgeons humectés préalablement seront plus sensibles au gel.

La nébulosité

Une masse d'air ne peut contenir qu'une quantité limitée de vapeur d'eau, proportionnelle à sa température ; au-delà, la vapeur d'eau se condense autour des noyaux de condensation pour former un nuage. Celui-ci absorbe en grande partie le rayonnement terrestre (infrarouge) et contribue alors au rayonnement atmosphérique nécessaire à la compensation du déficit radiatif pendant la nuit, voire à son annulation par forte nébulosité (Figure II.3).

Le Tableau II.1 répertorie des mesures de P. Queney [1974] sur l'intensité du rayonnement net nocturne en fonction de la nébulosité. Par ciel clair, la déperdition de chaleur au niveau du sol est plus importante que lors des nuits où le ciel est en partie couvert. En outre, l'effet de serre est beaucoup plus accentué avec la présence de nuages relativement chauds, donc bas (stratus, strato-cumulus).

Tableau II.1 : Rayonnement net nocturne en fonction de l'état du ciel

	R_N (W/m ²)
Ciel clair	118
Nuages élevés	94
Nébulosité moyenne	24
Nuages bas	16

Source : [Queney, 1974]

Le vent

Le vent est un autre paramètre climatique intervenant dans le refroidissement radiatif. D'une part, sa direction déterminera, à l'échelle synoptique, la nature de la masse d'air (température, humidité). V. Vazart [1988] donne l'exemple d'un risque de gel accru par l'advection d'un air froid et sec après une chute de pluie ou de neige (gel par évaporation et par advection).

D'autre part, la vitesse du vent peut fortement modifier la diminution de la température pendant la nuit. En effet, un vent calme (inférieur à 2 m/s) ne va pas faciliter le mélange des couches atmosphériques et notamment des basses couches où peut se produire le phénomène d'inversion thermique. Ce dernier gêne davantage le brassage de l'air, en stabilisant thermiquement cet air. En outre, une absence de vent nuit au déplacement de chaleur sensible, qui pourrait compenser le déficit radiatif.

La topographie

Les relations entre le relief et les paramètres climatiques sont très souvent mentionnées dans la littérature : températures décroissant avec l'altitude, pente et orientation des versants modifiant l'interception du rayonnement solaire, formes topographiques influençant la direction et la vitesse du vent, etc. [Geiger, 1969 ; Guyot, 1997 ; Personnic, 1999].

Concernant les températures minimales, H. Geslin [1956] a mesuré, lors de nuits de gel et sur plusieurs coteaux viticoles champenois, la variation des indices actinothermiques⁵⁰, dont nous présentons un exemple, celui des Briquettes, sur la Figure II.5. Le phénomène

50. Les indices actinothermiques sont mesurés par des capteurs situés à quelques dizaines de centimètres du sol et à l'air libre (cf. Données thermiques, p. 88).

d'*inversion thermique* est particulièrement net : le relevé, dont la température est la plus élevée, est situé en haut (point A), la plus froide en bas (point C). En outre, un petit minimum s'observe dans la cuvette (point P), où l'air froid s'est accumulé.

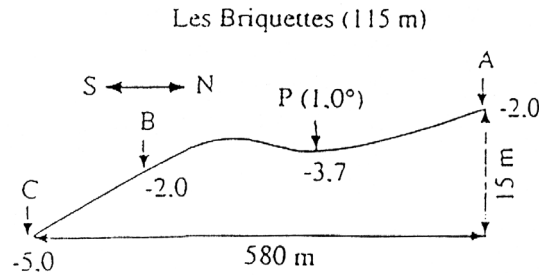


Figure II.5 : Variations des indices actinothermiques le long d'un coteau du vignoble champenois, mesurés au cours d'une nuit de gel

Source : [Geslin, 1956]

La Figure II.5 illustre bien l'influence, à l'échelle topoclimatique, de la topographie sur la répartition spatiale des températures minimales, lors des nuits dont les conditions atmosphériques sont stables. Ainsi, lors de ces nuits de ciel clair et de vent calme, l'air à proximité du sol se refroidit fortement par convection. Il devient alors plus dense et s'affaisse par subsidence. Si le terrain n'est pas plat, cet air froid tend à s'écouler, par gravité, vers des parties plus basses (vallées, bas de coteaux), où cette arrivée froide s'ajoute au refroidissement radiatif. Cette brise thermique est appelé « vent catabatique », « brise d'amont », « brise descendante » ou encore « brise de pente » pour des reliefs peu accentués comme en Champagne. Les zones basses ou encaissées sont alors plus froides que les parties hautes. Le profil thermique est très proche du profil altitudinal, ce qu'illustre, de manière éloquent, la Figure II.6 extraite des travaux de A. Bootsma [1976].

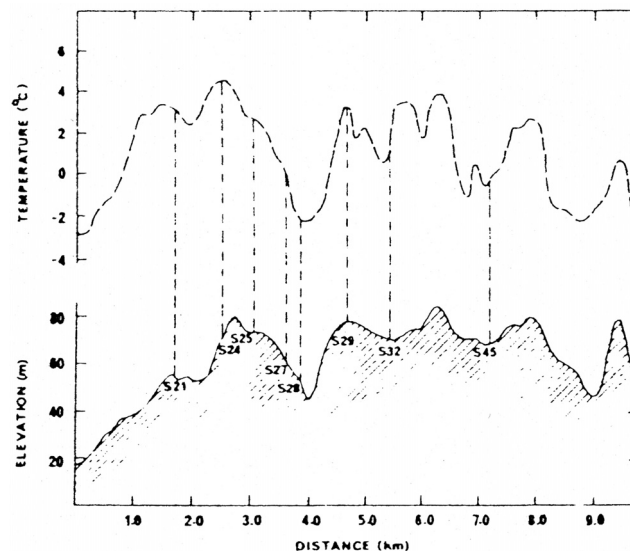


Figure II.6 : Relation entre la topographie et la répartition des températures au cours d'une nuit claire et calme

Source : [Bootsma, 1976]

De nombreux auteurs ont étudié le phénomène des brises thermiques : Bouchet [1966], Carrega [1994], Doran et Horst [1981], Endlicher [1980], Fallot [1992], Flohn [1969],

Geiger [1969], André et Mahrt [1982], Mahrt et Larsen [1982], Roten [1964], Yoshino [1975], etc.

Cette brise thermique s'établit dès la tombée de la nuit. Elle s'écoule par saccades⁵¹ (ou pulsations) en fonction des frictions locales. La vitesse de ces écoulements est de l'ordre de 1 à 3 m/s au maximum [Mahrt et Larsen, 1982]. En Champagne, en raison du relief peu accidenté, cette vitesse est moins importante : des vitesses comprises entre 0.5 et 2.5 m/s ont été mesurées par des capteurs situés à 1-2 m du sol [Beltrando, 1997]. Plus généralement, les formes topographiques (convexité/concavité, angle, etc.) influencent fortement la direction et l'intensité ces brises thermiques. En outre, l'intensité de ces brises de pente descendantes varie selon l'intensité du refroidissement et selon la différence de pression hydrostatique. J.-M. Fallot [1992] a ainsi montré l'importance du taux de remplissage en air froid du réservoir situé en contrebas : s'il est plein, la brise de pente s'affaiblit fortement, voire s'arrête.

L'air froid accumulé en bas de coteau ou en fond de vallée forme un *lac* d'air froid, appelé encore une *nappe*, dont le plan est légèrement incliné dans le sens de la pente. Cette accumulation d'air froid se produit également en amont de chaque obstacle à l'écoulement catabatique (replat, haie dense, route surélevée, remblai TGV⁵²).

Dès le lever du soleil, la brise de pente change de direction et remonte la pente : c'est la *renverse*. Sous des conditions atmosphériques stables, il existe donc un système cyclique journalier de brises thermiques, descendantes et ascendantes.

Dans le vignoble champenois, des études sur les relations entre le vent synoptique, les brises de pente et la topographie ont été réalisées à partir de plusieurs campagnes de mesures [Bridier *et al.*, 1995 ; Misrahi *et al.*, 1990 ; Sarmir, 1995]. Lorsque les vents régionaux sont puissants, ils « effacent » les vents catabatiques (dispersion de l'air froid). Par contre, par vent faible ou modéré, les masses d'air froid qui glissent à la surface des coteaux sont bloquées quand le versant est *quasi* parallèle au flux ou évacuées vers la plaine ou la vallée de la Marne quand le vent est oblique par rapport au flux (Figure II.7). De plus, le vent opposé à la pente entraîne une remontée du lac d'air froid.

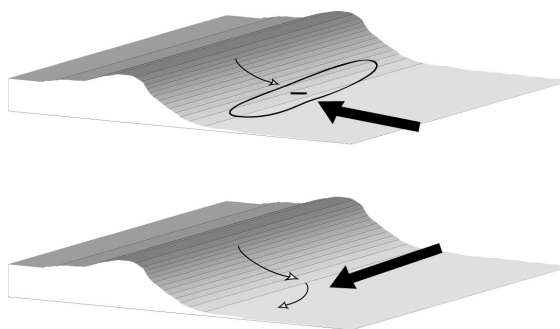


Figure II.7 : Schéma des interactions entre le vent synoptique et la brise de pente, sur un coteau typique du vignoble champenois

Le trait renforcé désigne le vent synoptique, le trait fin la brise de pente et le signe moins l'accumulation d'air froid.

51. Selon une périodicité de 5 à 30 minutes pour Flohn [1969] ou encore de 1h30 pour Doran et Horst [1981].

52. La construction de la future Ligne à Grande Vitesse du TGV Est européen, qui traversera le vignoble AOC de Champagne en contrebas des coteaux de la Montagne de Reims, a suscité des travaux d'évaluation de son influence et de son impact sur les températures minimales : [Beltrando *et al.*, 2002].

En somme, la topographie influence fortement la répartition spatiale des températures minimales. Des écarts de plusieurs degrés peuvent alors être observés entre deux points séparés d'une centaine de mètres.

Le sol

Outre la topographie d'un site, son environnement peut accentuer ou non le refroidissement nocturne. La vaste plaine de la *Champagne crayeuse* est occupée principalement par des grandes cultures (betterave, luzerne et céréales). Ces terres atteignent des températures assez basses en situation de refroidissement radiatif. Il se forme alors des *lacs froids* en contrebas des coteaux viticoles [Cellier, 1993]. En fin de nuit, un vent peut pousser cet air froid vers les vignes et provoquer des dégâts gélifs [Beltrando *et al.*, 1995].

À une échelle microclimatique, nous avons évoqué précédemment que la conduction dans le sol peut compenser en partie le déficit radiatif. Aussi, à l'échelle microclimatique, la restitution de la chaleur sera-t-elle limitée par tout obstacle à cette remontée de la profondeur vers la surface, en créant une couche isolante : sol travaillé récemment, couverture herbacée. Ceci pourra amener à des différences thermiques de 2 à 3°C [Cellier, 1991]. Par exemple, une surface enherbée ou avec un apport de mulchs organiques maintiendra l'évapotranspiration en début de nuit et isolera thermiquement la surface du sol des basses couches atmosphériques.

De plus, le flux de conduction dans le sol est conditionné par la conductivité thermique du sol liée à sa structure, à sa texture, à sa porosité et surtout à son humidité⁵³ (Figure II.8) [Guyot, 1997 ; Pérarnaud et Raynal, 1991]. Ainsi, un sol tassé et humide (sol argileux ou limoneux, par exemple) favorise la conduction et donc atténue le refroidissement de surface, à la différence d'un sol sec et poreux (sol sableux, par exemple) [Cellier, 1993].

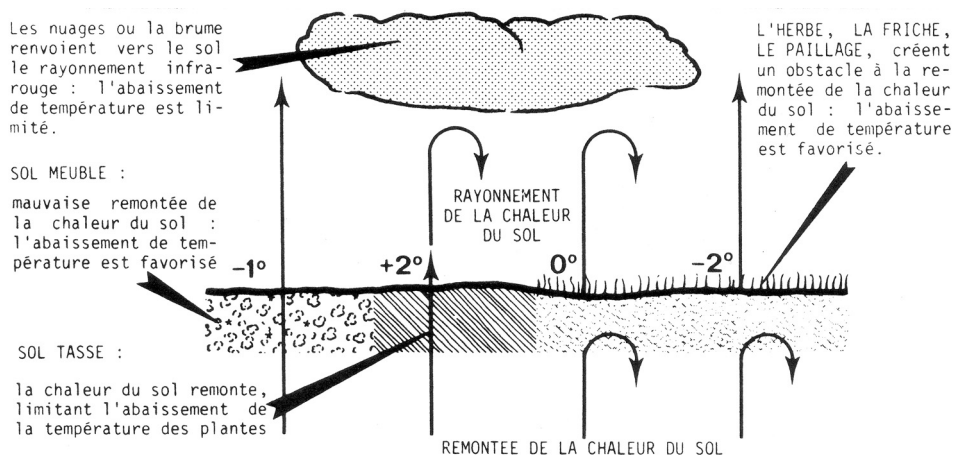


Figure II.8 : Influence de la couverture du sol sur la remontée de chaleur

Source : [Soltner, 1995]

Nous avons rappelé plusieurs facteurs modifiant localement le refroidissement nocturne et accentuant de fait les contrastes thermiques. Les nuits de ciel clair et de vent calme apparaissent comme les plus propices à un fort refroidissement et à une variabilité spatiale

53. Compte tenu que la conductivité thermique de l'eau est plus importante que celle de l'air, la conductivité des sols humides, environ 0.04 W/m/K, est beaucoup plus grande que celle des sols secs (de 0.0001 à 0.0004 W/m/K) [Huglin, Schneider, 1998].

importante. La topographie renforce alors ces contrastes locaux. P. Carrega [1994] insiste sur l'importance de connaître le rôle de chaque facteur dans la variabilité spatiale des températures. Sur la Figure II.9, il résume les paramètres (et leurs actions) intervenant à différentes échelles.

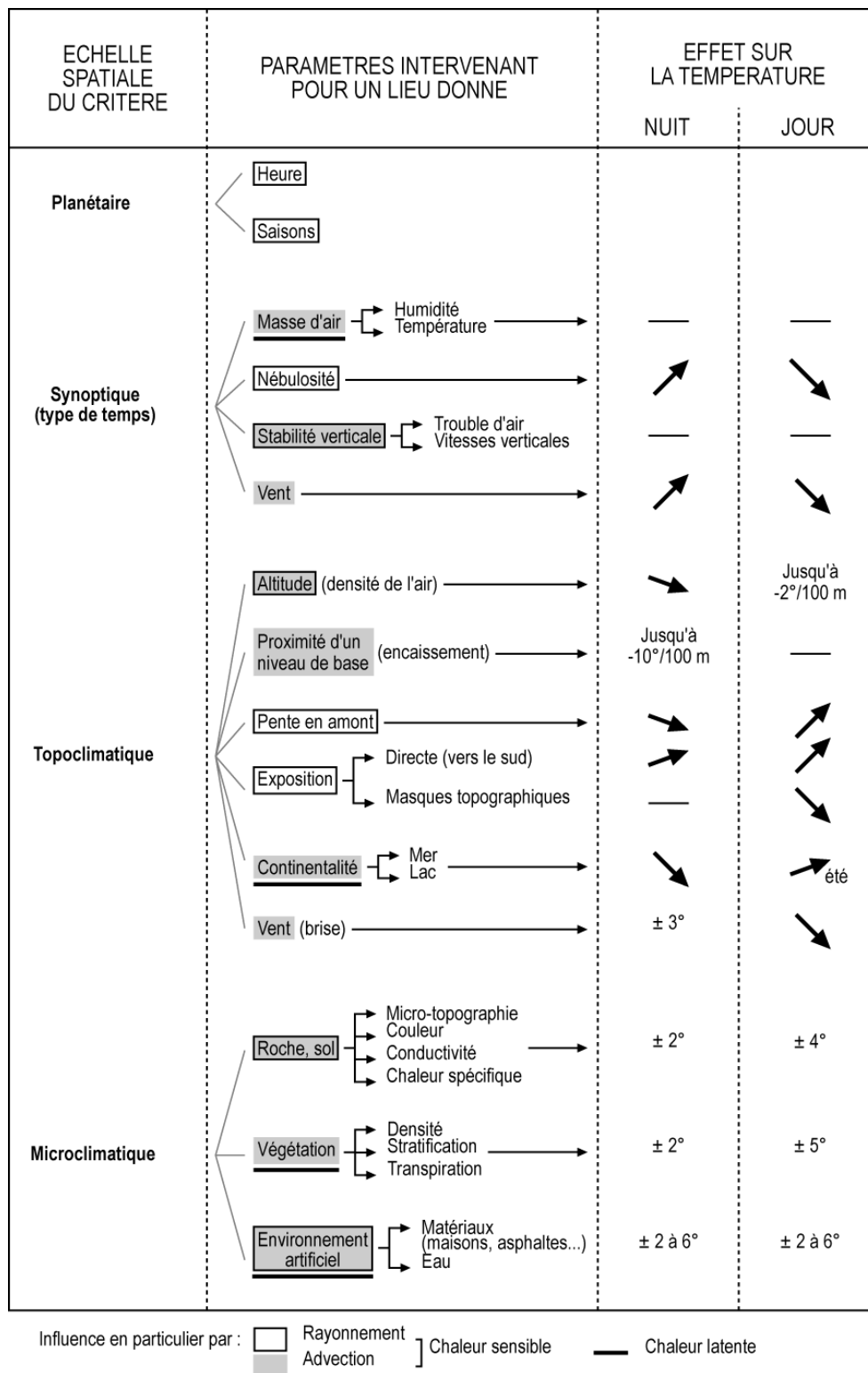


Figure II.9 : Influence de plusieurs paramètres sur les températures minimales et maximales, selon plusieurs échelles spatiales

Source : [Carrega, 1994]

Afin de lutter contre les gelées, le viticulteur pourra modifier certains de ces facteurs (par exemple, la structure du sol). Cette lutte dite *passive* est décrite plus précisément par la suite (II.2.3 - Les moyens de lutte contre le gel, p. 48). Par contre, il ne peut pas intervenir directement sur les facteurs atmosphériques comme l'humidité de l'air ou le vent. Il lui est alors possible d'utiliser un moyen de lutte active favorisant, par exemple, le brassage de l'air (II.2.3 - Les moyens de lutte contre le gel, p. 48).

II.2 - La vigne face au gel

Le phénomène de gel peut affecter les végétaux ; les dommages occasionnés dépendront de l'intensité du refroidissement et de sa vitesse, mais également de l'espèce et de son stade phénologique.

II.2.1 - Le phénomène du gel à l'échelle de la cellule

Le gel des végétaux peut s'opérer d'une part dans les espaces intercellulaires (ou extracellulaires) du végétal et d'autre part dans les cellules. L'eau présente dans ces deux milieux contenant des substances dissoutes (sucs végétaux), la température de cristallisation y est toujours inférieure à 0°C [Pérarnaud et Raynal, 1991]. Cependant, les espaces intercellulaires, plus sensibles, sont plus vite touchés par le phénomène de congélation. Ce dernier entraîne une concentration progressive de ce milieu et donc un déséquilibre de la pression osmotique entre les espaces intercellulaires et les cellules. Un flux d'eau s'effectue alors des cellules vers les méats intercellulaires. Le contenu des cellules s'étant concentré en substances dissoutes, leur température de cristallisation diminue, ce qui tend à les protéger du gel. Toutefois, une perte d'eau trop importante peut être néfaste et entraîner l'arrêt du fonctionnement des cellules, la rupture des membranes et, à terme, la mort des cellules [Clément, 1981]. En outre, cette mort cellulaire peut également être causée par l'action mécanique des cristaux de glace formés dans les espaces intercellulaires.

Si le refroidissement est lent, il peut entraîner une meilleure résistance de la plante au gel : c'est le phénomène d'endurcissement de la plante au froid (Figure II.10). Par contre, s'il est rapide, l'eau ne sort pas des cellules et la cristallisation de l'eau intracellulaire détruit les éléments cellulaires de façon irréversible. Un refroidissement rapide entraîne donc des destructions importantes et surtout irréparables.

En hiver les végétaux sont en repos végétatif, les cellules sont petites et à l'inverse les espaces intercellulaires occupent une grande place [Leddé et Dereuddre, 1993]. L'eau sortant facilement des cellules, la plante peut renforcer son seuil de résistance aux températures négatives. Des dégâts ne pourront alors être occasionnés qu'avec de très basses températures. Par contre, au printemps, l'activité végétative reprenant, les cellules contiennent beaucoup d'eau et sont donc susceptibles de geler à des températures moins basses qu'en hiver (mais toujours négatives). Les seuils de sensibilité au gel des végétaux varient donc selon les saisons.

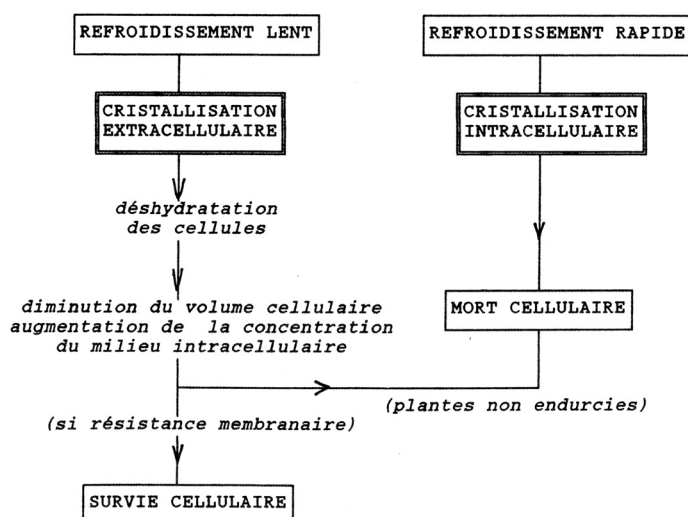


Figure II.10 : Effets comparés d'un refroidissement rapide et d'un refroidissement lent

Source : [Leddet et Dereuddre, 1993]

II.2.2 - Une sensibilité de la vigne variable selon les stades phénologiques

Généralement, la vulnérabilité des plantes au gel varie selon les espèces (et même les variétés) et leurs stades phénologiques [Clément, 1981]. Même si la sensibilité de chaque organe végétal aux basses températures est fortement variable et dépend de nombreux facteurs (volume du bourgeon, état d'hydratation, etc.), plusieurs travaux empiriques ont permis de dégager des seuils critiques de températures pour diverses espèces et selon leurs stades phénologiques.

La vulnérabilité de la vigne, espèce particulièrement sensible en raison de sa hauteur, varie selon la période de l'année. Ainsi, à la fin de l'été, la durée des jours raccourcit, les températures descendent en dessous de 15°C ; cela permet une première phase d'endurcissement de la vigne aux prochains refroidissements importants. Pendant l'hiver, la vigne, alors en repos végétatif, peut supporter des températures assez basses : jusqu'à -20°C si le processus est lent, sinon -15°C [Carbonneau, 1992]. Au printemps, comme nous l'avons évoqué précédemment, les plantes reprennent leur activité végétative et résistent moins aux gelées. Au début de cette saison, la vigne, dont les bourgeons sont *dans le coton* (Figure I.6, p. 30), peut encore supporter des températures de -8°C.

Mais c'est au stade phénologique suivant, le débourrement, que la vigne est la plus vulnérable aux gelées et ce jusqu'au stade de la floraison. La date moyenne de cette reprise de la croissance se situe généralement entre le 10 et le 15 avril, même si elle varie en fonction des cépages et des années, selon les conditions climatiques. Néanmoins, le débourrement peut se produire parfois fin mars, ce qui renforce le risque de gel. À ce moment-là, la température critique retenue est celle de -2.5°C (ou -2°C, selon les auteurs⁵⁴).

54. En outre, ces différents seuils de sensibilité ont été estimés soit à 2 m du sol (températures sous abri), soit à 10 cm (en indices actinothermiques). Ces différences de capteur sont rarement explicitées. Or, le capteur en indice actinothermique, placé à 10 ou 50 centimètres du sol et à l'air libre, a un comportement thermique plus proche de la vigne et serait donc à prendre plus en compte que les températures minimales sous abri. L'écart non constant entre ces deux températures est accentué lors des inversions thermiques (en refroidissement radiatif). Si l'étude porte sur le gel des végétaux, les températures critiques énoncées doivent donc être prises avec prudence.

Si cette température persiste pendant une demi-heure, le bourgeon primaire est détruit [Itier, 1993]. Des températures encore plus basses, inférieures à -7°C , vont détruire bourgeon primaire et contre-bourgeon. Sous des conditions climatiques favorables, un troisième bourgeon se formera alors, mais ne donnera pas de récolte, hormis quelques grappes pour le Pinot Noir.

En outre, les dégâts du gel dépendent de l'âge de la vigne⁵⁵ et surtout de son cépage⁵⁶. En effet, la date moyenne du débourrement des différents cépages influence, par là même, leur sensibilité au gel. Dans le vignoble champenois, la date moyenne du débourrement du Chardonnay est le 6 avril, celle du Pinot Noir le 8 avril et celle du Pinot Meunier le 13 avril (période 1954-1990 ; [AVC, 1991]). Par exemple, pour les gelées du 5 avril 1990, les vignes en Pinot Meunier, qui n'avaient pas encore débourré, n'ont pas souffert des gelées, à l'inverse des deux autres cépages [AVC, 1991]. Par contre, D. Moncomble et A. Descotes [1993] ont montré la plus grande résistance du Chardonnay lors des gelées hivernales de 1985 dans le vignoble champenois, ce qui pourrait s'expliquer par une meilleure résistance des cépages à bois dur et à moelle peu abondante, comme le Chardonnay.

En somme, le risque de gel des bourgeons de la vigne est une combinaison entre des températures basses (aléa gélif) et un stade phénologique (vulnérabilité). Celui-ci varie selon le cépage, mais aussi selon les conditions climatiques précédentes. Ainsi, V. Vazart [1988] précise-t-il qu'une « diminution brutale de la température succédant à une période clémente est plus dangereuse qu'un froid prolongé qui s'est installé progressivement ». En outre, les pratiques culturales peuvent également accentuer ou diminuer la sensibilité de la vigne au gel et constituent alors un moyen de lutte passive.

II.2.3 - Les moyens de lutte contre le gel

Face au phénomène des gelées, il existe divers moyens de lutte permettant de modifier certains paramètres microclimatiques. Notre objectif n'étant pas de décrire dans les détails les moyens de lutte, ni leurs actions, nous les évoquerons très succinctement. Il est très classique de distinguer les luttes *passive* et *active*.

Lutte passive

La lutte passive contre les gelées s'exprime essentiellement à travers le choix du site viticole et les pratiques culturales.

Le vignoble champenois, situé à la limite septentrionale de la viticulture, connaît un aléa gélif important, notamment au printemps. Aussi, pour lutter passivement contre les gelées et pour prendre en compte les écoulements de l'air, les vignerons ont-ils, depuis plusieurs siècles, planté la vigne sur les coteaux⁵⁷. Ce moyen de lutte s'étend, plus généralement, à tout obstacle, naturel ou non, de ces écoulements de l'air.

De plus, les vignerons luttent passivement contre les gelées printanières par des pratiques culturales particulières. Ainsi, l'ouvrage de l'Association Viticole Champenoise sur les

55. Les jeunes vignes (jusqu'à 6 ans) résistent moins que les plus âgées.

56. Les cépages rouges sont, en règle générale, plus résistants que les cépages blancs [Clément, 1981].

57. Cette position permet également de favoriser l'ensoleillement (surtout pour l'orientation sud).

Gelées de printemps [AVC, 1991] répertorie plusieurs d'entre elles. Par exemple, nous avons vu précédemment que les cépages pouvaient être plus ou moins sensibles aux gelées printanières. Un des premiers moyens de lutte est donc le choix du cépage adapté. Par ailleurs, une taille tardive peut retarder de 10 jours le développement des bourgeons, ce qui est parfois suffisant pour mettre les bourgeons hors d'atteinte des gelées printanières [Avc, 1991].

En outre, le travail du sol peut permettre aux vignerons de lutter contre les gelées printanières, compte tenu de l'influence du sol et de sa composition sur le bilan radiatif évoquée précédemment :

« [...] un sol couvert d'herbes accentue la gelée. Des études micro-climatiques réalisées en 1955 à Urville (Aube) montrent que sur un sol en friche la température à 40 cm est de 2°C inférieure à celle d'un sol nu et tassé. Un sol travaillé s'avère également plus froid : les pertes enregistrées peuvent dépasser 1°C par rapport à une friche et plus de 3°C comparé à un sol nu et tassé. Des mesures réalisées en 1989 sur le vignoble expérimental de Plumecoq confirment ces observations. Par contre, un gazon fin et peu dense se comporte presque comme un sol nu. La technique d'enherbement, en cours d'étude depuis trois ans dans le vignoble révèle une faible augmentation des risques de gel. » [AVC, 1991]

En somme, les méthodes de lutte passive regroupent le choix des cépages et celui d'un site peu gélif, soit un sol propre et bien tassé, ainsi que la limitation des obstacles empêchant l'écoulement de la masse d'air froid.

Lutte active

Les moyens de lutte active sont utilisés pour modifier localement le micro-climat et, plus spécifiquement, le bilan énergétique de surface (II.1.2 - Le bilan radiatif, p. 37). Ainsi, ils agissent soit sur le rayonnement atmosphérique (fumées et brouillards artificiels), soit sur la chaleur sensible (bougies, chaufferettes, tours à vent, hélicoptère) ou encore sur la chaleur latente (aspersion). Leur mise en œuvre est décidée en fonction de la température prévue (aléa gélif) et du seuil critique pour la plante variant selon son stade phénologique.

Notre propos n'est pas de détailler ces différents systèmes de protection (se reporter à [AVC, 1991 ; Bagdonas *et al.*, 1978 ; Brun, 1993 ; CTIFL, 1998 ; Itier, 1993 ; Kalma *et al.*, 1992]). Toutefois, nous ferons une description sommaire des trois principaux moyens de lutte : le chauffage, l'aspersion et les tours à vent.

Le chauffage de l'air, et donc celui des plantes indirectement par convection, est un des plus vieux moyens de lutte contre le gel. Il existe une multitude de systèmes : chauffage par bougies de paraffine, par pains calorifiques, par chaufferettes ou par fuel pulvérisé, etc. Son efficacité est importante. Toutefois, compte tenu des besoins très importants en main-d'œuvre et du coût important, ce système est bien adapté aux parcelles où le gel est peu fréquent (lutte ponctuelle) ou en complément des autres méthodes [AVC, 1991].

La méthode de l'aspersion est basée sur le principe de l'apport de chaleur latente lors de la transformation de l'eau en glace (au niveau des bourgeons). Elle nécessite des réserves d'eau suffisantes. En outre, sa mise en œuvre demande un certain nombre de précautions, notamment pour déterminer à quel moment déclencher⁵⁸ et arrêter l'arrosage [Itier, 1993].

58. L'aspersion diminue, dans un premier temps, la température de l'air non saturé (par évaporation à la surface des bourgeons mouillés) [AVC, 1991].

Le principe de la protection par brassage d'air (tours à vent et hélicoptères) est de mélanger l'air plus chaud du haut de la couche d'inversion thermique avec l'air plus froid au niveau du sol. Ce moyen de lutte, simple et de mise en œuvre rapide, se justifie donc lors des forts refroidissements *radiatifs* (II.1.1 - Les différents types de refroidissement). La surface protégée par une tour à vent, en forme d'ellipse, est variable selon l'origine des écoulements de l'air. L'efficacité de ce système est donc renforcée pour les terrains plats. Toutefois, lors des très fortes gelées, ce moyen de lutte ne suffit pas à lui seul. Il est alors indispensable d'apporter un complément d'énergie (chauffage par exemple).

De nombreuses études⁵⁹, réalisées sur diverses parcelles et cultures, ont porté sur la comparaison de ces différentes méthodes de lutte active, leurs apports et limites respectifs. Retenons que le choix d'un système antigel en particulier va dépendre de multiples facteurs, tels la fréquence et l'intensité des gelées, la surface à protéger, l'approvisionnement en eau, les besoins en main-d'œuvre ou encore la proximité d'habitations (pollution atmosphérique et sonore).

Pour aider un agriculteur à faire face aux dommages dus au gel, et plus généralement à une contrainte climatique, il existe deux systèmes qui cohabitent : les assurances et le Fond National de Garantie des Calamités Agricoles⁶⁰ (FNGCA) [Babusiaux, 2002]. Par exemple, les dégâts liés à une sécheresse sont indemnisés par le FNGCA, alors que la grêle, phénomène ponctuel et très localisé dans l'espace, est couverte par les assurances. Actuellement, le FNGCA est remis en cause, notamment en raison de la lenteur et de la complexité des procédures ou encore en raison des indemnités jugées trop faibles par les agriculteurs [Mahul, 1998]. L'État et les assureurs réfléchissent alors à l'extension de l'assurance à d'autres aléas climatiques (par exemple, assurance du gel sur la vigne en cours d'expérimentation par Groupama).

II.3 - Les méthodes d'estimation d'un aléa gélif

Estimer un aléa gélif représente une aide précieuse pour le viticulteur ou l'arboriculteur [Pérarnaud et Raynal, 1991], qui sauront alors s'il y a un risque de gel de leurs cultures en fonction du développement de celles-ci. À une échelle climatique, il est possible de construire, à partir des données des stations, des calendriers de probabilités de températures inférieures à certains seuils. Ces probabilités permettent aux agriculteurs de connaître les périodes sensibles de l'année et d'adapter ainsi leurs pratiques culturales. De plus, ils peuvent mettre en œuvre une lutte passive en fonction de la fréquence et estimer le moyen de lutte active *a priori* le plus efficace. Par contre, cette estimation n'est que ponctuelle. Afin de délimiter les zones gélives, il est possible d'utiliser les thermographies. Toutefois, ces deux informations n'aident pas à connaître l'aléa gélif à court terme, soit du jour au

59. Citons celles entreprises par l'INRA, le CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes) [1998], le CEFEL (Centre d'Expérimentation Fruits Et Légumes), les services techniques du CIVC et Mumm-Perrier Jouët [AVC, 1991] ou encore l'ACMG (Association Climatologique de la Moyenne-Garonne et du Sud-Ouest).

60. Loi n°64.706 du 10/07/64, article 2 : « Sont considérés comme calamités agricoles les dommages non assurables d'importance exceptionnelle dus à des variations anormales d'intensité d'un agent naturel, lorsque les moyens techniques de lutte préventive ou curative employés habituellement dans l'agriculture n'ont pu être utilisés ou se sont révélés insuffisants ou inopérants. »

lendemain. À cette échelle météorologique, l'aléa gélif ne peut être évalué que par des méthodes d'estimation basées sur des observations empiriques ou par des méthodes de prévision relevant de la physique de l'atmosphère.

II.3.1 - Calendriers de probabilités de l'aléa gélif

En se plaçant à une échelle climatique, il est possible, non pas de faire une *prévision*, mais d'estimer des probabilités d'occurrence de basses températures, de *prédéterminer* [Charre et de Saintignon, 1997]. Très souvent, plusieurs seuils thermiques sont retenus pour affiner l'estimation d'un aléa gélif : par exemple, quelle est la probabilité d'avoir une température inférieure à -8°C fin mars (avant le débourrement), puis inférieure à -2°C mi-avril⁶¹ ? À partir de ces diverses probabilités, sont construits les calendriers de probabilités [Arlery, 1958 ; Péguy, 1976]. Par exemple, la Figure II.11 représente celui de la station de Reims-Courcy. L'occurrence de températures minimales négatives (sous abri, à 2 m) diminue progressivement à partir de la fin de l'hiver et jusqu'à début mai. Pendant la période du débourrement (première quinzaine d'avril), une nuit sur cinq connaît un gel *météorologique* autour du 1^{er} avril, puis une sur dix vers le 11 avril.

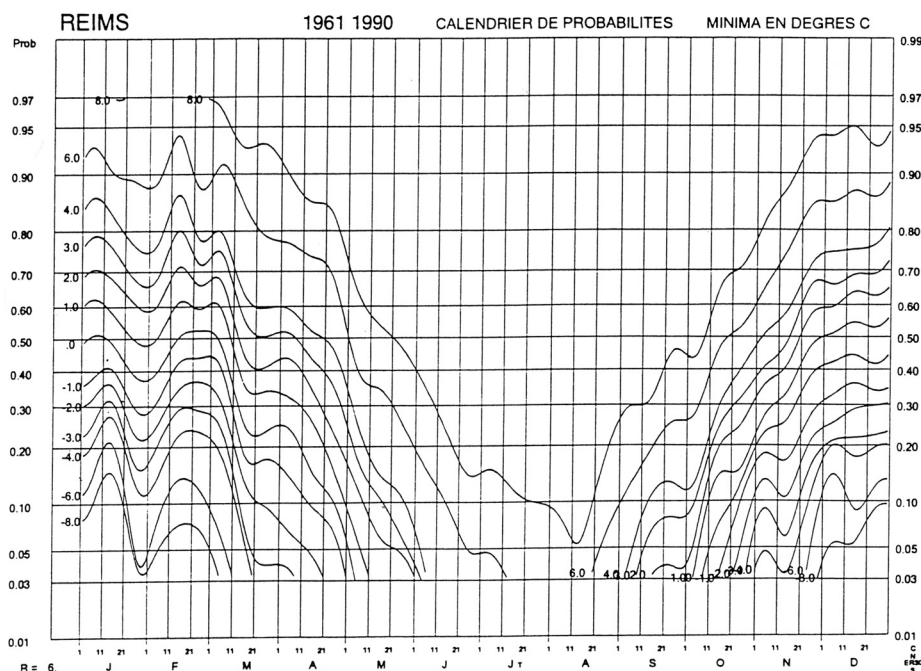


Figure II.11 : Calendriers de probabilité des températures minimales (sous abri, à 2 m) de Reims-Courcy (1961-1990)

Source : [Beltrando, 1997]

L'auteur précise que le « pic » observé mi-février est lié à certains événements très froids (notamment en février 1986).

D'après J. Charre et M.-F. de Saintignon [1997], la lecture de ce type de graphique peut être biaisée par la continuité apparente des courbes qui laisserait penser que les cas extrêmes ou les cas *moyens* se retrouvent la même année. En outre, il est essentiel que l'échantillon temporel sur lequel repose le calcul des probabilités ne soit pas trop restreint.

61. Il est également possible de représenter, toujours sous la forme de courbes de probabilité, le nombre moyen de jours où, après une date donnée, la température sous abri risque encore de devenir inférieure à des seuils déterminés [Arlery, 1958].

Le plus souvent, une période de 30 ans est recommandée. Cela étant, si ce n'est pas le cas, il est possible de reconstituer des séries de données de stations à partir d'un réseau de mesures de longue durée. Par exemple, M.-F. de Saintignon [1998-1999] a construit des calendriers de probabilités pour plusieurs stations récentes du vignoble champenois. Nous ne détaillerons pas ici le principe de la méthode alors retenue et basée sur un modèle de la variance interactif à deux facteurs [Martin *et al.*, 1991].

Les calendriers de probabilités permettent de mieux connaître l'aléa gélif pour une station donnée. Par contre, cette estimation n'est que ponctuelle et ne permet pas de délimiter des zones gélives.

II.3.2 - Détermination par thermographie infrarouge des zones d'accumulation d'air froid lors des gelées radiatives

En utilisant les propriétés physiques des corps (en particulier l'émissivité), les outils de la télédétection permettent d'identifier et de caractériser des objets à distance, par la mesure du rayonnement électromagnétique réfléchi et émis et selon une large gamme de longueurs d'onde. Les thermographies mesurant le comportement spectral des corps dans l'infrarouge permettent ainsi de reconstituer la température de surface des corps (en utilisant des algorithmes, tel le *split window* [Robin, 1995]).

Ces thermographies infrarouges peuvent s'avérer alors utiles pour délimiter et cartographier des zones gélives, selon certains seuils thermiques [Antonioletti, 1988 ; Endlicher, 1980 ; Kerdiles *et al.*, 1996 ; Santibáñez *et al.*, 1997 ; Stewart *et al.*, 1978]. Toutefois, elles ne sont faibles que lors des nuits de ciel clair et leur résolution spatiale est encore limitée :

« On pourra se contenter de la résolution spatiale propre aux satellites actuels (1 km pour NOAA) dans le cas de zones suffisamment homogènes (relief et parcellaire) ; il faudra par contre attendre que cette résolution descende au-dessous de la centaine de mètres pour pouvoir traiter le cas des plantations (vignobles, vergers) de coteaux ou de piémonts où les gradients thermiques sont beaucoup plus importants. » [Hallaire et Itier, 1984]

II.3.3 - Les différentes méthodes de prévision du refroidissement nocturne

Une prévision météorologique est définie par l'élaboration d'hypothèses sur l'évolution de paramètres météorologiques (en l'occurrence thermiques), en extrapolant à partir de l'analyse des événements plus ou moins récents et de la situation présente. A. Bagdonas *et al.* [1978] dressent un inventaire de la prévision du gel à travers son historique, prévision qui se résume très souvent à la prévision de la température minimale. La plupart des méthodes sont à court terme (moins de 24h) et à une échelle locale.

Il est très classique de distinguer les méthodes empiriques et théoriques. Les premières s'appuient sur des calculs statistiques réalisés à partir des mesures d'une station donnée. Reposant sur l'hypothèse d'une certaine régularité des phénomènes atmosphériques, ces méthodes sont très faciles à mettre en œuvre. Nous présenterons ici l'exemple des modèles basés sur des formules hygrométriques. Par contre, les méthodes théoriques consistent à

appliquer les principes de la thermodynamique et de la mécanique des fluides à l'atmosphère (conservation de l'énergie, de la masse et de transfert), même si plusieurs hypothèses simplificatrices sont adoptées. Ces méthodes estiment la température localement (par exemple, la formule de Brunt) ou sur un plus vaste espace (modèles numériques de Météo France).

Les modèles utilisant des formules hygrométriques

En décrivant précédemment le refroidissement par évaporation, nous avons rappelé le rôle, certes restrictif, de l'humidité de l'air sur le refroidissement radiatif : le phénomène de condensation modifie le bilan radiatif. Il est alors possible de prendre en compte ce rôle en formalisant l'équation de la relation entre le refroidissement et une donnée relative à l'humidité de l'air (température sèche et humide, point de rosée ou encore humidité relative). Ce modèle empirique s'appuie sur des séries de données antérieures de température et d'humidité d'un poste donné. Sur la Figure II.12, nous pouvons observer un exemple mettant en relation l'humidité relative au coucher du soleil et l'écart entre la température minimale observée (T_n) et le point de rosée (T_d) au coucher du soleil. La droite de régression estimée permet alors de prévoir la température minimale, à l'aide des paramètres hygrométriques et thermiques au coucher du soleil.

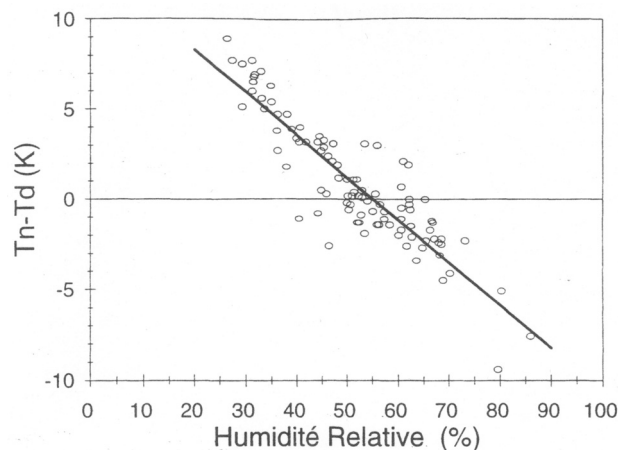


Figure II.12 : Relation entre l'humidité relative au coucher du soleil et l'écart entre la température minimale observée (T_n) et le point de rosée (T_d) au coucher du soleil

Source : [Cellier et al., 1997]
Le site et la période ne sont pas précisés.

Cette méthode, certes simple par son élaboration et par son utilisation, n'est cependant valable que pour un poste donné.

Formule de Brunt et ses dérivées

La formule théorique de D. Brunt [1941] s'appuie sur les équations de conservation de l'énergie et de transfert d'énergie par conduction, convection, rayonnement et changement de phase. Elle repose sur différentes hypothèses :

- rayonnement net constant au cours de la nuit ;
- flux de chaleur latente négligeable (en l'absence de changement de masse d'air) ;
- ciel clair et vent faible ;
- sol homogène, humide ;

- apport de chaleur par conduction des plus basses couches atmosphériques vers le sol négligeable ;
- perte d'une quantité d'énergie constante (par unité de temps).

Sous ces conditions, D. Brunt [1941] exprime alors le refroidissement nocturne :

$$\Delta t = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R_N}{P_S C_S \sqrt{K_S}} \sqrt{\omega}$$

où R_N est le rayonnement net, P_S la densité du sol supposé homogène, C_S la chaleur massique du sol, K_S le coefficient de conductivité thermique du sol et ω la durée de la nuit (durée du refroidissement comptée en heures à partir du coucher du soleil).

Cette formule a l'avantage de pouvoir s'appliquer à divers types de sols. Toutefois, il reste parfois difficile de connaître l'état physique du sol ($P_S C_S \sqrt{K_S}$). Aussi, certains auteurs, notamment Mitxchelich, Katilin et Dufour (cités par [Pérarnaud et Raynal, 1991]) ont-ils proposé des valeurs moyennes de ce produit.

En outre, un grand nombre de modèles locaux ont été construits à partir de formules dérivées de celle de Brunt, en prenant en compte d'autres paramètres d'entrée (par exemple, la convection) ou, au contraire, en simplifiant la formule initiale pour faciliter la mise en œuvre opérationnelle (par exemple, le modèle de N. Gerbier et R. Pédeau [1974]).

Il existe une multitude d'autres modèles théoriques locaux, à court terme, permettant de prévoir une température minimale, comme ceux classiques de R.A. Sutherland [1980] et de P. Cellier décrit dans la section suivante. Très souvent, ces modèles ne s'appliquent que pour des conditions atmosphériques particulières (en particulier de ciel clair et de vent calme). Les progrès récents de l'informatique ont permis de prendre en compte l'ensemble des processus de transferts d'énergie du sol et de l'atmosphère, ce qui a affiné la prévision du refroidissement radiatif. Les températures peuvent maintenant être prévues à différentes hauteurs : sol, bourgeons et air. Néanmoins, ces modèles sont complexes à mettre au point et utilisent parfois des variables d'entrées difficiles à mesurer.

Les modèles numériques

À l'inverse des modèles précédents qui cherchent à prévoir un paramètre en particulier, les modèles numériques tentent de simuler le comportement de l'atmosphère à partir de lois de la mécanique des fluides et de la thermodynamique. Résolvant les équations traduisant approximativement ces lois, un programme informatique calcule l'évolution des différents paramètres atmosphériques à partir d'observations initiales [www.meteo.fr]. La portion de l'atmosphère considérée est divisée selon des boîtes, verticalement et horizontalement⁶²).

De nombreuses améliorations ont été apportées depuis, notamment grâce à l'augmentation des performances des ordinateurs, permettant de réduire la résolution spatiale (verticale et horizontale) et d'augmenter l'échéance des prévisions [Coiffier, 2000]. Par exemple, la résolution des modèles actuellement utilisés, de manière opérationnelle par Météo France, s'est affinée : 20 km pour ARPEGE, 10-14 km pour ALADIN⁶³ [Pailleux *et al.*, 2000].

62. Le plus souvent, la résolution horizontale est de l'ordre de la dizaine ou de la centaine de kilomètres et la verticale de quelques centaines de mètres.

63. ARPEGE : Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle ; ALADIN : Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement InterNational

II.3.4 - Le modèle numérique de l'INRA

Nous avons choisi de décrire plus précisément un de ces modèles numériques, celui développé par l'INRA [Cellier, 1984, 1991, 1993 ; Cellier et Itier, 1984] et utilisé de manière simplifiée dans le système opérationnel de prévision des gelées de printemps par Météo France Marne [Choisnel *et al.*, 1993].

Ce modèle local de prévision permet d'estimer le refroidissement selon une verticale, d'une profondeur de 1 m dans le sol jusqu'à une altitude de 200 m dans l'atmosphère. Unidimensionnel, il subdivise cet espace en plusieurs couches horizontales homogènes, d'autant plus fines vers la surface du sol.

Partant de l'hypothèse d'un refroidissement radiatif, ce modèle calcule, pour chaque couche horizontale, la variation de la température en appliquant le principe de la conservation de l'énergie (Figure II.13) :

- à la surface du sol, l'équation du bilan d'énergie (précédemment rappelée) est appliquée ;
- dans le sol, le processus des transferts énergétiques est la conduction ($d(dT/dz)/dz$) ;
- dans les couches atmosphériques, les échanges par rayonnement (dR/dz), par convection (dH/dz) et par condensation ou congélation (P) sont évalués approximativement.

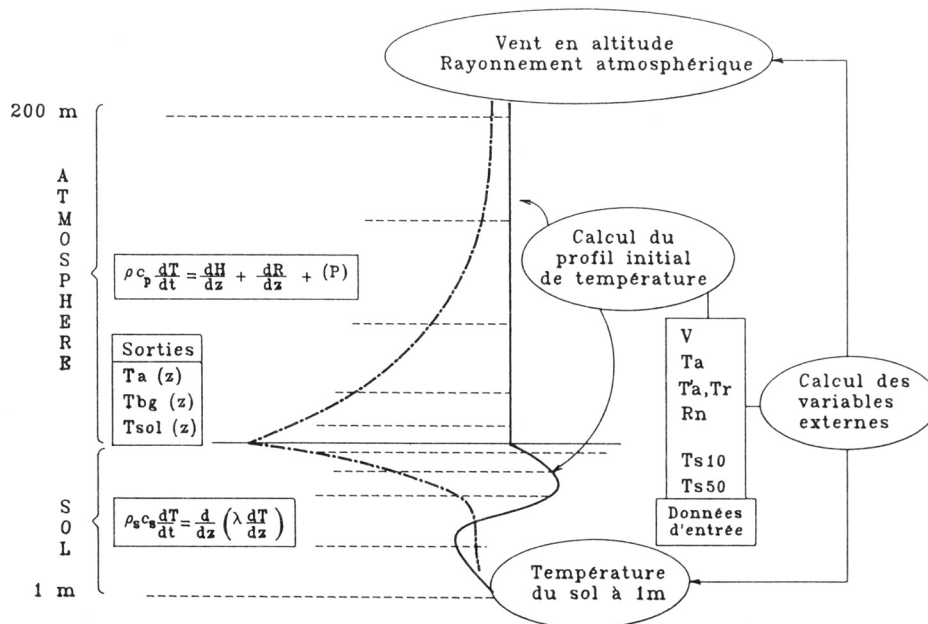


Figure II.13 : Schéma du principe du modèle de prévision des gelées de printemps développé par l'INRA

Source : [Cellier, 1993]
Les abréviations sont explicitées dans le corps du texte.

Prenant en compte ces divers modes de transferts, le modèle de l'INRA peut donner des températures minimales à différentes hauteurs dans l'atmosphère (T_a) et dans le sol (T_{sol}), des températures de bourgeons à différents niveaux (T_{bg}) (ainsi que le vent en altitude, le rayonnement atmosphérique et la température à un mètre dans le sol), à partir de cinq données d'entrée :

- le rayonnement net (R_N), une heure après le coucher du soleil, lorsque il est proche de son minimum. Restant difficile à mesurer, cette donnée peut être estimée avec

des formules utilisant la température et l'humidité de l'air (notamment la formule de Brutsaert [1975]) ;

- la température de l'air sous abri à 2 mètres (T_a) au coucher du soleil (qui est prise comme la température initiale de l'air et de la surface du sol) et celle une heure après le coucher du soleil (T'_a) ;
- la température à 10 centimètres dans le sol (T_{S10} et éventuellement à 50 cm T_{S50}), au coucher du soleil, pour évaluer la quantité d'énergie restituée par le sol par conduction (avec $T_a - T_{S10}$) ;
- la température du point de rosée (T_r), une heure après le coucher du soleil, pour estimer la limitation du refroidissement par condensation ;
- la vitesse du vent à deux mètres au-dessus du sol (V), moyenne sur une durée d'une heure ou d'une demi-heure avant le coucher du soleil.

Ce modèle local est transposable en de nombreux sites. Cela étant, sa mise en oeuvre étant assez lourde, une méthode simplifiée a donc été élaborée, à partir des mêmes paramètres d'entrée. Après des simulations pour des hauteurs de 0, 1.5 et 3 mètres, le refroidissement radiatif peut être estimé à partir de l'équation suivante :

$$T_n(z) - T_a = (A1 + A2 + A3) \cdot \ln(D_n)$$

où $T_n(z)$ est la température minimale à la hauteur z , D_n la durée de la nuit (en heure), $A1$ le coefficient (en °C) traduisant l'influence des transferts radiatifs / convectifs sur le refroidissement ($A1 = a + b V$, avec a et b des fonctions de R_N , de T_a et de V), $A2$ le coefficient (en °C) précisant la partition du déficit radiatif entre le sol et l'atmosphère ($A2 = 0,024 (T_a - T_{S10}) (10 - V)$) et $A3$ le terme correctif (en °C) dépendant de T_a ($A3 = 0,04 (T_a - 12)$)

Cette méthode simplifiée de prévision a donné des résultats au moins équivalents aux autres méthodes [Cellier, 1984]. Le modèle de prévision de l'INRA est actuellement utilisé par le CDM⁶⁴ de la Marne dans son système de prévision des gelées printanières (III.4.2 - Le système opérationnel de prévision des gelées de printemps par Météo France, p. 70).

Conclusion du chapitre II

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au phénomène du gel, à ses répercussions sur la vigne et enfin aux méthodes de prévision de cet aléa climatique. Nous avons ainsi vu l'importance des conditions météorologiques : une advection d'air froid, une absence de nuages, une sécheresse de l'air ou encore un vent faible vont favoriser le refroidissement nocturne. Les caractéristiques environnementales, tels le relief, l'état du sol, vont également influencer l'intensité de ce refroidissement et jouer sur sa variabilité spatiale. Enfin, selon la variété et le stade phénologique de la plante, les températures basses vont créer des dommages sur les organes (*gel agronomique*).

64. CDM : Centre Départemental de la Météorologie.

Chapitre III - LE VIGNOBLE CHAMPENOIS : **un vignoble prestigieux sensible aux gelées printanières**

Localisé au nord-est de la France, le vignoble champenois a une situation géographique très septentrionale par rapport à l'ensemble des vignobles mondiaux. S'étendant sur une surface relativement limitée, il est pourtant connu dans le monde entier. Le vin de Champagne porte le nom de la région où il est principalement élaboré. Toutefois, la situation du vignoble dans la Champagne⁶⁵ est, en réalité, très marginale :

« Le vignoble, qui symbolise le mieux la Champagne du XX^e siècle dans les esprits, tant en France qu'à l'étranger, n'est pas situé dans la Champagne naturelle mais sur ses marges, sur la côte des Bars et surtout sur la côte d'Île-de-France, mais dans ce dernier cas il se prolonge dans la vallée de la Marne, au-delà de Château-Thierry, c'est-à-dire non seulement en dehors de la Champagne naturelle mais aussi de la Champagne politique. » [Reynaud, 1990⁶⁶]

Dans ce chapitre, nous nous attacherons à décrire succinctement le vignoble champenois, ses caractéristiques géographiques, climatiques et économiques. Ensuite, nous évoquerons les gelées printanières, principale contrainte climatique de ce vignoble septentrional.

III.1 - Caractéristiques géographiques : à la limite septentrionale de la viticulture

Le vignoble champenois situé à l'est du Bassin Parisien s'étend du 48° N au 49.5° N de latitude et représente à peu près 30 000 ha, soit 5.7% de la superficie viticole française (en appellation) [SCEES, 2000]. En examinant sa répartition spatiale (Carte III.1), on constate qu'il est très morcelé sur un espace de 90 km du nord au sud et de 70 km d'ouest en est. Réparti sur plusieurs départements, il est principalement implanté dans la Marne avec plus de 21 000 ha, soit plus des deux tiers de la superficie totale du vignoble champenois (Tableau III.1).

Tableau III.1: Répartition des surfaces viticoles en champagne selon les départements (dans les années 1990)

	Superficie (en ha)	Proportion (en%)
Aisne	2 800	9.0
Aube	6 645	21.3
Marne	21 670	69.4
Haute-Marne	68	0.2
Seine-et-Marne	45	0.1
Ensemble	31 228	100

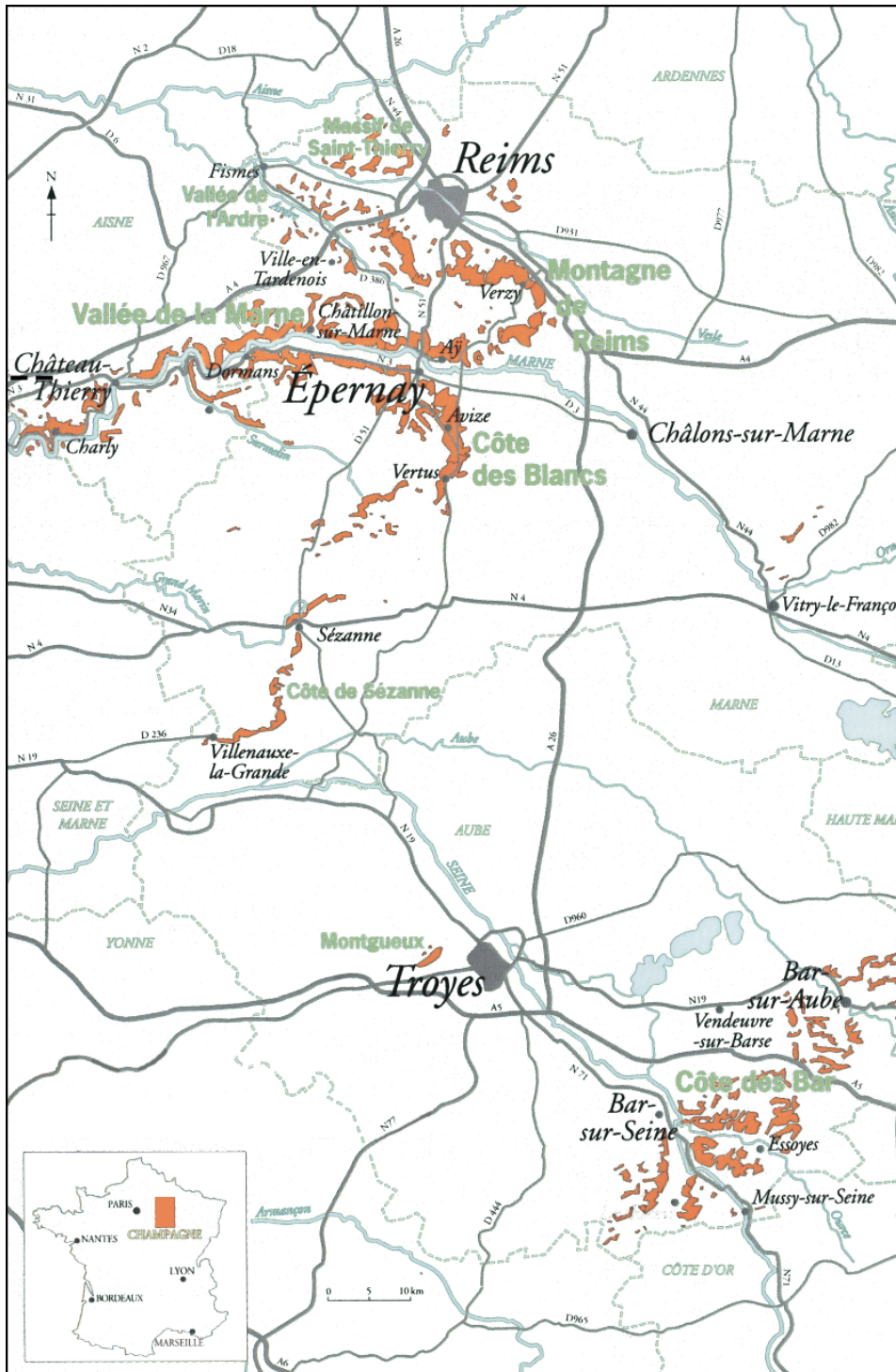
Source : [Garcia, 1997]

65. En géographie agraire, le terme *champagne* désigne des paysages de champs nus (aussi *plaine*, *champeigne*, *champs ouverts* et *openfield*), qui caractérisent des régions de plateaux crayeux ou calcaires comme la Beauce, la Brie, la Picardie, etc.

66. Dans cet article de qualité, Reynaud [1990] revient sur le terme *champagne* et discute de l'inadéquation entre ce nom de région et ses « contenus spatiaux » (région naturelle, historique, politique).

On distingue communément quatre grandes régions (Carte III.1) :

- la Montagne de Reims (coteaux entre le plateau du parc naturel régional et les vallées de l'Ardre et de la Vesle) ;
- la Vallée de la Marne (sur les deux rives, d'Épernay à Château-Thierry) ;
- la Côte des Blancs reliant Épernay aux coteaux du Sézannais ;
- et la Côte des Bar dans l'Aube.



Carte III.1 : Localisation du vignoble champenois et ses grandes régions viticoles

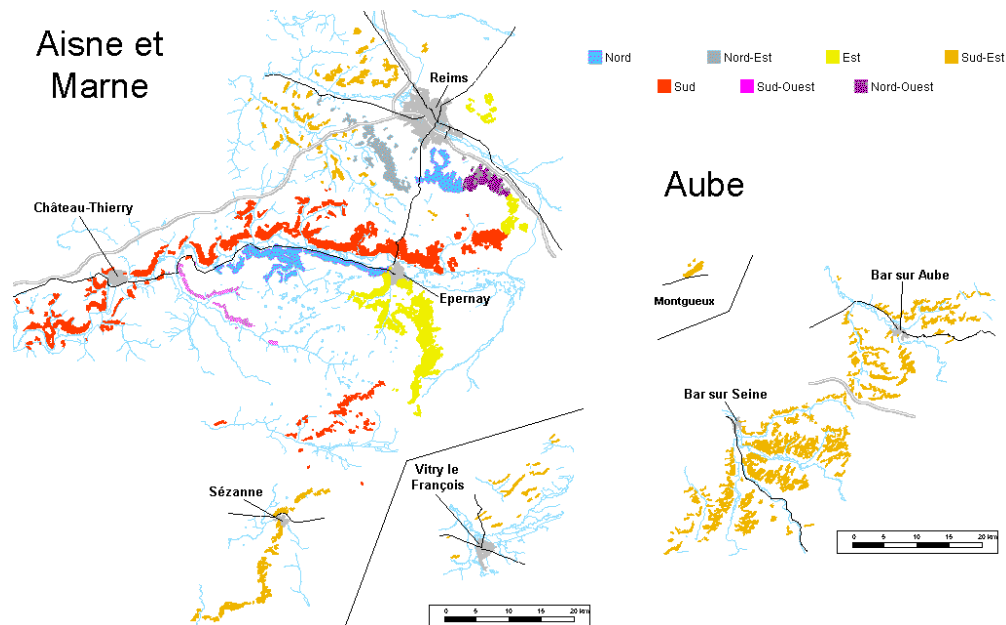
Source : d'après [www.civc.fr]
Les espaces viticoles sont indiqués en orange, les régions viticoles en vert.

Côtes et cuestas : un site privilégié de coteaux

Le vignoble a été implanté majoritairement sur des coteaux, afin de lutter passivement contre les gelées de printemps et d'être mieux exposé au rayonnement solaire (surtout orientation sud à est ; Carte III.2)⁶⁷. Bien que les altitudes ne soient pas très élevées (inférieures à 400 m), les pentes peuvent parfois être importantes du fait du fort encaissement des vallées (jusqu'à 59%) [Doledec, 1995 ; Lombart, 1998].

Dans la Marne et dans l'Aisne, les pentes des coteaux sont assez faibles (10.4% de pente moyenne), entre 110 et 180 mètres d'altitude [Ballif, 1999 ; Panigai et Doledec, 1998] : sur les revers de la cuesta d'Île-de-France (Massif de Saint-Thierry, Montagne de Reims, Côte des Blancs, région de Congy-Villenard et le Sézannais), ainsi que sur les versants de la vallée de la Marne et des vallées adjacentes (Carte III.1).

Le vignoble de l'Aube, à une centaine de kilomètres au sud-est de celui de la Marne, est localisé sur des coteaux beaucoup plus inclinés (14.3% en moyenne) et entre 150 et 400 mètres d'altitude. La cuesta du Barrois est découpée par les vallées de la Seine et de l'Aube, beaucoup plus étroites et encaissées que la vallée de la Marne.



Carte III.2 : Les orientations dans le vignoble champenois

Source : [www.civc.fr]

Les coteaux viticoles ont très souvent le même profil topographique, une « forme lisse » issue de la régularisation des versants : zones de forte pente en haut de versant (forme concave) et zones de replat en bas [Lombart, 1998].

Les roches en place et le sol

En Champagne, les sédiments affleurants sont calcaires à 75% (craies, marnes et calcaires proprement dits). La Côte de l'Île-de-France est constituée par la craie du Crétacé (craie à bélemnites) et les formations diverses du Tertiaire (calcaires, argiles, sables, etc.) [Hilly et Haguenaer, 1979]. La Côte du Barrois dans l'Aube est une cuesta formée par le contraste

67. La position du vignoble sur des coteaux pose, d'un autre côté, un problème d'érosion hydrique (étudié notamment par [Lombart, 1998 ; Marre et Laurain, 1996])

entre les calcaires du Portlandien et les marnes du Kimméridgien. Le rôle de la craie est assez souvent mise en avant pour expliquer la qualité du vignoble champenois, notamment en favorisant le drainage des sols. De plus, sa couleur blanche jouerait également un rôle prépondérant : en réfléchissant les rayons solaires, elle permettrait d'optimiser l'ensoleillement et d'augmenter localement la température des bourgeons.

Toutefois, les sols de ce vignoble ont été tellement remaniés depuis des siècles par l'homme qu'ils en ont perdu leurs caractéristiques originelles, en particulier du fait des nombreux amendements⁶⁸ [Pomerol, 1984] :

« [les vignes poussent] dans un sol artificiel qui a fini par acquérir, à force d'apports incessants, une constitution qui favorise à un haut degré leur prospérité. Leur culture peut se comparer en quelque sorte à la culture maraîchère, dans laquelle on accumule dans un sol superficiel les éléments fertilisants nécessaires à la production des récoltes. » [Dion, 1990]

Le paysage « classique » du vignoble champenois

L'image traditionnelle du vignoble de Champagne est celle de coteaux plantés de vigne, surplombant de grandes cultures et dominés par des sommets boisés (Figure III.1) :

« La couverture végétale des sols obéit à un strict zonage. Forêt en exclusivité sur le revers de plateau, puis vignes sur le front de côte et les versants de vallées, enfin installation de cultures variées à l'approche du contact avec la dépression et abandon rapide de la viticulture. » [Réjalot, 2000]



Figure III.1 : Le coteau des « Noires Vaches » (Vertus)

Source : [Beltrando, communication privée]

Sur la Figure III.2 issue du satellite SPOT, nous observons un morcellement relativement important du vignoble. Les parcelles, très nombreuses (plus de 250 000) ont une superficie moyenne de 12 ares [Réjalot, 2000]. Elles sont cultivées « en champs ouverts », sans clôture, à l'inverse, par exemple, des *châteaux* du vignoble bordelais.

68. Cet apport, de tourbe, de lignite ou encore de composts, vise à améliorer les propriétés physiques d'un sol.

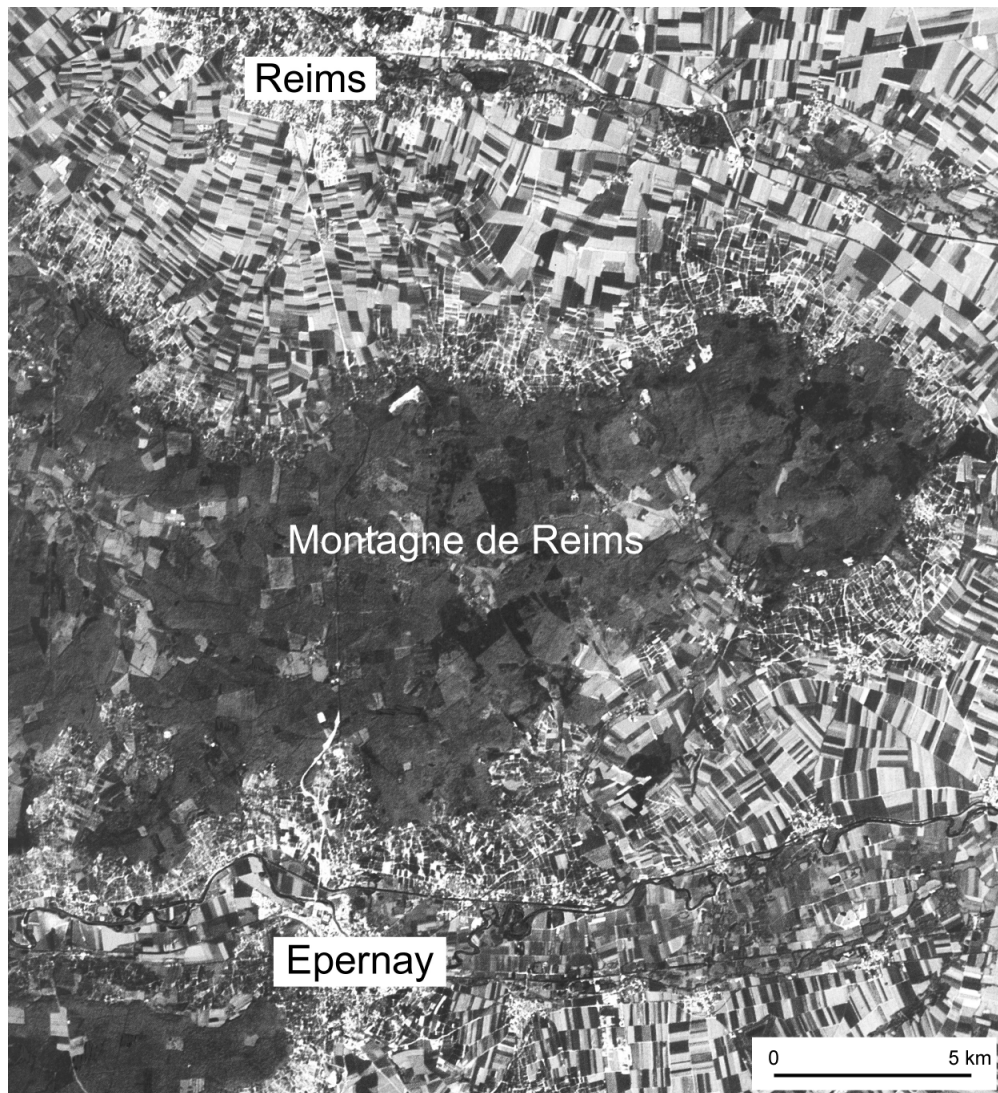


Figure III.2 : Image satellite de la Montagne de Reims (SPOT)

Source : d'après [Hubschman *et al.*, 1992]

III.2 - Un climat océanique de transition

La région Champagne-Ardenne qui regroupe la *quasi*-totalité du vignoble champenois est soumise à un climat océanique de transition, avec une tendance continentale sensible sur le sud et l'est [Météo France, n.d.]. La dégradation du caractère océanique apparaît dans la décroissance des températures en hiver vers l'est et dans l'augmentation de l'insolation vers le sud [Escourrou, 1982]. En outre, la légère continentalisation se traduit également par des orages en été.

Globalement, le climat de cette région est caractérisé par des précipitations régulières et des contrastes thermiques peu marqués d'une saison à une autre. La description qui suit s'appuie sur les paramètres climatiques moyens de deux stations synoptiques situées à proximité de ce vignoble : Reims-Courcy au nord du vignoble marnais et Troyes au nord-ouest du vignoble aubois (station plus éloignée ; Carte III.1, p. 58).

Les précipitations

Pour les deux stations, les précipitations sont assez régulières au cours de l'année (autour de 50 mm par mois), même si leur répartition mensuelle présente deux légers maxima, en mai-juin et en octobre-décembre (Figure III.3). Troyes et Reims, avec des totaux pluviométriques annuels respectivement de 633 et de 604 mm, se différencient assez peu et sont caractérisées par des précipitations relativement faibles par rapport à l'ensemble de la région Champagne-Ardennes [Météo France, n.d.] (Annexe A).

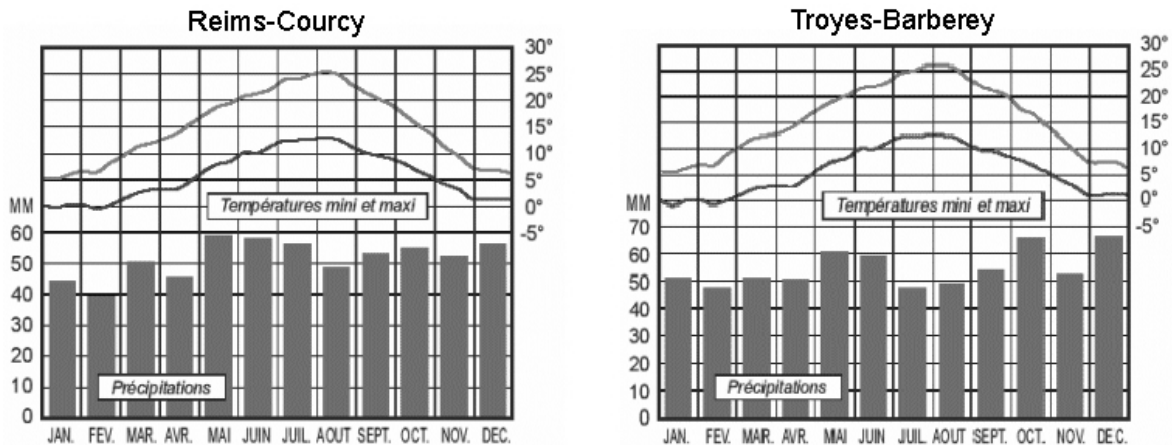


Figure III.3 : Normales de températures et de précipitations pour deux stations synoptiques situées à proximité du vignoble champenois (1971-2000)

Source : [www.meteo.fr]

En outre, l'intensité des précipitations est beaucoup plus importante en été qu'en hiver, ce qui est lié au caractère orageux des précipitations estivales. Dans l'*Aperçu climatique de la région Champagne-Ardennes* (Annexe A), Météo France [n.d.] donne un exemple éloquent : à Reims, il tombe, au mois d'août, 49 mm en 40 h en moyenne, alors que les précipitations de janvier sont de 44 mm en 108 h.

Les températures

La température moyenne est de 10°C pour la Marne et de 9°C pour l'Aube. L'amplitude thermique annuelle reste modérée : 16°C à Reims et 17°C à Troyes. Les températures minimales pour les deux stations sont, en moyenne, de 0°C en hiver et de 13°C en été (Figure III.3).

Au printemps, il n'est pas rare que les températures journalières descendent en dessous de 0°C, ce qui peut conduire au gel des bourgeons de la vigne. La date de la dernière gelée à Reims-Courcy est, en moyenne, le 27 avril, mais certaines années, l'aléa gélif persiste jusqu'à la fin du mois de mai (date la plus tardive : 1^{er} juin 1962)⁶⁹ [Météo France Reims, communication privée].

Le vent

D'une manière générale, les vitesses du vent à Reims-Courcy sont plutôt modérées [Météo France, n.d.]. La Figure III.4 représente les fréquences de direction du vent sous la forme

69. De 1949 à 1996, la date de la dernière gelée (températures inférieures ou égales à 0°C) à Reims-Courcy : la moins tardive, 01/04/87 ; quintile 1, 17/04 ; quintile 2, 24/04 ; médiane, 27/04 ; quintile 3, 29/04 ; quintile 4, 06/05 ; la plus tardive 01/06/62 [Météo France Reims, communication privée].

d'une rose. Il apparaît que les masses d'air proviennent principalement du sud-ouest. Toutefois, les advections nord et est ne sont pas inhabituelles. Provoquant un refroidissement général des températures, elles peuvent être associées à des événements gélifs (surtout quand elles sont suivies de conditions plus radiatives).

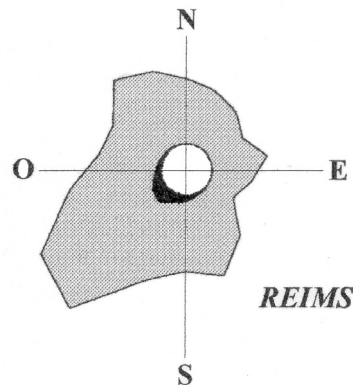


Figure III.4 : Rose des vents à Reims-Courcy (1961-1990)

Source : [Météo France, n.d.]
Échelle non précisée.

En outre, un autre facteur déterminant pour la viticulture est l'ensoleillement. La région bénéficie d'une légère continentalisation, ce qui lui permet d'avoir des étés plutôt chauds et ensoleillés. La durée annuelle d'insolation est estimée à 1 700 h pour la Marne et à 1 800 h pour l'Aube.

Compte tenu des exigences climatiques de la vigne, rappelées dans le premier chapitre, le vignoble champenois connaît donc des conditions limites pour la viticulture. En particulier, sa position septentrionale le rend vulnérable aux gelées printanières, qui constituent une contrainte importante. Face à cette rigueur climatique, de nombreux auteurs avancent l'importance de nombreux microclimats résultant des variations d'altitude et d'exposition au soleil : l'implantation sur des coteaux orientés sud-est favorise ainsi un meilleur ensoleillement.

III.3 - L'appellation AOC Champagne

Les dénominations des vignobles en Appellation d'Origine Contrôlée (AOC) ont été mises en place par l'INAO⁷⁰, afin de garantir une certaine qualité pour les consommateurs et afin de défendre des terroirs (Encadré I.3, p. 14) :

« La mention AOC identifie un produit qui tire son authenticité et sa typicité de son origine géographique. Cette mention garantit un lien intime entre produit et terroir, c'est-à-dire une zone géographique bien circonscrite avec ses caractéristiques géologiques, agronomiques, climatiques..., des disciplines particulières que se sont imposées les hommes pour tirer le meilleur parti de celles-ci et une notoriété acquise de longue date que l'appellation vise à protéger. En puisant ses spécificités dans son terroir d'origine, en cherchant à valoriser les potentialités agro-pédologiques d'une zone géographique et en les protégeant, le produit AOC peut être un véritable outil d'aménagement et d'entretien du territoire. C'est un facteur de localisation de la valeur ajoutée. » [www.inao.gouv.fr]

70. INAO : Institut National des Appellations d'Origine.

Dans la région Champagne, il existe plusieurs appellations relatives à des vins : le célèbre vin *Champagne* mais aussi des vins dits *tranquilles* avec une production beaucoup plus restreinte, les vins rouges des *Coteaux champenois* (tel le vin de Bouzy) ou encore le *Rosé des Riceys*. Nous nous limiterons ici à rappeler quelques aspects de l'appellation *Champagne*, de son histoire à son économie.

Une volonté ancienne d'appellation

L'histoire des vignobles est très souvent abordée, notamment par les géographes. Ne voulant pas nous attarder sur ce sujet ici, nous orientons le lecteur intéressé vers les ouvrages de R. Dion [1990], de J.-F. Gautier [1996] ou encore de H. Johnson [1990]⁷¹, et plus spécifiquement sur le vignoble de Champagne vers A. Garcia [1997] et V. Vazart [1988]. Nous souhaitons ici insister sur le fait que les « acteurs » de ce vignoble ont très tôt voulu s'individualiser et faire reconnaître une zone d'appellation.

La viticulture existe en Champagne depuis l'époque gallo-romaine. Pendant plusieurs siècles, le vin de Champagne, appelé alors le « vin de France » comme ceux de la région parisienne, était le vin de sacre⁷², ce qui lui octroyait une certaine renommée [Gautier, 1996]. Cette puissance cléricale a bénéficié de la position de la vallée de la Marne (expéditions par bateau) et des activités commerciales importantes à Reims (foires). Cependant le vin de l'époque n'était pas celui que nous connaissons. Au XVII^e siècle, le nom « vin de Champagne » remplace celui de « vin de France » et le vin rouge pétillant est progressivement devenu vin gris, puis blanc [Dion, 1990].

Même si l'usage de désigner des produits par le nom du lieu de leur fabrication ou de leur récolte est ancien, à la fin du XIX^e siècle, le développement du commerce et la crise phylloxérique vont conduire à la délimitation de zones d'appellation viticole, puis, un peu plus tard, à la création de l'INAO [www.inao.gouv.fr]. En Champagne, après des étapes franchies en ce sens à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e⁷³, la loi du 22 juillet 1927⁷⁴ fixe la délimitation de la Champagne viticole en fonction de caractéristiques agronomiques⁷⁵ et historiques (notamment en prenant en compte les espaces viticoles présents avant la crise phylloxérique) [Benko et Tesson, 1991].

Cette appellation a été accompagnée d'un certain nombre de règles : seulement trois cépages possibles (*Pinot noir*, *Pinot meunier* et *Chardonnay*) ; taille courte et basse des vignes pour favoriser la maturité et limiter la production (système Morlat, Chablis, Guyot) ; limitation du rendement à l'hectare et au pressurage ; hauteur, espacement et densité des vignobles cultivés ; vendange à la main... [Benko et Tesson, 1991 ; Pomerol, 1984]. Depuis 1959, l'INAO procède à la révision des terrains à l'intérieur de la zone délimitée

71. Il existe de nombreux autres ouvrages, notamment de vulgarisation, sur le sujet.

72. À une époque où les religieux s'occupaient de la viticulture (notamment pour les besoins des offices religieux), Reims était la ville des sacres royaux : de Clovis en 496 à Charles X en 1825 [Gautier, 1996].

73. En 1887, le Syndicat des Grandes Marques de Champagne obtient de la Cour d'appel d'Angers un arrêt reconnaissant la propriété du mot *champagne* exclusivement aux vins issus de la Champagne. Puis en 1905, les Champenois demandent au Ministère de l'Agriculture la délimitation précise de la « Champagne viticole » et l'exclusivité du nom « champagne » réservé aux vins « récoltés et manutentionnés complètement dans la Champagne viticole » [www.civc.fr].

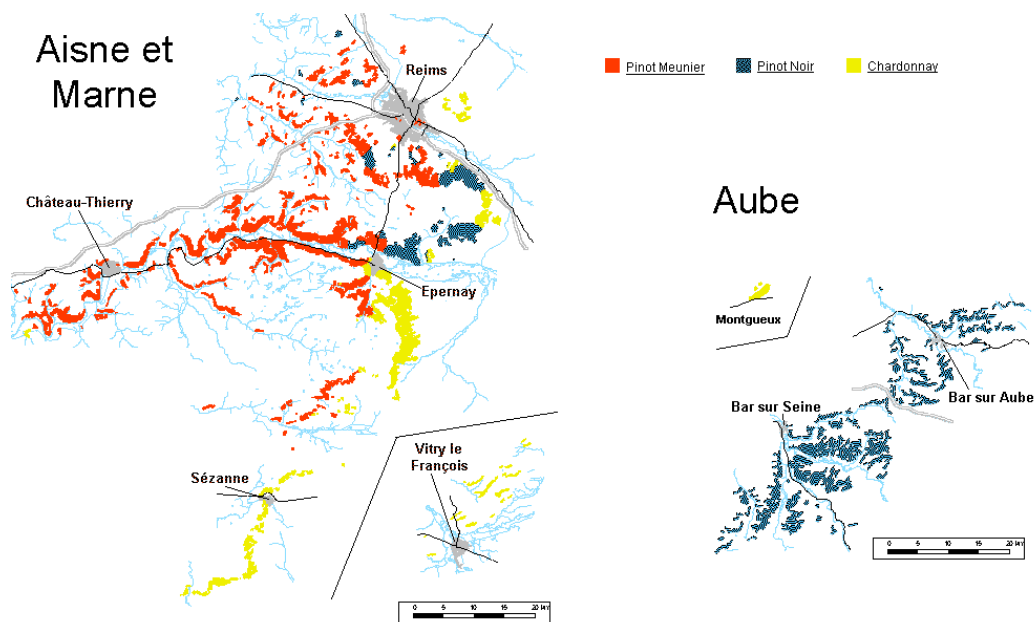
74. La loi de 1927 a été faite sous la pression d'émeutes rurales en 1908 et 1911 et des séquelles de la première guerre mondiale. Signalons que des vignobles de l'Aube ont été réintégrés ainsi qu'un certain nombre de communes oubliées lors d'une précédente délimitation (en 1908).

75. Cet argument est parfois mis en défaut, notamment en raison des faibles connaissances sur le sujet à l'époque. Certains auteurs affirment que cette délimitation donnait satisfaction aux grandes maisons de Champagne (décideurs dominants).

s'appuyant toujours sur des critères d'antériorité, auxquels s'ajoutent depuis 1984 des critères plus techniques comme la nature des sols ou l'exposition des coteaux [www.civc.fr].

L'appellation AOC Champagne

L'appellation AOC Champagne définit une aire de 34 000 ha. À l'intérieur de celle-ci, la culture des différents cépages autorisés suit une répartition géographique bien structurée (Carte III.3) : le *Pinot noir* (38%⁷⁶) essentiellement sur la Montagne de Reims et dans l'Aube ; le *Pinot meunier* (35%) dans la vallée de la Marne et le *Chardonnay* (27%) sur la Côte des Blancs et la Côte de Sézanne. Cette répartition spatiale est liée à des facteurs pédologiques et climatiques : par exemple, le Pinot meunier a un débourrement plus tardif, ce qui peut le protéger des gelées printanières.



Carte III.3 : Les cépages dans le vignoble champenois

Source : [www.civc.fr]

Dans cette aire juridique d'appellation AOC, des nuances étaient auparavant apportées par l'échelle des crus. Celle-ci, qui n'est plus appliquée actuellement, reposait sur une délimitation des communes en fonction de critères naturels, traditionnels et surtout historiques, voire politiques. À chaque commune était affecté un indice variant entre 80 et 100, qui permettait de calculer le prix du kilo de raisin à partir du prix de base indicatif déterminé par le CIVC⁷⁷ [Réjalot, 2000]. La majorité des communes de *grand cru* (100% - 17 communes) et de *premier cru* (de 90 à 99% - 50 communes) est située essentiellement sur la Côte des Blancs et la Montagne de Reims.

Actuellement, cette échelle tarifaire n'est plus appliquée⁷⁸, notamment parce que sa définition à l'échelle communale ne prenait pas en compte les variations infracommunales.

76. Ces pourcentages représentent la part de chaque cépage dans l'ensemble du vignoble champenois [www.civc.fr].

77. Prenons un exemple numérique pour illustrer : supposons le kilo de raisin au prix de 4€/kg. Les récoltants d'une commune de *grand cru* vendaient alors leur récolte à ce prix ; par contre, pour ceux d'une commune à l'indice 80, le prix du kilo de raisin était de 3.2€/kg (4 * 0.80).

78. Ce sont maintenant des contrats individuels entre le vigneron et le négociant.

En outre, pour A. Brochot [1999], elle était critiquée par les vigneron et ne reflétait pas, à l'origine, une échelle de qualité :

« [...] le prix du raisin, fixé par l'interprofession, est maximum dans les communes les plus proches des deux pôles du négoce et décroît en fonction de leur éloignement. Mais ce qui, au départ, devait être un gradient de compensation s'est vite retourné contre ceux qui devaient en être les bénéficiaires en introduisant, de fait, une hiérarchie entre les différentes zones du vignoble et en induisant des différences qualitatives des vins par l'utilisation des mentions "grand cru" et "premier cru". Et ce qui était échelle tarifaire a peu à peu été perçu comme échelle de qualité. » [Brochot, 1999]

Néanmoins, l'indication du cru 100% reste indiqué sur les bouteilles, à des fins commerciales.

Un vignoble puissant économiquement mais limité en surface

Alors qu'en 1954 la superficie du vignoble de Champagne est de 11 800 ha, sa progression, au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, est considérable : elle atteint 21 000 ha en 1975 et plus de 30 000 ha à la fin de ce siècle [CIVC, communication privée]. Les chiffres de production sont d'autant plus impressionnants : la production a été multipliée par neuf entre 1950 (32 millions de bouteilles par an) et 2002 (269 millions), notamment en raison des progrès agronomiques. Sur ces 269 millions de bouteilles, plus des deux tiers sont produites par les Grandes Maisons (Tableau III.2), qui en exportent la moitié vers l'étranger⁷⁹. À l'inverse, les récoltants-manipulants et coopérateurs sont presque exclusivement tournés vers un marché national. Ces deux *acteurs* du champagne, le négoce et les vigneron, ont eu des rapports difficiles, notamment lors de la crise phylloxérique [Benko et Tesson, 1991 ; Réjalot, 2000]. Leurs images respectives sont bien différenciées : le prestige, les grands noms et la renommée internationale pour le négoce et, à l'inverse, le « bon petit récoltant », dont les gens se passent l'adresse de bouche à oreille [Brochot, 1999].

Tableau III.2 : Ventes des vins de Champagne en 2002 (en bouteilles de 75 cl)

	France	Exportation	Total
Négoce	96 096 780	99 017 664	195 114 444
Récoltants-manipulants et coopérateurs	78 811 011	13 725 920	92 536 931
Total	174 907 791	112 743 584	287 651 375

Données : [CIVC, communication privée]

Cependant, l'accroissement a été freiné certaines années du fait des aléas climatiques tels que les gelées ou la grêle. Ces contraintes climatiques extrêmes ayant des répercussions économiques importantes témoignent de la fragilité de ce vignoble septentrional. Confrontés alors, à des vendanges variables, en qualité comme en quantité, les vigneron champenois s'en protègent en conservant chaque année une partie de la récolte. Ces *vins de réserve*, ajoutés aux vins de l'année suivante (lors de l'assemblage⁸⁰) sont les garants de la permanence d'un goût :

« Si les œnologues reconnaissent des caractéristiques propres aux vins produits sur les différents crus du vignoble, le champagne reste, dans l'immense majorité des cas, le résultat d'un assemblage qui peut combiner non seulement les cépages, mais aussi les cuvées

79. Les exportations ont fortement augmenté ces dernières années : « si les ventes en France ont progressé de 30% de 1975 à 1985, le marché extérieur a augmenté de 158% durant la même période » [Benko et Tesson, 1991].

80. Le lecteur souhaitant se documenter sur l'élaboration du champagne, non décrite ici, pourra s'orienter vers de nombreux ouvrages touristiques sur la Champagne, vers l'ouvrage de Garcia [1997] ou encore vers l'article de Benko et de Tesson [1991].

provenant de plusieurs crus ou même de plusieurs années. [...] C'est, en outre, pour s'affranchir des aléas climatiques et des variations annuelles dans la quantité et la qualité du raisin que les négociants ont développé et perfectionné cette pratique qui, si elle réduit le plus souvent la spécificité du terroir à sa plus simple expression, est aussi pour eux la garantie de pouvoir reproduire d'année en année leur propre "style" et offrir ainsi à leur clientèle un vin régulier et au goût constant. » [Brochot, 1999]

Les revenus dérivés du champagne sont considérables et pèsent fortement dans l'économie d'un département comme la Marne. La Chambre de commerce et d'industrie de Reims et d'Épernay mentionne que le montant total des ventes de champagne en 2002 a rapporté 3.3 milliards d'euros [www.reims.cci.fr]. Plus de 30 000 personnes sont concernées par l'activité champagne dans sa globalité⁸¹.

L'appellation AOC réunit 15 019 exploitations avec une surface moyenne de 2.1 ha (91% moins de 5 ha et 47% moins de 1 ha), ce qui est assez faible en comparaison avec d'autres vignobles [Réjalot, 2000]. Les exploitations réunissent plusieurs parcelles dispersées afin de diversifier les caractéristiques de la récolte et d'assurer des récoltes (par exemple, en cas de gelée). La superficie totale du vignoble champenois, et plus généralement celle des vignobles dits *de qualité*, n'a pas diminué contrairement à la baisse globale observée dans la France viticole depuis un demi-siècle [Auriac et Rey, 1998]. D'une manière générale, le secteur viticole français représente actuellement 17% des exploitations et 3% des terres agricoles [SCEES, 2000]. Il contribue fortement à l'excédent agroalimentaire français. Cependant, il existe de fortes disparités internes. Ainsi, on rencontre dans la viticulture française les revenus les plus élevés de toute l'agriculture, comme c'est le cas en Champagne, mais aussi les plus faibles [Dupont, 2002].

Sur les 34 000 ha ayant droit à l'appellation AOC Champagne, seuls 31 000 ha sont exploités. Une grande partie des 3 000 ha restants n'est pas utilisable : pentes excessives, occupation par d'autres activités, etc. En somme, le vignoble de Champagne s'étend sur un espace limité, ce qui, étant donnée la valeur marchande du vin produit, engendre un prix élevé de la terre.

Face à l'actuelle non-extensibilité de la production⁸², certains négociants choisissent alors la délocalisation et la diversification économique des activités⁸³, dans un contexte de concentration. Dans le bouleversement récent de la planète vini-viticole, le champagne semble épargné, notamment grâce à sa forte valeur symbolique (le luxe et la richesse, mais aussi la fête)⁸⁴. Cependant, sur la *planète viticole*, le *Nouveau Monde* s'affronte à l'Europe dans certaines pratiques œnologiques et législatives, comme dans la conquête des parts de marché. Aussi, dans ce contexte, la notion de *terroir*, mise en avant par les vieux pays, prend toute son importance (Encadré I.3, p. 14).

81. En incluant les bouchonneries, les cartonneries, les verreries, les imprimeries ou encore le matériel vitivinicole, etc.

82. Même si des discussions sont en cours pour étendre éventuellement l'aire AOC.

83. G.B. Benko et T. Tesson [1991] donnent les exemples d'une *joint-venture* de Heidsieck avec la Société nord-américaine Renfield Corporation pour produire et commercialiser un *sparkling wine* élaboré par le savoir-faire de la Maison champenoise, de la commercialisation par Mumm du Chivas Regal ou encore de la participation financière de Taittinger dans les magasins du Louvre.

84. Son pouvoir symbolique s'exprime, par exemple, dans le fait que sa bouteille soit reconnaissable très rapidement. Réjalot [2000] mentionne qu'il suffit « aux dessinateurs Hergé et Uderzo de barrer d'une simple ligne rouge une bouteille ou une amphore pour évoquer chez le lecteur l'idée du champagne ».

Hergé, *Le crabe aux pinces d'or*, Casterman, 1953, p. 13 et 18 ; Goscinny et Uderzo, *Le tour de Gaule d'Astérix*, Dargaud, 1965, p. 18.

III.4 - Les gelées en Champagne

Le vignoble champenois, du fait de sa situation septentrionale, est exposé au phénomène du gel, essentiellement au printemps, entraînant des dégâts plus ou moins importants. En moyenne, la Champagne connaît chaque année 3,5 nuits de gel de mars à juin, dont 2,8 après le débourrement [AVC, 1991]. En moyenne, une fois par an, une gelée provoque des dégâts importants sur les vignes. Entre 1928 et 1990, une moyenne des surfaces détruites a été estimée à 800 ha par an (52 200 ha en 63 ans). Au niveau des rendements, O. Brun et P. Cellier [1993] évaluent les pertes moyennes liées aux gelées printanières à 1 697 kg/ha par année de gel, soit 595 kg/ha par an. Compte tenu de la forte valeur ajoutée du vin de Champagne, G. Vesselle [1993] précise que cela représente 420 millions de francs (environ 64 millions d'euros) de perte annuelle en moyenne⁸⁵, sans compter les effets indirects.

III.4.1 - Des gelées printanières fréquentes mais très variables d'une année à l'autre

En 1988, V. Vazart a réalisé une étude historique des gelées de printemps dans le vignoble champenois, sur la période 1875-1986, et a estimé leurs conséquences sur la production de raisin (volume de récolte). Plusieurs données chiffrées ont retenu notre attention :

- 97 années sur 110 avec au moins de gel météorologique (soit 88%) ;
- en tout, sur cette période de 110 ans, 403 jours de gel météorologique (températures négatives), dont 102 jours de gelées dommageables pour la vigne ;
- 81 années avec des dégâts (73.6%) ;

La période à risque commence début avril⁸⁶, au moment de la reprise de la croissance végétative, et se termine généralement avec le mois de mai :

« Cependant, les gelées réellement responsables de dommages représentent 20% des gelées du mois d'avril et 35% des gelées du mois de mai. Les gelées du mois de mai peuvent donc être considérées comme plus dangereuses que celles du mois d'avril. » [Vazart, 1988]

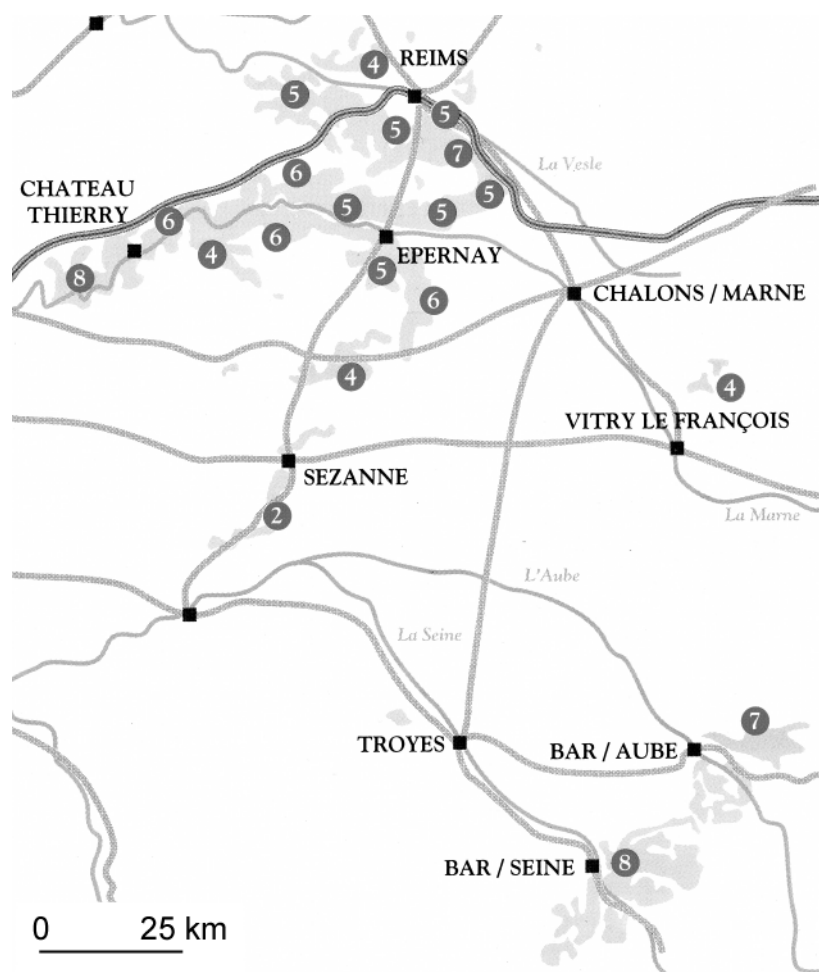
Plus récemment, en 1991, une enquête, réalisée par les services techniques du CIVC, a permis de préciser le phénomène des gelées à l'échelle communale dans le vignoble champenois. Bien que le département de l'Aube soit plus exposé au risque gélif que la Marne ou que l'Aisne, il existe une forte variabilité des événements gélifs et tout secteur du vignoble peut être touché par ce phénomène. Sur 157 communes, cette étude a répertorié les grandes années de gel depuis 1951 (soit 1951, 1957, 1961, 1965, 1967, 1968, 1971, 1977, 1981, 1989, 1990, 1991) (Carte III.4).

« Des secteurs se distinguent par leur risque élevé : supérieur à 7 gelées graves dans le Barsur-Aubois, le Barséquanais, ainsi que l'Ouest de Château-Thierry. À l'opposé, le Massif de Saint-Thierry, la région de Congy-Villevenard et surtout le Sézannais semblent beaucoup moins affectés. Entre ces deux extrêmes, seules quelques nuances différencient le risque d'une région à une autre : on constate que si les secteurs de Verzy-Verzenay, Épernay, les rives gauche et droite de la Marne et la Côte des Blancs sont plutôt "plus gélifs", la Grande

85. Au-delà de cette moyenne, G. Vesselle [1993] a estimé à 2.5 milliards de francs (en euros) les dégâts des gelées de 1985 (du 5 au 8 Janvier, -22° C et le 27 avril, -6° C), et ceux des gelées printanières de 1989 à près d'un milliard et demi de francs.

86. Cependant, V. Vazart [1988] mentionne le cas particulier des gelées du 21/03/1961.

Vallée de la Marne, les secteurs de Bouzy-Ambonnay, Trépail-Villers Marmery, Chigny les roses, la Montagne Ouest et la Vallée de l’Ardre sont plutôt “moins exposés”. » [AVC, 1991]



Carte III.4 : Nombre moyen des gelées pour les communes depuis 1951

Source : [AVC, 1991]

Toutefois, même si ce vignoble subit cette contrainte climatique des gelées, les vignerons se protègent peu. En effet, une enquête réalisée par le CIVC en 1991 (sur 75% du vignoble champenois) a permis d’estimer la surface protégée à 680 ha, soit environ 3.1% de la surface étudiée [Langellier et Jacquet, 1991]. En outre, le taux de protection varie selon les départements : 1.5% dans la Marne, 2.5% dans l’Aisne et 6.3% dans l’Aube, département qui reste plus touché par le gel que les deux autres [AVC, 1991].

Depuis 1991, le vignoble de Champagne n’avait pas connu de gelées importantes et les viticulteurs pouvaient se sentir à l’abri. Cependant, en avril 2003 (plus précisément la nuit du 10 au 11 avril), le vignoble a subi des dégâts importants. Les gelées ont alors touché de nombreux secteurs, mais, surtout, la Côte des Blancs où le cépage Chardonnay, plus précoce, est implanté. Une étude plus détaillée sera présentée ultérieurement et s’attachera à décrire la dynamique synoptique de cette période de froids matinaux (cf. X.1 - Étude dynamique des fortes gelées d’avril 2003, p. 187).

III.4.2 - Le système opérationnel de prévision des gelées de printemps par Météo France

Les dégâts des gelées printanières sur les bourgeons de la vigne ont suscité de nombreuses recherches afin d'améliorer les moyens de lutte et d'affiner la prévision du risque de gel printanier. Ainsi, le CIVC, les Vignobles et Recherches Mumm-Perrier Joüet et Météo France (Marne) ont décidé ensemble d'un système de prévision des gelées de printemps dans le vignoble de la Marne [Choisnel *et al.*, 1993]. L'objectif de ce système est de prévoir l'aléa gélif du bourgeon (seuil fixé à -2.5°C) et aussi de limiter les fausses alertes.

Ce système comprend plusieurs étapes (Figure III.5) :

- prévision de la température minimale sous abri (à 2 m) pour la station synoptique de Reims-Courcy, grâce au modèle de prévision de l'INRA en situations estimées comme *radiatives* (II.3.4 - Le modèle numérique de l'INRA, p. 55) ou par l'appréciation du prévisionniste (s'appuyant sur sa connaissance du terrain et sur les prévisions nationales de Météo France) ;
- estimation de la température minimale sous abri pour une station dans le vignoble ;
- estimation de l'indice actinothermique à 10 cm pour cette station.

En préalable aux deux dernières étapes, une adaptation statistique locale doit être réalisée.

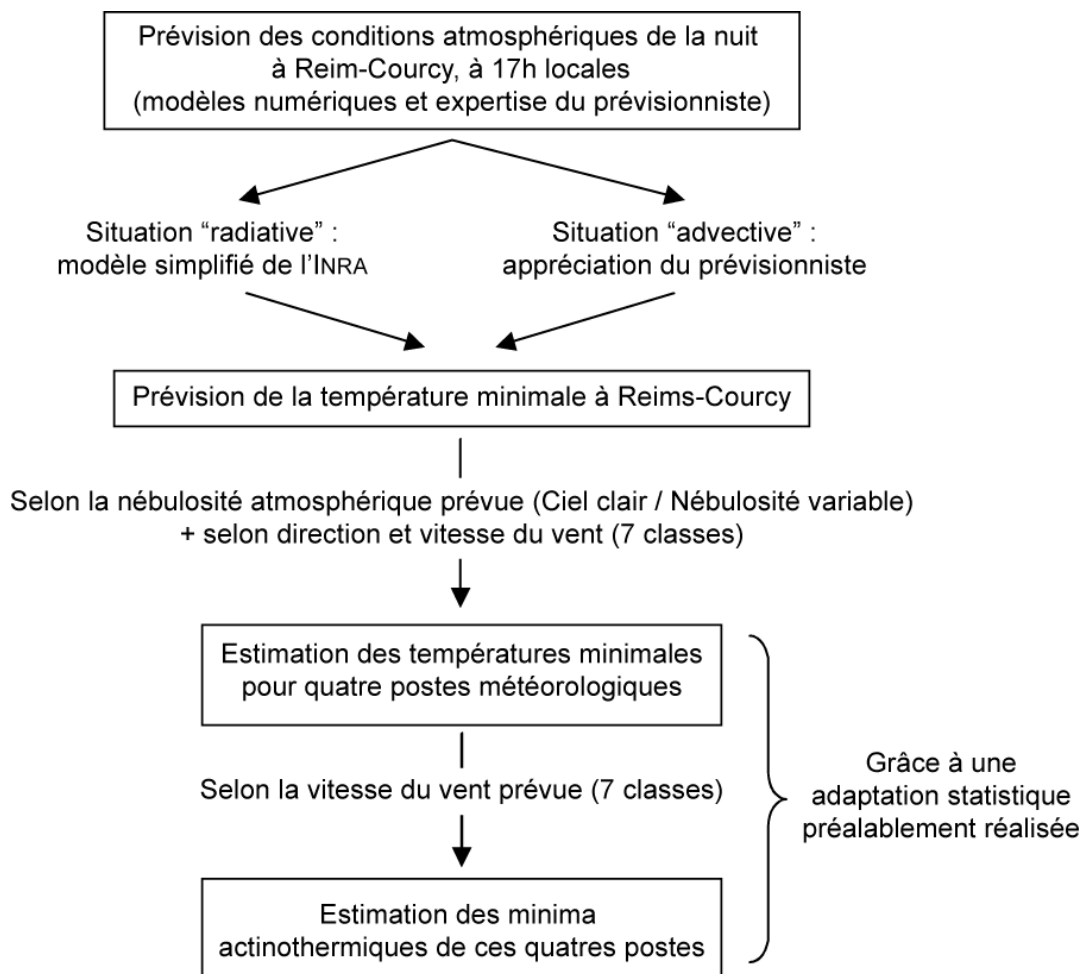


Figure III.5 : Le système opérationnel de prévision des gelées de printemps par le CDM de la Marne

L'adaptation statistique locale

L'adaptation statistique est une méthode destinée à améliorer, à l'échelle locale, les résultats de la prévision fournie par un modèle numérique [Pottier, 1990]. Cette correction s'appuie sur l'expérience et la connaissance climatologique du site. Reposant le plus souvent sur des relations statistiques ou sur des écarts moyens, l'adaptation statistique permet d'intégrer les effets locaux [Marais, 1997].

Concernant la Marne, la résolution spatiale des modèles de prévision numérique ne permet pas de prendre en compte des variations topoclimatiques des données thermiques, induites notamment par la Montagne de Reims. Ainsi, afin d'extrapoler la prévision du gel faite à Reims pour d'autres sites du vignoble champenois, il a été pertinent de réaliser une étude topoclimatique préalable : à partir de données thermométriques de quatre points du vignoble (Avize, Bouzy, Chambrecy et Mailly) sur une période de neuf ans (1976-1984), des tendances systématiques d'écarts thermiques ont ainsi été calculées entre ces stations et la station du réseau synoptique Reims-Courcy, selon les différents types de masse d'air [Choisnel *et al.*, 1993].

Le premier écart thermique est donc défini par la différence entre la température minimale du poste et celle de Reims - Courcy : $T_N(\text{poste}) - T_N(\text{Rei})$. Des moyennes de ces écarts ont été calculées, selon le type de masse d'air de la nuit étudiée. Ainsi, toutes les nuits de l'étude ont été classées selon leur nébulosité, qui peut modifier le déficit radiatif. L'occurrence d'une fraction d'insolation supérieure ou égale à 80% la veille et le jour même (à Reims-Courcy) a été choisie comme critère déterminant les nuits de « ciel clair » ; les autres nuits ont été désignées par « nébulosité variable ». Cette première classification est ensuite affinée par une seconde réalisée sur les données de vent à Reims-Courcy à 0h UTC (à 10 m). Cela permet d'attribuer à chaque nuit une classe de vent, parmi les sept définies par Météo France selon la direction et la vitesse du vent (Figure III.6). Six classes dépendent de la direction du vent et ont été déterminées à partir de l'étude de la répartition statistique de la direction des vents de 1951 à 1980. Enfin, une dernière classe est caractérisée par des vents strictement inférieurs à 2 m/s.

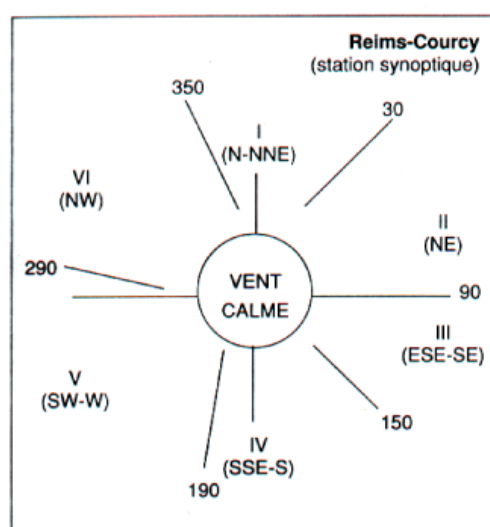


Figure III.6 : Secteurs de vent utilisés dans l'adaptation statistique locale

Source : [Choisnel *et al.*, 1993]

Le deuxième écart thermique estime l'indice actinothermique d'un poste (à 10 cm pour Météo France) à partir de la température minimale de ce même poste : T_N (poste) – IA (poste). Puis, des écarts moyens sont calculés selon la vitesse du vent à Reims - Courcy à 0h UTC (précisons que tous les vents supérieurs ou égaux à 6 m/s sont regroupés).

La mise en oeuvre opérationnelle du système par le CDM de la Marne

La campagne de prévision des gelées de printemps débute avec le risque de gel printanier pour la vigne, c'est-à-dire à partir du débourrement (le plus souvent début avril) et ce jusqu'à mi-juin.

En premier lieu, chaque jour, le prévisionniste, aidé des prévisions du modèle de Météo France, évalue l'importance de la nébulosité pour la nuit suivante. De cette façon, il peut éventuellement décider d'activer le logiciel issu du modèle simplifié de l'INRA (situation de ciel clair, sans changement de masse d'air ; II.3.4 - Le modèle numérique de l'INRA, p. 55). À 15-16h UTC⁸⁷ (17h locales), les mesures à Reims-Courcy de la température sous abri, de la température du point de rosée et de la vitesse du vent (à 10 m) permettent d'estimer les données d'entrées du modèle simplifié : température sous abri au coucher du soleil, température à 10 cm dans le sol au coucher du soleil, température sous abri une heure après le coucher du soleil et température du point de rosée une heure après le coucher du soleil. Le modèle donnera une température minimale sous abri pour Reims (et l'indice actinothermique à 10 cm). Si le modèle n'est pas activé, le prévisionniste estimera cette température à partir de son appréciation personnelle et des sorties du modèle numérique de Météo France (ARPEGE et ALADIN). L'adaptation statistique permet alors, à partir de l'ajout des données prévues de la vitesse et de la direction du vent pour la nuit, d'estimer un indice actinothermique pour quatre points du vignoble.

À 17h30 locales, la prévision de ces indices est donnée soit, sur un répondeur vocal, selon une fourchette (minimum et maximum), soit pour les quatre points à Mumm Perrier-Joüet et autres abonnés (Annexe B). Ce système, testé en 1988 et 1989, est opérationnel depuis 1990. Un indice actinothermique prévu inférieur à -2.5°C détermine un aléa gélif. La Figure III.7 nous indique les résultats du test sur 1989 : le risque de gel a été à chaque fois bien prévu, avec cependant deux fausses alertes (pour Avize et pour Chambrecy).

87. UTC : Coordinated Universal Time (référence internationale du temps). En France, le décalage est de +1h en hiver par rapport à l'heure UTC et de +2h en heures locales d'été.

<u>AVIZE</u>		<u>OBSERVATION</u>	
P R E V I S I O N	OUI	NON	
	O		
U	1	1	
I	-----		
N	0	48	

<u>BOUZY</u>		<u>OBSERVATION</u>	
P R E V I S I O N	OUI	NON	
	O		
U	0	0	
I	-----		
N	0	50	

<u>CHAMBRECY</u>		<u>OBSERVATION</u>	
P R E V I S I O N	OUI	NON	
	O		
U	4	1	
I	-----		
N	0	50	

<u>MAILLY</u>		<u>OBSERVATION</u>	
P R E V I S I O N	OUI	NON	
	O		
U	0	0	
I	-----		
N	0	50	

Figure III.7 : Tables de vérité Observation / Prédiction en 1989 pour un indice actinothermique inférieur ou égal à -2.5°C

Source : [Choisnel *et al.*, 1993]

Conclusion du chapitre III

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les principales caractéristiques géographiques, climatiques et économiques du vignoble champenois, en insistant sur les gelées printanières, objet de cette thèse. Très variables dans le temps, mais fréquentes, ces gelées ont des répercussions économiques et sociales importantes, ce qui justifie cette recherche⁸⁸. Afin de parer à cette contrainte climatique, une meilleure connaissance du phénomène des gelées à l'échelle du vignoble est souhaitable et souhaitée par les différents acteurs de la viticulture champenoise. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de thèse.

88. Comme de nombreuses autres recherches de climatologues sur ce vignoble : [Beltrando *et al.*, 1992 ; Bridier, 2001 ; Misrahi *et al.*, 1990 ; Sarmir, 1995...]

Deuxième partie

Données et approche méthodologique

Dans cette deuxième partie, nous présentons les données sur lesquelles s'appuie ce travail de thèse ainsi que notre approche méthodologique.

Nous commençons par une description et une critique des données climatiques (température et vent, principalement) mesurées dans les stations météorologiques du vignoble marnais. Nous soulignons la forte densité du réseau disponible, avant de décrire plus précisément les mesures météorologiques utilisées. Enfin, nous insistons sur la critique de ces données, qui constitue une étape essentielle avant tout traitement.

Nous présentons ensuite les bases de données d'altitude et d'occupation sol, bases qui seront utilisées dans les parties suivantes pour expliquer les températures printanières minimales à partir de l'environnement des stations. Nous exposons ensuite la délimitation géographique de ces bases et leur jointure pour constituer une base globale de données environnementales décrivant notre zone d'étude.

Enfin, nous terminons cette partie par un bref exposé de la démarche méthodologique retenue dans cette thèse. Nous discutons ainsi de l'apport des outils statistiques pour dégager l'information contenue dans les données précédemment décrites et pour modéliser la variation spatiale des températures minimales. La place des modèles est ensuite évoquée. Enfin, nous développons les réflexions qui nous sont venues au cours de cette thèse, concernant l'intégration du temps et de l'espace.

Chapitre IV - LES DONNEES CLIMATIQUES

La connaissance climatique est inséparable des mesures physiques qui sont principalement réalisées par des stations météorologiques structurées en réseau. Cette recherche a grandement bénéficié de l'existence d'un réseau dense de stations installées dans ou à proximité du vignoble marnais. Le grand nombre de données climatiques mesurées a permis l'étude de la variabilité spatio-temporelle des températures minimales et des écoulements de l'air.

Les données climatiques utilisées nous ont été fournies par Météo France et par le CIVC, grâce à une collaboration entre des géographes de l'Université Paris 7⁸⁹, le CIVC et le CDM de la Marne. Cette collaboration, existant depuis plusieurs années et visant essentiellement à améliorer la connaissance du phénomène des gelées printanières, m'a permis d'effectuer un stage au CDM 51 en 1997 (qualité des prévisions de températures) et d'être chargée d'étude au CIVC (amélioration de la prévision des épisodes gélifs aux échelles spatiales fines).

Dans cette partie, nous présenterons, dans un premier temps, le réseau de stations automatiques retenues dans cette recherche. Nous décrirons ensuite le type de données acquises, ainsi que leurs capteurs. Enfin, nous concluons par une analyse critique de ces données, analyse nécessaire avant tout traitement statistique.

IV.1 - Les réseaux d'information climatique de la Marne

En France, plusieurs réseaux d'information climatique coexistent à différentes échelles : les stations synoptiques du réseau Météo France, les postes climatologiques et les stations automatiques à l'échelle sous-synoptique, ainsi que les stations de réseaux à une échelle très fine⁹⁰.

Ce travail s'appuie sur plusieurs stations météorologiques gérées et exploitées par divers organismes : les réseaux de Météo France, de l'AGREMAM⁹¹ et du *Zonage vignoble*. Après une description de ces réseaux, nous présenterons l'ensemble des stations retenues dans cette recherche.

IV.1.1 - Les réseaux de Météo France

En premier lieu, le réseau climatologique d'État (RCE), géré et exploité par Météo France, comprend 161 stations synoptiques dont 7 de radiosondages en France métropolitaine

89. Citons G. Beltrando, M. Lecompte, Ph. Misrahi, I. Sarmir.

90. Par exemple, les réseaux du Service de la Protection des Végétaux (en moyenne 10 à 12 points de mesures par département), les stations de recherche de l'INRA, celles d'agriculteurs, etc. [Pérarnaud et Raynal, 1991].

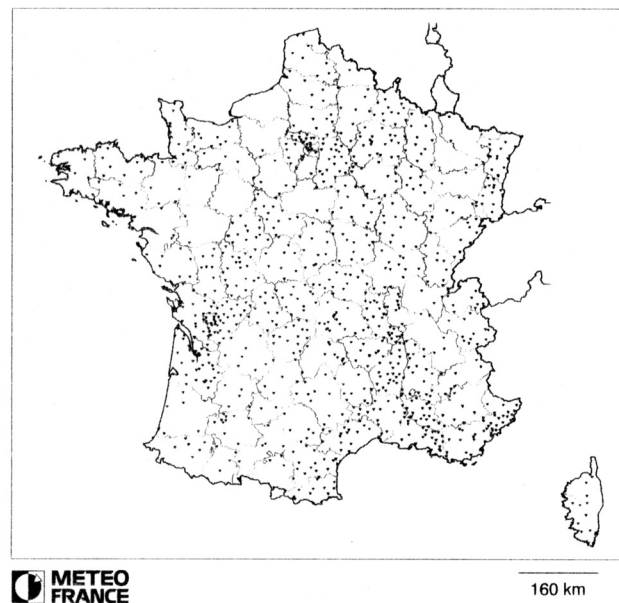
91. AGREMAM : Association de Gestion du REseau Météo Automatisé de la Marne.

[Champeaux *et al.*, 1994 ; Givone, 1997]. Des relevés et des observations (températures, précipitations, nébulosité, etc.) y sont effectués par les météorologues, afin d'alimenter une base de données climatologiques ainsi que les modèles de prévision tels ARPEGE ou ALADIN. Ces stations, installées très souvent en plaine, sont censées être les plus représentatives du climat à une échelle synoptique ou du méso-climat, en s'affranchissant des effets locaux. Dans la Marne, la station synoptique de référence est celle de Reims-Courcy.

À une échelle spatiale plus fine, Météo France gère un réseau d'environ 4 000 postes climatologiques, dont l'exploitation est confiée à des observateurs bénévoles (mais indemnisés) [Givone, 1997 ; Pérarnaud et Raynal, 1991]. Ils relèvent chaque jour les températures minimale et maximale, ainsi que la pluviométrie.

Enfin, pour appréhender des phénomènes climatiques à une échelle plus grande, à méso-échelle⁹², des réseaux de stations automatiques ont été mis en place selon une maille plus fine. Le premier réseau de ce type, PATAC⁹³, a été installé, dans les années 1980, dans le sud-ouest de la France afin d'améliorer les prévisions météorologiques et la climatologie à l'échelle locale. Depuis, reprenant la méthodologie PATAC, de nombreux autres réseaux complémentaires du RCE ont été créés et ont conduit à l'installation de nouvelles stations automatiques⁹⁴. D'après Ch. Givone [1997], ces dernières se chiffraient en 1997 à près de mille postes répartis dans toute la France (Carte IV.1).

Les données climatiques de ces différents réseaux sont relevées, contrôlées et exploitées par Météo France (Centres Départementaux Météorologiques).



Carte IV.1 : Les 995 stations automatiques du réseau à méso-échelle de Météo France

Source : [Givone, 1997]

92. Plusieurs auteurs emploient également le terme d'échelle « sous-synoptique », avec une maille de 35 km [Pérarnaud et Raynal, 1991].

93. Prévision Améliorée, Techniques d'Affinement de la Climatologie.

94. Citons, par exemple, les réseaux RAB (Réseau Automatisé Breton), IRMA (Informations Régionales Météorologiques Automatisées) géré par le Service Météorologique Inter-Régional Nord, ARCAL en Alsace et ARMEL en Lorraine, etc. [Pérarnaud et Raynal, 1991].

Le seul poste synoptique retenu pour cette recherche est celui de Reims-Courcy. Compte tenu de son antériorité et de sa représentativité « synoptique », cette station est souvent considérée comme une référence dans notre étude. Par exemple, la période étudiée (printemps 1998-2003) est replacée dans un temps plus long, en prenant les données de Reims-Courcy sur 30 années. De plus, cette station, la seule de notre zone d'étude où une température minimale est prévue à court terme⁹⁵, nous servira de référence dans l'optique d'une prévision opérationnelle de la température de l'air dans le vignoble marnais (ce qui est déjà le cas dans le système actuel de Météo France Reims pour prévoir l'aléa gélif, cf. III.4.2 -Le système opérationnel de prévision des gelées de printemps par Météo France, p. 70).

En outre, à une échelle plus fine, deux autres réseaux de postes automatiques ont un rôle essentiel pour la connaissance climatique du vignoble marnais : le réseau AGREMAM et celui du *Zonage vignoble*, ce qui donne à cet espace une originalité quant à la densité de l'information climatique.

IV.1.2 - Le réseau AGREMAM

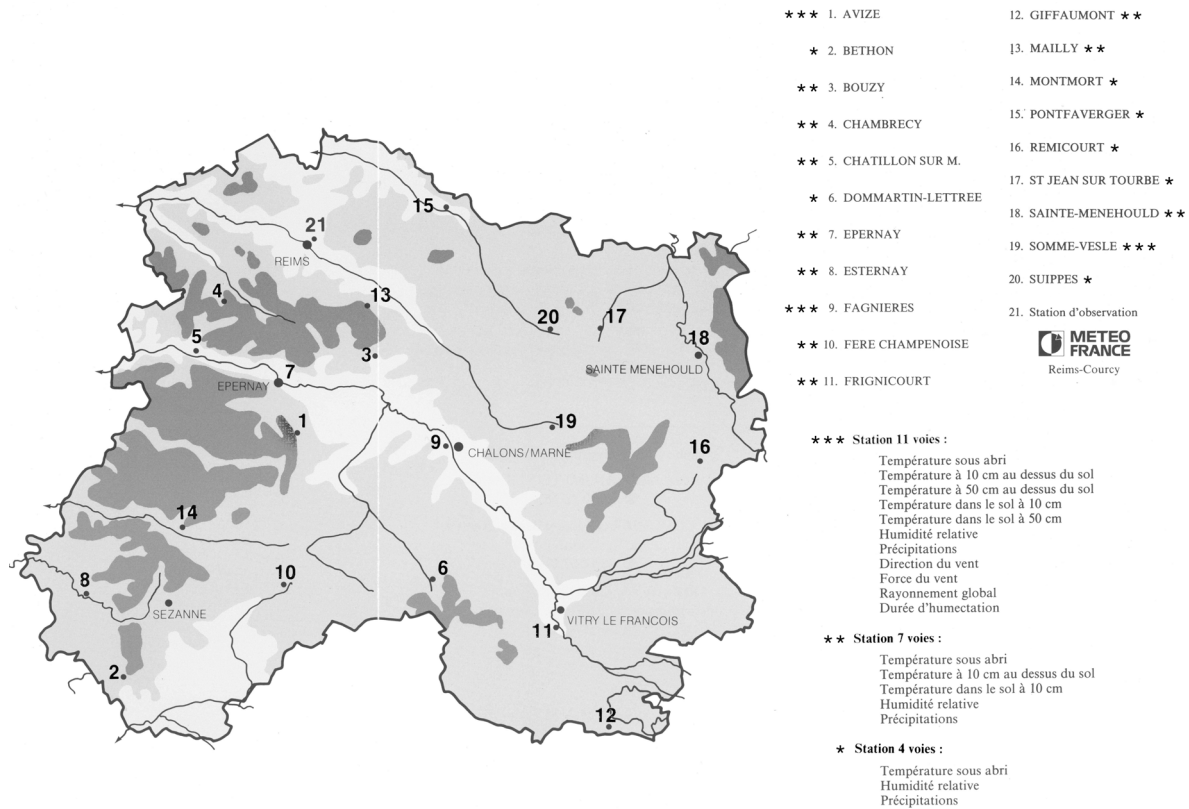
Entre 1992 et 1994, 20 nouvelles stations météorologiques automatiques ont été implantées dans la Marne, grâce à l'aide financière du Conseil Général de la Marne et surtout grâce à la volonté de divers organismes concernés par l'amélioration de la connaissance du climat local : Agence de l'Eau Seine-Normandie ; Chambre départementale d'Agriculture ; CIVC ; direction départementale de l'Équipement ; Institution des Barrages Réservoirs de la Seine ; lycée agricole de Somme-Vesle ; Météo France ; Mumm Perrier-Jouët – Vignobles et Recherche ; service régional de la Protection des Végétaux ; station INRA de Fagnières.

Cette collaboration a abouti à la création de l'Association de Gestion du Réseau Météo Automatisé de la Marne (AGREMAM), association loi 1901 assurant l'exploitation et la maintenance du réseau⁹⁶. Les stations (Carte IV.2), disposant de capteurs de mesures météorologiques équivalents à ceux de Météo France, ont été installées pour diverses applications : alerte phytosanitaire, optimisation des traitements, aide à l'irrigation ou à la prévision météorologique, etc.

Depuis le 1^{er} janvier 2004, cette association n'existe plus (pour des raisons financières). Le réseau des stations a été réparti selon les besoins et demandes de chaque organisme concerné. Compte tenu de leurs implantations dans le vignoble, le CIVC a, en toute logique, repris la gestion et la maintenance des stations suivantes : Avize-bas, Bethon, Bouzy-haut, Chambrecy, Châtillon, Épernay (Fort Chabrol) et Mailly [Langellier, communication privée], stations dont nous exploitons les données climatiques. Les autres stations de l'ancien réseau AGREMAM ont été soit reprises par le Service de la Protection des Végétaux, soit démontées.

95. Le météorologue de Météo France prévoit une température minimale à Reims à partir des sorties des modèles et de sa connaissance des conditions locales.

96. Une démarche similaire a été entreprise dans le département de l'Aube : le réseau Clara, mis en place à la fin des années 1980, comprend dix stations dont trois situées à proximité ou dans le vignoble (Ailleville, Cunfin et Les Riceys).



Carte IV.2 : Les stations automatiques du réseau AGREMAM

Source : [plaquette publicitaire transmise par le CDM de Reims en 1998]
Une information sur le relief est indiquée par un grisé.

IV.1.3 - Le réseau Zonage du vignoble

Simultanément et en collaboration avec Météo France, le CIVC a entrepris, début 1991, un *zonage du vignoble* (Encadré IV.1). Cette démarche a consisté, entre autres, à installer un réseau de stations automatiques dans le vignoble de Champagne. Elle bénéficie de la création en 1990 d'un groupe de travail réunissant des universitaires (M. Lecompte puis G. Beltrando), le CIVC (L. Panigai, F. Langellier), les CDM de Reims (M. Camblan) et de Troyes (C. Ruelle), ainsi que Mumm Perrier-Jouët – Vignobles et Recherche (O. Brun) [Panigai et Langellier, 1992].

Ainsi, la définition des sites d'implantation des stations s'est faite en collaboration avec les climatologues de l'Université Denis Diderot (Paris 7) : en juin 1991, G. Beltrando et M. Lecompte présentaient une proposition d'un réseau de stations météorologiques. La densité du réseau départemental était jugée alors trop faible pour pouvoir étudier des variations fines du climat entre différents sites du vignoble [Panigai et Langellier, 1992]⁹⁷. Aussi l'objectif principal de la création de ce réseau de postes automatisés a-t-il été d'obtenir une « sorte de référentiel » des nuances climatiques sur l'ensemble du vignoble.

97. Signalons que dès 1975, les vignobles du GCEV (Groupement Champenois d'Exploitation Viticole) ont été équipés de postes climatiques, ce qui a amélioré le réseau, qui était composé alors de 16 postes (dont cinq avec une mesure thermométrique) [Panigai et Langellier, 1992].

Encadré IV.1 : Zonage de la Champagne

Le zonage correspond à un découpage d'un espace en zones relativement homogènes, selon des critères tels que le climat, l'utilisation du sol, l'activité industrielle, etc.

Dans le monde vini-viticole, de nombreuses démarches de zonage ont été mises en place avec, très souvent, deux objectifs :

- connaissance des aptitudes et potentialités vini-viticoles d'un espace (par exemple, pour les nouveaux pays viticoles) ;
- recherche des différences locales de qualité selon les propriétés du sol et du climat (notamment à l'origine des appellations d'origine en France [Dion, 1990] ; É. Lebon [1993] sur le vignoble d'Alsace ; J. Astruc, J. Héritier et J.-C. Jacquinet [1980] sur celui de l'Aude ; C. Riou, R. Morlat, C. Asselin [1995] sur le Val de Loire*).

En Champagne, en 1990, le CIVC a mis en place un vaste programme de zonage dont l'objectif affiché est d'observer les variations du vignoble champenois (sol, climat, etc.) et de recenser des *unités-type* afin d'aider les vignerons dans leurs pratiques (conduite agronomique, protection phytosanitaire, entretien des sols, etc.) [Moncomble et Panigai, 1990]. En effet, la caractérisation et la localisation de sites représentatifs des spécificités du vignoble permettront d'extrapoler les résultats d'expérimentations viticoles et œnologiques sur ces parcelles à l'ensemble du vignoble [Doledec, 1995].

Ce découpage porte sur différents thèmes, tels que les cépages, la maturation, le gel, l'érosion, la date des vendanges, etc. Bien que « les racines de la mosaïque champenoise [soient] ancrées dans la tradition », cette politique vise à améliorer cette connaissance du milieu dans une optique de défense de l'appellation et de recherche de « l'excellence » [Moncomble et Panigai, 1990].

Ces recherches bénéficient des progrès informatiques récents permettant d'intégrer, de gérer, d'exploiter et surtout de combiner des bases de données géoréférencées diverses (données climatiques, pédologiques, d'occupation du sol, ...). De plus, des outils informatiques, tels que les Systèmes d'Information Géographique (SIG) permettent de modéliser de manière objective et systématique et de cartographier les résultats des différents zonages [Doledec, 1995].

Plusieurs volets de ce zonage ont été étudiés depuis 1990 : citons, par exemple, les travaux de P. Laville et D. Rambaud [1993] sur la cartographie des aléas de mouvement de terrain et d'érosion, et de A.-F. Doledec [1995] sur la pédologie du vignoble.

* Notamment, en proposant le concept d'*unité terroir de base* (cf. Encadré I.3, p. 14).

L'amélioration de la connaissance climatologique de la Champagne est surtout liée au développement de la climatologie agricole : connaissance du climat à l'échelle locale et modélisation agroviticoles (gelées, maladies et parasites, qualité du millésime)⁹⁸ [Panigai et Langellier, 1992]. Ainsi, les stations automatiques ont été installées sur les coteaux viticoles, à plusieurs hauteurs et avec plusieurs orientations, de manière à être les plus représentatives possibles des grands secteurs viticoles⁹⁹.

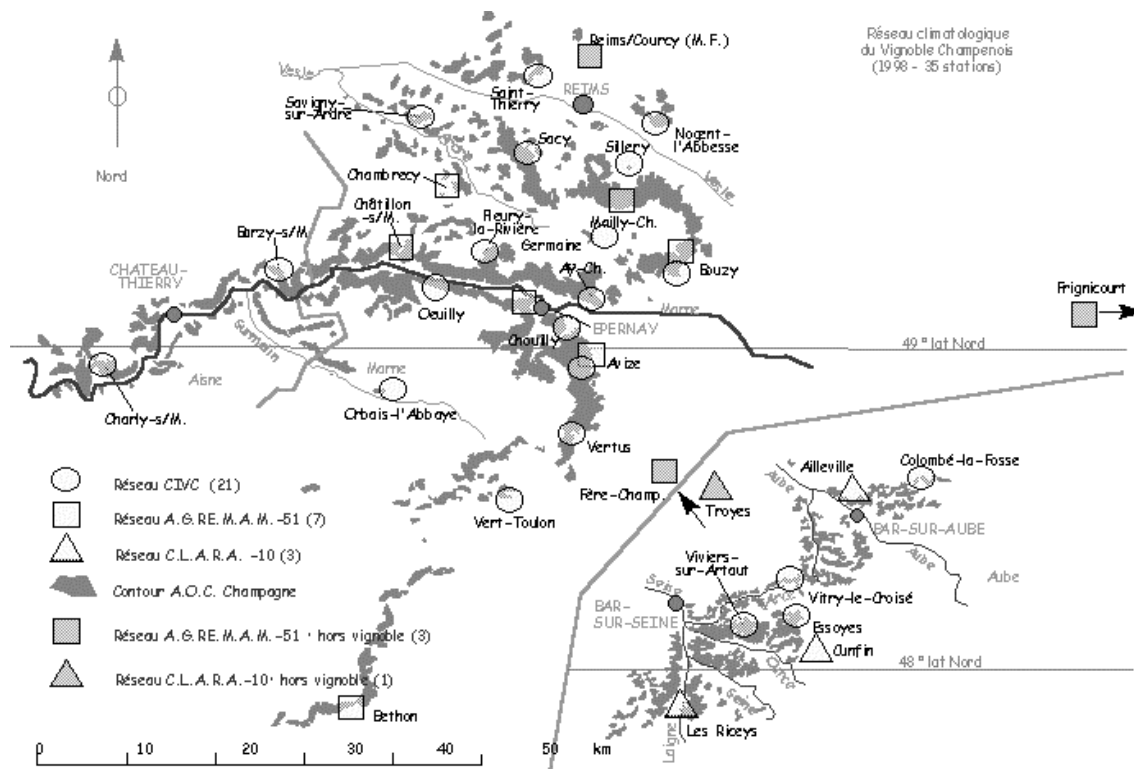
Afin d'étudier les phénomènes d'inversion thermique et de vents catabatiques lors des refroidissements radiatifs qui peuvent amener à des gelées printanières, les stations ont été placées au tiers inférieur ou supérieur des coteaux¹⁰⁰. De plus, trois couples de stations situées sur les mêmes coteaux permettent d'appréhender les phénomènes climatiques à différentes hauteurs, en l'occurrence entre le bas et le haut du coteau (sur la Carte IV.3, Avize bas / Avize haut ; Bouzy bas / Bouzy haut ; Sillery en bas / Mailly en haut¹⁰¹).

98. Mise au point et développement de modèles de simulation des maladies et parasites de la vigne et d'un modèle physiologique de la vigne pour le suivi de sa phénologie, de ses potentialités de production et de la qualité du raisin ; extrapolation spatiale des paramètres météorologiques (températures, précipitations) à une échelle fine.

99. Le choix final des sites a aussi été lié, cela s'entend, à des contraintes pratiques (proximité d'un chemin, aucune entrave à la culture des vignes proches, etc.).

100. Situés plus bas, les postes auraient été peu représentatifs des coteaux.

101. Plus précisément, les stations d'Avize haut, de Bouzy bas et de Sillery appartiennent au *zonage*, les autres à l'ancien réseau AGREMAM.



Carte IV.3 : Les stations du Zonage vignoble

Source : [www.civc.fr] ; été 2004

Depuis sa création, le réseau du Civc¹⁰² s'est enrichi par l'implantation de nouvelles stations et par la reprise de certaines stations de l'ancien réseau AGREMAM¹⁰³ (depuis le 01/01/04). Les réseaux *Zonage du vignoble*, AGREMAM et Clara (Aube) se complètent très bien (homogénéisation des mesures, pas de redondance spatiale, etc.). Ils constituent une base de données riche sur le climat du vignoble champenois. Au total, 37 stations sont situées dans ou à proximité du vignoble, soit une station pour moins de 1 000 ha (ou 10 km² ; Tableau IV.1 et Carte IV.3). Ce réseau peut donc être qualifié de dense.

IV.1.4 - Le réseau de stations retenues

Le domaine d'étude de cette recherche a été restreint au vignoble de la Marne. Ceci s'explique, en premier, par la collaboration étroite depuis plusieurs années entre des géographes de l'Université PARIS 7 et le CDM de Reims¹⁰⁴. De plus, le réseau climatique du vignoble aubois s'intégrait mal dans les analyses portant sur l'interpolation des données, sa localisation étant assez éloignée du vignoble marnais.

Dans la mesure où ce travail se restreint au vignoble de la Marne, les stations localisées à l'extérieur de cet espace, soit dans un autre département, soit trop éloignées du vignoble (par exemple Frignicourt), n'ont pas été retenues ici. Ces décisions ont été motivées par l'avantage d'un réseau homogène dans les méthodes d'interpolation, tout en essayant de

102. Les données sont accessibles sur le site professionnel Internet du Civc afin d'aider les vignerons dans leurs pratiques : données journalières sur une période courte ; synthèse mensuelle.

103. Par la suite, ces stations, récemment reprises par le Civc, seront libellées sous le même réseau que celles du *Zonage vignoble* : « les stations du Civc ».

104. Grâce à l'énergie et à la volonté de personnes voulant améliorer la connaissance de l'aléa gélif (en particulier M. Camblan).

garder l'apport de la densité évoquée précédemment. Par exemple, la station de Bethon (à plus de 60 km d'Épernay) certes située à proximité du vignoble marnais, a été écartée du fait de sa position excentrée (Carte IV.3). En la prenant en compte, nous nous éloignerions de l'homogénéité spatiale souhaitée dans ces méthodes.

Tableau IV.1 : Les principales caractéristiques des stations du réseau climatique du vignoble champenois

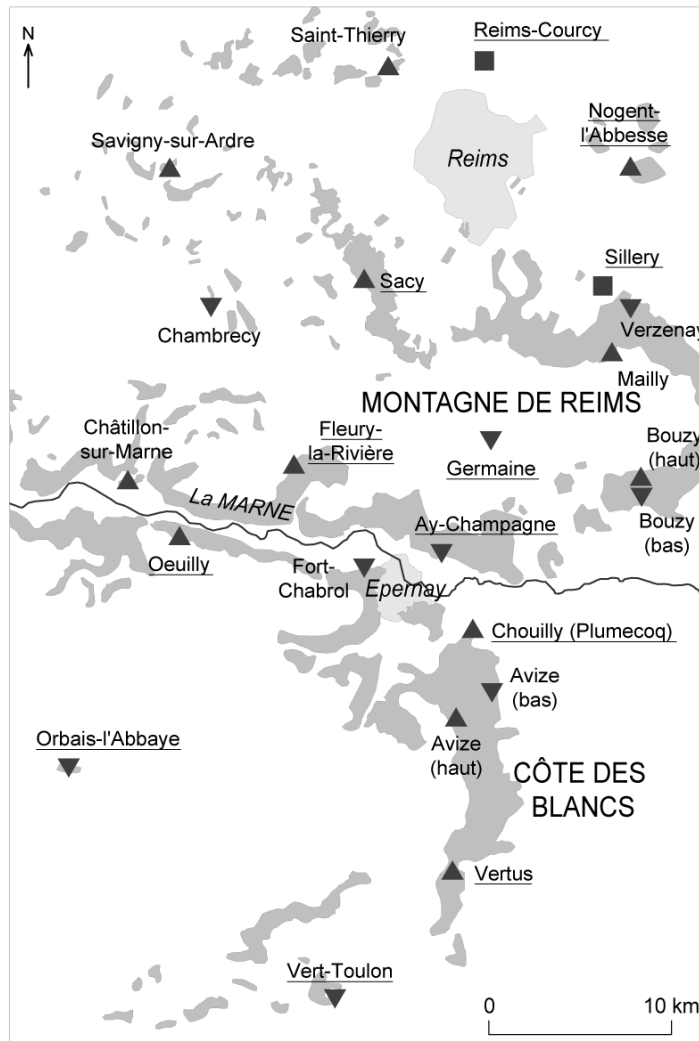
Stations	Département	Réseau	Mise en service	Situation	Ori-entation*	Altitude (en m)
Barzy-sur-Marne	Aisne	CIVC	08/09/95	Mi-coteau	O	120
Charly-sur-Marne	Aisne	CIVC	08/05/93	Mi-coteau	S	125
Ailleville	Aube	CLARA	01/01/93	Mi-coteau	O	185
Colombé-la-Fosse	Aube	CIVC	17/09/92	Mi-coteau	S	225
Cunfin	Aube	CLARA	01/10/92	Plaine	hrz	310
Essoyes	Aube	CIVC	31/03/99	Mi-coteau	S	230
Riceys	Aube	CLARA	01/10/92	Bas de coteau	hrz	185
Troyes	Aube	Météo France	01/01/92	Plaine	hrz	115
Vitry-le-Croisé	Aube	CIVC	01/01/95	Mi-coteau	S	255
Viviers-sur-Artaut	Aube	CIVC	06/11/92	Mi-coteau	S	200
Avize (bas)	Marne	AGREMAM	24/07/92	Bas de coteau	E	108
Avize (haut)	Marne	CIVC	19/05/92	Mi-coteau	E	180
Aÿ-Champagne	Marne	CIVC	27/05/94	Bas de coteau	S	80
Bethon	Marne	AGREMAM	01/02/95	Bas de coteau	S	150
Bouzy (bas)	Marne	CIVC	19/05/92	Bas de coteau	S	125
Bouzy (haut)	Marne	AGREMAM	05/04/93	Mi-coteau	S	155
Chambrecy	Marne	AGREMAM	25/01/93	Bas de coteau	O	125
Châtillon-sur-Marne.	Marne	AGREMAM	16/04/94	Mi-coteau	S	165
Chouilly (Plumecoq)	Marne	CIVC	12/07/97	Mi-coteau	E	160
Dommartin Lettrée	Marne	AGREMAM	01/10/95	Plaine	hrz	115
Épernay (Fort-Chabrol)	Marne	AGREMAM	01/01/61	Bas de coteau	E	85
Fère-Champenoise	Marne	AGREMAM	19/01/93	Plaine	hrz	150
Fleury-la-Rivière	Marne	CIVC	02/03/93	Mi-coteau	E	175
Frignicourt	Marne	AGREMAM	01/01/94	Plaine	hrz	195
Germaine	Marne	CIVC	01/10/96	Bas de coteau	O	175
Mailly-Champagne	Marne	AGREMAM	02/06/93	Mi-coteau	N	150
Nogent-l'Abbesse	Marne	CIVC	19/05/92	Mi-coteau	S	195
Œuilly	Marne	CIVC	01/01/93	Mi-coteau	N	150
Orbais-l'Abbaye	Marne	CIVC	16/10/94	Bas de coteau	S	160
Reims	Marne	Météo France	01/01/59	Plaine	hrz	95
Sacy	Marne	CIVC	14/08/93	Mi-coteau	N	155
Saint-Thierry	Marne	CIVC	15/07/92	Mi-coteau	S	135
Savigny-sur-Ardre	Marne	CIVC	18/06/92	Mi-coteau	S	125
Sillery	Marne	CIVC	15/08/93	Plaine	hrz	105
Vert-Toulon	Marne	CIVC	19/04/94	Bas de coteau	E	150
Vertus	Marne	CIVC	26/05/92	Mi-coteau	E	135
Verzenay	Marne	CIVC	01/01/98	Bas de coteau	N	95

Source : [CIVC, document interne]

* : hrz Horizontal ; E Est ; N Nord ; O Ouest ; S Sud

Sont signalées en gras les stations dont les relevés ont été utilisés dans cette thèse.
Les positions sur le coteau sont approximatives.

Au final, cette recherche s'appuie sur 23 stations : la station synoptique de Reims-Courcy, six stations de l'ex-réseau AGREMAM (appartenant maintenant au CIVC) et 16 du CIVC (Carte IV.4). Même si l'homogénéité des points de mesure a été privilégiée, les stations retenues ne sont pas réparties régulièrement dans l'espace. Par ailleurs, il est important de souligner un biais important du réseau retenu : les stations, situées principalement sur les coteaux viticoles et donc rarement en plaine ou sur un plateau, ne sont pas représentatives de l'ensemble de la zone étudiée.



Stations météorologiques retenues pour l'étude

Toutes les stations retenues mesurent les températures à deux mètres sous abri et en indice actinothermique (à l'air libre).
 Les 13 stations dont le nom est souligné relèvent également la direction et la force du vent.

Situation :

▲ Stations situées à mi-coteau	■ Limites approximatives de l'AOC Champagne (d'après la BD Carto®)
▼ en bas de coteau	■ Villes importantes
■ en plaine	

Carte IV.4 : Le réseau des 23 stations retenues

IV.2 - Acquisition et constitution des bases de données climatiques

Nous décrirons, dans un premier temps, l'appareil d'acquisition de données qu'est une station automatique, assurant la mesure, le traitement, le stockage et la transmission des données climatiques. Puis nous détaillerons les mesures retenues comme pertinentes pour ce travail, c'est-à-dire les données de vent, de température et de nébulosité. Enfin, nous justifierons les dates retenues pour cette étude.

IV.2.1 - Acquisition des données et traitements initiaux des données par les stations automatiques

Dans la mise en place des stations automatiques des réseaux AGREMAM et *Zonage vignoble*, la priorité concernant le matériel d'acquisition a été la complémentarité des données et l'harmonisation des observations. À partir d'équipements comparables, tant par leur implantation que par leurs modalités d'utilisation, les données doivent être collectées suivant les mêmes règles [Pérarnaud et Raynal, 1991] : aussi le choix s'est-il porté sur la station agroclimatique *Enerco*¹⁰⁵ commercialisée par Cimel Électronique, dont l'implantation et la technologie sont conformes aux recommandations de l'OMM¹⁰⁶ [www.cimel.fr].

Par exemple, le sol doit être enherbé et tondu régulièrement ; en fait, pour les stations gérées par le CIVC, c'est généralement un épandage d'écorce avec un désherbage qui a été retenu. Par ailleurs, le poste occupe une surface de quatre mètres sur quatre et est protégé par un enclos grillagé. Un système de batterie alimentée par des panneaux solaires permet une autonomie de ces équipements.

Selon le modèle, une station automatique¹⁰⁷ intègre plus ou moins de capteurs, mesurant différents paramètres climatiques : températures, précipitations, humidité, humectation, rayonnement, vitesse et direction du vent, etc. (Figure IV.1). Chaque capteur a sa cadence de mesure, sa résolution et sa précision (Tableau IV.2) : par exemple, les capteurs de direction du vent sont interrogés toutes les 0.5 secondes et l'information recueillie a une précision de 1° mais est donnée avec une résolution de 5°, compte tenu des erreurs accumulées au cours de la chaîne de mesure.

Après acquisition de mesures météorologiques par ces différents capteurs, la station automatique traite l'information recueillie avant de la transmettre. Les paramètres sont calculés selon plusieurs échelles de temps (par jour, par heure, par demi-heure, toutes les six minutes), et des informations variables sont extraites des mesures (Tableau IV.3). Par exemple, pour la température, l'information recueillie par les capteurs est synthétisée sous les formes de minimum, maximum et valeur moyenne par jour, ainsi que de valeurs horaires (à l'heure ronde).

105. Ici, nous avons choisi de décrire le modèle de station météo le plus fréquent dans le réseau du vignoble champenois, soit celui des stations gérées par le CIVC.

106. Organisation Mondiale de la Météorologie.

107. Le matériel et la technologie de cette station sont décrites plus en détail sur le site Internet de Cimel Electronique : [www.cimel.fr].

Ensuite, le raccordement de toutes les stations météorologiques au réseau téléphonique permet la transmission des informations (avec une interrogation à distance tous les jours). L'extraction des données est réalisée par les logiciels *Irma* pour Météo France et *Bluesky*¹⁰⁸ pour le CIVC (ces deux logiciels utilisant la même procédure de transmission PATAC de la Météorologie Nationale), qui donnent en sortie des fichiers ASCII.

Tableau IV.2 : Caractéristiques de l'unité d'acquisition

Paramètre	Cadence de mesure	Étendue de mesure	Résolution (à 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/d
Humidité	30 s	0-100%	0.5%	0.5%
Humectation	5 s	n/d	6 mm	5 s
Force vent	0.5 s	0-64 m/s	0.1 m/s	n/d
Direction vent	0.5 s	360°	5°	1°
Rayonnement	5 s	-5 à +1.5 Wm ⁻²	1 J	0.05%
Durée d'insolation	4 ms	n/d	36 s	n/d
Hauteur d'eau	60 s	20 000 inc	n/d	0.01%
Pression ATM	60 s	900-1050 hPa	0.1 hPa	0.01%

Source : [www.cimel.fr]
n/d : non disponible

Tableau IV.3 : Principaux résultats horaires et journaliers

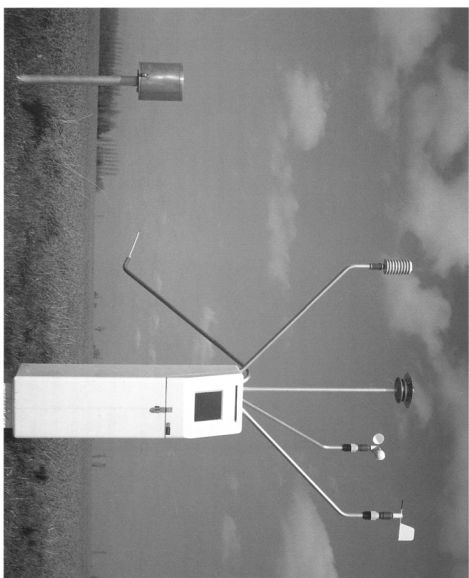
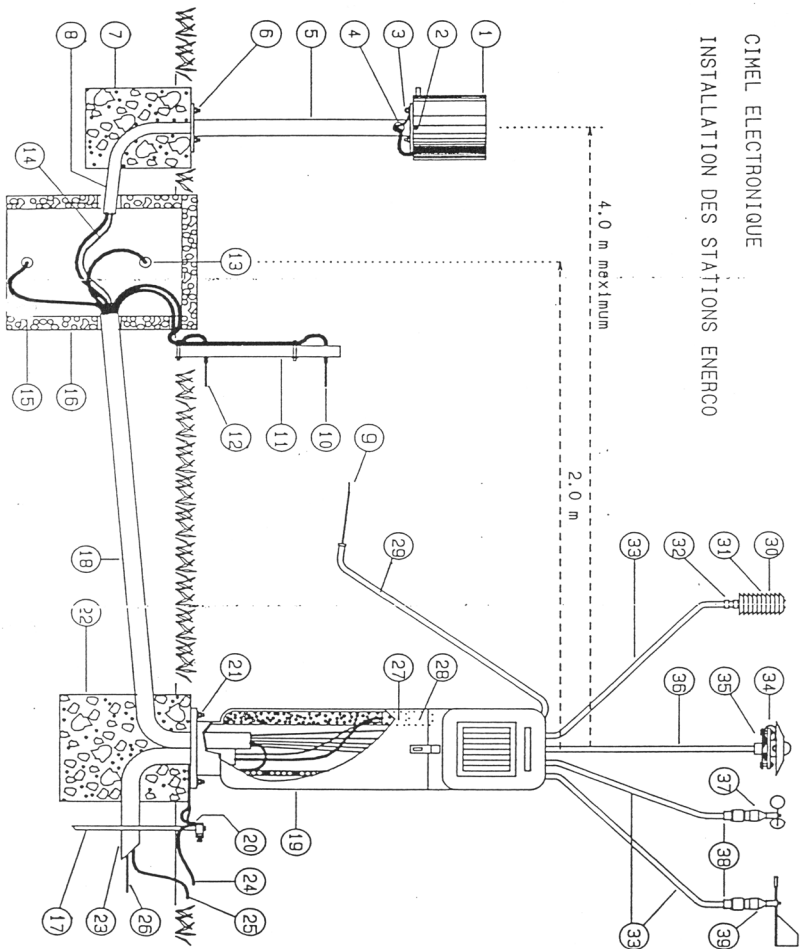
Paramètre	Résultats journaliers	Résultats horaires
Température	Valeurs minimale, moyenne et maximale (avec instants des extrema)	Valeurs relevées à l'heure ronde
Précipitation	Hauteur des précipitations Hauteur maximale de pluie sur 6 mm (avec instant de ce maximum)	Hauteur des précipitations Hauteur maximale de pluie sur 6 mm
Humidité	Valeurs minimale, moyenne et maximale (avec instants des extrema) Temps pendant lequel l'humidité est supérieure à 40, 60, 80 et 90%	Valeurs relevées à l'heure ronde Temps pendant lequel l'humidité est supérieure à 80 et 90%...
Humectation	Durée de mouillage	Durée de l'humectation
Rayonnement	Rayonnement intégré	Rayonnement intégré
Force du vent	Total du vent passé Vitesse et instant du maximum	Total du vent passé Vitesse du maximum Valeurs relevées à l'heure ronde (sur 10 min)
Direction du vent	Cumul sur 8 directions Direction du vent de vitesse maximale	Valeurs relevées à l'heure ronde (sur 10 min) Direction du vent de vitesse maximale
Pression atmosphérique	Valeurs minimale, moyenne et maximale	Valeurs relevées à l'heure ronde

Source : d'après [www.cimel.fr]
Sont signalées en gras, les mesures utilisées dans ce travail de thèse.

Après avoir décrit l'équipement permettant d'acquérir une information climatique, nous allons détailler les mesures utilisées dans ce travail.

108. Développé par SESMA, Bluesky est un outil de gestion et d'exploitation des données météorologiques. Un de ses objectifs est l'amélioration de la prévision des risques, surtout dans le domaine de la lutte contre les parasites.

Figure IV.1 : Un exemple de station électronique Enerco® de Cimet Electronique (d'après [www.cimet.fr])



- (1) Corps du pluviomètre ; (7) Socle pluviomètre (en béton) ; (9) Sonde humectation ; (10) et (12) Sondes température en indice actinothermique ; (13) et (15) Sondes température du sol -10 et -50 cm ; (19) Borne station ; (22) Socle station (en béton) ; (28) Borne d'abri ; (30) Sonde température ; (31) Sonde humidité ; (34) Pyranomètre ; (35) Plateau support du pyranomètre ; (37) Anémomètre ; (39) Girouette

Remarque : toutes les stations ne sont pas équipées de l'ensemble des capteurs indiqués sur ce schéma. En outre, seules les principales légendes sont mentionnées ci-dessus. Pour plus d'informations, se reporter au guide technique de la station (cf. Annexe C et www.cimet.fr).

IV.2.2 - Les paramètres climatiques retenus

Dans cette recherche, nous nous sommes intéressés principalement au phénomène du refroidissement radiatif pouvant induire un aléa gélif important sur le vignoble de Champagne. Plus précisément, l'accent a été mis sur l'amélioration de la connaissance de la répartition des températures minimales. Or nous avons rappelé, dans le deuxième chapitre, combien les écoulements de l'air, en relation avec la topographie, pouvaient, selon leur intensité et leur direction, modifier cette répartition, surtout lors des nuits où le refroidissement est purement radiatif (ciel clair, vent calme). Les mesures des stations automatiques utilisées ici sont donc la température et le vent. En outre, nous prendrons également des observations de nébulosité faites à la station synoptique de Reims-Courcy.

Données thermiques

Nous avons sélectionné la mesure de la température sous abri à deux mètres du sol, ainsi que celle en indice actinothermique (capteurs 30 et 10 ou 12 sur la Figure IV.1, ci-dessus). Toutes les stations retenues pour cette recherche mesurent ces deux températures, et ce, à partir de sondes thermométriques (à résistance platine 100 ohms à 0°C), ayant une résolution de 0.1°C.

La mesure en indice actinothermique est réalisée à partir de capteurs installés en condition de libre rayonnement et à quelques dizaines de centimètres du sol. Pour comprendre les répercussions du refroidissement nocturne sur la végétation, les indices actinothermiques se révèlent très intéressants, car ils sont proches de la température réelle des organes végétaux. Au contraire, les mesures en journée ne sont pas pertinentes, elles reflètent plus les caractéristiques du capteur que la température [Pérarnaud et Raynal, 1991]. Dans le vignoble champenois, ces indices sont mesurés à différentes hauteurs : les capteurs des stations du CIVC sont officiellement à 50 centimètres du sol, alors que ceux de Météo France sont à 10 centimètres. Dans la réalité, ces instruments de mesure ne sont pas exactement aux hauteurs spécifiées, mais dans la fourchette 10-50 centimètres. Les écarts thermiques entre ces indices et les températures relevées sous abri, à deux mètres, peuvent être de plusieurs degrés, surtout en cas de refroidissement nocturne radiatif (inversion thermique).

Les pas de temps de ces mesures sont variables. Ici, nous avons retenu les minima journaliers et les données horaires afin d'appréhender la variabilité temporelle de ce paramètre. Par la suite, nous utiliserons « minimum actinothermique » pour désigner la valeur minimale journalière en indice actinothermique et « indice actinothermique horaire » pour les données horaires. Les mesures thermiques horaires sont effectuées à l'heure ronde. Par convention, la température minimale et l'indice actinothermique d'un jour sont relevés entre 18h UTC la veille et 18h UTC le jour même¹⁰⁹.

109. Au cours de travaux sur le climat de la Champagne, M.-F. de Saintignon [1998-1999] a noté que les données thermiques minimales étaient parfois supérieures au minimum des températures horaires (entre 18h UTC la veille et 18h le jour *J*). Après réflexion et observation, F. Langellier et M.-F. de Saintignon ont déduit que les minima des stations Cimel ne sont pas calculés sur la période de temps réglementaire (18h à *J-1* – 18h à *J*), mais sur l'ensemble des données d'une journée (1h – 24h à *J*). Depuis, F. Langellier a apporté les corrections nécessaires aux données initiales.

Mesures de vent

Les mesures de vent sont de deux types :

- la direction d'où vient le vent (exclusivement la composante horizontale) est captée par une girouette et exprimée en dizaine de degrés (ou en degrés) par rapport au Nord géographique, dans le sens des aiguilles d'une montre ;
- la vitesse du vent est mesurée par un anémomètre (moulinet tournant autour d'un axe vertical et actionnant un petit générateur électrique) ; les mesures sont exprimées en mètres par seconde.

Nous avons acquis de Météo France des données relatives au vent (direction et vitesse) pour Reims-Courcy. Relevées à 10 m au-dessus du sol afin de limiter les perturbations et les turbulences de l'écoulement, ces mesures trihoraires sont calculées par convention sur les 10 minutes qui précèdent¹¹⁰.

De plus, nous disposons également des données horaires de vent pour huit stations appartenant au CIVC (à 2 m du sol) : Aÿ-Champagne, Fleury-la-Rivière, Nogent-l'Abesse, Œuilly, Orbais-l'Abbaye, Sacy, Vert-Toulon et Vertus (Carte IV.4, p. 78). Les mesures disponibles sont diverses : *ventpas* le vent passé en kilomètres dans l'heure, *ventmax* la vitesse maximale du vent, *ventmoyh* la vitesse moyenne du vent, *dirmax* la direction du vent maximal, *dirmoyh* la direction moyenne du vent (en degrés). Seules les données moyennes du vent (*ventmoyh* et *dirmoyh*) ont été retenues pour privilégier la complémentarité et la comparaison avec les données de Météo France.

Un biais dans la correspondance entre les données du CIVC et de Météo France est introduit par la différence de hauteur des capteurs. On peut supposer que les capteurs plus hauts mesurent une vitesse plus importante et que la variabilité des directions est moindre. Afin d'harmoniser le plus possible les données de vitesse, nous avons appliqué un coefficient correcteur aux vitesses mesurées pour la station Météo France de Reims-Courcy, le coefficient de Baes [Roten, communication privée] :

$$\frac{V_H}{V_{10}} = \left(\frac{H}{10}\right)^{\frac{1}{7}}$$

où H est la hauteur souhaitée, V_H la vitesse du vent à la hauteur H (c'est-à-dire celle qu'on cherche à déterminer ici) et V_{10} celle observée à la hauteur 10 m.

Cette correction suppose une croissance exponentielle de la vitesse du vent avec l'altitude. L'exposant choisi varie en fonction de la rugosité du terrain. D'autres auteurs posent l'hypothèse que le profil vertical de la vitesse du vent (en terrain plat) suit une loi logarithmique [Oke, 1987]. Des coefficients correcteurs peuvent ensuite être appliqués pour prendre en compte la stabilité ou non de l'air [Kaimal et Finnigan, 1994]

Quant aux données de direction, aucune correction n'a pu être apportée du fait de l'absence de méthodes. Gardons-le à l'esprit pour l'interprétation future des résultats.

110. Excepté lorsqu'il s'est produit une discontinuité marquée dans la direction et/ou dans la vitesse du vent. Dans ce cas précis, la moyenne est alors calculée depuis la discontinuité.

Nébulosité

Enfin, des données de nébulosité ont été utilisées dans cette recherche pour réaliser une typologie des nuits en fonction de la couverture nuageuse (ciel clair ou non) et approcher ainsi la notion de *situation radiative* (II.1 - Les gelées radiatives, p. 35). Ces données sont issues d'observations du ciel, toutes les trois heures, à la station synoptique de Reims-Courcy. L'unité de mesure est l'*octat* : le ciel est découpé en huit parties ; une nébulosité de zéro octat correspond à un ciel complètement dégagé et huit octats à un ciel couvert.

Dans l'étude de E. Choisnel *et al.* [1993], chaque nuit est définie par le critère d'une occurrence d'une fraction d'insolation à Reims supérieure ou égale à 80% la veille et le jour même : nuit de *ciel clair* / nuit à *nébulosité variable*. Le refroidissement se produisant essentiellement la nuit (excepté lors des refroidissements advectifs le jour), il nous a semblé plus approprié de prendre en compte des données de nébulosité de la nuit (21, 0, 3 et 6h UTC) plutôt que des données d'insolation relevées le jour [Madelin *et al.*, 2002]. Concrètement, si au moins trois mesures sur quatre sont inférieures ou égales à deux octats, alors on attribue à la nuit des conditions de *ciel clair*, de *nébulosité variable* en cas contraire.

IV.2.3 - Choix temporels

Dans le vignoble de Champagne, l'aléa gélif est particulièrement préoccupant au printemps. Nous avons alors retenu une période d'étude annuelle s'étendant du 15 mars¹¹¹ au 31 mai. Au-delà de cette date, l'occurrence du gel reste un phénomène exceptionnel.

Pour une dizaine des 23 stations retenues, nous disposons de données depuis 1993, voire 1992 (Tableau IV.1, p. 83). Cependant, pour prendre en compte les postes plus récents (Bethon, Germaine, Chouilly et Verzenay) et alors garder une cohérence temporelle des bases de données climatiques, nous avons choisi de commencer notre période d'étude au printemps 1998. Ici a été privilégié le nombre de stations par rapport au nombre de dates.

Au final, nous avons sélectionné les mesures et observations de 78 dates (15/03-31/05) pour 6 printemps (1998-2003).

IV.3 - Critique des données climatiques

La base de données climatiques acquise est donc issue des mesures de 23 stations automatiques et sur une période de six printemps. Or toute mesure induit une erreur et n'a de « signification que si l'on connaît sa marge d'erreur » [Serres et Farouki, 1997]. L'erreur ainsi définie est liée, pour les stations automatiques, à la précision des capteurs de mesure et a été appelée précédemment la *résolution* (Tableau IV.2, p. 85).

Avant toute analyse statistique, un certain nombre d'hypothèses doivent être vérifiées. Par exemple, les données doivent être *consistantes*, c'est-à-dire sans aucun changement des conditions de mesure (lieu, procédure, etc.). On dit également que la série de données doit

111. La date du débourrement la plus précoce est celle du 15 mars 1957 [CIVC, communication privée].

être *stationnaire* : les paramètres statistiques du phénomène ne doivent pas évoluer au cours du temps.

Des *erreurs* de données peuvent également se produire lors de la mesure (capteurs défectueux, biaisés) ou lors de la transmission de l'information. Les statisticiens distinguent deux types d'erreurs [Musy, 2003] :

- les erreurs *aléatoires* (ou accidentelles) qui ne sont pas corrélées entre elles ;
- les *erreurs systématiques*, qui peuvent survenir lors d'une modification d'un capteur ou de sa position, lors d'un mauvais étalonnage de celui-ci, etc.

Afin de valider les séries climatiques, il s'agit ici d'identifier ces éventuelles erreurs amenant à des biais ou à des discontinuités dans les séries de données, ainsi que de repérer les données manquantes. Ces hétérogénéités pourront alors être reconstituées ou corrigées.

Ces contrôles initiaux permettent d'évaluer la validité et la qualité des données acquises, afin de relativiser la portée des résultats obtenus. Nous avons contrôlé nos données en trois étapes :

- repérer les valeurs manquantes ;
- rechercher les valeurs aberrantes (à rapprocher des erreurs aléatoires) ;
- et détecter les ruptures dans les séries de données (erreurs systématiques).

Nous présentons ici les méthodes utilisées, ainsi que les principaux résultats de cette critique des données.

IV.3.1 - Les méthodes de contrôle utilisées

Il existe de nombreuses méthodes de contrôle de la qualité des données, parfois propres à certaines disciplines. Notre but n'est pas de les énumérer de manière exhaustive, mais d'exposer celles qui nous ont paru les plus pertinentes et que nous avons cherchées à mettre en œuvre. Nous nous sommes inspirés des procédures classiques (valeurs manquantes ; ruptures dans une série chronologique), ainsi que des techniques de contrôle plus spécifiques aux données climatiques, recommandées par l'OMM [Abbott, 1986] et utilisées par Météo France [Champeaux *et al.*, 1994 ; Givone, 1997 ; Lamarque et Jourdain, 1994] (contrôle des cohérences spatiales et temporelles par exemple).

Valeurs manquantes

Les valeurs manquantes dans un fichier de données météorologiques peuvent avoir des origines diverses, mais elles sont liées principalement à une panne d'un capteur, à une rupture de communication avec une station automatique ou encore à une erreur au moment de l'extraction des données.

Un nombre non négligeable de valeurs manquantes peut remettre en cause les résultats d'une analyse. En revanche, lorsque leur densité est faible, il est possible de reconstituer ces valeurs : notamment en remplaçant la donnée manquante par la moyenne pour le jour ou l'heure concernés ou encore en estimant cette valeur, soit par régression linéaire (avec la station « la plus proche » quant à la grandeur climatique étudiée, voire sur plusieurs

stations), soit par interpolation simple (en prenant en compte les relevés des postes voisins, pondérés par la distance à ces mêmes postes)¹¹².

Recherche de valeurs aberrantes (erreurs aléatoires)

- Contrôle de vraisemblance et de cohérence entre les paramètres

Il s'agit de repérer, dans les séries de relevés météorologiques, les valeurs « impossibles » (invraisemblables) et celles qui semblent fausses compte tenu des valeurs des autres paramètres. Par exemple, une direction de vent ne peut pas être supérieure à 360° ou inférieure à 0° (par convention). De plus, pour une même date, la température minimale ne doit pas être supérieure à la température maximale. Sans être exhaustifs, retenons que ces erreurs aberrantes sont définies comme des valeurs impossibles ou « hors limites ».

- Contrôle de cohérence temporelle des valeurs horaires

Cette méthode ne s'applique qu'à des paramètres fortement corrélés dans le temps (température, humidité, etc.) : il s'agit de calculer « la différence entre la valeur mesurée d'un paramètre pour une heure donnée et la moyenne arithmétique des valeurs de ce même paramètre mesurées une heure avant et une heure après » [Givone, 1997]. Ensuite, on détermine un seuil au-delà duquel cette différence signifie une *incohérence* de la donnée.

- Contrôle de cohérence spatiale des paramètres quotidiens

Cette méthode se déroule en plusieurs étapes :

- définition de zones climatiques homogènes ;
- calcul de moyennes et d'écart-types journaliers pour un paramètre donné et pour chaque zone ;
- calcul de la différence entre le relevé journalier d'une station et la moyenne de sa zone climatique.

Si cette différence, en valeur absolue, est supérieure à un seuil donné (souvent 3 écart-types¹¹³), en d'autres termes si la station se distingue par sa valeur par rapport à l'ensemble de sa zone climatique (définie par une relative homogénéité), alors la significativité de la donnée est remise en cause, une valeur aberrante est mise en évidence.

Une fois les erreurs aléatoires détectées par ces méthodes, on choisit alors d'exclure ces valeurs, de les corriger ou encore de ne rien faire mais d'en tenir compte lors de l'interprétation des résultats. Cela dépend du paramètre météorologique, de la densité des valeurs aberrantes et des moyens techniques disponibles.

Détection de ruptures dans les séries de données (erreurs systématiques)

Il s'agit de savoir si la série des données est homogène, c'est-à-dire d'observer si la loi de distribution de la variable n'a pas évolué au cours du temps. Cela peut refléter une tendance climatique (évolution progressive) ou être lié à une perturbation extérieure telle qu'un changement de capteur ou d'environnement de la station automatique (construction d'un

112. D'autres méthodes de reconstitution des manques ont été mises au point spécifiquement pour les données pluviométriques et sont mentionnées dans l'article de Ph. Lamarque et S. Jourdain [1994].

113. Ce seuil est choisi d'après les probabilités associées à la loi normale : en supposant une distribution normale, 99.9% des valeurs sont comprises dans l'intervalle de confiance [moyenne - 3 écart-types ; moyenne + 3 écart-types].

bâtiment par exemple). Ces dernières ruptures d'homogénéité peuvent être détectées par plusieurs méthodes graphiques et statistiques¹¹⁴ (se reporter, entre autres, à des ouvrages de statistiques et aux travaux de [Bigot *et al.*, 2002 ; Lamarque et Jourdain, 1994 ; Lubès-Niel *et al.*, 1998 ; Mestre, 2000 ; Paturel *et al.*, 1996]). Seules celles utilisées dans notre étude sont détaillées à présent. Notre choix s'est porté sur quelques méthodes simples d'utilisation (procédure simple et/ou logiciel adapté). Si nous avons été dans une optique de recherche de l'évolution du climat sur le temps long¹¹⁵, il aurait été préférable de multiplier les différentes méthodes et de les comparer (comme dans les travaux de S. Bigot *et al.* [2002] et O. Mestre [2000]).

- Homogénéité relative

La méthode la plus usuelle est celle du double cumul¹¹⁶. Son principe consiste à vérifier la proportionnalité des valeurs mesurées à deux stations (l'une, supposée correcte, est la référence¹¹⁷ et doit être corrélée à celle que l'on contrôle) et donc à estimer l'homogénéité *relative* de la série testée. En pratique, il suffit de tracer un graphique cartésien des valeurs cumulées du paramètre climatique¹¹⁸ étudié pour les deux stations. Les points doivent s'aligner sur une droite. On peut supposer une hétérogénéité dans la série lorsque l'on observe une rupture dans la pente de la droite.

- Homogénéité interne

Outre cette représentation graphique simple d'utilisation, il existe d'autres méthodes statistiques ne testant plus l'homogénéité relative mais l'homogénéité *interne*. Plus complexes, elles reposent alors très souvent sur la détection d'un changement dans la moyenne de la variable étudiée [Paturel *et al.*, 1996] et supposent une variance constante (excepté la méthode de Pettitt) [Lubès-Niel *et al.*, 1998].

Le logiciel Khronostat 1.0, développé par J.-F. Boyer (ORSTOM Hydrologie¹¹⁹) [Boyer, 1998], permet d'utiliser plusieurs méthodes de détection de ruptures. Il indique les résultats sous formes numérique et graphique. Les tests disponibles sont le test de Pettitt (adaptation de celui de Mann-Whitney), la méthode de Buishand et celle de Lee et Heghinian¹²⁰.

114. Très souvent, les tests permettent de détecter une seule rupture.

115. Ici les séries de données portent sur une période récente et relativement courte. On peut supposer *a priori* une meilleure qualité que pour des séries commençant au début du siècle dernier.

116. On peut mentionner également la méthode du cumul des résidus, dérivée de celle du double cumul [Musy, 2003].

117. Ici, les séries de référence seront celles de Reims-Courcy, station synoptique de Météo France.

118. En raison de la possibilité d'avoir des valeurs négatives pour les températures (en degrés Celsius), celles-ci ont été converties en degrés Kelvin : $T_{\text{Kelvin}} = T_{\text{Celsius}} + 273.15$.

119. ORSTOM : Organisme de Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer.

120. Pour la description des ces différents tests, le lecteur pourra se référer à :

- Sneyers R. (1975), Sur l'analyse statistique des séries d'observations, Genève : OMM, Note technique n°143, 192 p. ;

- Pettitt A.N. (1979), A non-parametric approach to the change-point problem, *Appl. Statist.*, 28, 2, 126-135 ;

- Buishand T.A. (1984), Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series, *J. Hydrol.*, 73, 51-69 ;

- 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, 503-506.

IV.3.2 - Principaux résultats

Valeurs manquantes

- Températures minimales journalières

Pour les séries de données de températures journalières (en indices actinothermiques et sous abri), seules 162 valeurs manquantes ont été relevées sur 21 128 données¹²¹, soit moins de 0.8% (0.3% pour les températures minimales sous abri et 1.2% pour les indices actinothermiques) (Tableau IV.4). À l'exception de la station de Vert-Toulon présentant une seule lacune ponctuelle, les manques s'étalent sur plusieurs jours et sont liés à une panne du capteur (Reims, Verzenay) ou encore à une interruption des mesures (arrêt de la mesure des indices actinothermiques à Avize bas).

Tableau IV.4 : Lacunes dans les 468 données thermiques journalières

Stations	Températures minimales	Indices actinothermiques
Avize (bas)		78 (16.7%) [tout le printemps 2003]
Reims-Courcy		17 (3.6%) [15/03/00 – 31/05/00]
Vert Toulon		1 (0.2%) [15/05/03]
Verzenay	33 (7.1%) [29/04/03 – 31/05/03]	33 (7.1%) [29/04/03 – 31/05/03]

Données : 15/03-31/05 1998-2003, C1VC, Météo France

Compte tenu de leur nombre relativement limité et afin d'assurer les analyses statistiques ultérieures, nous avons choisi de reconstituer ces lacunes lorsque leur importance était jugée négligeable. La méthodologie adoptée repose alors sur des régressions linéaires simples¹²² : les données manquantes sont estimées à partir des autres mesures thermiques disponibles (pour Avize bas, Reims et Vert-Toulon, les indices actinothermiques sont reconstitués à partir des températures minimales) ou à partir des stations les plus proches thermiquement (les lacunes des températures à Verzenay sont évaluées avec les données de Sillery située à quelques centaines de mètres). Cette dernière modélisation est illustrée à titre d'exemple (l'ensemble des modèles retenus est indiqué en l'Annexe D) :

Les corrélations entre les températures à Verzenay et à Sillery sont fortement significatives (pour un seuil inférieur à 1%) :

$$r_{Tn_{Sill} / Tn_{Vzy}} \approx r_{IA_{Sill} / IA_{Vzy}} \approx 0.98$$

Les régressions effectuées (méthode des moindres carrés) avec, comme variables explicatives, températures minimales puis indices actinothermiques de Sillery expliquent respectivement 96.8% et 96.0% des variations thermiques à Verzenay :

$$Tn_{Vzy} = 0.976 * Tn_{Sill} + 0.502(+\varepsilon)$$

$$IA_{Vzy} = 0.992 * IA_{Sill} + 0.288(+\varepsilon)$$

Ces équations nous permettent alors de reconstituer les valeurs manquantes pour la station de Verzenay.

121. Soit 2 températures x 23 stations x 6 printemps x 78 dates.

122. Des régressions multiples (pas à pas) intégrant l'ensemble des stations ont été testées pour estimer les différentes lacunes. Néanmoins, elles n'améliorent que très peu les modèles simples (coefficient de détermination augmentant de 1 à 3 points), qui apportent déjà une information conséquente (supérieure à 90%). Elles n'ont donc pas été retenues ici pour ne pas complexifier la reconstitution des données manquantes.

- Températures horaires

Le Tableau IV.5 répertorie les valeurs manquantes des données thermiques horaires (en indice actinothermique et sous abri) : elles représentent dans l'ensemble 2% des données¹²³ et moins de 0.01% lorsqu'on exclut les indices actinothermiques pour Avize bas (à peine 8% des données sont disponibles).

Tableau IV.5 : Lacunes dans les 11 232 données thermiques horaires

Stations	Températures sous abri	Indices actinothermiques
Avize (bas)	46 (0.4%) [31/03/98 22-23h ; 31/05/99 22-23h ; 03/05/01 7h – 04/05/01 10h ; 10/05/01 7-8h ; 12/05/01 21-23h ; 13/05/01 21-23h ; 26/05/02 18h ; 15/04/03 22h – 16/04/03 2h]	10 374 (92.4%) [Données disponibles : 02/05/98 1h – 12/05/98 6h ; 15/05/98 1h – 19/05/98 6h ; 21/05/98 1h – 25/05/98 6h ; 15/03/03 1h – 31/03/03 24h]
Plumecocq	1 (0.01%) [31/03/98 12h]	1 (0.01%) [31/03/98 12h]
Reims-Courcy		1 (0.01%) [30/05/01 17h]

Données : 15/03-31/05 1998-2003, Civc, Météo France

Pour combler ces lacunes, diverses méthodes ont été adoptées selon les différents cas de figure, en estimant au mieux tout en cherchant la simplicité :

- étant donné un nombre trop important de lacunes (92.4%), nous avons choisi de ne pas reconstituer les indices actinothermiques d'Avize bas ;
- pour les températures sous abri de cette même station, la méthodologie décrite précédemment a été reprise : estimation de la température à partir des données de la station la plus proche thermiquement, ici Fort-Chabrol (Annexe D.1, Tab. D - 2) ;
- enfin, pour les lacunes ponctuelles restantes, nous avons choisi d'appliquer la moyenne des heures précédente et suivante (cette méthode simple s'applique ici très bien avec des lacunes ponctuelles et nous a semblé *a priori* meilleure que la précédente).

- Données horaires et trihoraires de vent

Les données horaires de vent, en particulier les directions, présentent beaucoup plus de lacunes que les températures (au total, 4.7% pour les directions et 1.4% pour les vitesses¹²⁴ ; Tableau IV.6). Ces lacunes sont parfois ponctuelles, sur quelques heures¹²⁵, voire sur quelques jours (capteur en panne). Souvent, la valeur manquante n'est pas isolée : il n'est pas rare pour certaines dates et heures de constater des lacunes pour plusieurs stations¹²⁶. Pour certaines stations, la période sans donnée est plus longue : par exemple, pour Vert-Toulon, la girouette et l'anémomètre n'ont pas enregistré de mesures sur plus des

123. Soit 10 423 valeurs manquantes sur 516 672 données (2 températures x 23 stations x 6 printemps x 78 dates x 24 heures).

124. Pour les directions : 6 874 lacunes sur 13 stations x 6 printemps x 78 dates x 24 heures (146 016) ; pour les vitesses : 2 089 / 146 016.

125. En calculant la part des valeurs manquantes pour chaque heure (par rapport à l'ensemble des valeurs manquantes), toutes stations confondues, il apparaît que les données nocturnes présentent moins de lacunes que celles de la journée : de 19 à 7h, chaque heure comptabilise moins de 4% des lacunes, ce qui n'est pas le cas pendant la journée (s'il y avait une équirépartition, la part de valeurs manquantes pour chaque heure serait de 4.2%). Cette observation, certes non satisfaisante, est positive dans la mesure où l'accent de notre travail est surtout mis sur les données nocturnes.

126. Par exemple, le 09/05/2001 à 17h, sur les 13 stations du réseau retenu, seules quatre d'entre elles ont mesuré une direction du vent : Avize bas, Aÿ, Nogent-l'Abesse et Reims-Courcy.

deux tiers du printemps 2000¹²⁷, ce qui contribue fortement aux 16% de lacunes (Tableau IV.6). Dans une moindre mesure, la station de Vertus présente des lacunes au début du printemps 2002 (du 15/03 au 02/04).

À la lecture des données, nous avons constaté que coexistaient parfois, pour une date et une heure données, une absence de donnée de direction et une vitesse de 0 m/s, soit un vent nul ou une absence de vent (769 cas des 6 874 lacunes, dont plus d'un tiers pour Nogent-l'Abesse). Aussi avons-nous attribué à ces directions manquantes la valeur 0 (absence de vent). Pour les autres valeurs manquantes, aucune estimation n'a été faite, compte tenu de la variabilité de la direction du vent.

Tableau IV.6 : Lacunes dans les 11 232 données horaires de vent¹²⁸

Stations	Direction du vent	Vitesse du vent
Aÿ-Champagne	98 (0.9%)	96 (0.9%)
Fleury-la-Rivière	583 (5.2%)	1 (0.01%)
Germaine	282 (2.5%)	240 (2.1%)
Nogent-l'Abesse	918 (8.2%)	
Œuilly	16 (0.1%)	4 (0.04%)
Orbais	1053 (9.4%)	9 (0.1%)
Plumecoq	587 (5.2%)	49 (0.4%)
Sacy	133 (1.2%)	
Sillery	770 (6.9%)	
Vert-Toulon	1 811 (16.1%)	1 234 (11.0%)
Vertus	623 (5.5%)	456 (4.1%)

Données : 15/03-31/05 1998-2003, Civc, Météo France

Enfin, signalons que le fichier des mesures de vent et des observations de nébulosité à Reims-Courcy ne présente aucune lacune.

Recherche de valeurs aberrantes

La seconde étape du contrôle et de la validation des données climatiques consiste à rechercher les valeurs aberrantes définies comme des erreurs aléatoires ou accidentelles.

- Contrôle de vraisemblance et de cohérence entre les paramètres

Premièrement, nous n'avons relevé aucune invraisemblance dans les séries climatiques : toutes les données étaient comprises dans les limites du possible (aucune direction de vent supérieure à 360°, etc.).

Ensuite, nous avons calculé la différence entre les deux hauteurs de températures : à 2 mètres sous abri et à l'air libre entre 10 et 50 cm du sol. La nuit, le rayonnement terrestre va fortement influencer le refroidissement de l'indice actinothermique à l'air libre et près du sol. Le phénomène d'inversion thermique peut alors s'observer par la différence entre ces deux températures ($I_A < T_n$). La moyenne positive (0.8°C) pour l'ensemble des dates et des stations reflète ce phénomène que les conditions de vent calme et de ciel clair accentuent. Ainsi, il n'est pas rare d'observer des écarts positifs importants : par exemple, 7°C le 26 mai 2000 à Orbais-l'Abbaye ou 6.8°C le 17 mars 2003 à Bouzy (haut). Par contre, nous

127. En simplifiant, aucune mesure en mars et en mai. Pour ce printemps, 1 275 valeurs manquantes sur 1 872 (78 dates x 24 heures).

128. L'ensemble des lacunes représentant 6 874 données pour les directions et 2 089 pour les vitesses, nous avons choisi de ne pas répertorier les dates et heures.

avons estimé qu'un écart négatif important était suspect : l'exemple unique du 31 mai 2000 à Œuilly avec -8.5°C ($T_n : 2.1^{\circ}\text{C}$; $IA : 10.6^{\circ}\text{C}$) a été jugé comme une valeur aberrante. En effet, les températures minimales sous abri relevées dans toutes les autres stations du vignoble étaient supérieures à 9.3°C (Annexe D.2, Tab. D - 3) ; la température aberrante à Œuilly a donc été estimée à partir de l'écart moyen entre T_n et IA pour cette date et pour l'ensemble des stations, soit $+0.1^{\circ}\text{C}$.

Enfin, en effectuant des calculs de fréquence des directions de vent, nous nous sommes aperçus de l'importance de la direction 140° , qui correspond à la position d'équilibre de la girouette [Météo France Reims, communication privée]. À titre d'exemple, cette prépondérance s'observe très bien sur le graphique des fréquences des différentes modalités de la donnée *Direction* à Aÿ : la direction 140° représente 8.1% des vents. Toutefois, cette direction est le plus souvent associée à une vitesse de 0 m/s, qui signifie une absence de vent¹²⁹. Cette erreur a déjà été mise en évidence dans l'étude des valeurs manquantes et n'apparaît que pour les stations gérées par le CIVC. Elle représente une part non négligeable sur l'ensemble des données : de 11.7% pour Chouilly-Plumecoq à 34.5% pour Germaine (Tab. D - 4). Pour corriger ces valeurs aberrantes, nous avons attribué aux données de direction la valeur 0. La direction 140° n'est alors présente que 2 748 fois (contre 6 284 avant correction et sur 146 016 données), ce qui reste encore important. Pour Aÿ (Figure IV.2), après correction¹³⁰, la proportion de la direction 140° , qui représente 4.8% de l'ensemble des vents non nuls, reste encore la direction la plus fréquente. Il est difficile alors de savoir si cette mesure est aberrante ou non. Nous avons donc choisi de laisser telles quelles les directions 140° avec des vitesses non nulles¹³¹, sans pour autant perdre notre vigilance à l'avenir. Enfin signalons que cette comparaison de la direction et de la vitesse du vent nous a permis de dégager deux autres valeurs aberrantes : vitesse non nulle et direction égale à 0 (à Nogent-l'Abbaye et à Sacy).

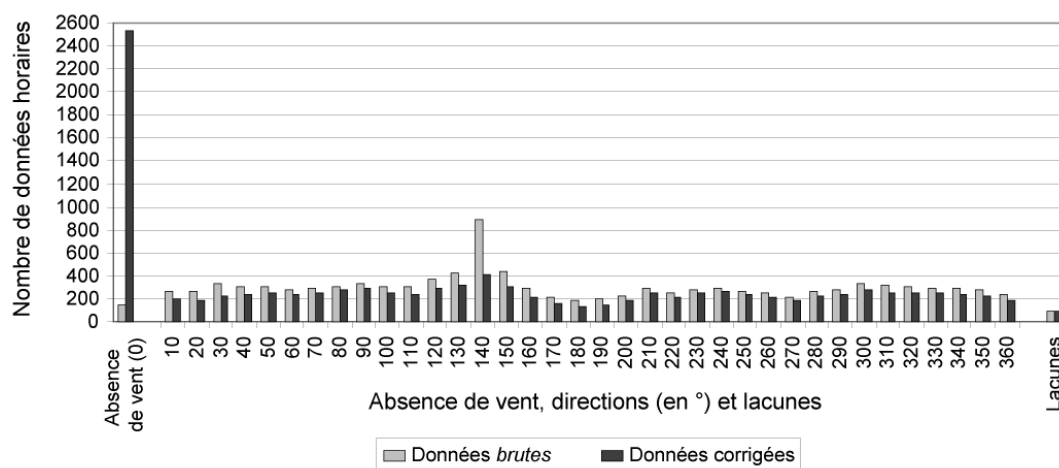


Figure IV.2 : Fréquence des modalités de la donnée *Direction* à Aÿ

Données : 15/03-31/05 1998-2003, CIVC

129. Signalons que pour la station Sillery, la girouette semble se bloquer sur les directions $210-220^{\circ}$ (avec des vitesses de vent nulles).

130. Les répercussions de cette correction sont très nettes sur la Figure IV.2 : hausse importante du nombre de données horaires avec une absence de vent.

131. Parfois les girouettes mesurent pendant plusieurs heures une direction de 140° : est-ce la direction *réelle* du vent ? Ou est-ce que les vents relativement faibles (1 à 2 m/s) ne permettent pas à la girouette bloquée sur 140° de tourner ? Il est très difficile de le savoir.

▪ Contrôle de cohérence temporelle des températures horaires

Pour les données horaires de températures minimales sous abri, le contrôle de la cohérence temporelle a révélé que, dans l'ensemble, les données étaient stables d'une heure à l'autre. En effet, l'écart moyen, en valeur absolue, entre une donnée et la moyenne aux heures précédente et suivante est de 0.4°C et varie peu d'une station à une autre¹³². La moitié de ces écarts en valeur absolue est inférieure à 0.3°C. Néanmoins, les maxima sont parfois importants : jusqu'à 7°C pour la donnée à 10h, le 14/05/03, à la station de Nogent-l'Abesse. En observant plus précisément l'évolution des températures minimales sous abri pour cette journée, il apparaît que la donnée à 10h est aberrante (Figure IV.3). Aussi avons-nous corrigé cette valeur aberrante, en lui attribuant la moyenne des heures précédente et suivante.

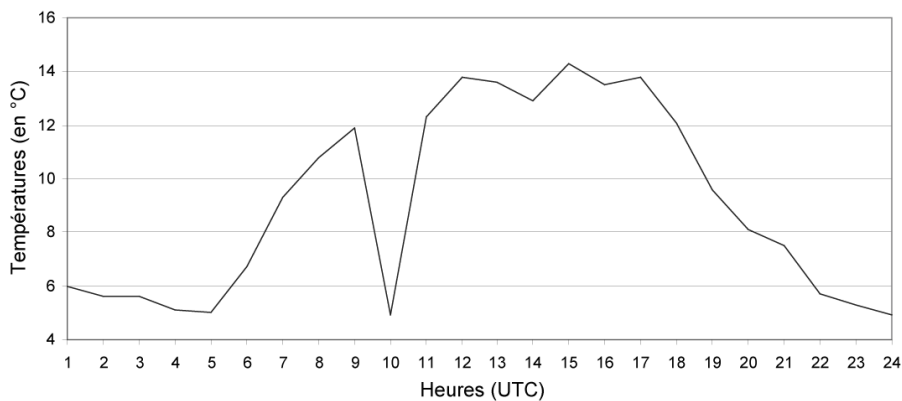


Figure IV.3 : Évolution des températures minimales horaires (sous abri) à Nogent-l'Abesse, le 14/05/03

Données : 14/03/2003, C1vc

En prenant un seuil arbitraire d'un écart supérieur à 5°C (en valeur absolue), nous relevons 14 données présentant une *incohérence temporelle*. Nous avons regardé l'évolution, au cas par cas : certaines valeurs aberrantes ont été corrigées ; pour d'autres, la variabilité des données ne nous a pas permis de statuer. Il est évident que cette analyse est fortement tributaire du seuil retenu.

Les indices actinothermiques horaires présentent plus d'incohérence temporelle : la moyenne des écarts est de 0.6°C, la médiane de 0.4°C. Étant donné que le capteur est à l'air libre, de grandes différences thermiques peuvent apparaître pendant la journée selon le rayonnement solaire incident. Ainsi, les écarts sont inférieurs à la moyenne entre 20h et 5h et supérieurs pour la journée. En gardant le même seuil de 5°C (en valeur absolue), nous nous sommes intéressés aux seules données nocturnes¹³³ (21-6h) : seules deux données semblent aberrantes et ont été corrigées (même méthode).

Dans la mesure du possible, les données supposées aberrantes ont été corrigées. Cette analyse¹³⁴ nous montre combien il faut être vigilant avec les données, notamment les données horaires.

132. De 0.35°C pour Avize (bas) à 0.49°C pour Sillery.

133. Par curiosité, nous avons regardé l'écart maximal (apparaissant en journée) : 19.7°C entre la donnée à 9h, le 26/05/2000 à Orbais-l'Abbaye et la moyenne à 8 et 10h. Les trois indices actinothermiques sont respectivement pour 8, 9 et 10h : 15.1, -2.9 et 18°C. Nous pouvons conclure à une valeur aberrante à 9h ne pouvant pas s'expliquer par un rayonnement solaire incident plus ou moins important.

134. Elle pourrait être plus systématique. Par exemple, le choix du seuil de 5°C pourrait être discuté.

- Contrôle de cohérence spatiale des températures quotidiennes

Pour valider la cohérence spatiale, nous avons choisi de ne pas découper notre espace en plusieurs zones climatiques homogènes, mais de le considérer comme relativement « homogène » spatialement, compte tenu de ses dimensions (57.2 km x 38.5 km). Concernant les températures minimales journalières sous abri, on dénombre 30 *valeurs remarquables*, c'est-à-dire pour lesquelles l'écart à la moyenne (sur l'ensemble des stations et pour un jour donné) est supérieur à trois fois l'écart-type (en valeur absolue). La station de Germaine se démarque fortement des autres (17 valeurs remarquables) (Annexe D.2, Tab. D - 5). Quant aux indices actinothermiques, ce sont les stations de Reims-Courcy et de Chambrecy, avec respectivement 11 et 14 valeurs remarquables (sur un total de 43), qui enregistrent des températures minimales non représentatives de l'ensemble du réseau climatique (Tab. D - 6). Ces trois stations sont particulièrement froides en moyenne et en particulier lors des temps stables. Elles se distinguent également dans l'étude de la cohérence spatiale sur les données horaires (Fig. D - 1).

Détection de ruptures dans les séries de données thermiques

La première méthode utilisée pour estimer l'homogénéité relative de chaque série temporelle, le double cumul, montre que toutes les stations sont homogènes¹³⁵ (pour chaque printemps), que ce soit au niveau des températures horaires ou journalières (en indices actinothermiques et sous abri) (exemple pour la station de Nogent-l'Abesse, au printemps 2003, Annexe D.3, Fig. D - 2).

Cependant pour chaque chronique stationnelle, tous les tests d'homogénéité interne (de Pettitt, de Buishand, etc.) conduisent à rejeter l'hypothèse nulle d'une absence de rupture au seuil de 1% : les séries stationnelles présentent toutes une rupture récurrente dans les températures entre le 15 et le 25 avril de chaque printemps (exemple pour Reims-Courcy, au printemps 2000, Annexe D.3, Fig. D - 3). L'analyse des chroniques nous a permis de conclure à une rupture d'ordre climatique. À titre d'illustration, la Figure IV.4 représente la chronique printanière des températures minimales sous abri, à Reims-Courcy, pour le printemps 2000. On observe une croissance importante des températures mi-avril (ceci est également le cas pour chaque printemps et pour toutes les stations du vignoble) : les séries printanières présentent donc deux périodes thermiques assez distinctes, séparées par une *rupture* autour du 20 avril (en pointillé sur la Figure IV.4) que les différents tests d'homogénéité interne révèlent.

135. La station prise comme référence est Reims-Courcy. Afin de vérifier la stabilité de ce résultat, nous avons fait le test avec une autre station (Bouzy bas) : les résultats sont similaires.

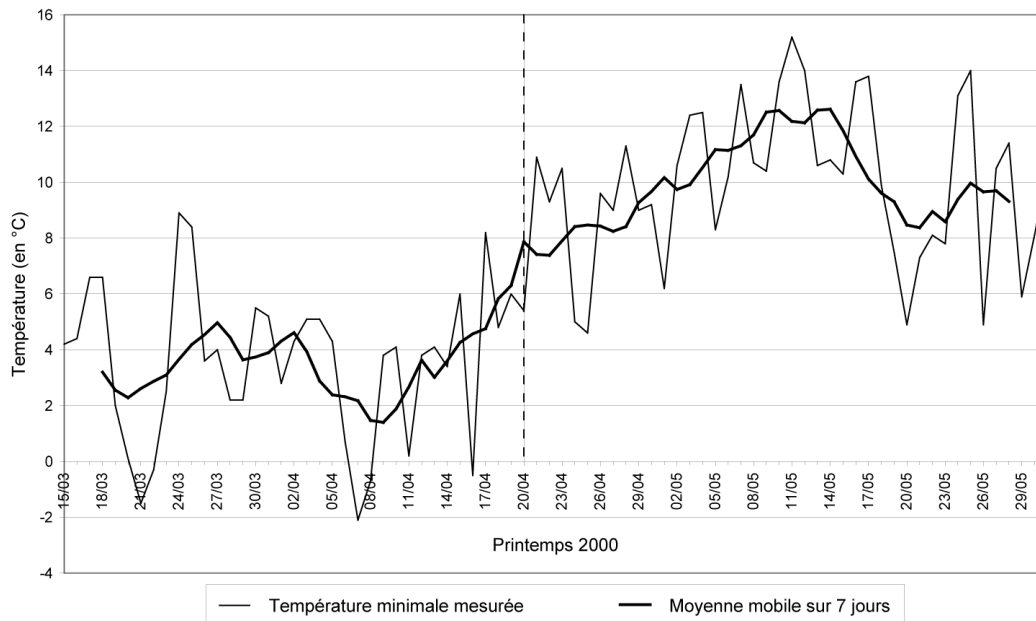


Figure IV.4 : Évolution des températures minimales sous abri à Reims-Courcy lors du printemps 2000

Données : 15/03-31/05 2000, Météo France

Conclusion du chapitre IV

Dans ce chapitre, nous avons présenté les données climatiques sur lesquelles s'appuie cette thèse. Elles sont mesurées pour 23 stations dans ou à proximité du vignoble marnais, ce qui représente un réseau d'information relativement dense. Plus précisément, les données utilisées concernent les températures, le vent et la nébulosité. Enfin, une analyse critique a permis d'établir un inventaire des lacunes, représentant moins de 5% des données, et de relever quelques valeurs aberrantes. Ces données manquantes ou erronées, une fois répertoriées, ont été estimées et corrigées, dans la mesure du possible, afin de constituer des fichiers opérationnels plus conséquents. À travers ce contrôle des cohérences temporelle et spatiale, nous avons constaté que la qualité des données était cependant perfectible, ce qui doit nous amener à être prudents dans les interprétations des analyses ultérieures.

Chapitre V - LA BASE DE DONNEES ENVIRONNEMENTALES : ALTITUDE ET OCCUPATION DU SOL

Un des objectifs de notre recherche consiste à modéliser la variabilité spatiale des températures minimales. Or, d'après la littérature présentée dans le chapitre 2, les paramètres topographiques influencent fortement le champ des températures, en particulier lors des situations de ciel clair et de vent calme. En effet, l'air froid a tendance à s'accumuler, par gravité, en bas des coteaux et dans les petites cuvettes. De plus, les différences d'occupation du sol, par exemple, entre les espaces forestiers et urbains, influent également sur les températures minimales.

Pour définir les paramètres *environnementaux* (relief, occupation du sol) pertinents pour notre étude, nous avons eu recours à deux bases de données décrivant la surface terrestre : la BD Alti® donnant l'altitude et la BD Carto® l'occupation du sol, deux bases de données acquises par le CIVC auprès de l'IGN. Dans ce chapitre, nous présenterons les caractéristiques principales de ces deux couches d'information, ainsi qu'une analyse critique de celles-ci. Puis, nous décrirons la sélection de ces informations afin de constituer une base unique d'informations altitudinale et environnementale sur notre domaine d'étude.

V.1 - Données altitudinales

Dans de nombreux champs disciplinaires (aménagement, urbanisme, environnement, hydrologie, analyse paysagère, etc.), l'utilisation des Modèles Numériques de Terrain (MNT) est aujourd'hui très répandue. On attribue l'origine de ce terme à C.L. Miller et R.A. Laflamme [1958] qui définissaient alors le *Digital Elevation Model*¹³⁶ (DEM) comme suit :

« a statistic representation of the continuous surface of the terrain, by means of a big number of points with co-ordinates (X, Y, Z), in one arbitrary system of co-ordinates »¹³⁷.

136. Le terme *Digital Elevation Model* ou *Modèle Numérique d'Élévation* désigne une base de données représentant la distribution spatiale de l'altitude de la surface terrestre, sous une forme numérique. Il existe une grande diversité de MNE, en particulier suivant la construction de la base de données altimétriques (source et technique) et la structure finale du modèle numérique (Encadré V.1). Ils représentent les données initiales nécessaires pour produire d'autres modèles numériques relatifs à la surface topographique, tels que les MNT impliquant d'autres informations que l'altitude : pente, orientation, visibilité, etc. [Burrough et McDonnell, 2000].

Dans la langue française, le *Modèle Numérique de Terrain*, qualification très souvent retenue, désigne souvent concrètement un *Modèle Numérique d'Élévation* et montre combien le terme MNT est devenu générique. Par la suite, nous emploierons le terme MNE pour décrire la base de données altimétriques acquise, puis MNT dès lors que des calculs seront effectués.

137. « Une représentation statistique de la surface continue d'un terrain, au moyen d'un grand nombre de points de coordonnées (X, Y, Z), dans un système arbitraire de coordonnées. »

Encadré V.1 : Construction et structure des modèles numériques d'élévation

La construction et la structure d'un MNE diffèrent selon l'espace étudié, les moyens financiers ou encore les objectifs.

En premier lieu, un MNE peut être construit à partir de différentes sources :

- levés sur le terrain (mesures topométriques avec un théodolite ou un récepteur Gps – Global Positioning System) ;
- cartes topographiques digitalisées (le plus fréquent) ;
- ou encore images stéréoscopiques, telles que des photographies aériennes, des images satellitaires (Spot) ou encore des images de radar*.

Les résolutions planimétrique et altimétrique dépendent de l'échelle de ces données sources. Par exemple, avec une image SPOT, les précisions planimétrique et altimétrique seront respectivement de 20-40 m et de 10-20 m, alors qu'à partir de cartes topographiques digitalisées, elles varient de 10 à 100 m et de 5 à 50 m, selon le relief [Charleux-Demargne, 2001].

Ensuite, le jeu de données altimétriques ainsi obtenu est stocké et structuré selon plusieurs formats possibles (Figure V.1) :

- les courbes de niveau (isohypses) qui résument l'information sous forme de polygones caractérisées par leur altitude et par les coordonnées planimétriques de tous les points ;
- les profils dont l'altitude est donnée par des coupes longitudinale ou transversale ;
- le format TIN (*Triangular Irregular Network*) défini par les liaisons de chaque point remarquable du relief, formant ainsi des facettes triangulaires de forme et de taille variables ;
- le format maillé avec une information altitudinale pour chaque carré ou pixel ; la représentation est alors *raster* à la différence des trois précédents formats de type *vectoriel*.

Chacun des formats possibles sera plus ou moins adapté au relief de l'espace étudié. Par exemple, le réseau irrégulier de triangles (prenant en compte les différents points remarquables du relief) est plus adéquat avec un relief complexe, pour une résolution égale, que les courbes de niveaux ou qu'une grille régulière qui peuvent ne pas enregistrer les changements brusques de relief. Par contre, ce dernier format, du fait de sa structure régulière, permet beaucoup plus facilement des croisements d'information avec d'autres données *raster* et des traitements matriciels [Charleux-Demargne, 2001].

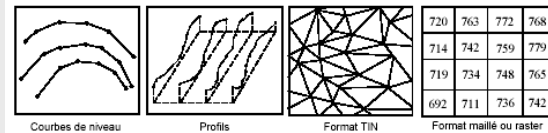


Figure V.1 : Différents formats d'un modèle numérique d'élévation

Source : [Charleux-Demargne, 2001]

Quel que soit le format du MNE, l'information altitudinale reste discontinue dans l'espace. Pour s'approcher le plus possible du phénomène continu qu'est le relief, on a recours à des méthodes d'interpolation permettant alors de calculer l'altitude en tout point de l'espace à partir du jeu de points altimétriques initiaux**. L'interpolation retenue influe alors sur les résolutions planimétrique et altimétrique.

* Pour une synthèse bibliographique plus complète, se reporter à la thèse de J. Charleux-Demargne [2001].

** Les différentes méthodes d'interpolation, non détaillées ici, font l'objet d'une synthèse bibliographique présentée par la suite (cf. Chapitre XII - Quelques références sur la spatialisation des données ponctuelles, p. 209).

La connaissance de l'altitude d'un espace donné s'avère particulièrement intéressant pour étudier et visualiser les caractères structurels du terrain, ainsi que pour modéliser des phénomènes morphologiques et atmosphériques [Hutchinson et Gallant, 1999]. La représentation de cette information géographique peut être de deux types : *raster*, lorsque l'espace est divisé en plusieurs cellules ou mailles de forme régulière, et *vectoriel*, si l'espace est composé d'objets géométriques sous la forme de points, lignes et polygones [Bordin, 2002 ; Laurini et Milleret-Raffort, 1993]. Le format numérique apporte un intérêt et une force supplémentaires, grâce aux manipulations possibles de l'information altitudinale initiale, qui permettent notamment d'obtenir des informations dérivées : calculs de pente, d'orientation, de courbure ; détermination des lignes de force du relief (crête, talweg) ; calcul des ombres portées ; délimitations de bassins-versants ou d'aires de visibilité, etc. [Burrough et McDonnell, 2000 ; Moore *et al.*, 1991 ; Skidmore, 1989]. La plupart des algorithmes utilisés pour ces calculs sont intégrés dans les différents logiciels SIG et de traitement d'images. Les plus simples (pente, azimuth) sont basés sur une approximation du plan tangent en un point à une surface donnée. Nous ne détaillons ici que les calculs de la pente et de l'orientation associées à un point donné (Encadré V.2). Par la

suite, ces calculs sont utilisés pour caractériser la topographie de chaque point de notre Modèle Numérique d'Élévation (MNE).

Encadré V.2 : Pente et azimuth, calculs dérivés de l'altitude

Les informations altitudinales d'un MNE permettent de calculer, en chaque point, plusieurs paramètres topographiques dérivés :

- *pente* et *azimut* (ou exposition) à partir de l'approximation de la dérivée de premier ordre ;
- *courbures verticale* et *horizontale* ; *convexités transversale* et *verticale* ; *encaissement* ; *rugosité* du terrain à partir de la dérivée seconde,
- d'autres paramètres faisant appel à des algorithmes plus complexes (*bassins-versants*, etc.).

Dans cet encadré, nous souhaitons détailler le calcul de la pente et de l'azimut, c'est-à-dire l'inclinaison du terrain et son exposition [Burrough et McDonnell, 2000]. Ces deux composantes sont les caractéristiques intensité et direction du vecteur définissant le plan tangent en un point.

Pour les MNE en facettes triangulaires, pente et azimuth sont calculés sur chaque plan défini par chaque triangle (TIN). Pour les MNE en format *raster* ou en semis régulier, le plan est défini à partir d'une fenêtre mobile parcourant l'ensemble de la grille (Figure V.2). Le centre de la fenêtre est placé successivement au centre de chaque maille.

Figure V.2 : Exemple d'une fenêtre 3 x 3 pour le calcul des dérivées des altitudes au point $Z_{i,j}$

$Z_{i-1,j+1}$	$Z_{i,j+1}$	$Z_{i+1,j+1}$
$Z_{i-1,j}$	$Z_{i,j}$	$Z_{i+1,j}$
$Z_{i-1,j-1}$	$Z_{i,j-1}$	$Z_{i+1,j-1}$

Dans un espace à deux dimensions, la pente est le rapport entre la différence altitudinale H et la distance horizontale L (Figure V.3).

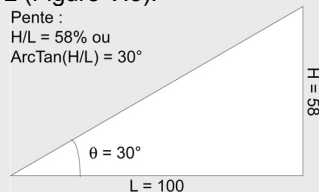


Figure V.3 : Représentation de la pente dans un espace à deux dimensions

Dans un espace à trois dimensions, la pente et l'azimut* sont calculés à partir des deux gradients suivant x et y : $\Delta z/\Delta x$ et $\Delta z/\Delta y$.

$$\begin{aligned} \text{Pente} &= \text{ArcTan} \sqrt{(\Delta z / \Delta x)^2 + (\Delta z / \Delta y)^2} \quad ** \\ \text{Azimut} &= \text{ArcTan}((\Delta z / \Delta x) / (\Delta z / \Delta y)) \end{aligned}$$

Plusieurs méthodes existent pour calculer les deux gradients ($\Delta z/\Delta x$ et $\Delta z/\Delta y$). En reprenant les énumérations de P.A. Burrough et R.A. McDonnell [2000] et de A.K. Skidmore [1989] :

1. L'azimut est défini comme la direction du gradient maximal entre le point central et ses huit voisins. Le résultat indique la pente maximale vers le point le plus bas.

$$\text{Gradient}_{\max} = \max((z_{i,j} - z_{i-1,j-1}), \dots, (z_{i,j} - z_{i+1,j+1}))$$

2. La seconde méthode est similaire, mais s'appuie sur les valeurs absolues des différences entre le point central et ses huit voisins (vers le point le plus haut ou le plus bas).

3. Une autre possibilité est de calculer deux gradients NS et EW :

$$(\Delta z / \Delta x)_{i,j} = (z_{i+1,j} - z_{i-1,j}) / 2\Delta x$$

$$(\Delta z / \Delta y)_{i,j} = (z_{i,j+1} - z_{i,j-1}) / 2\Delta y$$

Alors, l'estimation de la pente et de l'azimut se fait à partir des équations 11 et 12.

4. En utilisant le troisième ordre, les formules (1) et (2) des deux gradients deviennent :

$$(\Delta z / \Delta x)_{i,j} = \frac{(z_{i+1,j+1} + 2z_{i+1,j} + z_{i+1,j-1}) - (z_{i-1,j+1} + 2z_{i-1,j} + z_{i-1,j-1})}{8\Delta x}$$

$$(\Delta z / \Delta y)_{i,j} = \frac{(z_{i+1,j+1} + 2z_{i,j+1} + z_{i-1,j+1}) - (z_{i+1,j-1} + 2z_{i,j-1} + z_{i-1,j-1})}{8\Delta y}$$

Une autre méthode consiste à calculer pour chaque point de la grille un modèle de régression*** de l'altitude, en fonction des valeurs des neuf points de la fenêtre :

$$z = a.x + b.y + c$$

Ainsi le gradient $\Delta z/\Delta x$ est le coefficient a et $\Delta z/\Delta y$ le coefficient b .

6. Enfin, un dernier type de méthode est souvent mentionné : celui des régressions polynomiales. Par exemple :

$$z = a.x^2 + b.y^2 + c.xy + d.x + e.y + f$$

Les gradients sont alors les dérivées :

$$(\Delta z / \Delta x)_{i,j} = 2a.x + c.y + d$$

$$(\Delta z / \Delta y)_{i,j} = 2b.y + c.x + e$$

A.K. Skidmore [1989] a testé ces différentes méthodes de calcul de pente et d'azimut, en les comparant à des valeurs dites « vraies », c'est-à-dire des valeurs calculées à partir de cartes topographiques. L'auteur montre que toutes ces méthodes donnent des résultats significativement corrélés aux valeurs vraies et entre eux, même si les deux dernières (régressions) sont associées à de meilleures corrélations. Alors que les résultats des trois premières méthodes (intégrées dans la plupart des SIG) sont fortement influencés par les extrêmes et privilégient les grandes directions (0° , 45° , ...), les trois dernières formules, prenant en compte davantage de points pour l'estimation de la pente et de l'azimut, s'affranchissent de ces biais.

Outre le choix de ces méthodes, qui influe sur les valeurs dérivées, rappelons que la qualité du MNE original joue évidemment un rôle primordial [Burrough et McDonnell, 2000].

* La pente sera donnée en pourcentage ou en degrés. La valeur de l'azimut variera de 1 à 360° dans le sens des aiguilles d'une montre par rapport au Nord (0° associé à une pente nulle).

** Ou pour une pente en % : $\text{Pente} = 100 \cdot \sqrt{(\Delta z / \Delta x)^2 + (\Delta z / \Delta y)^2}$

*** Par les moindres carrés.

En tant que bases de données enrichies, ces *modèles numériques de terrain* permettent donc de visualiser, d'analyser et de modéliser des phénomènes liés au relief. Par exemple, dans notre travail, la prise en compte du relief est primordiale pour appréhender les écoulements de l'air à l'échelle topoclimatique, dont l'incidence sur la répartition spatiale des températures a été démontrée à plusieurs reprises [Beltrando *et al.*, 1992 ; Bouchet, 1966 ; Carrega, 1994].

Origine des données

La base de données altitudinales utilisée dans cette recherche provient de la BD Alti® acquise par le CIVC auprès de l'IGN. Cette base est « une gamme complète de MNT qui décrivent la forme du terrain à différentes échelles (du 1/50 000 au 1/1 000 000) » (plaquette publicitaire de la BD Alti® [www.ign.fr]). Ces modèles numériques ont été construits à partir de la numérisation de cartes topographiques au 1/50 000 ou 1/25 000 (courbes de niveaux et points cotés) et de la restitution photogrammétrique de photographies aériennes (à partir de couples au 1/30 000 ou 1/60 000) (Encadré V.1). Ils sont proposés sous divers formats et projections.

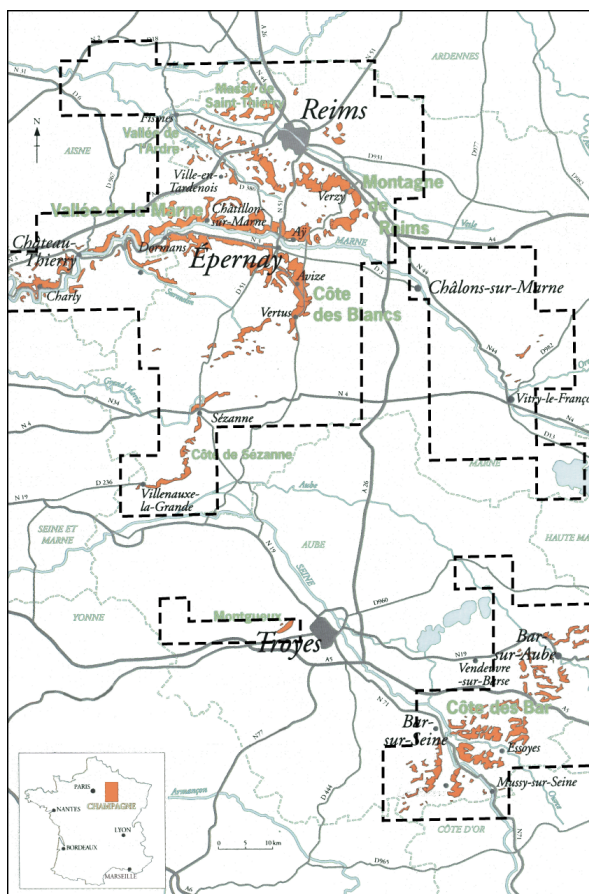
Concrètement, la base acquise se présente sous la forme de plusieurs fichiers ASCII contenant les coordonnées géométriques¹³⁸ (X et Y) et les altitudes (Z) de chacun des points de quatre zones couvrant l'ensemble du vignoble champenois (Carte V.1). Les coordonnées planimétriques des points, avec une résolution de 50 m, sont enregistrées dans la projection Lambert II étendu¹³⁹ et les altimétriques sont données en mètres par rapport au niveau de la mer (précision : 3-5 m ; Encadré V.3). Aussi, tous les 50 m, nous disposons d'une information *brute* sur l'altitude moyenne du terrain naturel se présentant sous la forme suivante :

X	Y	Z
713 975	2 480 525	154.803
713 975	2 480 575	161.89
713 975	2 480 625	166.142
713 975	2 480 675	174.646
...

Ce semis de points régulier (*lattice*) peut ensuite être traité par les méthodes d'analyse matricielle. Pour M.F. Hutchinson et J.C. Gallant [1999], les MNE de 200 m à 5 km de résolution sont appropriés aux représentations des champs de vent et de températures de surface, qui dépendent de la topographie. La résolution encore plus fine de notre base de données nous permettra d'appréhender les phénomènes à l'échelle topoclimatique (inversion thermique le long d'un coteau, par exemple).

138. Ces coordonnées « géométriques » ou « kilométriques » seront appelées par commodité « coordonnées géographiques » dans la suite de la thèse, terme qui ne doit s'appliquer, en toute rigueur, qu'aux latitudes et aux longitudes.

139. Le système de référence des données géographiques est la projection Lambert II étendu : c'est une projection conforme (conservation des angles) des coordonnées (sur l'ellipsoïde de Clarke) sur un cône tangent au parallèle de référence 46°48'00" [Gambier, 1972 ; Laurini, Milleret-Raffort, 1993 ; www.ign.fr]. Le système altimétrique correspond au Nivellement Général de la France (IGN 1969 pour la France continentale).



Carte V.1 : Les quatre zones où une information altitudinale est disponible

Source et données : le fond de carte d'après [www.civc.fr] ; les délimitations à partir de la BD Alti® [IGN]
Les espaces viticoles sont indiqués en gris foncé ; les zones du MNE sont délimitées par des traits en pointillés.

Encadré V.3 : Résolutions planimétrique et altimétrique

Pour définir la précision d'un MNE (ou d'un MNT), on distingue deux types de résolution : la *résolution planimétrique* (ou *résolution spatiale*) se référant à la position planimétrique de deux points, et la *résolution altimétrique* renvoyant aux valeurs d'altitude. Ces deux grandeurs dépendent du relief de l'espace étudié et de la construction du MNE. Dans sa thèse sur la qualité des MNT pour l'hydrologie, J. Charleux-Demargne [2001] donne l'exemple des informations provenant de la digitalisation des cartes topographiques (qui dépendent de la déformation du papier), de la précision des tracés sur la carte et de la qualité de digitalisation.

La prise en compte de ces résolutions est primordiale pour les analyses et calculs ultérieurs, telle la pente :

« Le MNT modélise implicitement la surface topographique à une certaine échelle, correspondant à sa résolution spatiale ; tout calcul mené à partir de ce modèle est relatif à cette échelle de représentation. » [Charleux-Demargne, 2001]

Ainsi, les erreurs de construction, jugées toutefois mineures sur les altitudes, sont amplifiées lors des calculs des plans dérivés (pente, etc.). Cette propagation des erreurs a été étudiée, entre autres, par [Burrough et McDonnell, 2000 ; Carter, 1992 ; Chang et Tsai, 1991 ; Chrisman, 1984]. K.-T. Chang et B.-W. Tsai [1991] soulignent, en particulier, l'importance des erreurs dans les calculs d'azimut pour les zones dont le relief est peu accentué.

La base de donnée altimétrique BD Alti® de l'IGN utilisée dans ce travail est présentée sous la forme d'une grille régulière : c'est un ensemble de valeurs numériques, régulièrement espacées de 50 m (résolution planimétrique). Quant à la résolution altimétrique, il est admis qu'elle correspond en moyenne à la demi-équidistance des courbes de niveau. Les cartes topographiques au 1/25 000 utilisées pour construire la BD Alti® donnent une information altimétrique par isohypses distants, le plus souvent, de 5 m (pour la Champagne). Par conséquent, la précision altimétrique est de 2.5 m en moyenne. Généralement, la précision est entre 2 et 3 m dans les plaines et de 12 à 15 m dans les zones à forts dénivelés et très accidentées [Gaddas, 2001].

Sur un espace plus restreint du vignoble marnais (autour de Sillery), S. Bridier *et al.* [2004] ont confronté la base altitudinale décrite ici avec un MNE plus précis (résolution planimétrique de 20 m ; résolution verticale centimétrique). Ils montrent que, pour des mêmes points, les différences d'altitude entre ces deux bases sont à 70% inférieures à 1 m (40% inférieures à 0.5 m).

On peut facilement imaginer que, pour un relief plus complexe que celui de la Champagne, somme toute assez peu accentué, l'imprécision de la donnée altitude serait plus importante et donc plus préoccupante.

Critique des données altitudinales

Cette base de données, du fait de sa couverture spatiale et de sa résolution, est riche et d'une taille considérable¹⁴⁰, ce qui conduit à des traitements longs nécessitant des ressources informatiques importantes. De même, le fait de se limiter aux seules zones viticoles (Carte V.1) a conduit à un morcellement spatial de cette base, ce qui a pu parfois gêner des analyses ultérieures (cf. Délimitation d'une zone d'étude, p. 113).

Il est essentiel d'évaluer la qualité de cette information altitudinale, avant de dégager d'autres informations (pente, etc.) et de l'utiliser dans des modélisations ultérieures. Afin de vérifier un éventuel décalage spatial des données, nous avons cherché à comparer les altitudes de cette base avec celles des cartes topographiques¹⁴¹, où l'altitude est représentée par les courbes de niveau et les points cotés. Après avoir scanné puis calé plusieurs cartes topographiques au 1/25 000, nous nous sommes appuyés sur les données du MNE pour tracer, sur ces cartes, les courbes isohypses générées par le logiciel d'interpolation Surfer® (par triangulation¹⁴²). Cette estimation de la qualité de la BD Alti® a été réalisée sur quelques zones-tests. Ici, deux exemples autour de Mailly sont présentés : au nord-ouest, à l'échelle 1/10 000 (Carte V.2) et au sud, au 1/5 000 (Carte V.3). Sur la première carte, nous constatons que les isohypses issues du MNE coïncident relativement bien avec celles de la carte topographique au 1/25 000.

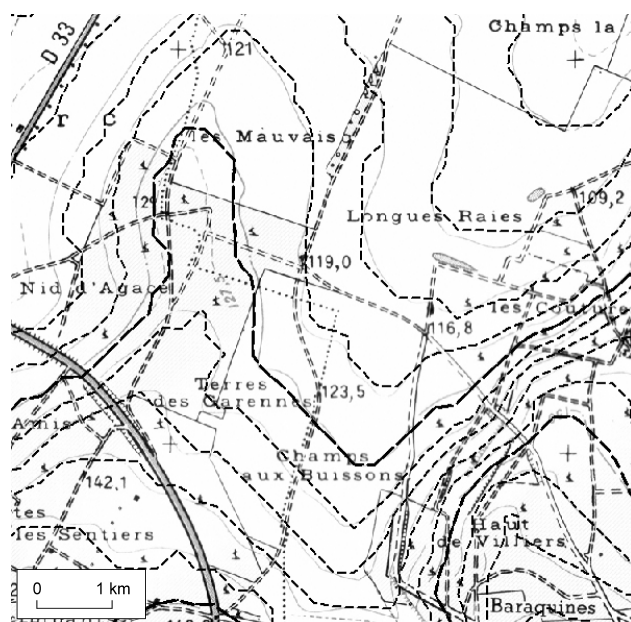
À une échelle plus fine (Carte V.3), nous observons de légers décalages, pouvant être liés à une imprécision de l'information altimétrique ou encore à celle induite par l'interpolation des données du MNE. Cependant, les courbes de même altitude pour les deux sources sont distantes de moins d'un demi-centimètre (sur la Carte V.3), soit moins de 25 m. La résolution planimétrique du MNE étant de 50 m, nous pouvons donc estimer que l'information issue du MNE n'est pas aberrante et ne présente pas de décalage spatial¹⁴³.

140. Pour le vignoble de Champagne, nous disposons de 10 fichiers ASCII donnant chacun une information altitudinale pour 330 000 points géographiques.

141. Rappelons que les deux informations altitudinales proviennent du même organisme, l'IGN. Il n'est donc pas possible de vérifier la qualité intrinsèque de ces informations.

142. Les méthodes d'interpolation spatiale sont décrites plus précisément dans le Chapitre XII - Quelques références sur la spatialisation des données ponctuelles (p. 209).

143. Cette analyse critique (non systématique) a été réitérée sur d'autres exemples, non répertoriés ici : à chaque fois, les courbes de niveaux coïncident approximativement.



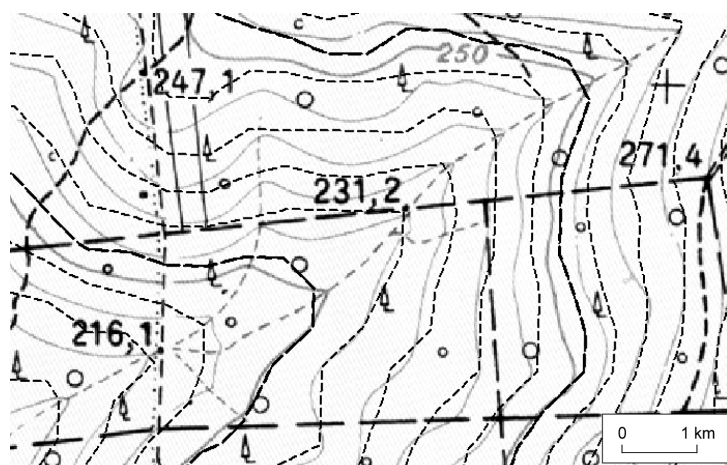
Courbes isohypses créées par interpolation à partir du MNE
(méthode : triangulation)

----- Courbes de niveaux équidistantes de 5 m

----- Renforcement des courbes équidistantes de 25 m

Carte V.2 : Exemple comparatif entre la carte topographique [IGN, 1/25 000, n°2812 O] et la BD Alti® [IGN] : au nord-ouest de Mailly

Les courbes de niveaux de la carte topographique apparaissent en gris clair.



Courbes isohypses créées par interpolation à partir du MNE
(méthode : triangulation)

----- Courbes de niveaux équidistantes de 5 m

----- Renforcement des courbes équidistantes de 25 m

Carte V.3 : Exemple comparatif entre la carte topographique [IGN, 1/25 000, n°2812 O] et la BD Alti® [IGN] : au sud de Mailly

Les courbes de niveaux de la carte topographique apparaissent en gris clair.

Outre cette analyse visuelle, nous avons réalisé une analyse statistique descriptive des données d'altitude¹⁴⁴, à travers le calcul des fréquences altitudinales du MNE (Figure V.4). Il apparaît une récurrence pour certaines valeurs : l'information est discrète et comporte 235 modalités d'altitude. Malgré un arrondi à trois ou quatre chiffres après la virgule, l'information altitudinale discrète donne une répartition en *plages* d'altitude, comme l'illustre la Figure V.5. Quatre modalités sont particulièrement fréquentes : 89.6063, 102.362, 140.63 et 144.882 m. L'étude détaillée de la localisation de ces modes ne nous a pas permis de comprendre la raison de ces récurrences. Toutefois, M.F. Hutchinson et J.C. Gallant [1999] indiquent que les MNE construits à partir de la digitalisation des courbes de niveau, comme c'est le cas en partie pour la BD Alti®, présentent des fréquences élevées pour les certaines altitudes (biais de construction). Peut-être est-ce l'explication ici ? En outre, le différentiel altitudinal des plages observées est toujours le même : autour de 1.4 m (ou le double : 2.8 m). Ces observations semblent liées à la construction même du MNE et peuvent avoir une incidence sur les calculs dérivés de ce MNE (pentes, etc.).

Plusieurs auteurs signalent également la génération, lors de la construction d'un MNE, de « creux » et de « bosses » [Hutchinson et Gallant, 1999]. Ils proposent alors de calculer l'écart entre la valeur d'un point et celle des huit voisins (moyenne). Il ressort de cette étude que la valeur absolue de la différence est en moyenne de 0.6 m¹⁴⁵ et ne dépasse jamais 13.3 m. En conclusion, aucun creux ni bosse n'est présent dans notre MNE.

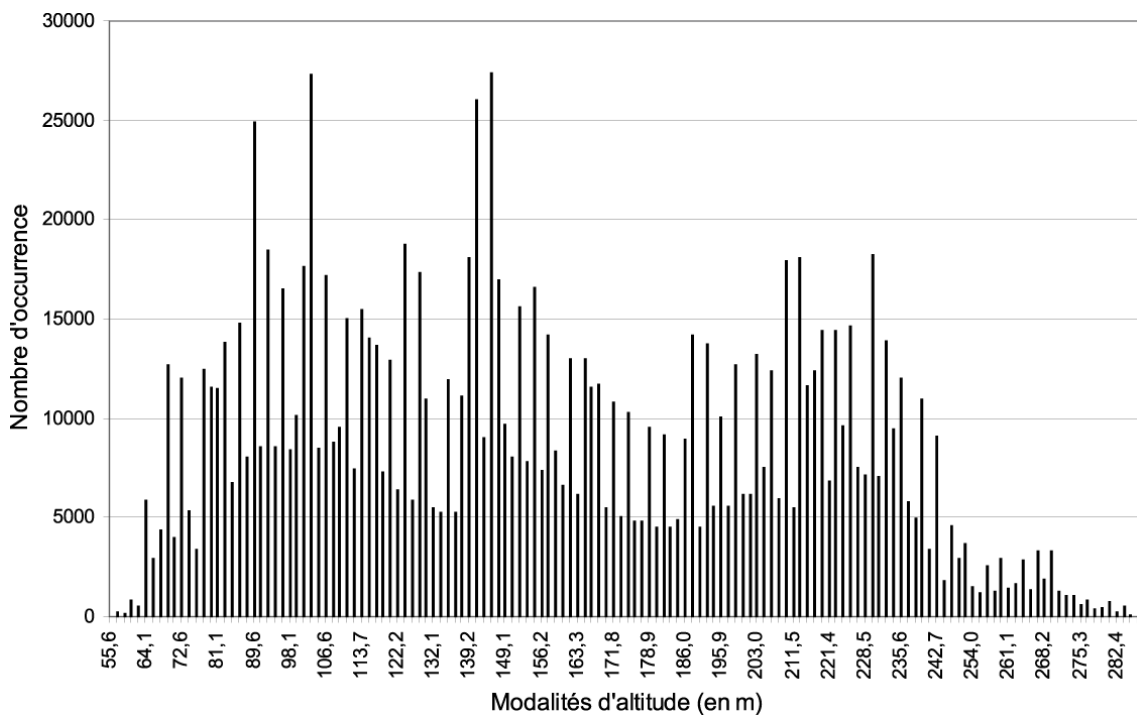


Figure V.4 : Fréquences des modalités altitudinales du Modèle Numérique d'Élévation

Données : BD Alti®, IGN

144. Cette analyse statistique descriptive n'a pas été faite sur l'ensemble des fichiers du MNE, mais seulement sur les altitudes de la sélection présentée ultérieurement (vignoble marnais ; X [697 425 ; 735 975] et Y [2 425 325 ; 2 482 525]). Une analyse fréquentielle similaire peut être réalisée sur les azimuts.

145. Cette faible valeur est liée, en partie, à la discrétisation des données altitudinales du MNE (Figure V.5) et au relief peu accentué de la zone d'étude : 8% des points ont des altitudes égales à celles de leurs voisins.

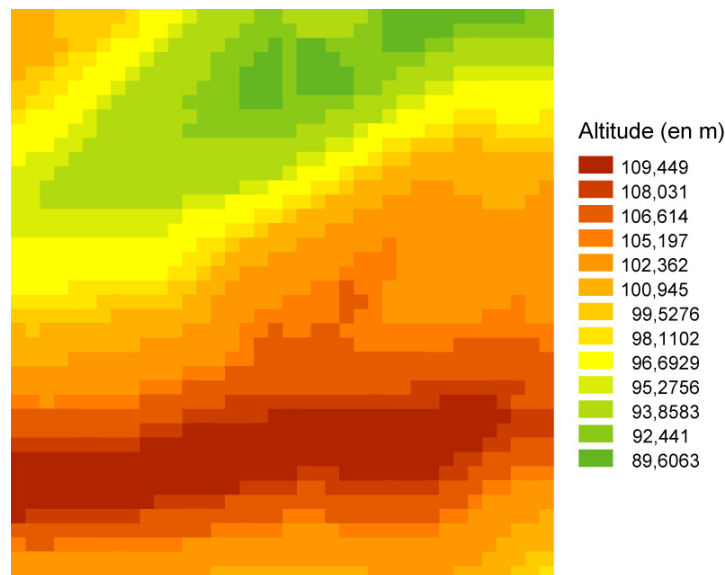


Figure V.5 : Représentation¹⁴⁶ des données altitudinales discrètes sur une zone de 1 km²

Données : BD Alti®, IGN

V.2 - Données d'occupation du sol

La BD Carto® de l'IGN est une vaste base de données géographiques vectorielles. Structurée en plusieurs thèmes (réseau routier et franchissements, réseau ferré, hydrographie, unités administratives, habillage, toponymes, équipements)¹⁴⁷, elle constitue 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 1/100 000 » [CERTU, IGN, 1998].

Sa construction repose sur plusieurs types de documents : cartes au 1/50 000 de l'IGN (vectorisation des objets linéaires) et images satellitaires de SPOT (photo-interprétation pour les éléments en implantation zonale). La précision géométrique, après digitalisation des objets, est estimée, selon les thèmes, entre 15 et 50 m en erreur moyenne quadratique [CERTU, IGN, 1998]. Chaque élément du terrain, assez important par sa taille et/ou sa fonction, est décrit par :

- des informations *sémantiques* (nature et caractéristiques) ;
- et des informations *géométriques* (forme et localisation)¹⁴⁸.

Le thème Occupation du sol de la BD Carto®

Dans ce travail de recherche, le seul thème de la BD Carto® (IGN, 1992) qui nous intéresse est celui de l'occupation du sol. Il nous permet de délimiter les zones viticoles et de définir l'environnement des stations (environnement influant sur les températures observées).

Ce thème, *Occupation du sol*, en format vectoriel, est un découpage de l'espace en zones connexes, chacune définie par une *nature* d'occupation du sol homogène, selon 13 classes

146. Pour illustrer la discrétisation, le MNE (implantation ponctuelle) a été représenté sous forme *raster* (information spatiale continue).

147. Les données par thèmes, qui peuvent être vendus séparément, regroupent des objets « partageant une même fonctionnalité sur le terrain ou dans la base » [CERTU, IGN, 1998].

148. La projection de l'information géométrique de la BD Carto® est en Lambert II étendu [CERTU, IGN, 1998].

(Tableau V.1) [IGN, 1996]. Les tailles minimales de sélection d'une zone lors de la construction varient selon le type d'occupation du sol : par exemple, 2 ha pour le bâti et les équipements et 4 ha pour les autres catégories (sauf les glaciers et la classe *Autre*) [CERTU, 1997].

La BD Carto® acquise par le CIVC auprès de l'IGN est la première version de cette base de données (IGN, 1992). Depuis, la définition des occupations du sol a été améliorée dans une deuxième version, notamment en se rapprochant de la typologie de CORINE Land Cover¹⁴⁹ [CERTU, 1997]. Par la suite et par souci de simplicité, nous utiliserons des libellés plus restreints (Tableau V.1).

Tableau V.1 : Libellés des types d'occupation du sol de la BD Carto®

Code	Libellé retenu	Libellé exact [CERTU, IGN, 1998]
1	Espace bâti	Espace bâti : cela comprend sans distinction l'enveloppe des espaces bâtis qu'ils soient à prédominance d'habitat ou à prédominance d'activité
2	Infrastructures de communication	Grands équipements d'infrastructure de communication : emprise des équipements liés aux aéroports (gares routières et ferroviaires, zones de triage, péages et échangeurs, parkings, aéroports et aérodromes)
3	Vignes	Vignes
4	Vergers	Vergers
5	Formations boisées	Formations boisées : le couvert des arbres appartenant à des espèces forestières est supérieur au couvert de formations de buissons
6	Broussailles	Broussailles : formation végétale de buisson ou broussaille
7	Surfaces minérales à nu	Surfaces minérales à nu : roches, pierres, plages, dunes, carrières, galets non couverts de végétation et hors d'entrant et du lit des cours d'eau ou plan d'eau
8	Autre (grandes cultures, etc.)	Autre ou prairie, pelouse, toute culture autre que vignes et vergers
9	[aucun libellé] ¹⁵⁰	Névés et glaciers
10	Eau douce	Eau douce permanente
11	Eau douce non permanente	Eau douce non permanente
12	[aucun libellé]	Eau salée permanente
13	[aucun libellé]	Eau salée non permanente

Critique des données d'occupation du sol

La base de données *Occupation du sol* est une « image du terrain réel vu à travers les spécifications de la BD Carto® à une date donnée » [CERTU, IGN, 1998]. Aussi y a-t-il un écart entre la réalité et les données. Il nous a été difficile de proposer une analyse critique pertinente de cette base de données : d'abord parce qu'elle dépend fortement de la date de sa construction (ici 1992 ; les délimitations des occupations ont pu varier), ensuite parce que peu de méthodes ont été jusqu'alors proposées pour vérifier la qualité de ces informations.

149. Le programme européen CORINE (CoORDination of INformation on the Environment), dans une optique d'harmonisation de la cartographie de l'occupation du sol, propose une base de donnée environnementale CORINE Land Cover construite par l'Agence Européenne pour l'Environnement [1996] : issue d'images satellitaires, elle dispose d'une nomenclature hiérarchisée et emboîtée (5 grandes classes d'occupation du sol se subdivisant en 15, puis en 44). Cf. le site Internet de l'IFEN (www.ifen.fr).

150. Aucun libellé n'a été attribué aux occupations du sol non présentes dans la base de données acquise.

À la lecture des données, nous avons constaté que la superficie de la classe « Vignoble » (34 784 ha) ne correspondait pas exactement à celle mentionnée dans la littérature (environ 31 000 ha). Cet écart peut s'expliquer par la définition de ce qu'est un vignoble (surfaces viticoles observées ou aire AOC *Champagne*). De plus, la base de données acquise comprend une petite zone de 21 ha caractérisée par un code d'occupation du sol « 0 ». D'après la carte au 1/25 000 (IGN 28130), il s'agit d'une enclave de culture (ou prairie ou pelouse), le *Marais de Champagne*, dans les Marais de la Somme Soude¹⁵¹ entre Jalons, Aulnay-sur-Marne, Champigneul-Champagne et Pocancy.

Cependant, de manière générale, les nombreuses confrontations visuelles entre les données numérisées de l'occupation du sol et les cartes topographiques n'ont pas révélé d'erreurs flagrantes. Enfin, signalons que les observations de terrain se sont appuyées sur des cartes d'occupation du sol issues de la BD Carto® (IGN, 1992) et, à ces occasions, aucune aberration n'a été constatée à nouveau. Bien sûr, il ne s'agit pas ici d'une étude systématique.

Une autre possibilité pour évaluer la qualité de cette base de données consiste à la comparer à une autre. Ainsi, le CERTU¹⁵² a étudié la cohérence entre CORINE Land Cover (1996) et la BD Carto® (1992) [CERTU, 1997] :

« Ces deux couches sont a priori complémentaires : CORINE Land Cover est riche au niveau thématique, avec 44 classes orientées environnement, mais ne représente que des zones de plus de 25 ha ; la BD Carto est plus pauvre en thématique (13 classes), mais prend en compte des zones plus petites. Cependant, cette complémentarité théorique suppose que les deux bases soient calées géographiquement, qu'elles respectent bien leur spécification et que les nomenclatures soient cohérentes entre elles. » [CERTU, 1997]

À partir de tests réalisés sur 26 feuilles au 1/50 000, les auteurs signalent que le décalage géographique peut parfois être important (supérieur à 100 m)¹⁵³, ce qui conduit à des problèmes d'utilisation conjointe. Par ailleurs, ils évoquent des décalages temporels, sémantiques, la résolution spatiale différente pour les deux bases ou encore des erreurs humaines [CERTU, 1997]. Le test réalisé sur la Champagne agricole (test 10.3, Montmor-Lucy) témoigne d'un décalage géographique de 70 m, qualifié de *correct* par les auteurs.

En adoptant une démarche similaire pour notre domaine d'étude, nous avons cherché à comparer les deux bases en ne retenant que l'occupation du sol *vigne*¹⁵⁴. La Figure V.6 montre le résultat autour d'Épernay (au centre de la première figure) : un décalage géographique apparaît très nettement et correspond approximativement aux observations faites par le CERTU [1997]. Excepté ce décalage, les zones ne se recouvrent pas systématiquement (par exemple à l'ouest de la zone 10x10 km)¹⁵⁵. Ce dernier cas peut relever d'un décalage temporel entre les images satellitaires utilisées (évolution possible dans l'occupation des sols), d'une nuance de définition de l'occupation *vigne* (limites AOC,

151. Ces marais sont classés comme une *Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique* par le ministère de l'Ecologie et du Développement Durable [<http://www.champagne-ardenne.environnement.gouv.fr>].

152. Centre d'Etudes sur les Réseaux de Transport et l'Urbanisme.

153. Ce décalage peut être lié à la construction même des deux bases de données : pour CORINE Land Cover, interprétation et délimitation sur un calque puis digitalisation de ce calque ; pour la BD Carto, digitalisation directement [CERTU, 1997].

154. BD Carto : classe 3 ; CORINE Land Cover : 221 soit « Vignobles : surfaces plantées de vigne ». *A priori*, aucun problème de correspondance des définitions entre ces deux bases.

155. Pour le test 10.3 sur une partie de la Champagne, le CERTU [1997] estime une correspondance spatiale des surfaces viticoles entre les deux bases à 63% (27% de superficies non communes).

surfaces occupées réellement) ou encore de l'écart entre les résolutions spatiales (25 ha pour CORINE Land Cover et 4 ha pour la BD Carto®).



Figure V.6 : Comparaison BD Carto (1992) – CORINE Land Cover (1996)

V.3 - Du choix d'une zone d'étude à la création d'une base de données environnementales

Nous avons procédé à certaines extractions des bases de données précédemment décrites afin de définir une zone d'étude en adéquation avec la localisation des stations météorologiques retenues. Après un bref exposé de nos choix de sélection, nous décrivons les caractéristiques de notre zone d'étude relatives au relief (altitude) et à l'occupation du sol. Enfin, nous présenterons la manière dont les deux bases de données, BD Alti® et BD Carto®, ont été réunies pour faciliter les calculs et analyses ultérieurs.

Délimitation d'une zone d'étude

Acquises par le CIVC, les bases de données altitudinale et environnementale dont nous disposons ont des couvertures spatiales morcelées en quatre zones, étroitement liées à la répartition du vignoble champenois. Nous avons délimité un espace d'étude correspondant aux stations automatiques retenues (IV.1.4 - Le réseau de stations retenues, p. 82). La procédure de calcul matriciel IML¹⁵⁶ sous le logiciel Sas® utilisée, notamment, pour les calculs de pente, ne peut s'appliquer qu'à des zones rectangulaires. Nous avons donc délimité un espace d'étude correspondant à un rectangle de 38.55 km d'est en ouest et de 57.20 km du nord au sud (Carte V.4, p. 115).

Pour la base altitudinale, la procédure était simple : nous avons sélectionné les 883 940 points du MNE dont les coordonnées géographiques étaient comprises, pour les X , entre 697 425 et 735 975 et, pour les Y , entre 2 425 325 et 2 482 525. Quant à la BD Carto®, la construction d'un cadre limite a permis de découper les différents polygones (Figure V.7) : la partie du polygone située à l'extérieur du cadre délimitant notre zone d'étude n'est alors pas prise en compte.

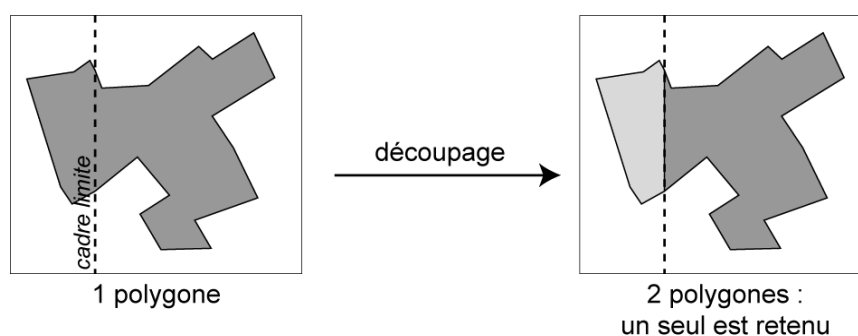


Figure V.7 : Schéma du découpage de la base d'occupation du sol

Relief et occupation du sol de la zone d'étude retenue

Nous avons cartographié l'altitude et l'occupation du sol de la zone d'étude (Carte V.4, A et B). L'altitude varie de 59.8 à 286.6 m : les vallées de la Marne et de la Vesle, dont les altitudes sont inférieures à 80 m, sont encaissées dans le plateau d'Île-de-France situé au-dessus de 220 m. Le relief est donc peu marqué. D'autres vallées secondaires interrompent également la continuité des plateaux. À l'est de la zone, nous observons la marge

156. Interactive Matrix Language.

occidentale de la plaine de la *Champagne crayeuse* avec des altitudes inférieures à 140 m. La carte de l'occupation du sol (Carte V.4B) montre une organisation spatiale assez nette selon l'altitude : de manière générale, nous retrouvons les mêmes grandes structures. Les formations boisées dominent sur les plateaux. En contrebas, le vignoble occupe les coteaux surplombant les vallées et les plaines caractérisées essentiellement par les classes d'occupation *Espace bâti* et *Autre*. Nous retrouvons le paysage « classique » décrit précédemment (cf. p. 60). La classe *Autre* (prairie, pelouse, toute culture autre que vignes et vergers) domine très largement l'espace (59.7%) ; viennent ensuite les formations boisées (25.2%). Enfin, le vignoble occupe 20 494 ha¹⁵⁷ sur notre zone d'étude (soit 9.3% de l'espace). Cela représente une part importante de la superficie totale du vignoble champenois (66.6%) et la *quasi*-totalité du vignoble marnais (94.6%) (Tableau III.1, p. 57).

Création d'un système d'information géographique environnemental au moyen d'une jointure spatiale

Pour réaliser cette étape, nous avons effectué une jointure spatiale : pour chaque point du MNE, nous avons ajouté l'attribut *Occupation du sol* du polygone dans lequel se trouve ce point (Figure V.8). Ainsi, la nouvelle base créée se compose des coordonnées géographiques (X et Y), de l'altitude (Z) et de l'occupation du sol (OS) :

X	Y	Z	OS
713 975	2 480 525	154.803	3
713 975	2 480 575	161.89	3
713 975	2 480 625	166.142	3
713 975	2 480 675	174.646	5

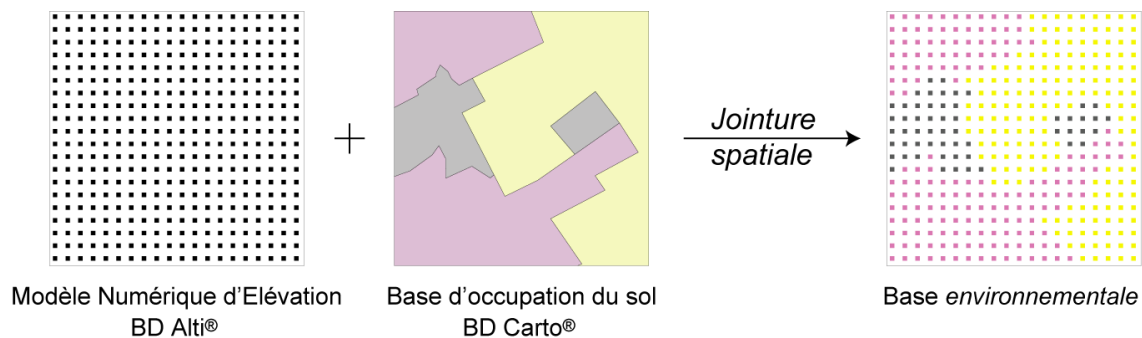
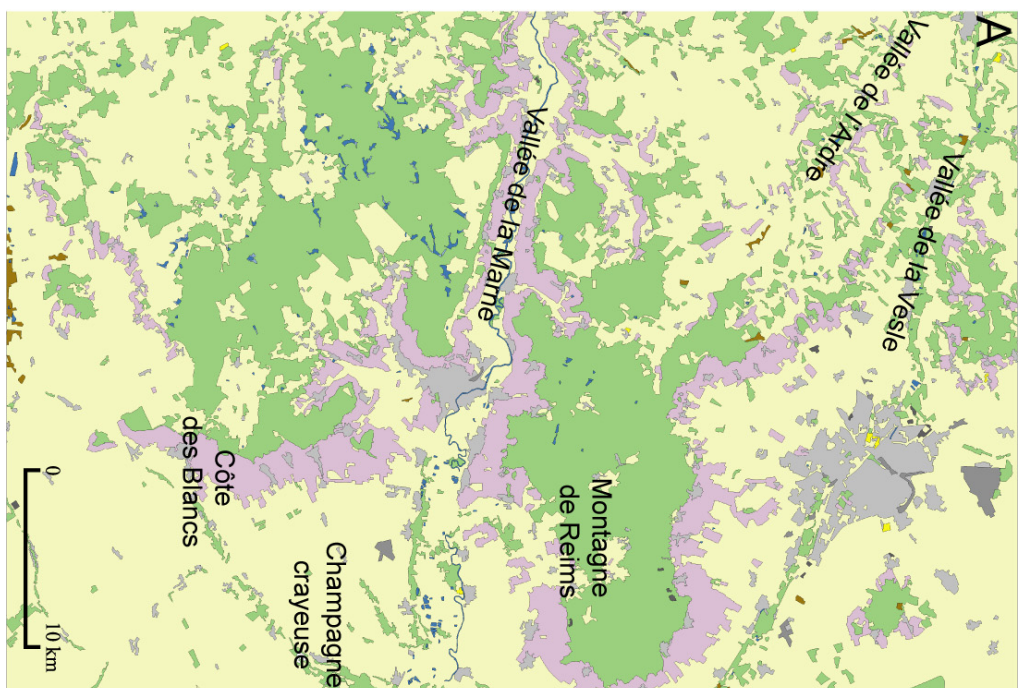


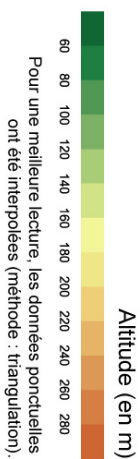
Figure V.8 : Schéma de la jointure spatiale

Cette opération conduit à une information exclusivement ponctuelle dont la résolution spatiale est celle du MNE, soit 50 m. L'information concernant l'occupation du sol est ainsi généralisée (Figure V.8), mais cette jointure spatiale est indispensable à la réalisation des calculs ultérieurs.

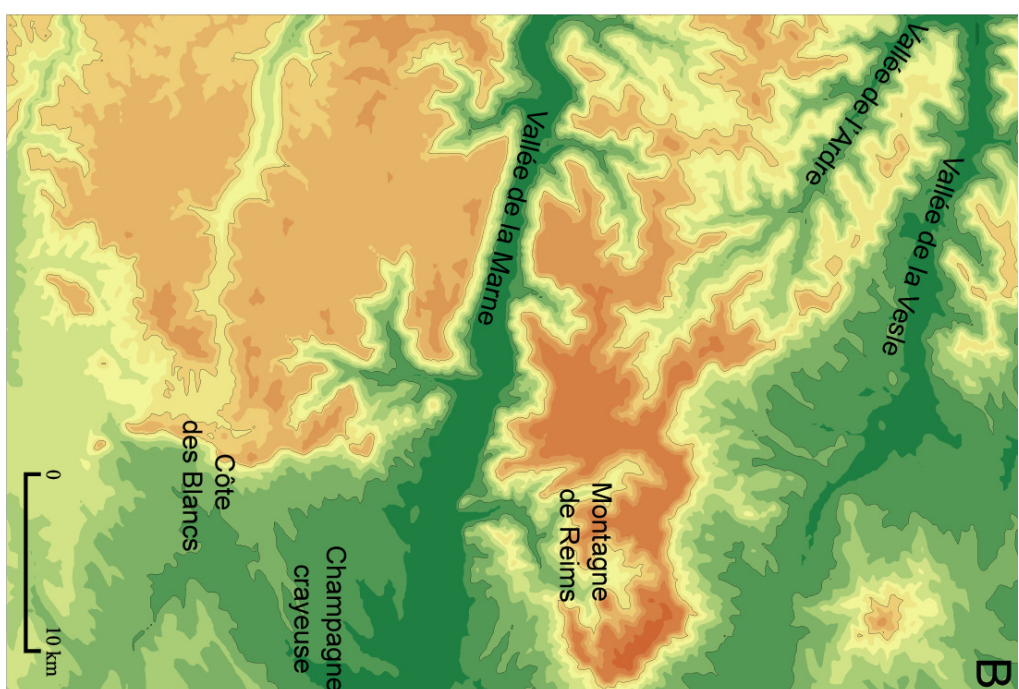
157. 100 ha <=> 1 km²



- Occupation du sol**
- Espace bâti (10 007 ha)
 - Infrastructures de communication (714 ha)
 - Vignes (20 494 ha)
 - Vergers (96 ha)
 - Formations boisées (55 614 ha)
 - Broussailles (461 ha)
 - Surfaces minérales à nu (122 ha)
 - Autre (grandes cultures, etc.) (131 737 ha)
 - Eau douce (1 102 ha)
 - Eau douce non permanente (139 ha)
 - Données manquantes (21 ha)



Carte V.4 : Occupation du sol et altitude de notre zone d'étude



Sources : BD Cartho® (IGN, 1992) ; BD Alti® (IGN)

Conclusion du chapitre V

Dans ce chapitre, nous avons présenté la base de données environnementales utilisée dans ce travail de recherche. Elle est construite à partir de la BD Alti® et la BD Carto® de l'IGN donnant une information respectivement sur l'altitude et l'occupation du sol. La qualité de ces informations a été brièvement évaluée. Ensuite, après avoir défini une zone d'étude, nous avons, en conséquence, délimité ces deux bases. Étant donnée leur non-correspondance, nous avons choisi de les associer par une jointure spatiale.

Chapitre VI - L'APPROCHE METHODOLOGIQUE

Dans les deux chapitres précédents, nous avons décrit les bases de données utilisées dans ce travail de recherche, bases qui ont bénéficié de la numérisation croissante de l'information, notamment à caractère géographique. Compte tenu de leur volume important, il a été nécessaire de définir une stratégie permettant de les exploiter au mieux afin de répondre à notre problématique. Précisons que ce chapitre n'a pas vocation à décrire chacune des méthodes mises en œuvre¹⁵⁸, mais cherche plutôt à présenter la démarche méthodologique générale qui sous-tend ce travail.

VI.1 - Une approche statistique

Les méthodes statistiques occupent une place fondamentale dans ce travail de recherche. En effet, elles constituent une palette d'outils essentiels pour résumer le grand nombre de données à traiter, pour identifier d'éventuelles structures ou récurrences dans le temps et dans l'espace, en somme pour dégager l'information contenue dans les bases de données, souvent difficilement accessible à partir de l'observation des tableaux de chiffres initiaux. Ainsi, en reprenant la définition de E. Vigneron [1997] :

« La statistique est 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. » [Vigneron, 1997]

Outre leur apport dans l'étude de la variabilité d'un phénomène, les méthodes statistiques permettent également de tester des hypothèses sur les relations entre deux phénomènes. Ainsi, dans ce travail, nous serons amenés à tester l'existence d'un lien entre les températures minimales et différents facteurs topographiques (Chapitre XIV - Prise en compte des facteurs locaux, p. 237).

En somme, les méthodes statistiques permettent de répondre à certaines questions et sont habituellement regroupées en différentes catégories selon leurs objectifs. Ainsi, on parlera de statistiques *descriptives* lorsqu'on cherche à résumer l'information, de statistiques *explicatives* quand on s'attache à *expliquer* un phénomène par un autre ou encore de statistiques *inférentielles* lorsqu'on essaye de déterminer les caractéristiques d'un ensemble à partir d'un échantillon. Une autre classification, reposant sur le nombre de variables (phénomènes) prises en compte, s'avère plus pertinente dans le cadre de ce travail : les statistiques *univariée*, *bivariée* et *multivariée*. Dans chacune de ces catégories, les outils

158. La description détaillée des méthodes sera développée ultérieurement, sous forme d'encadré, au fur et à mesure de leur mise en œuvre.

varient selon la nature des variables¹⁵⁹ qui décrivent des individus statistiques. Ici, il s'agira alternativement des stations météorologiques et des jours, voire des heures.

VI.1.1 - Statistiques univariées

Les statistiques univariées sont utilisées pour décrire les phénomènes un par un. Dans cette approche descriptive, il s'agit alors de résumer l'information contenue dans chaque variable au moyen des paramètres de position (moyenne¹⁶⁰, médiane, mode) et de dispersion (étendue, écart-type, etc.). Les statistiques univariées permettent également de caractériser la forme de la *distribution statistique* du phénomène.

Ces méthodes seront largement utilisées dans la troisième partie pour décrire les variabilités temporelle et spatiale des températures minimales. Par exemple, nous discuterons de la distribution statistique des moyennes des températures minimales des postes météorologiques (Figure VII.8, p. 141). Pour les températures et la vitesse du vent, ces paramètres de position et de dispersion, ainsi que l'étude des distributions statistiques, pourront être évalués sur les données *brutes*. Par contre, les données de direction du vent, compte tenu de leur caractère angulaire, nécessiteront des calculs plus spécifiques, telle la résultante vectorielle (Encadré VIII.1 : Comment résumer le vent ?, p. 154).

VI.1.2 - Statistiques bivariées

Les statistiques bivariées permettent de rechercher l'existence d'une *relation* entre deux variables, en étudiant la variation d'un phénomène en fonction de l'autre. Selon la nature des variables, les méthodes adaptées ne seront pas les mêmes :

- le test du χ^2 (Annexe E.5) pour deux variables qualitatives, par exemple pour tester la correspondance entre les classes de vent à Reims-Courcy et celles d'une autre station ;
- le coefficient de Bravais Pearson¹⁶¹ pour deux variables quantitatives, comme le refroidissement et la vitesse du vent ;
- l'analyse de la variance (Annexe E.2) pour rendre compte de la relation entre une variable quantitative et une variable qualitative, par exemple pour déterminer si les températures minimales dépendent de la position sur le coteau des stations, selon une dichotomie bas de coteau / mi-coteau.

Toutes ces méthodes reposent sur une démarche hypothético-déductive. Rappelons que la mise en évidence d'une relation ne signifie pas l'identification d'une cause et de son effet. Elle signale simplement une co-variation, qu'il reste à interpréter.

159. Variables quantitatives ou qualitatives, discrètes ou continues, mesurables ou repérables, de taux ou de stock (cf. l'ouvrage du groupe CHADULE [1997]).

160. La moyenne se prête bien aux températures : leurs distributions sont très souvent proches d'une loi normale (les moyennes sur 30 ans sont précisément appelées des *normales*). Il est alors possible d'associer des probabilités sur des intervalles construits à partir de la moyenne et de l'écart-type.

161. Alors une hypothèse très importante est prise, celle d'une relation linéaire.

VI.1.3 - Statistiques multivariées

Les statistiques multivariées rassemblent plusieurs méthodes qui permettent de traiter simultanément un ensemble de variables. Elles sont destinées à synthétiser et à hiérarchiser l'information initiale contenue dans les données, en mettant à jour des structures qui n'étaient pas immédiatement décelables à la lecture du tableau. Il est courant de distinguer les méthodes *descriptives* et les méthodes *explicatives*. Les premières, souvent appelées *analyse des données*, regroupent les analyses factorielles¹⁶² et les méthodes de classification. Par exemple, la Classification Ascendance Hiérarchique (Annexe E.4) sera utilisée dans cette thèse afin de réaliser une typologie des stations selon leurs ressemblances et leurs différences vis-à-vis des températures minimales. La cartographie des résultats permettra alors de proposer un *zonage climatique*¹⁶³.

Les secondes méthodes, dites *explicatives*, sont utilisées pour étudier les relations entre une variable donnée et un ensemble d'autres phénomènes. Ainsi, nous mettrons en relation la variation spatiale des températures minimales avec plusieurs variables relatives, en particulier, à la topographie autour des stations. Il s'agira donc, au moyen d'une régression multiple (Encadré XII.2, p. 216), de construire un *modèle* de répartition des températures minimales. Ce dernier point témoigne de la place centrale de la modélisation dans ce travail de thèse.

VI.2 - La modélisation au cœur de l'estimation de l'aléa gélif

Nous reprendrons la définition classique de F. Durand-Dastès [1992] : « le modèle est une représentation simplifiée de la réalité en vue de la comprendre et de la faire comprendre ». Pour les phénomènes atmosphériques, il est courant de distinguer deux types de modélisation :

- les modélisations *physiques* faisant appel aux lois physiques (mécanique, thermodynamique) ;
- les modélisations *statistiques* reposant sur une approche empirique et basées, très souvent, sur des relations entre une variable climatique et les autres composantes environnementales.

Dans ce travail de thèse, nous aurons recours à ces deux types de modélisation, avec pour objectif commun l'amélioration de l'estimation de l'aléa gélif.

VI.2.1 - L'adaptation statistique

Le système de prévision des gelées printanières dans le vignoble marnais (p. 70) utilise un modèle statistique basé sur des écarts thermiques moyens, appelé *l'adaptation statistique*. Ce modèle empirique permet d'estimer un minimum actinothermique pour quatre stations

162. Classiquement, on préférera une Analyse en Composantes Principales pour un tableau de mesure (avec très souvent la distance euclidienne ; Annexe E.3), alors que l'Analyse Factorielle des Correspondances est utilisée pour un tableau de contingence (distance du χ^2).

163. Découpage géographique d'un espace à partir d'un comportement jugé sensiblement homogène vis-à-vis d'une variable climatique.

du vignoble marnais à partir de la température minimale à Reims-Courcy et des conditions atmosphériques. Nous reprendrons cette méthode en l'appliquant à un plus grand nombre de stations (19), afin d'affiner l'estimation d'un aléa gélif.

VI.2.2 - Le modèle de régression multiple

L'adaptation statistique fournit une information ponctuelle, c'est-à-dire au niveau des stations météorologiques. Or cette recherche se veut plus ambitieuse. Dans la mesure où l'aléa gélif peut *a priori* toucher n'importe quelle zone du vignoble marnais, notre travail vise à une spatialisation de l'estimation, c'est-à-dire au passage d'une description discrète à une description la plus continue possible. Il est alors nécessaire de construire un modèle de la répartition spatiale des températures minimales, ici réalisé à partir de la méthode de la régression multiple (Encadré XII.2, p. 216).

En identifiant les composantes de la variation du phénomène des températures minimales, nous chercherons à exprimer pourquoi le froid est plus intense à un endroit plutôt qu'à un autre. En d'autres termes, quels sont les facteurs géographiques, environnementaux et topographiques influençant, de manière significative, la distribution spatiale observée ? En nous inspirant des résultats issus de l'étude des variabilités spatiale et temporelle des températures minimales (Troisième partie) et de la littérature sur le domaine, nous proposerons plusieurs descripteurs potentiels. Dans une démarche hypothético-déductive, il s'agira alors de quantifier leur rôle en testant et en mesurant les effets respectifs de chaque facteur sur les températures minimales, toutes choses étant égales par ailleurs. Au final, nous obtiendrons une équation de régression dans laquelle les températures minimales seront la variable à *expliquer*, tandis que les facteurs intervenant significativement feront figure de variables explicatives. L'équation de la régression multiple proposera ainsi une description du réel à partir d'un modèle *mathématique*. Notons ici que la validité de ce modèle repose sur l'hypothèse forte de relations linéaires entre les facteurs.

Une fois le modèle construit et validé, nous le généraliserons à l'ensemble de la zone d'étude, afin d'estimer une température minimale là où l'information thermique manque. Nous nommerons *spatialisation* cette étape. Théoriquement, on aimerait estimer une température pour tout point de l'espace. En pratique, la résolution du modèle dépend de celle des bases de données, ici de 50 m. Il pourra nous arriver d'utiliser l'expression « en tout point de l'espace », très commode et séduisante. Il s'agit en réalité de « tout point de la grille du MNE ».

L'explication apportée par le modèle de la régression multiple, centré sur les facteurs géographiques et environnementaux, restera partielle. D'autres facteurs, tels que le vent, influant sur la variabilité spatiale des températures minimales seront appréhendés par l'utilisation du modèle *physique* Meso NH.

VI.2.3 - Le modèle numérique Meso NH

Les modèles dits *physiques* permettent d'appréhender la complexité du réel, difficilement prise en compte par les modèles précédents. Toutefois, ils demandent un investissement logistique et informatique considérable. Alors que le reste de notre travail est fondé sur

L'analyse des 468 dates, sur six printemps successifs, nous serons amenés à utiliser le modèle MesoNH pour simuler, pour une seule date donnée, le comportement de l'atmosphère à *méso-échelle*, dans le but d'affiner la modélisation antérieure. À cette échelle, la difficulté est alors de reproduire aussi fidèlement que possible le comportement de l'atmosphère au voisinage immédiat du sol en tenant compte des caractéristiques de la surface (topographie, occupation du sol...). Même si les équations de ce modèle qui repose sur des principes physiques complexes sont délicates à appréhender pour un non spécialiste, sa contribution est essentielle dans l'interprétation et la validation des sorties.

VI.3 - Les dimensions temporelles et spatiales de l'information

Les principales valeurs étudiées dans cette recherche sont fournies par les stations météorologiques. Toutes ces valeurs sont donc caractérisées par deux éléments essentiels : la localisation dans l'espace de la station et le moment de l'enregistrement. Les phénomènes étudiés s'inscrivent alors dans deux dimensions, le temps et l'espace, ce qui a suscité plusieurs réflexions, développées ici brièvement.

VI.3.1 - La question du temps

Dans ce travail de recherche, la prise en compte de la dimension temporelle de l'information est complexe. Même si cette dimension est souvent réduite par commodité et nécessité, il reste néanmoins très intéressant de jouer sur ses différentes échelles, horaires, journalières, printanières (Figure VI.1). La dimension temporelle sera notamment au cœur de l'analyse des variabilités temporelles des températures minimales dans la troisième partie.

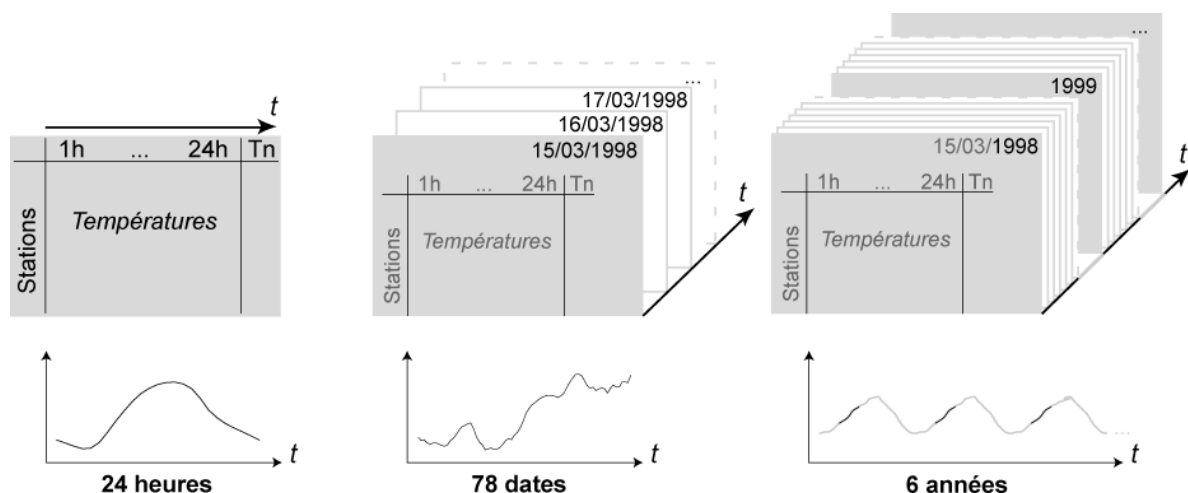


Figure VI.1 : La variation des échelles temporelles

Le calcul d'une moyenne thermique, qu'elle soit effectuée sur l'ensemble des printemps ou sur une sélection de nuits de ciel clair et de vent calme (Encadré VII.1, p. 148), réduit la dimension temporelle à une seule valeur. En toute rigueur, les méthodes statistiques s'appliquent uniquement à des données stationnaires dans le temps (variance et moyenne

constantes). Ce postulat ne peut pourtant pas être respecté, les températures minimales augmentant au cours des printemps. Cela étant, cette *réduction* temporelle apparaît commode pour décrire les phénomènes.

La prise en compte de la dimension temporelle est également altérée lors de l'utilisation des températures minimales journalières. En effet, celles-ci ne se produisent pas forcément au même moment, même s'il s'agit très souvent de la fin de la nuit. Cela étant, ces données apportent une information sur le minimum *absolu*, ce que ne peuvent exprimer les températures horaires¹⁶⁴. Il ne faudra pas oublier cette réduction de la dimension temporelle lors de la lecture de nos résultats. Par exemple, les cartes du champ thermique des températures minimales pour deux dates (proposées en fin de quatrième partie) sont une image abstraite et non une photographie à un temps donné.

VI.3.2 - L'intégration de l'espace

Dans l'analyse des variabilités spatiale et temporelle des températures minimales et des écoulements de l'air (troisième partie), la dimension spatiale sera intégrée *a posteriori* par la cartographie des résultats et non dans les analyses en tant que telles. L'espace est alors considéré comme un *espace-support*. Les représentations cartographiques apporteront cependant des éléments d'interprétation essentiels de la répartition spatiale d'un phénomène. Par exemple, la carte des températures minimales permettra de mettre en évidence ou non l'existence de gradients est-ouest ou nord-sud (composante thermique méridienne ou zonale). En outre, la superposition d'une information sur cet espace-support pourra s'avérer très utile à l'interprétation : les roses des vents seront ainsi interprétées à l'aide de la représentation du relief, compte tenu des liens entre les écoulements de l'air et le relief.

Cette intégration de l'espace *a posteriori* contribuera donc à identifier d'éventuelles *structures spatiales*, par exemple dans la répartition des températures minimales à l'échelle du vignoble marnais. Il s'agira alors de vérifier des hypothèses sur les facteurs explicatifs par le biais de méthodes statistiques classiques (corrélation linéaire, surface de tendance) en intégrant les coordonnées géographiques (*X* et *Y*) comme variables explicatives¹⁶⁵. Ces coordonnées pourront alors constituer des facteurs de la répartition des températures minimales. Enfin, les structures spatiales seront également étudiées à partir de méthodes plus complexes intégrant explicitement l'espace (analyse variographique).

Signalons pour finir que l'espace étudié est considéré, très souvent, dans deux dimensions, la dimension verticale n'étant réellement prise en compte que par les simulations Meso NH (Chapitre XVI).

164. En somme, la situation finale du minimum est privilégiée, et non le processus s'inscrivant dans le temps. C'est en revanche le contraire avec les sorties à échéances horaires du modèle Meso NH (Chapitre XVI). Ainsi, nous montrerons la mise en place des brises de pente au cours d'une nuit.

165. L'espace sera également introduit par la distance à certains types d'occupation du sol.

VI.4 - L'apport ambigu des Systèmes d'Information Géographique

Dans cette section, nous discuterons de l'apport des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans notre travail de recherche¹⁶⁶.

R. Laurini et F. Milleret-Raffort [1993] définissent les SIG comme des systèmes « de gestion de base de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage des données localisées ». Les auteurs ajoutent que les quatre groupes de fonctionnalités de ces SIG sont :

- l'*acquisition* des données géographiques d'origines diverses ;
- la *gestion* pour le stockage et la recherche de données ;
- l'*analyse spatiale* pour le traitement ;
- l'exploitation et enfin la *présentation* des résultats sous forme cartographique.

Même s'il apparaît que ces fonctionnalités répondent *a priori* très bien à notre problématique et aux caractéristiques des bases de données utilisées, qu'en est-il vraiment en pratique ? La Figure VI.2 résume la place des logiciels SIG dans notre démarche méthodologique.

Dans le cadre de ce travail, l'apport des logiciels de SIG a été décisif dans l'intégration des données (Figure VI.2) : les bases de données d'occupation du sol (BD Carto) et altitudinales (BD Alti), l'une assimilable à du *raster* et l'autre vectorielle, ont été jointes en privilégiant la démarche *raster*. À chaque point du MNT est attribuée l'occupation du sol lui correspondant. Cette jointure spatiale a pu être aisément mise en œuvre par le logiciel de SIG MapInfo®.

Il est communément admis que les étapes de visualisation, d'analyse et de modélisation sont grandement facilitées par la pratique des logiciels SIG. Par exemple, il y est très souvent possible de calculer, directement ou en ajoutant des modules, des grandeurs dérivées de l'altitude (comme la pente), de délimiter les bassins versants, etc. Cependant, nous pouvons regretter qu'il s'agisse souvent de « boîte noire » et qu'il soit difficile de paramétrer ces calculs (par exemple de calculer selon plusieurs fenêtres spatiales). Nous avons donc préféré développer nous-mêmes des programmes sous le logiciel de gestion de données et de statistique SAS® pour pouvoir notamment prendre en compte différentes fenêtres spatiales relatives à plusieurs échelons d'analyse.

166. Cette section a bénéficié de nombreux échanges avec E. Dumas (ingénieure cartographe) et A. Ribardière (doctorante en géographie).

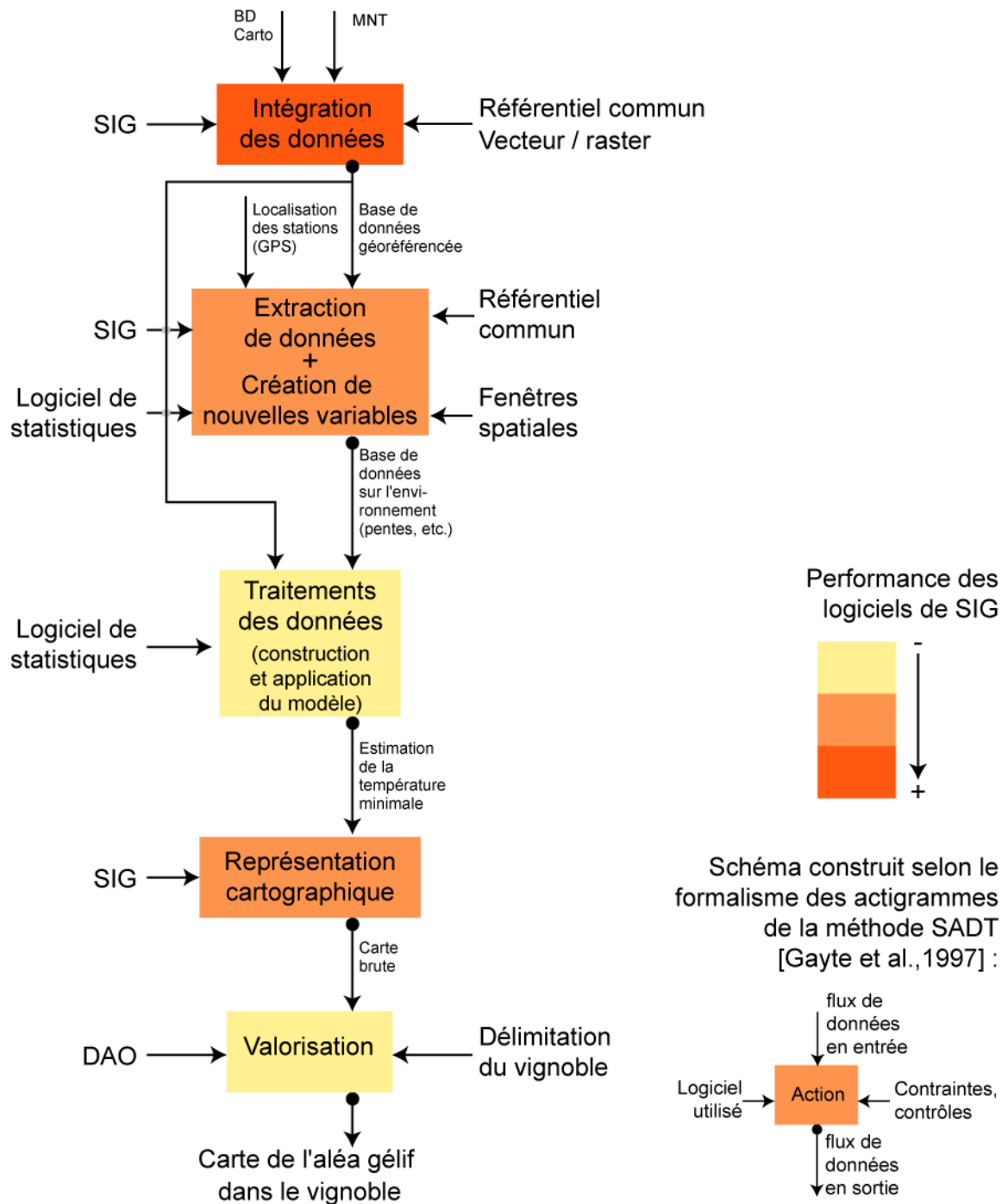


Figure VI.2 : Schéma illustrant la place des logiciels Sig dans notre chaîne méthodologique

SIG : Système d'Information Géographique ; DAO : Dessin Assisté par Ordinateur ; GPS : Global Positioning System

Paradoxalement, alors que la réponse à notre problématique nous a conduit à construire un système d'information géographique, les logiciels SIG, en eux-mêmes, ont été peu utilisés. Par contre, notre démarche s'inspire très fortement de l'approche *multicouche* des systèmes d'information géographique, à savoir traiter un ensemble d'objets géographiques et les relations qu'ils entretiennent les uns avec les autres. Ainsi, en combinant les températures minimales des stations, la topographie, la délimitation du vignoble, etc. (Figure VI.3), nous pourrions proposer une carte des zones potentiellement gélives sous certaines conditions atmosphériques, ce qui est une des finalités de notre travail.

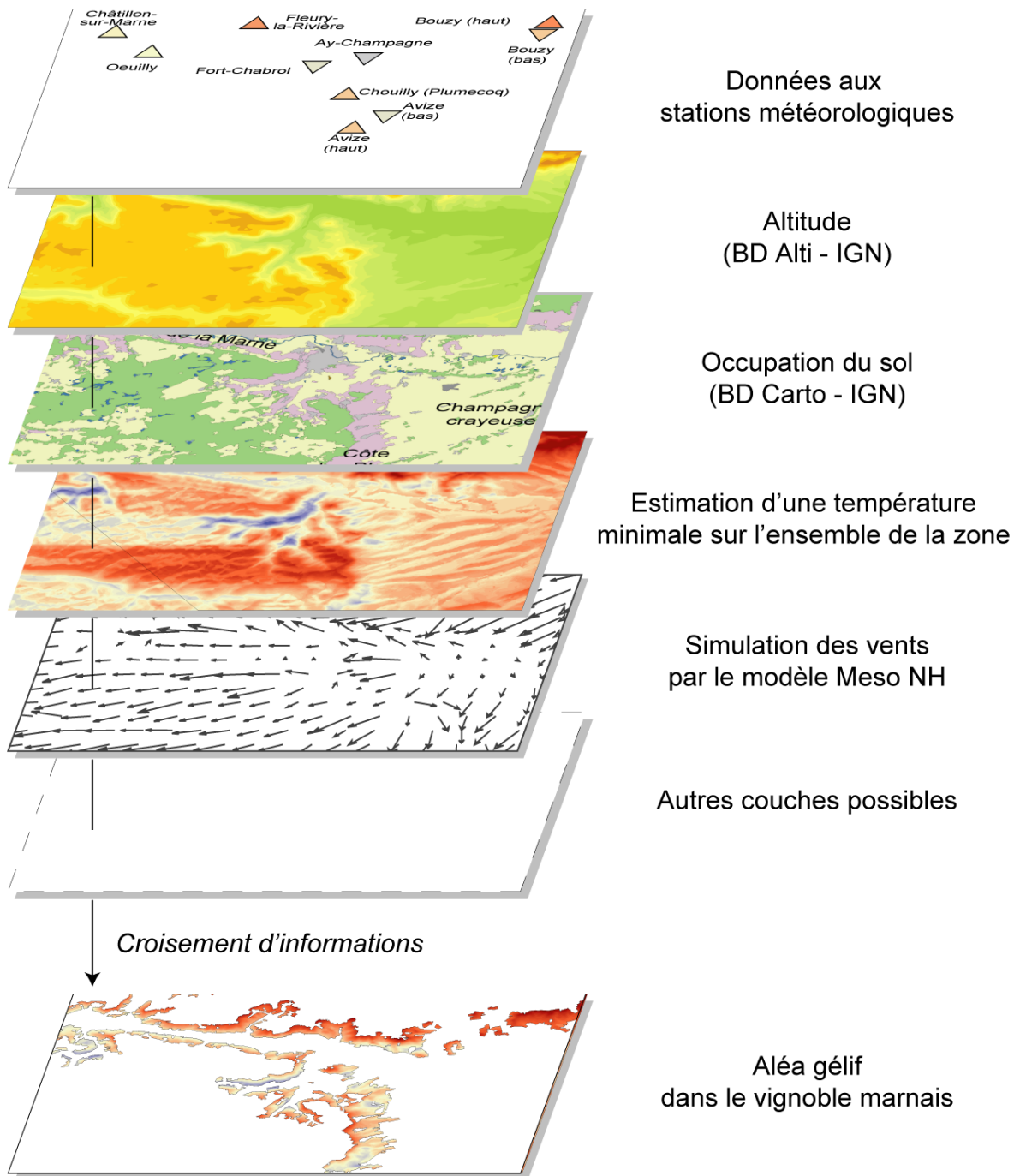


Figure VI.3: Les différentes couches d'information possibles dans notre approche multicouche

Conclusion du chapitre VI

Dans ce chapitre, nous avons exposé succinctement l'approche méthodologique qui soutient ce travail de thèse. Nous avons ainsi souligné l'importance des méthodes statistiques, notamment pour répondre à des objectifs de modélisation de la répartition des températures minimales dans le vignoble marnais. Après une discussion sur l'intégration du temps et de l'espace dans notre approche, nous avons montré la place, somme toute réduite, des logiciels SIG même si notre démarche s'en inspire largement.

Enfin, si les outils statistiques ont pour vocation de répondre à des questionnements précis, nous avons pu vérifier au cours de ce travail à quel point les problématiques et la démarche peuvent également être influencées, en retour, par les outils, comme le souligne, très justement, J. Charre [1992] à propos de la modélisation statistique :

« Mais il arrive parfois qu'une problématique nouvelle amène à mettre au point un modèle statistique qui permet de résoudre une question spécifique. C'est un événement rare, car la préexistence de modèles incite les chercheurs à se poser des problèmes résolus d'avance (du point de vue de la modélisation). C'est pourquoi l'on peut dire que les modèles ne sont pas sans influence sur les problématiques. » [Charre, 1992]

Troisième partie

Variabilités spatiale et temporelle des températures minimales et des écoulements de l'air

Cette première partie de résultats traite des variabilités spatiale et temporelle des températures minimales et des écoulements de l'air dans le vignoble marnais, au cours du printemps.

Les deux premiers chapitres sont, avant tout, descriptifs et relèvent de la climatologie séparative. L'accent est principalement mis sur l'étude des variabilités spatiale et temporelle des températures minimales nocturnes. Une telle démarche est ensuite reproduite pour les écoulements de l'air, dans la mesure où ces derniers jouent un rôle primordial dans la répartition spatiale des températures minimales.

Dans le troisième chapitre, dont l'approche est plus synthétique et plus explicative, nous nous intéressons à l'influence des conditions atmosphériques (ici définies à partir du vent et de la nébulosité) sur les températures minimales. Nous étudions plus spécifiquement le refroidissement nocturne, la variabilité spatiale et l'inversion thermique.

Enfin, dans un dernier chapitre, nous détaillons l'étude des nuits de gel printanier dans le vignoble marnais. Quelles sont leur fréquence ? Existe-t-il des différences entre les stations ? Et quelles sont les conditions atmosphériques associées à ces nuits gélives ?

Cette première approche permet de donner un aperçu des températures minimales des stations du vignoble marnais. Elle nous a semblé une première étape nécessaire avant de mettre au point un modèle de spatialisation des températures minimales sur l'ensemble du vignoble.

Chapitre VII - LES TEMPERATURES MINIMALES PRINTANIERES DANS LE VIGNOBLE MARNAIS

Les facteurs influençant la température minimale en un lieu donné sont multiples et leurs effets dépendent des échelles spatiales et temporelles considérées. En effet, si, à l'échelle globale, les températures dépendent des facteurs astronomiques et de la latitude, la circulation synoptique des masses d'air perturbe ce schéma général. Par exemple, l'arrivée d'une advection de nord-est sur le Nord de la France entraîne une diminution d'ensemble des températures. À une échelle plus fine, l'échelle topoclimatique, l'influence des facteurs locaux, telles la topographie ou l'occupation du sol, peut devenir prépondérante et amener à une forte variabilité spatiale des températures minimales, accentuée lors des nuits de ciel clair et de vent calme.

L'objectif de ce chapitre est de décrire les variabilités spatiale et temporelle des températures minimales printanières dans le vignoble marnais. À partir du réseau des 23 stations de notre zone d'étude, nous dégagerons les caractéristiques générales de ces stations. Quelles sont les plus froides, les plus chaudes ? Est-ce que leur comportement thermique est proche ? Ou, au contraire, observe-t-on des différences entre stations importantes ? En outre, nous nous attacherons à décrire le champ thermique. Existe-t-il des structures spatiales bien définies ? Ou, au contraire, est-ce que les facteurs locaux prédominent ?

Dans un premier temps, nous replacerons dans une perspective à long terme les nuits des six printemps retenus. Nous décrirons ensuite la variabilité temporelle des températures minimales en fonction de critères annuels, mensuels puis horaires, avant de nous intéresser finalement à leur variabilité spatiale.

VII.1 - Les nuits des printemps 1998-2003 par rapport à un temps plus long

Avant d'étudier les températures minimales dans le vignoble marnais pour les printemps retenus (1998-2003), nous avons voulu caractériser, d'une manière générale, les nuits de ces six printemps. Étaient-elles plutôt froides ou chaudes par rapport à des normales calculées sur un temps plus long (30 années) ? Les réponses apportées à cette question permettront de mieux comprendre les résultats exposés ultérieurement ainsi que de relativiser leur portée.

Le réseau du CIVC étant récent, il n'a pas été possible d'acquérir des données thermiques sur une longue période. Par contre, nous avons pu obtenir, pour la station synoptique de Reims-Courcy, les mesures de températures minimales journalières depuis 1961. Ainsi,

nous pouvons comparer les moyennes des six printemps (1998-2003) évaluées pour cette station à celle calculée sur 30 ans, c'est-à-dire sur les printemps 1974 à 2003¹⁶⁷.

VII.1.1 - Comparaison des moyennes printanières des températures minimales

La moyenne¹⁶⁸ des températures minimales journalières (sous abri) à Reims-Courcy, calculée sur la période 1998-2003 (6.2°C) est légèrement supérieure à celle sur la période 1974-2003 (5.2°C), ce qui est vérifié par un test de comparaison des moyennes (test de Student significatif au seuil de 1% ; Annexe E.1). Les nuits printanières retenues dans notre recherche sont donc plutôt chaudes, comme le montre la Figure VII.1. Par ailleurs, signalons que les températures minimales (à Reims-Courcy) ont tendance à augmenter avec le temps, sur la période 1974-2003 (relation linéaire significative à 2%). Ceci pourrait être lié à une augmentation simultanée de la température moyenne du globe (effet de serre) et de sa nébulosité¹⁶⁹.

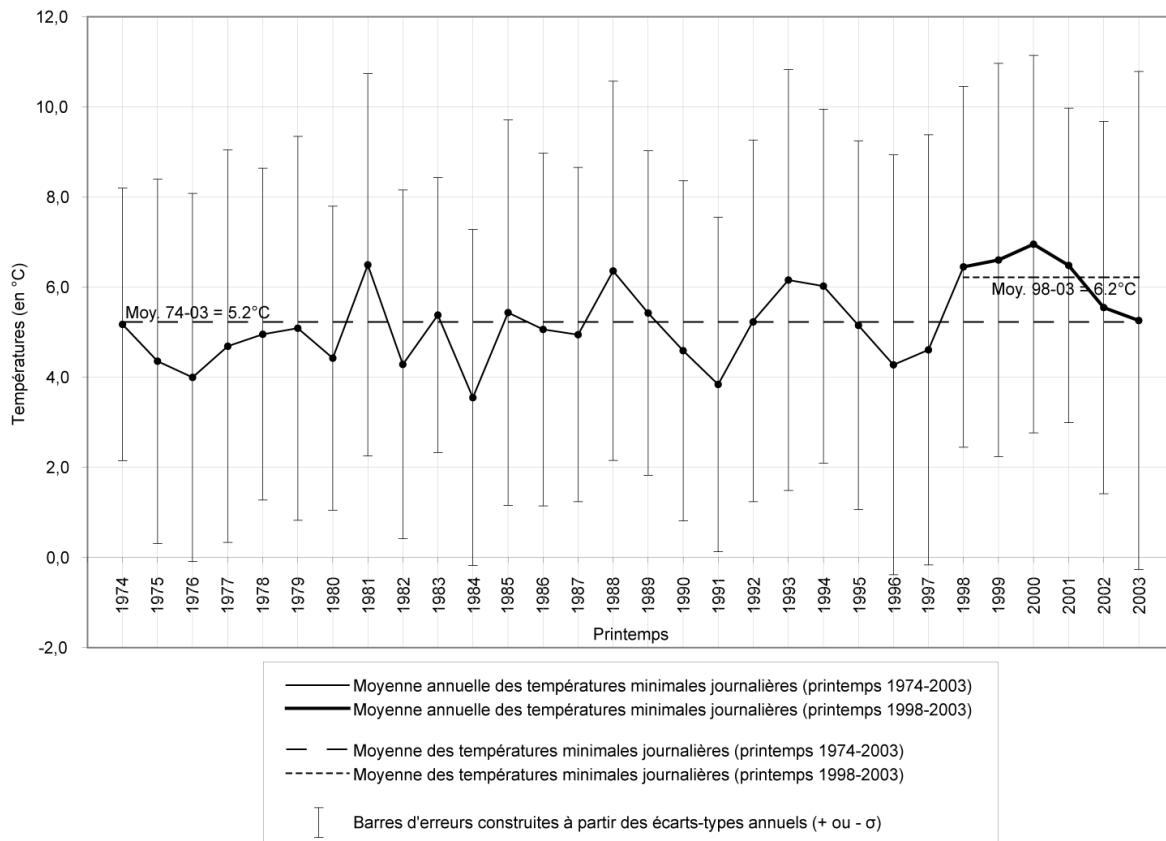


Figure VII.1 : Évolution sur le long terme des moyennes printanières des températures minimales journalières (à 2 m du sol, sous abri) à Reims-Courcy (1974-2003)

Données : 15/03-31/05 1974-2003 ; Météo France

167. Cette période de référence ne correspond pas aux recommandations internationales de l'OMM (1961-1990), mais elle nous permettait d'intégrer la période d'étude.

168. Bien que les distributions statistiques des températures minimales ne soient pas gaussiennes (elles s'en rapprochent), nous avons préféré, par commodité, retenir la moyenne et le coefficient de variation comme paramètres de position et de dispersion (relative).

169. À propos d'un réchauffement significatif des températures minimales au cours du dernier siècle, de très nombreux auteurs (notamment [Bücher et Dessens, 1991]) ont suggéré ces hypothèses.

Plus précisément, les températures minimales printanières sont, en moyenne, plutôt chaudes de 1998 à 2001. Ces quatre printemps figurent parmi les cinq printemps où la température minimale moyenne était la plus chaude (avec 1981). Par contre, les nuits des deux derniers printemps, 2002 et 2003, peuvent être qualifiées d'assez froides par rapport à l'ensemble des six printemps retenus¹⁷⁰. Cependant, seules les moyennes en 2000 et en 2003 se différencient significativement de la moyenne sur les six années (test de Student au seuil de 2%) : avec des températures minimales moyennes respectivement plus chaude et plus froide.

En outre, nous avons représenté sur la Figure VII.1 la dispersion des températures minimales autour de chaque moyenne printanière, sous la forme de barres d'erreur correspondant à plus ou moins un écart-type. Ainsi, il apparaît très nettement que la variation autour de ces moyennes annuelles est très importante pour chaque printemps¹⁷¹ et en particulier pour le printemps 2003 (Figure VII.1).

VII.1.2 - Comparaison des moyennes par quinzaine

Compte tenu de la forte dispersion mise en évidence, nous avons cherché à *dépasser* les moyennes printanières et à comparer les températures minimales moyennes par quinzaine¹⁷² de ces six printemps par rapport à la série 1974-2003 (toujours pour Reims-Courcy). Le Tableau VII.1 répertorie les moyennes calculées par printemps et par quinzaine. En outre, chaque moyenne a été replacée par rapport à l'ensemble des quinzaines de 1974 à 2003, à partir d'une discrétisation basée sur une standardisation. Par exemple, une quinzaine est qualifiée de « très froide » si la moyenne des températures minimales est très inférieure à celle calculée sur 1974-2003 (plus précisément, si elle s'écarte de plus un écart-type).

Tableau VII.1 : Moyennes par quinzaine des températures minimales journalières (sous abri), à Reims-Courcy, pour chaque printemps de 1998 à 2003 et pour les printemps 1974-2003

Année	Du 15/03 au 31/03	Du 01/04 au 15/04	Du 16/04 au 30/04	Du 01/05 au 15/05	Du 16/05 au 31/05
1998	3.7	4.9	6.4	9.1	8.4
1999	2.9	5.2	5.4	9.5	10.2
2000	3.8	3.0	7.5	11.3	9.5
2001	5.2	4.7	4.5	8.8	9.1
2002	3.5	1.6	5.5	8.4	8.8
2003	0.7	0.6	6.8	7.9	10.5
1974-2003	3.1	3.1	4.5	7.0	8.5

Caractérisation des quinzaines à partir d'une standardisation (faite sur les printemps 1974-2003)

	Températures minimales très froides
	Températures minimales froides
	Températures minimales chaudes
	Températures minimales très chaudes

Données : 15/03-31/05 1974-2003 ; Météo France

170. En prenant comme référence la série 1974-2003, ils ont des températures minimales moyennes très légèrement supérieures à la normale.

171. De 1998 à 2003, les coefficients de variation sont 0.6, 0.7, 0.6, 0.5, 0.7 et 1.1.

172. Même si ce choix de discrétisation du temps en quinzaine nous a semblé commode, il peut être critiquable. En effet, le choix d'un pas de temps influence les observations pouvant être faites sur la variabilité climatique [Charre et de Saintignon, 1997].

Il apparaît à nouveau que les nuits des quinzaines des printemps 1998 à 2003, à Reims-Courcy, étaient dans l'ensemble plus chaudes que sur la période 1974-2003 : la majorité des quinzaines sont qualifiées de chaudes, voire très chaudes. Cependant, six quinzaines apparaissent plus froides : par exemple, la dernière en 1998 (du 16/05 au 31/05) ou la première en 1999 (du 15/03 au 31/03). Mais c'est surtout la période du 15 mars au 15 avril 2003 qui se distingue par des températures minimales journalières beaucoup plus froides qu'en moyenne pour les printemps 1974-2003. En effet, le début du printemps 2003 a connu des températures très basses, qui ont conduit à des gelées dommageables importantes dans le vignoble champenois (essentiellement le 11 avril 2003). Ceci s'explique par l'alternance de situations d'advection d'air froid provenant du nord/nord-est et de conditions synoptiques anticycloniques (ciel peu nuageux). À l'inverse, les dernières nuits de ce printemps étaient plus chaudes que la normale, ce qui peut expliquer l'importance de la dispersion mesurée pour ce printemps (Figure VII.1).

VII.2 - Variabilité temporelle des températures minimales

Après avoir replacé les nuits des six printemps étudiés par rapport à une période plus longue, nous allons à présent décrire la variabilité temporelle au cours du printemps, puis de la nuit.

VII.2.1 - L'évolution des températures minimales au cours du printemps

Pour toutes les stations

La Figure VII.2 représente l'évolution des températures minimales (sous abri et en indices actinothermiques) pour le vignoble marnais (moyennes sur l'ensemble des stations retenues) au cours du printemps. De mi-mars à fin mai, les températures minimales augmentent de manière importante, d'environ 7°C (par exemple, pour les minima actinothermiques, approximativement de 3 à 10°C). Les facteurs astronomiques, tels que l'augmentation de la durée du jour, expliquent cette augmentation générale des températures minimales.

Cependant, une rupture dans la chronique printanière apparaît assez nettement vers le 22 avril (ce qui a déjà été relevé précédemment, Figure IV.4, p. 100). Dans la première période printanière (jusqu'à mi-avril), les températures minimales sous abri (minima actinothermiques) pour l'ensemble des stations retenues sont comprises entre 2.3 et 6.9°C (1.2 – 6.0°C). Après la troisième quinzaine d'avril, les températures minimales sont nettement plus chaudes : les températures à 2 m et sous abri vont de 6.3 à 12°C, celles hors abri et à 10-50 cm de 6.3 à 11.3°C (Figure VII.2). Deux périodes thermiques apparaissent donc nettement.

De façon contre-intuitive, les minima de ces températures minimales n'ont pas lieu tout au début de notre période d'étude, mais lors de la deuxième semaine d'avril, juste après des températures sensiblement plus chaudes (Figure VII.2). Cette diminution des températures

minimales en avril s'observe assez souvent en Europe de l'Ouest. Elle serait liée à des conditions plutôt anticycloniques avec un fond de l'air frais (*retour d'hiver*). Dans le contexte du vignoble marnais, cette observation prend toute son importance : en effet, cette période plus froide coïncide avec celle où la vigne reprend sa croissance végétative (débourrement), ce qui la fragilise face à des températures froides. Notons que ce phénomène s'observe également sur les calendriers de probabilités (Figure II.11, p. 51).

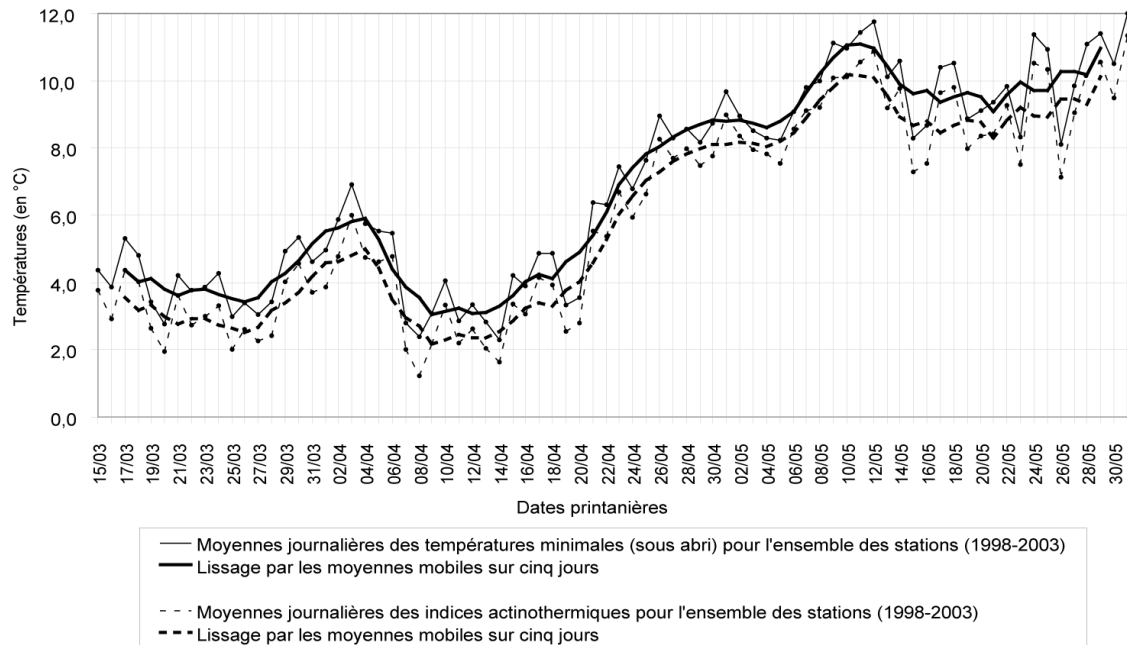


Figure VII.2 : Évolution printanière des moyennes journalières des températures minimales sous abri et des minima actinothermiques pour l'ensemble des stations retenues

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Météo France

Par ailleurs, nous pouvons observer sur la Figure VII.2 que les courbes des deux températures minimales (moyennes journalières pour l'ensemble des stations), à 2 m sous abri et entre 10 et 50 cm hors abri, ont un profil proche et sont distantes d'environ 1°C tout au long du printemps. Malgré cette apparente régularité pour les moyennes, il est important de rappeler que l'écart thermique entre ces deux températures minimales varie fortement selon les conditions synoptiques. Par exemple, lors des nuits de vent calme et de ciel clair, le capteur d'indice actinothermique, à l'air libre et à 10-50 cm, va mesurer des températures très froides (en relatif) en raison du fort refroidissement radiatif du sol, non compensé par un rayonnement atmosphérique. Une étude sur l'influence des conditions atmosphériques sur l'intensité de cet écart sera présentée ultérieurement (cf. IX.3.1 - Différences thermiques entre les capteurs des températures minimales à 2 m (sous abri) et à 10-50 cm (hors abri), p. 181).

Une évolution variable selon les années

Nous avons caractérisé les six printemps retenus (puis leurs quinzaines) quant aux températures minimales et par rapport à un temps plus long. En outre, nous venons d'évoquer l'évolution moyenne des températures minimales au cours d'un printemps : augmentation entre mars et mai, selon deux périodes thermiques assez distinctes (Figure VII.2). Toutefois, pour chaque printemps, les températures sont déterminées par une succession de types de temps, créant ainsi une variabilité interannuelle importante.

Nous avons souhaité mettre en évidence cette variabilité interannuelle des températures. La Figure VII.3 représente, pour chaque année, l'évolution des températures sous abri au cours du printemps et selon les heures (thermo-isoplèthes construits à partir des moyennes pour toutes les stations). Nous pouvons alors comparer les températures entre le jour et la nuit, selon les dates printanières et enfin selon les années.

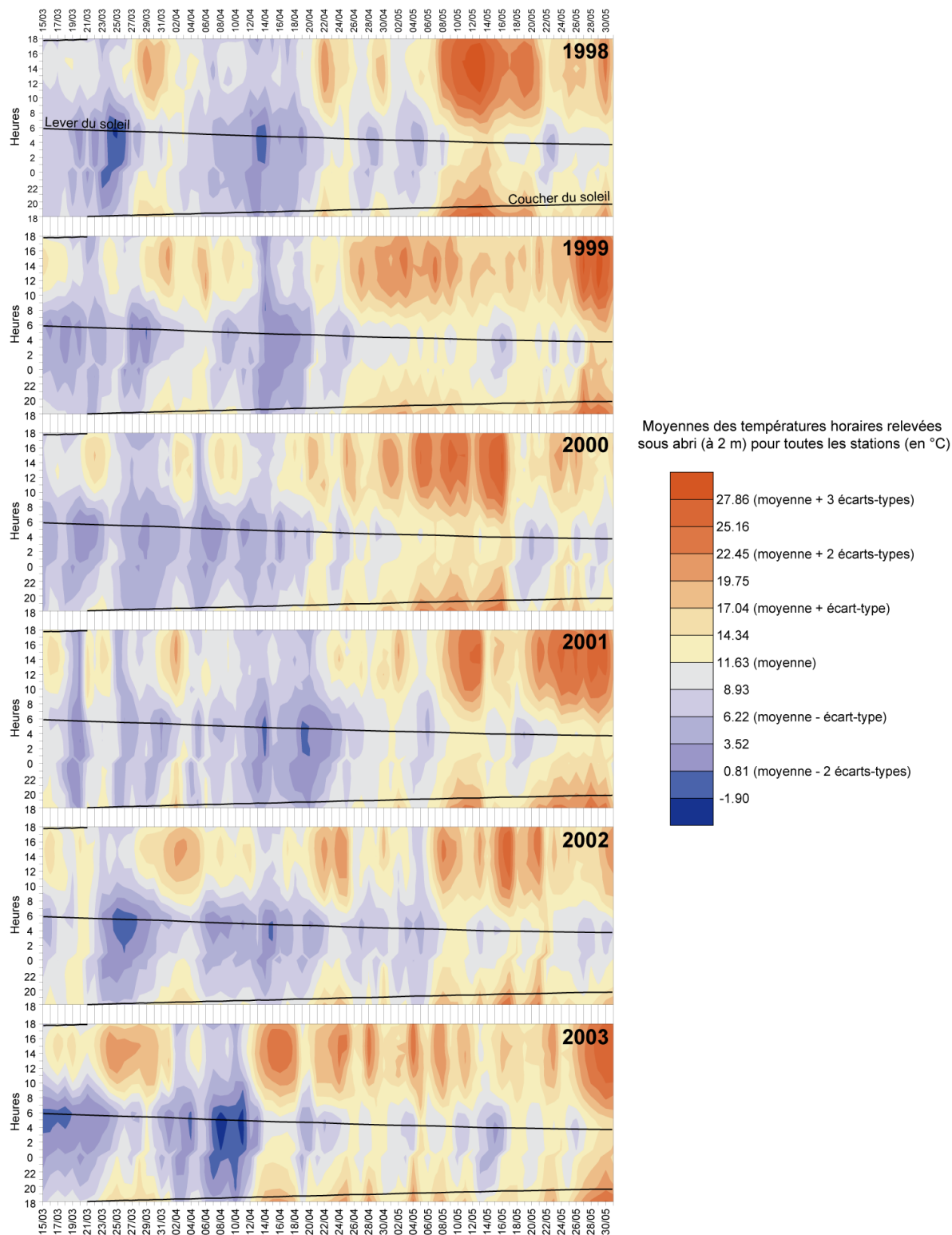


Figure VII.3 : Variabilités interannuelles, journalières et horaires des températures sous abri

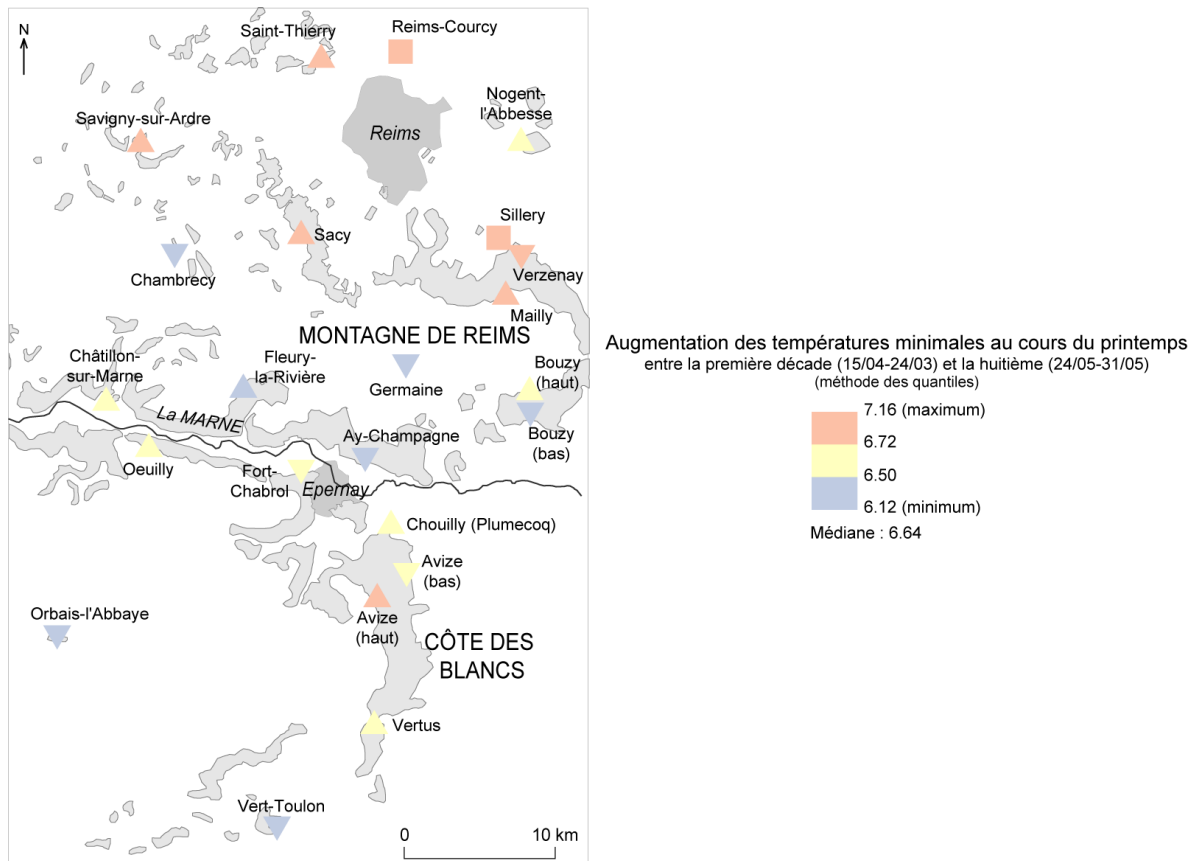
Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Cîvc, Météo France

À partir de la Figure VII.3, nous pouvons dégager plusieurs observations :

- il apparaît très clairement que les minima journaliers interviennent au moment du lever du soleil (ce qui a été déjà mentionné auparavant) ;
- les températures moyennes horaires (pour toutes les stations) ont une forte amplitude entre la nuit et le jour ;
- les deux périodes thermiques individualisées précédemment peuvent s'observer assez facilement ;
- cependant l'évolution diurne et printanière des températures dépend clairement d'une succession d'épisodes plus ou moins froids ;
- cette succession, liée aux types de temps et différente selon les années, conduit à une forte variabilité interannuelle des températures.

Une évolution différente selon les stations

En moyenne, toutes stations confondues, les températures minimales sous abri au cours du printemps augmentent d'environ 6.6°C entre la première et la dernière décades¹⁷³ de la période retenue. Cette augmentation des températures minimales au cours du printemps est-elle variable selon les stations ?



Carte VII.1 : Répartition de l'évolution des températures minimales sous abri au cours du printemps dans le vignoble marnais

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France
Les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

La Carte VII.1 représente la répartition spatiale de l'évolution des températures minimales sous abri entre les première et dernière décades printanières : une logique spatiale apparaît

173. Première décade du 15/03 au 24/03 et dernière décade du 24/05 au 31/05 (cette huitième *décade* est légèrement plus courte compte tenu des 78 dates printanières).

assez nettement. Ainsi, le réchauffement est légèrement plus important pour les postes situés au nord (et à mi-coteau) : par exemple, 7.2°C pour Sacy (plutôt au nord et à mi-coteau). À l'inverse, un réchauffement plus faible est enregistré par les stations situées sur les coteaux sud de la Montagne de Reims, ainsi que celles au sud de la zone d'étude (6.1°C pour Vert-Toulon à l'extrême sud et en bas de coteau).

VII.2.2 - Évolution des températures au cours de la nuit

Nous nous intéressons, à présent, à l'évolution des températures au cours d'une journée printanière, puis plus précisément au refroidissement nocturne. Pour cela, nous avons calculé les moyennes horaires des températures pour l'ensemble des stations. La Figure VII.4 représente l'évolution horaire des moyennes des températures sous et hors abri. Nous observons que les deux températures ont un profil général similaire : décroissance des températures de 14-15h à 4-5h (UTC), puis réchauffement rapide dû à l'apport énergétique du rayonnement solaire. Cependant, en raison de la situation des capteurs à l'air libre, donc beaucoup plus sensibles aux rayonnements solaire et terrestre, les indices actinothermiques sont plus froids la nuit que les températures à 2 m du sol, sous abri, et inversement dans la journée¹⁷⁴.

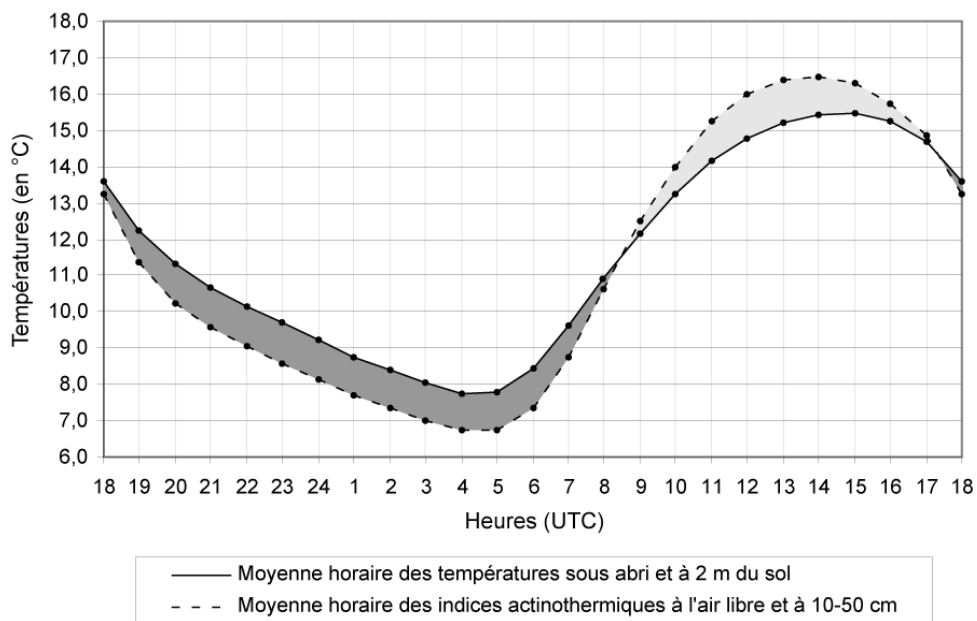


Figure VII.4 : Évolution moyenne horaire des températures sous abri (à 2 m) et en indice actinothermique (pour toutes les stations)

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CVC, Météo France

Plus particulièrement, la Figure VII.5 montre les profils thermiques pour quelques stations, plutôt froides :

- en moyenne au cours d'une nuit (21-7h UTC),
- et pour la nuit du 13 au 14 avril 2001.

174. La moyenne horaire des indices actinothermiques indiquée sur ce graphique n'est pas significative en journée. Comme il est hors abri, le thermomètre n'indique que sa propre température (qui dépendra de l'épaisseur du verre, de sa couleur, etc.) [Péramnaud, Raynal, 1991]. À l'inverse, la nuit, la température mesurée est proche de celle des plantes situées à la même hauteur.

Nous retrouvons, pour les profils moyens (Figure VII.5A), l'évolution horaire des indices actinothermiques décrite ci-dessus, avec un minimum à 4h pour Châtillon-sur-Marne et Chambrecy et à 5h pour Savigny. L'heure moyenne du minimum n'est donc pas la même selon les stations. Cependant, nous n'avons pas trouvé de relation entre cette heure et les caractéristiques des stations, telles que la position sur le coteau ou la localisation géographique. Les conditions locales pourraient expliquer ces différences (par exemple, présence d'un abri topographique, végétal ou anthropique). Par contre, le minimum est atteint de moins en moins tard au cours du printemps car le soleil se lève de plus en plus tôt : en moyenne pour l'ensemble des stations, à 6h (UTC) en mars, à 5h en avril et à 4h en mai.

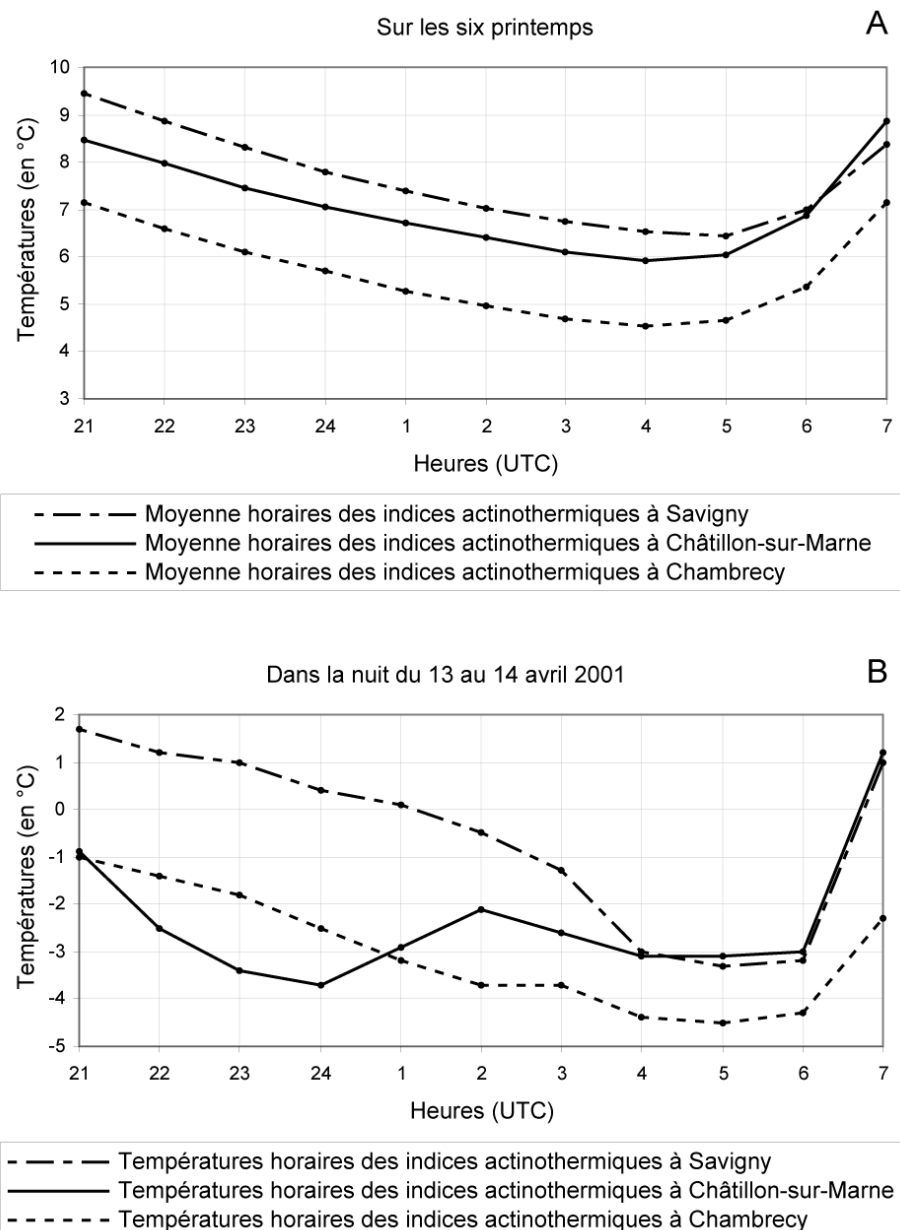


Figure VII.5 : Évolution horaire des indices actinothermiques pour trois stations, la nuit, sur les six printemps et pour la nuit du 13 au 14 avril 2001

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CVC, Météo France

Par ailleurs, nous pouvons également noter, sur la Figure VII.5A, une différence assez importante, en moyenne, entre Savigny et Chambrecy (2-2.5°C), qui sont pourtant deux stations plutôt froides. Cela étant, la décroissance de la température est assez linéaire et identique selon les stations. Pour donner un ordre de grandeur du refroidissement, la diminution des indices actinothermiques est en moyenne, pour les trois stations retenues, de -0.4°C par heure entre 21 et 4h UTC¹⁷⁵.

Notons toutefois que des écarts à ce comportement moyen de l'évolution des températures horaires moyennes au cours de la nuit peuvent s'observer parfois. Pour illustrer ce point, nous avons choisi un exemple assez atypique, mais éloquent : la nuit du 13 au 14 avril 2001 (Figure VII.5B). Les profils horaires des trois stations retenues ne sont pas similaires : pour Savigny et Chambrecy, le refroidissement nocturne s'apparente approximativement au profil moyen, avec cependant une décroissance plus marquée en fin de nuit pour Savigny (diminution de 1.8°C entre 3 et 4h). Par contre, pour Châtillon-sur-Marne, la température atteint son minimum à minuit (-3.7°C) et augmente très légèrement ensuite. Nous pouvons supposer que la formation de brumes ou le passage d'un voile nuageux ont modifié localement la diminution des températures. Même si un vigneron sera vigilant toute la nuit à l'annonce d'un risque de gel (pour mettre en œuvre un moyen de lutte adapté, par exemple), ces différentes évolutions nocturnes n'auront pas les mêmes répercussions sur la plante. En effet, la durée d'un événement gélif influence les dommages au niveau de la plante (cf. II.2.1 - Le phénomène du gel à l'échelle de la cellule, p. 46).

VII.2.3 - Le refroidissement nocturne

Nous avons souhaité compléter cet aperçu de l'évolution des températures minimales au cours de la nuit par une étude sur le refroidissement nocturne. Pour cela, nous avons calculé la différence, pour chaque nuit, entre les températures horaires (sous abri et à 2 m) relevées à 19h (la veille) et à 4h du matin, soit entre l'heure (ronde) moyenne du coucher du soleil et la plus froide en moyenne (Figure VII.4, p. 136). Le refroidissement ainsi défini a été calculé pour chaque nuit et pour chaque station.

Un refroidissement très variable selon les jours

Entre 19 et 4h, les températures sous abri diminuent en moyenne de 4.4°C, toutes stations confondues (la médiane est de 4.2°C). Excepté quelques réchauffements liés à l'arrivée sur la région de masses d'air plus chaudes que celles en place, la *quasi*-totalité (98%) des nuits est caractérisée par un refroidissement (écarts positifs), très souvent compris entre 2 et 6°C (50% des nuits ; Figure VII.6).

Toutefois, l'histogramme de ces refroidissements (Figure VII.6) montre une grande diversité : d'un réchauffement de 7.3°C pour Sacy dans la nuit du 20 au 21 mars 2001¹⁷⁶ jusqu'à un refroidissement très important, de 13.2°C pour Chambrecy, dans la nuit du 16 au 17 mai 1998 (ciel clair et vent faible à nul).

175. Le refroidissement est très légèrement plus important pour les stations situées en bas de coteau. Signalons que la diminution des températures minimales sous abri est égale à celle des minima actinothermiques.

176. Pour cette nuit, toutes les stations ont connu un réchauffement lié à l'arrivée sur la région d'un flux de SSW (avec un passage d'un front occlus).

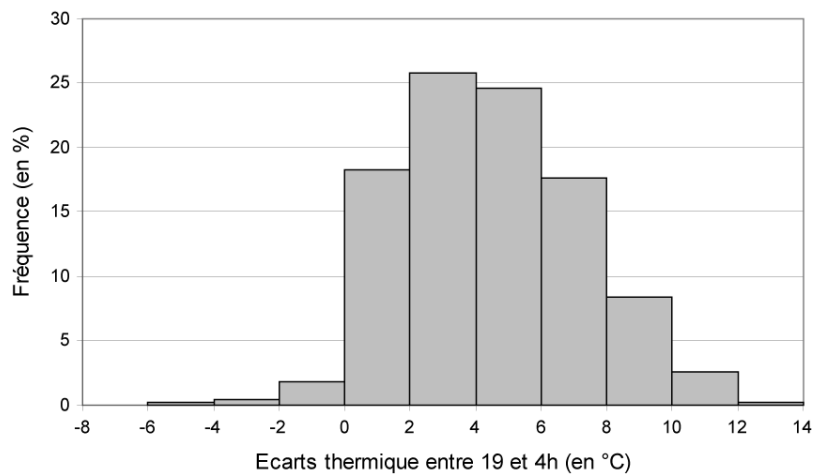


Figure VII.6 : Fréquences des refroidissements nocturnes (19-4h UTC), toutes stations confondues
Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CVC, Météo France

Un refroidissement plus accentué pour les stations de bas de coteau

L'examen des écarts thermiques moyens par station montre une différence significative entre les stations situées à mi-coteau et celles en bas de coteau. En effet, la moyenne des écarts pour les stations à mi-coteau est significativement supérieure à celle obtenue pour les stations de bas de coteau et de plaine (test de Student sur des échantillons indépendants, seuil inférieur à 0.01% ; Annexe E.1). La Figure VII.7 illustre très bien cette influence de la position sur le coteau sur l'évolution des températures sous abri entre 19 et 4h. Le phénomène d'écoulement de l'air froid vers le bas du coteau semble donc favoriser un refroidissement plus important en moyenne pour les bas de coteau. On peut facilement supposer que cela est d'autant plus fort que les conditions atmosphériques sont radiatives.

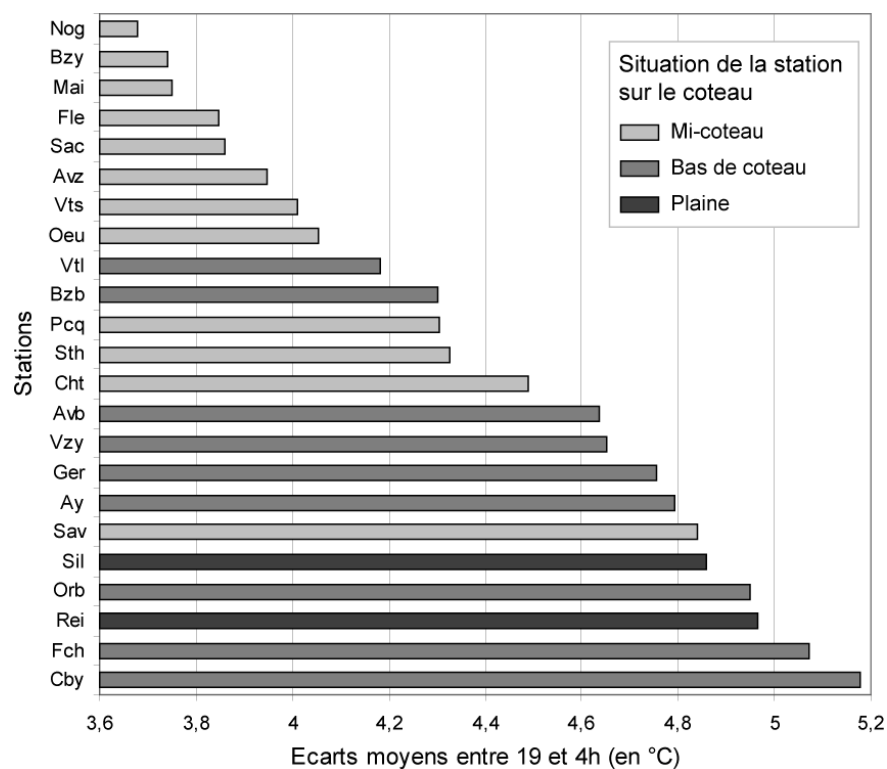


Figure VII.7 : Refroidissements nocturnes moyens (19-4h UTC) par station

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CVC, Météo France
Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

Afin de vérifier cette hypothèse de l'influence des conditions atmosphériques sur l'importance ou non du refroidissement nocturne, nous présenterons ultérieurement une étude des écarts thermiques enregistrés entre 19 et 4h selon la vitesse du vent et sa direction, ainsi que selon la nébulosité à Reims-Courcy (cf. IX.1 - Le refroidissement nocturne, p. 169).

VII.3 - Variabilité spatiale des températures minimales

Après cette description de l'évolution des températures minimales du vignoble marnais au cours du printemps et de la nuit, nous étudions à présent la variabilité spatiale de ces températures. Existe-t-il un gradient nord-sud, qui découlerait de facteurs à l'échelle synoptique ? Ou, au contraire, les effets locaux influencent-ils davantage la répartition spatiale de ces températures minimales ?

VII.3.1 - Moyennes des températures minimales

Dans un premier temps, nous avons calculé les moyennes des températures minimales par station. La Figure VII.8 représente la distribution statistique de ces moyennes¹⁷⁷ calculées sur l'ensemble des printemps. Il apparaît très clairement, sur cette figure, une forte disparité entre les stations, en particulier quant aux minima actinothermiques :

- pour les températures minimales journalières (sous abri), près de 3°C d'écart entre les valeurs minimale à Chambrecy (5.04°C) et maximale à Bouzy haut (7.86°C),
- et presque 4°C pour les minima actinothermiques journaliers, de 3.58°C à Chambrecy (minimum à nouveau) jusqu'à 7.30°C à Vertus.

Nous observons également que les stations plutôt chaudes ont des moyennes thermiques assez proches alors que les postes froids s'individualisent nettement des autres (et même entre eux) (Figure VII.8). Par exemple, pour les températures minimales sous abri, 14 stations sur 23 ont des moyennes comprises entre 7 et 8°C, alors que les valeurs moyennes des stations les plus froides s'étalent de 5 à 7°C, avec une singularité marquée pour Germaine et Chambrecy, qui se détachent très nettement. Cette individualisation se retrouve également au niveau des minima actinothermiques de manière plus accentuée : Reims-Courcy et Chambrecy (Germaine également, mais dans une moindre mesure) ont des minima actinothermiques très froids, en moyenne, par rapport aux autres stations.

177. Il est souvent mentionné dans la littérature que les températures sont des séries statistiques qui suivent une loi normale (donc pour lesquelles se justifie l'utilisation de la moyenne) [Charre *et al.*, 1986]. Ici, toutes nos séries thermiques (par station et par type de capteur) ont une distribution significativement différente de la loi normale (à 10%). Il aurait été alors plus souhaitable de prendre en compte la médiane comme paramètre de position. Cependant, par commodité, nous avons choisi la moyenne. Signalons que la variation des médianes printanières entre les stations était similaire à celle décrite ici avec les moyennes.

De plus, nous n'évoquons pas la dispersion par station, celle-ci étant du même ordre, quelque soit le poste : l'intervalle interquartile varie de 5.8 (pour Orbais-l'Abbaye, pour les deux mesures thermiques) à 6.8 (pour les minima actinothermiques relevés à Chambrecy et à Reims-Courcy, stations les plus froides). Nous avons considéré que la dispersion des températures pour chaque station était globalement la même.

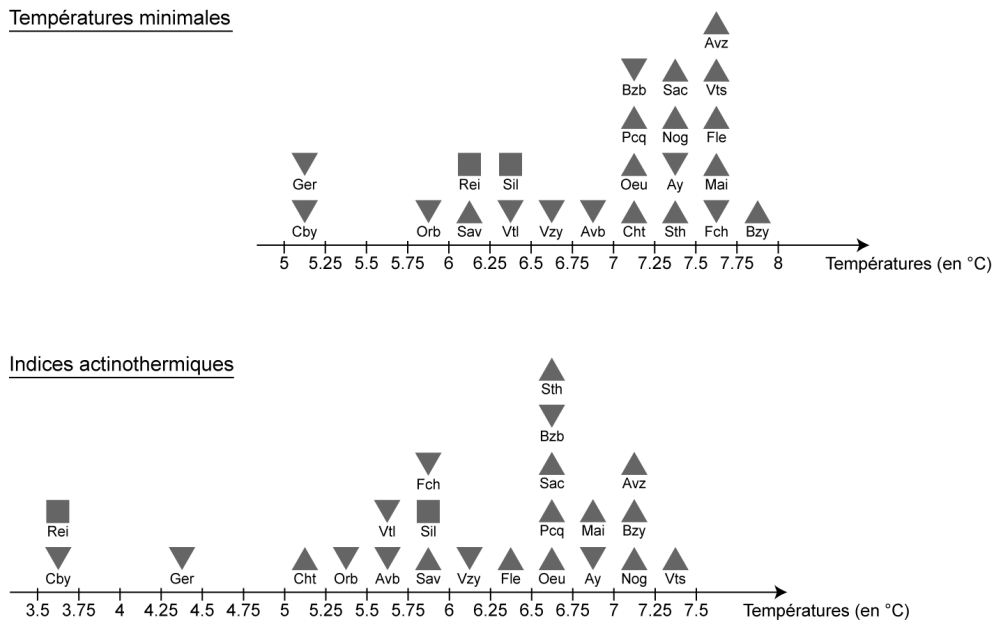


Figure VII.8 : Distribution statistique des moyennes des températures minimales journalières (sous abri et hors abri en indices actinothermiques) pour l'ensemble des stations du vignoble marnais

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France
Les abréviations des stations ainsi que les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

Par ailleurs, nous pouvons d'ores et déjà remarquer que la hiérarchie entre les stations selon les températures minimales sous abri (à 2 m) n'est pas exactement la même que celle qui s'appuie sur les minima actinothermiques. Ces différences entre les minima actinothermiques et les températures minimales seront abordées ultérieurement (p. 181). Cela étant, quelle que soit la station, les températures minimales sous abri et à 2 m sont légèrement supérieures, en moyenne, aux minima actinothermiques (hors abri, à 10-50 cm du sol), ce qui a déjà été observé précédemment (cf. VII.2 - Variabilité temporelle des températures minimales). Cet écart révèle l'importance du phénomène d'inversion thermique, la nuit : les basses couches sont fortement refroidies par le refroidissement infrarouge du sol, ce qui est accentué ici par la mesure à l'air libre des indices actinothermiques. Même si ce phénomène apparaît particulièrement lors des nuits de ciel clair et de vent calme, où l'apport énergétique de l'atmosphère est dérisoire face au refroidissement du sol (conditions de temps anticycloniques), il ressort ici à travers les moyennes printanières.

Enfin, sur cette Figure VII.8, nous avons ajouté une information relative à la position des stations sur le coteau par différents symboles. Il apparaît ainsi que les stations situées en bas de coteau (triangle orienté vers le bas) et en plaine (carré) ont plutôt une moyenne plus froide que les stations de mi-coteau (triangle orienté vers le haut). Cette observation est confirmée par une analyse de la variance (Annexe E.2) indiquant une relation significative, pour un risque d'erreur inférieur à 1%, entre la moyenne des températures minimales et la position sur le coteau¹⁷⁸. Toutefois, d'autres facteurs peuvent modifier cette dichotomie stations de bas de coteau froides / stations de mi-coteau chaudes. Ainsi, la situation de la station automatique de Fort-Chabrol à proximité de la ville pourrait expliquer une

178. Les stations de plaine et de bas de coteau ont été regroupées.

température minimale (à 2 m, sous abri) plutôt chaude pour une localisation vers le bas du coteau.

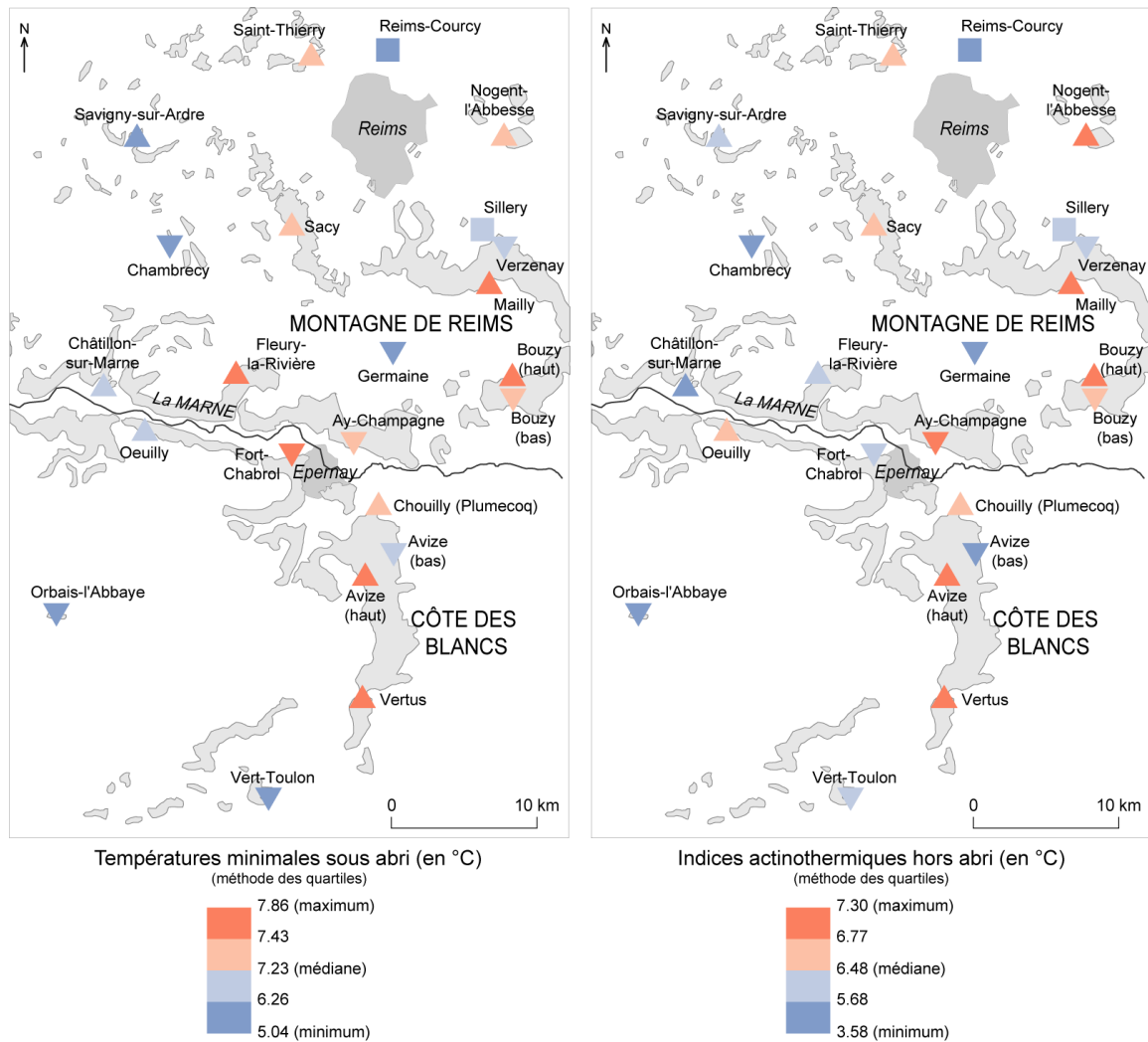
Nous pouvons facilement imaginer que ces différences thermiques sur un espace relativement restreint ont des répercussions sur le développement de la vigne. Ces résultats pourraient alors s'inscrire dans une étude des potentialités climatiques des zones viticoles.

VII.3.2 - Répartition spatiale des températures minimales moyennes

Après l'analyse de la distribution des températures minimales moyennes sur le plan statistique, considérons à présent leur répartition spatiale. Pour cela, nous avons cartographié les moyennes thermiques printanières, calculées précédemment, pour les 23 stations retenues (Carte VII.2)¹⁷⁹. Dans l'ensemble, il est assez difficile de repérer des structures spatiales nettes. Toutefois, les stations situées à l'est de la zone d'étude, en particulier sur la Côte des Blancs (Vertus, Avize haut) et au sud de la Montagne de Reims (Bouzy), sont plus chaudes en moyenne que celles situées à l'ouest (Orbais, Châtillon, Chambrey). Il semble que la position sur le coteau, dont l'influence était déjà observable sur les distributions statistiques (Figure VII.8), se combine avec la localisation géographique. Par exemple, la station de Verzenay en bas de coteau (tout comme Sillery en plaine) est plus froide que Mailly située plus haut sur le même coteau, ce qui montre l'influence de la position sur le coteau.

Bien que les distributions spatiales des deux cartes soient assez proches (Carte VII.2), leur examen attentif révèle des nuances dans la hiérarchie entre les stations. Par exemple, les minima actinothermiques à Nogent-l'Abesse, Aÿ-Champagne, Œuilly et Vert-Toulon sont légèrement plus chauds que ce à quoi on pourrait s'attendre compte tenu des températures minimales. Cela nous a amenés à étudier plus précisément les écarts entre température minimale et minimum actinothermique afin de comprendre l'origine des différences observées entre ces deux répartitions spatiales.

179. Afin de comparer les deux cartes des températures, nous avons choisi d'utiliser la méthode de discrétisation des quartiles : chaque ensemble des 23 stations est divisé en 4 classes d'effectifs égaux (trois classes avec six individus et une avec cinq).



Carte VII.2 : Répartitions spatiales des températures minimales sous abri (à 2 m) et en indices actinothermiques (hors abri, 10-50 cm) dans le vignoble marnais

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CVC, Météo France
Les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

VII.3.3 - Les écarts entre température minimale et minimum actinothermique

Nous pouvons très facilement émettre l'hypothèse qu'il existe une relation entre les rangs des stations selon les températures minimales sous abri et selon les minima actinothermiques (hors abri). En d'autres termes, une station qui relève, en moyenne, des températures minimales sous abri froides (par rapport à l'ensemble des stations) enregistrerait des indices actinothermiques également bas. La relation ici, testée sur les moyennes printanières, est très significative (pour un seuil inférieur à 0.01%).

Bien que cette hypothèse soit confirmée, les différences entre les répartitions spatiales des minima actinothermiques et des températures minimales, observées sur la Carte VII.2, nous ont amenés à étudier plus précisément les stations pour lesquelles l'écart entre les rangs était non négligeable. Sur la Figure VII.9, nous avons représenté sur un graphique cartésien la hiérarchie des stations selon les deux températures. Trois postes, Châtillon-sur-Marne (Cht), Fort-Chabrol (Fch) et Fleury-la-Rivière (Fle), se distinguent nettement : les minima

actinothermiques sont beaucoup plus froids que ce que pouvaient laisser présager les températures minimales (par comparaison avec l'ensemble des stations). Les moyennes des températures minimales sous abri (à 2 m) à Fort-Chabrol et à Fleury-la-Rivière appartiennent aux 25% les plus chaudes (sur l'ensemble des stations ; en rouge sur la Carte VII.2, à gauche), alors que les moyennes des minima actinothermiques pour ces mêmes stations sont comprises entre le deuxième quartile et la médiane (en bleu pâle sur la Carte VII.2, à droite). Ces trois stations sont localisées le long de la Vallée de la Marne. Cependant, pour les autres stations situées dans cette vallée, Œuilly et Aÿ-Champagne, nous observons l'inverse. Nous avons alors recherché une explication autre que la localisation le long de cette vallée.

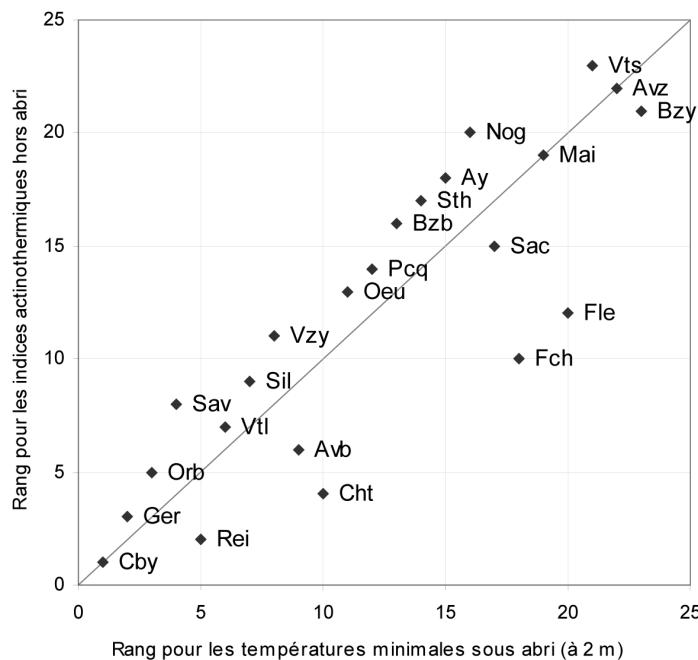


Figure VII.9 : Graphique cartésien des rangs hiérarchiques occupés par chaque station selon les températures minimales sous abri (à 2 m) et les minima actinothermiques (hors abri, 10-50 cm)

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France
 Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

Le Tableau VII.2 répertorie, par station, les écarts moyens entre les températures minimales sous abri et les minima actinothermiques hors abri. Étant tous positifs, ils signifient qu'en moyenne, les températures minimales à 2 m et sous abri sont supérieures aux indices actinothermiques, ce qui a déjà été mentionné précédemment. Ils sont, dans l'ensemble, assez faibles : les deux tiers sont inférieurs à la moyenne 0.8°C (dissymétrie à gauche très marquée). Seules six stations se distinguent nettement avec des écarts plus grands, en particulier Châtillon-sur-Marne (2.1°C) et Reims-Courcy (2.6°C). Ces stations, excepté Fleury-la-Rivière, appartenaient à l'ancien réseau AGREMAM et à Météo France (cf. IV.1 - Les réseaux d'information climatique de la Marne, p. 77). Or nous savons que les capteurs en indices actinothermiques de ces réseaux ont été installés *théoriquement* à 10 cm (50 cm pour les stations du CIVC). Même si nous avons déjà mentionné auparavant que cette hauteur n'est pas toujours strictement respectée, ces écarts thermiques importants observés pour les stations Météo France et AGREMAM s'expliquent donc par la position du capteur plus proche du sol, qui est alors plus influencé par le refroidissement du sol (dans les basses couches).

Tableau VII.2 : Moyenne, par station, des écarts entre les températures minimales journalières sous abri (à 2 m) et hors abri (à 10-50 cm)

Stations	Moyenne des écarts (en °C)
Vertus	0.3
Nogent-l'Abesse	0.3
Savigny-sur-Ardre	0.3
Sillery	0.5
Aÿ-Champagne	0.5
Orbais-l'Abbaye	0.5
Avize (haut)	0.5
Vert-Toulon	0.5
Mailly	0.6
Saint-Thierry	0.6
Verzenay	0.6
Bouzy (bas)	0.6
œuilly	0.6
Plumecoq	0.6
Germaine	0.7
Sacy	0.7
Bouzy (haut)	0.8
Fleury-la-Rivière	1.1
Avize (bas)	1.3
Chambrecy	1.5
Fort-Chabrol	1.7
Châtillon-sur-Marne	2.1
Reims-Courcy	2.6

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

L'écart entre les deux mesures thermiques est donc variable selon les stations, en fonction, notamment, de la hauteur du capteur en indice actinothermique. Par la suite, afin de comparer les stations avec des références communes, par conséquent, nous utiliserons les températures minimales sous abri et à 2 m. Dans une perspective d'étude de l'aléa gélif, cela est regrettable, puisque les capteurs les plus proches thermiquement des bourgeons sont ceux hors abri et à quelques dizaines de centimètres du sol.

En outre, nous pouvons d'ores et déjà mentionner que leur variation est influencée par les conditions atmosphériques. Par exemple, lors des nuits de ciel clair et de vent calme, le phénomène d'inversion thermique est particulièrement marqué. Ce point sera abordé ultérieurement (p. 181).

VII.3.4 - Vers le zonage thermique du vignoble marnais

Nous avons distingué précédemment, à partir des moyennes des températures minimales journalières, des nuances entre les différentes stations. Cette distinction rapide entre stations froides et chaudes nous a permis de montrer le rôle de la localisation géographique, ainsi que celui de la position sur le coteau. Afin d'affiner ces premiers résultats, nous avons cherché à réaliser un *zonage*¹⁸⁰ thermique du vignoble marnais.

180. Rigoureusement, réaliser un zonage sous-entend définir des zones considérées comme homogènes (par exemple, sur le plan thermique). Nous nous limitons ici à un regroupement des stations (unités ponctuelles) sans proposer une extrapolation à l'ensemble du vignoble (ce qui sera fait par la suite dans la quatrième partie).

L'histoire thermique commune des stations

La première étape a été d'étudier les relations entre les données thermiques des stations. Compte tenu de notre échelle topoclimatique, toutes ces relations sont positives et significatives à un seuil bien inférieur à 0.01% : plus une station quelconque enregistre des températures élevées, plus une autre a tendance à relever des températures également élevées et vice versa (pour les minima actinothermiques et pour les températures minimales sous abri). À partir de la matrice de corrélation des températures minimales sous abri (Tableau VII.3), nous constatons que les coefficients de corrélation de Bravais Pearson¹⁸¹ sont tous supérieurs à 0.76¹⁸². Les trois plus fortes relations (0.99) sont relatives à des stations proches géographiquement et avec une situation sur le coteau identique : Fort-Chabrol et Aÿ-Champagne, Œuilly et Châtillon-sur-Marne, Sillery et Verzenay. Par contre, le poste de Chambrecy (site de cuvette), caractérisé, rappelons-le, par des températures minimales froides, est le moins corrélé avec tous les autres.

Tableau VII.3 : Matrice de corrélation entre les stations pour les températures minimales journalières sous abri (à 2 m)

	Avb	Avz	Ay	Bzb	Bzy	Cby	Cht	Fch	Fle	Ger	Mai	Nog	Oeu	Orb	Pcq	Rei	Sac	Sav	Sil	Sth	Vtl	Vts	
Avz	0.94	1																					
Ay	0.96	0.93	1																				
Bzb	0.95	0.94	0.95	1																			
Bzy	0.90	0.98	0.90	0.95	1																		
Cby	0.90	0.82	0.91	0.83	0.76	1																	
Cht	0.94	0.96	0.96	0.94	0.95	0.89	1																
Fch	0.97	0.94	0.99	0.96	0.92	0.92	0.97	1															
Fle	0.91	0.96	0.94	0.95	0.97	0.83	0.98	0.95	1														
Ger	0.95	0.87	0.94	0.89	0.82	0.96	0.90	0.95	0.86	1													
Mai	0.89	0.94	0.91	0.90	0.94	0.85	0.97	0.93	0.96	0.84	1												
Nog	0.89	0.97	0.90	0.93	0.98	0.80	0.97	0.92	0.98	0.83	0.97	1											
Oeu	0.95	0.96	0.96	0.95	0.95	0.89	0.99	0.98	0.98	0.91	0.96	0.96	1										
Orb	0.94	0.88	0.96	0.89	0.83	0.96	0.93	0.97	0.89	0.96	0.88	0.85	0.94	1									
Pcq	0.95	0.98	0.95	0.96	0.97	0.85	0.97	0.96	0.97	0.89	0.95	0.97	0.97	0.90	1								
Rei	0.94	0.89	0.93	0.87	0.84	0.97	0.94	0.95	0.88	0.95	0.91	0.86	0.93	0.96	0.91	1							
Sac	0.93	0.95	0.92	0.89	0.91	0.90	0.97	0.95	0.94	0.90	0.96	0.93	0.96	0.92	0.95	0.95	1						
Sav	0.92	0.88	0.95	0.89	0.84	0.97	0.95	0.96	0.91	0.95	0.91	0.87	0.95	0.97	0.91	0.97	0.94	1					
Sil	0.95	0.91	0.95	0.90	0.87	0.96	0.95	0.96	0.91	0.95	0.92	0.89	0.95	0.96	0.93	0.98	0.96	0.97	1				
Sth	0.93	0.97	0.94	0.93	0.95	0.89	0.98	0.96	0.97	0.89	0.98	0.97	0.98	0.91	0.97	0.94	0.98	0.94	0.95	1			
Vtl	0.96	0.93	0.96	0.96	0.91	0.88	0.94	0.96	0.92	0.93	0.88	0.90	0.95	0.94	0.95	0.91	0.89	0.92	0.92	0.92	1		
Vts	0.94	0.98	0.93	0.96	0.98	0.81	0.96	0.95	0.97	0.86	0.94	0.97	0.96	0.88	0.98	0.88	0.93	0.88	0.90	0.96	0.94	1	
Vzy	0.96	0.91	0.95	0.91	0.87	0.95	0.94	0.96	0.90	0.95	0.91	0.88	0.95	0.96	0.92	0.98	0.95	0.96	0.99	0.95	0.93	0.90	1

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France
 Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.
 En gras, les plus fortes corrélations mentionnées dans le commentaire.

Ces fortes corrélations entre les stations, liées à notre échelle spatiale, démontrent une *histoire thermique commune* sur le vignoble marnais : les jours où une station donnée enregistre une température minimale froide sont caractérisés par des basses températures sur l'ensemble du vignoble marnais (et inversement). Cette histoire se retrouve dans les Analyses en Composantes Principales (ACP ; Annexe E.3) réalisées sur les températures minimales sous abri puis sur les minima actinothermiques. En effet, le premier facteur résume 93.3% de l'information pour les températures minimales (92.1% pour les indices actinothermiques) ; les autres facteurs ne peuvent pas être retenus (leur apport est inférieur

181. Le lecteur trouvera des précisions dans l'ouvrage du groupe Chadule [1997]. Rappelons l'équation du coefficient du

$$\text{corrélation} : r = \frac{\text{COV}_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

182. Par ailleurs, nous avons calculé, heure par heure, les coefficients de corrélation entre les températures (sous abri et hors abri) des stations : ils sont, en moyenne, plus faibles la nuit que le jour, ce qui indique une plus grande variabilité nocturne.

à celui d'une variable¹⁸³). Cet effet de masse, représenté sur la Figure VII.10, est lié à l'histoire commune des stations et masque donc les nuances thermiques entre les stations. Pourtant, certaines nuits, les différences entre stations peuvent être très importantes.

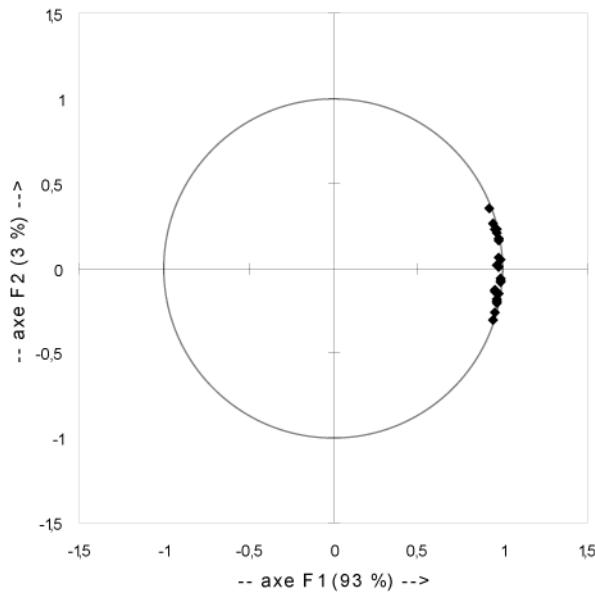


Figure VII.10 : Graphique cartésien des deux premiers facteurs d'une Analyse en Composantes Principales réalisée sur les températures minimales journalières

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

Une classification thermique des postes météorologiques lors des nuits de ciel clair et de vent calme

En utilisant une autre méthode d'analyse de données, la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH ; Annexe E.4), nous avons cherché à regrouper les postes qui se ressemblent le plus thermiquement et à différencier ceux qui sont moins proches. Comme pour l'ACP, l'accent est davantage mis sur la comparaison des profils thermiques que des moyennes : on cherche à regrouper les stations dont la variabilité serait synchrone [Charre et de Saintignon, 1997]. Les données utilisées sont les températures minimales journalières par station. Elles ont été standardisées afin de ne pas donner plus de poids aux températures les plus élevées.

Une première classification réalisée sur les températures minimales des printemps 2001 et 2002 avait distingué très nettement les stations, des plus froides (principalement en bas de coteau) aux plus chaudes. Toutefois, les résultats de la même méthode utilisée sur les printemps 1998-2003 se différencient des précédents. En réalité, les proximités statistiques entre les stations ne sont pas les mêmes selon les périodes choisies (par exemple, par année). Nous pouvons supposer que la variation des types de temps, de jour en jour, rend non robustes ces classifications. Nous avons donc choisi de sélectionner 107 nuits particulières, de ciel clair et de vent calme (Encadré VII.1), propices à une forte variabilité spatiale et à un refroidissement intense des températures nocturnes.

183. Le deuxième facteur apporte moins de 4.17% d'information (1/23 stations) : 3.31% pour les températures minimales et 3.39% pour les minima actinothermiques.

Encadré VII.1 : Typologie des nuits de ciel clair et de vent calme

Dans l'application du système de prévision des gelées printanières de Météo France, le prévisionniste entre les données relatives au vent (direction et vitesse) et à la nébulosité (dans le chapitre III, p. 70), ce qui modifie l'estimation des écarts entre la station de référence Reims-Courcy et les quatre points du vignoble. Pour l'initialisation de ce système, E. Choissnel *et al.* [1993] ont proposé une classification des nuits selon la nébulosité et le vent (classification rappelée dans Chapitre III). Cette classification basée sur des valeurs seuils nous a paru intéressante pour sélectionner les nuits de ciel clair et de vent calme. Toutefois, nous avons apporté quelques modifications.

Anciennement la nébulosité de la nuit était définie selon l'existence ou non d'une fraction d'insolation supérieure ou égale à 80% la veille et le jour même (à Reims-Courcy) [Choissnel *et al.*, 1993] (ce qui déterminait des conditions de « ciel clair »). Le refroidissement ayant lieu principalement la nuit (excepté lors des refroidissements advectifs le jour), nous avons

préférentiellement choisi de classer les nuits à partir des données trihoraires de nébulosité de 21, 0, 3 et 6h UTC (à Reims-Courcy) : si au moins trois mesures sur quatre sont inférieures ou égales à deux octats, la nuit est classée en « ciel clair », sinon à « nébulosité variable ».

Ensuite, pour distinguer les nuits de vent calme, nous avons pris en compte les moyennes des vitesses de vent sur l'ensemble des stations. Dans la classification de E. Choissnel *et al.* [1993], seule la vitesse à 0h à Reims-Courcy était prise en compte. Il nous a semblé que cette donnée n'était pas forcément représentative de l'ensemble de la nuit et de la zone d'étude. Pas conséquent, nous distinguons une nuit de vent calme lorsque la moyenne des vitesses de vent nocturnes (de 21 à 6h UTC ; données trihoraires pour Reims-Courcy, horaires pour les 11 autres stations) est strictement inférieure à 2 m/s.

Au final, pour les six printemps, nous avons retenu 107 dates qualifiées de vent calme et de ciel clair.

Les deux stations se ressemblant le plus sont Œuilly et Châtillon-sur-Marne, situées à proximité géographique sur deux coteaux opposés de la vallée de la Marne, et toutes les deux à mi-coteau. Ensuite, la méthode de classification ascendante regroupe Aÿ-Champagne et Fort-Chabrol : à nouveau, ces postes sont localisés sur deux coteaux de la Vallée de la Marne opposés (plus à l'est), mais implantés en bas.

L'arbre des indices de niveaux (Figure VII.11) différencie clairement deux grandes classes de stations. Afin d'affiner cette classification réductrice, nous avons choisi de partitionner l'ensemble des stations en quatre classes. Cette partition retenue explique 77.9% de la variabilité initiale.

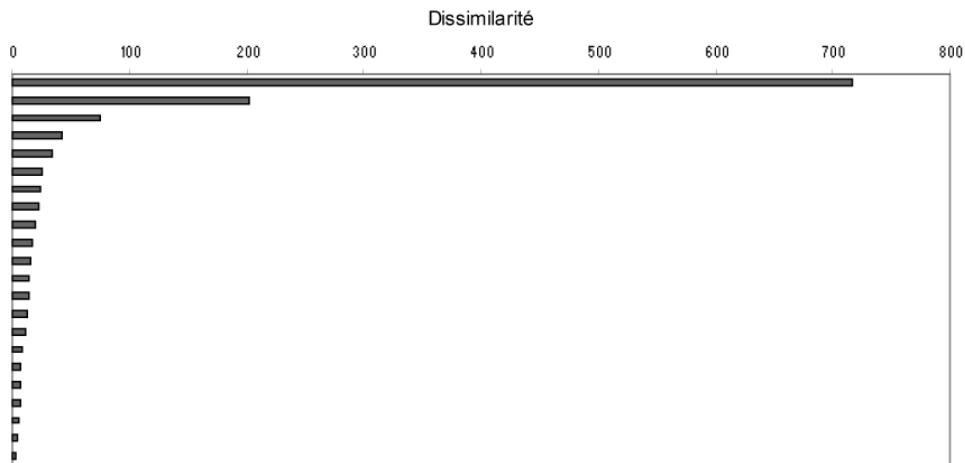


Figure VII.11 : Histogramme des indices de niveaux de la CAH réalisée sur les températures minimales des stations du vignoble marnais pour les nuits de ciel clair et de vent calme

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France
La définition des nuits de ciel clair et de vent calme est indiquée dans l'Encadré VII.1.

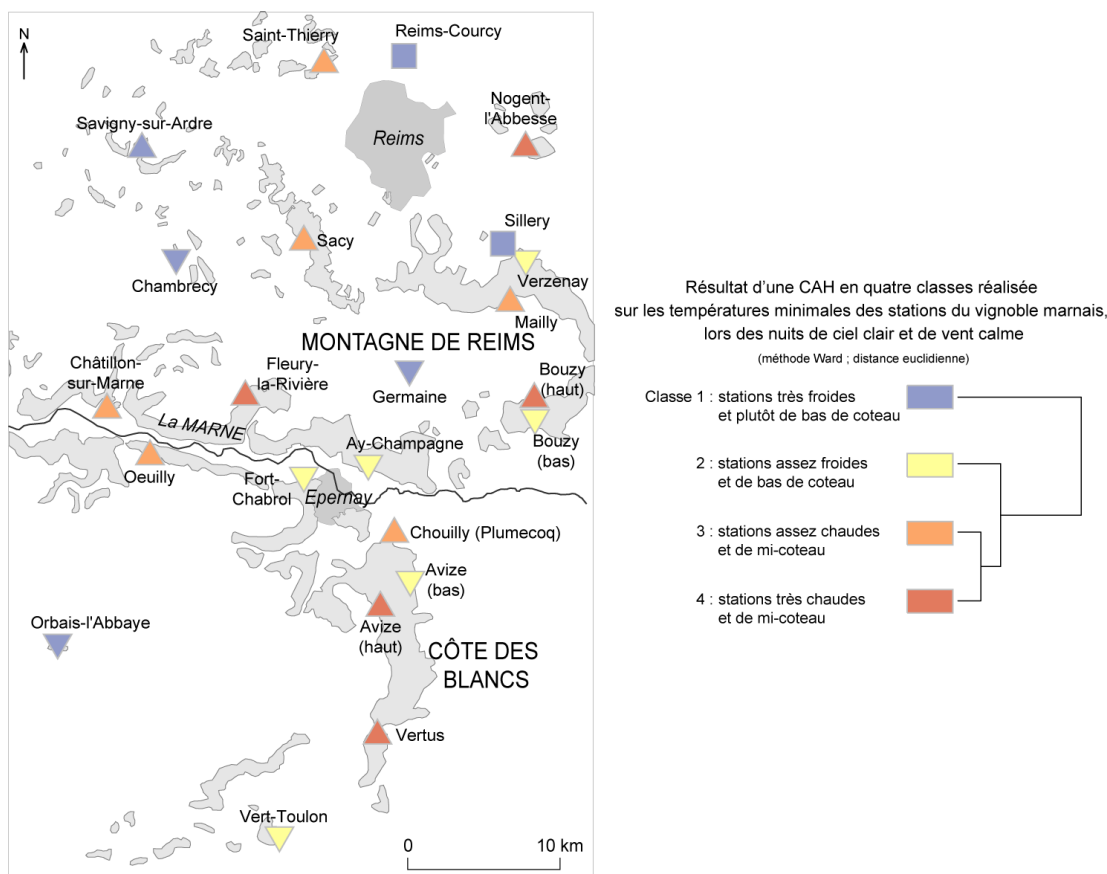
L'étude des profils nous a permis d'interpréter les regroupements de la CAH. Nous ne donnons ici que les moyennes, les minima et maxima des températures minimales par classe (Tableau VII.4), ainsi que la carte de la typologie des stations obtenue (Carte VIII.3).

Tableau VII.4 : Moyenne, minimum et maximum des quatre classes de la CAH réalisée sur les températures minimales des stations du vignoble marnais pour les nuits de ciel clair et de vent calme

	Moyenne	Minimum	Maximum
Classe 1	4.12	-5.20	13.10
2	6.51	-2.60	17.30
3	7.58	-1.80	18.00
4	8.84	0.20	17.80

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Cjvc, Météo France

La classe 1 se distingue très nettement des trois autres (cf. l'arbre de la Carte VII.3) et regroupe des stations dont les températures minimales sont très froides, en moyenne 4.12°C. Toutes, excepté Savigny-sur-Ardre, sont des stations de bas de coteau. Les postes de la classe 2, de bas de coteau, sont caractérisés par un profil proche du profil moyen. Leurs températures minimales peuvent être qualifiées d'assez froides dans l'ensemble. Les classes 3 et 4 réunissent des stations de mi-coteau assez chaudes et très chaudes. Les stations de la classe 2 et 4 sont localisées sur la Côte des Blancs et à l'est de la Montagne de Reims. Elles bénéficient d'une orientation plutôt est et se différencient par leur position sur le coteau.



Carte VII.3 : Typologie des stations du vignoble marnais en fonction de leurs températures minimales lors des nuits de ciel clair et de vent calme

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Cjvc, Météo France
 Les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.
 La définition des nuits de ciel clair et de vent calme est indiquée dans l'Encadré VII.1.

En somme, la CAH retenue nous a donc permis de classer les stations en fonction de leurs températures minimales lors des nuits de ciel clair et de vent calme, des plus froides aux plus chaudes. En outre, elle met en évidence l'importance de la position sur le coteau.

Conclusion du chapitre VII

À travers l'étude de l'évolution temporelle et de la répartition spatiale des températures minimales, nous avons pu caractériser les grands traits des températures minimales printanières dans le vignoble marnais.

Le printemps connaît ainsi un réchauffement important et relativement brutal vers la deuxième quinzaine d'avril, qui suit une période froide dangereuse car elle coïncide avec la reprise végétative de la vigne. En étudiant la variabilité des températures au cours d'une nuit quelconque, nous avons pu mettre en évidence que le minimum thermique se situait en général vers 4-5h, même si le refroidissement nocturne peut varier d'une nuit à une autre, d'une station à une autre. Par exemple, il est, de manière générale, plus accentué pour les bas de coteau.

L'étude de la variabilité spatiale n'a pas permis de mettre en évidence une structure spatiale nette. Même si les températures minimales, sur un espace assez restreint, témoignent d'une *histoire commune* (forte corrélation), la variabilité des comportements thermiques des stations, lors des nuits de ciel clair et de vent calme, semble davantage influencée par des facteurs locaux, telles la position sur le coteau et plus généralement la topographie.

Cette variabilité spatiale des températures, et plus généralement des paramètres climatiques, a des répercussions importantes sur le développement et la croissance des ceps de vigne, et donc indirectement sur la production et la qualité des récoltes. Il apparaît, par exemple, à travers notre recherche, que les bas de coteau ont des températures plutôt plus froides, donc un aléa gélif plus important, que les hauts de coteau. Cela étant, leurs températures plus froides peuvent aussi entraîner un retard végétatif protégeant la plante des gelées.

Chapitre VIII - LES ECOULEMENTS DE L'AIR, LES NUITS DE PRINTEMPS, DANS LE VIGNOBLE MARNAIS

Le vent, défini communément par la composante horizontale du déplacement d'une masse d'air par rapport au sol¹⁸⁴, découle d'un gradient de pression horizontal entraînant le déplacement de l'air depuis les hautes pressions vers les basses. Considéré par Ch. Péguy [1970] comme un « élément ingrat à observer » en raison de sa donnée double (direction et intensité) et de sa forte variabilité temporelle, il est associé à différents termes selon l'échelle adoptée. À l'échelle synoptique, le vent dit *général* résulte de la circulation générale liée au champ de pression. Par contre, à une échelle plus fine et lors de conditions atmosphériques stables, le terme *brise* caractérise un vent faible généré par un gradient de température¹⁸⁵ et soumis à un cycle diurne. Nous emploierons souvent le terme *écoulement de l'air* pour désigner les deux et distinguerons quand cela s'avérera nécessaire.

Plusieurs auteurs ont souligné l'importance des écoulements de l'air dans le refroidissement nocturne. À l'échelle synoptique, le *vent général* détermine la masse d'air et donc indirectement les températures, l'humidité ou encore la stabilité verticale [Wisdorff *et al.*, 1999]. Par exemple, les advections très froides venant du nord ou de l'est peuvent favoriser un aléa gélif printanier pour le vignoble champenois. À une échelle plus fine et lors des nuits de vent calme et de ciel clair, les écoulements de l'air froid par gravité, appelés ici *brises de pente*, conduisent à une accumulation de l'air froid dans les zones basses (bas de coteau, replat) [Fallot, 1992 ; Geiger, 1969 ; Roten, 1964]. Cette échelle locale étant imbriquée dans une échelle plus vaste, il peut y avoir des interactions entre le vent général et les brises de pente. Ainsi, G. Beltrando *et al.* [1992] ont montré que lorsque la brise de pente était perpendiculaire au vent général, les bas de coteau étaient d'autant plus froids (et inversement ; Figure II.7, p. 43). Ces quelques exemples suffisent à montrer que l'étude du vent est incontournable lorsqu'on s'intéresse au phénomène des gelées printanières.

L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu général du vent nocturne printanier dans le vignoble marnais. Cette étude repose sur les données de direction et de vitesse du vent mesurées pour 12 stations météorologiques : 11 installées dans ou à proximité du vignoble marnais et la station synoptique de Reims-Courcy (Carte IV.4, p. 84). Après une brève description du *vent général* à Reims-Courcy, nous reprendrons la même démarche que celle adoptée précédemment, en étudiant les variabilités spatiale et temporelle de la vitesse et de la direction du vent pour l'ensemble des stations marnaises. Enfin, nous vérifierons la

184. Certes, les mouvements de l'air ne sont pas exclusivement horizontaux. La composante verticale du déplacement de l'air, appelée la *turbulence*, est considérée comme négligeable aux échelles qui nous intéressent : « à une telle échelle [synoptique, mesures à 10 m] le vent au-dessus d'un terrain plat et horizontal est lui-même pratiquement horizontal à tous les niveaux voisins du sol, et c'est pourquoi dans les stations terrestres tout comme sur les navires on ne détermine couramment que la direction et la vitesse de la *composante horizontale* du vent » [Queney, 1974].

185. Il est courant de préciser l'origine de ces brises locales, qui est liée à des différences d'occupation du sol et/ou de relief : *brises de mer / de terre ; brises de ville / de campagne ; brises de vallée / de montagne*.

représentativité de la donnée à Reims-Courcy, à 0h UTC, donnée prise en compte dans l'initialisation du système de prévision des gelées printanières dans le vignoble marnais (adaptation statistique de Météo France, p. 71).

VIII.1 - Un premier aperçu à partir de la station synoptique de Reims-Courcy

La station synoptique de Reims-Courcy est installée en plaine, conformément aux conventions internationales dans un endroit dégagé pour s'affranchir des effets locaux. Les mesures de vent sont alors considérées représentatives à l'échelle synoptique. Nous avons donc souhaité présenter, dans un premier temps, un aperçu de ce *vent général*. Dans une première étape, nous revenons sur la correction de la donnée de vitesse.

VIII.1.1 - La correction de la vitesse du vent à Reims-Courcy

Comme nous l'avons indiqué dans la présentation des données (p. 89), les capteurs de vent pour la station de Reims-Courcy sont à 10 m du sol (par convention OMM) alors que ceux des autres stations sont à 2 m. Or la vitesse du vent augmente avec l'altitude (moins de frottements) ; quant à la direction, elle est plus variable. Cette dépendance entre l'altitude et la vitesse peut s'exprimer par une relation empirique et il est alors possible d'appliquer un coefficient correcteur. Nous avons retenu ici le coefficient de Baes, environ 0.7, pour estimer, à partir de la donnée à 10 m, la vitesse à 2 m. Étant donné que les vitesses sont exprimées sans décimales pour les autres stations (CIVC), nous avons arrondi les valeurs corrigées afin de faciliter les comparaisons ultérieures. L'arrondi gomme en partie la correction effectuée : la Figure VIII.1 montre que la modalité 2 m/s regroupe les *anciennes* vitesses 2 et 3 m/s, alors qu'aucune modification n'est apportée pour les vitesses 0 et 1 m/s (du fait de l'arrondi¹⁸⁶). Cela étant, cette correction est nécessaire pour toute analyse comparative ultérieure.

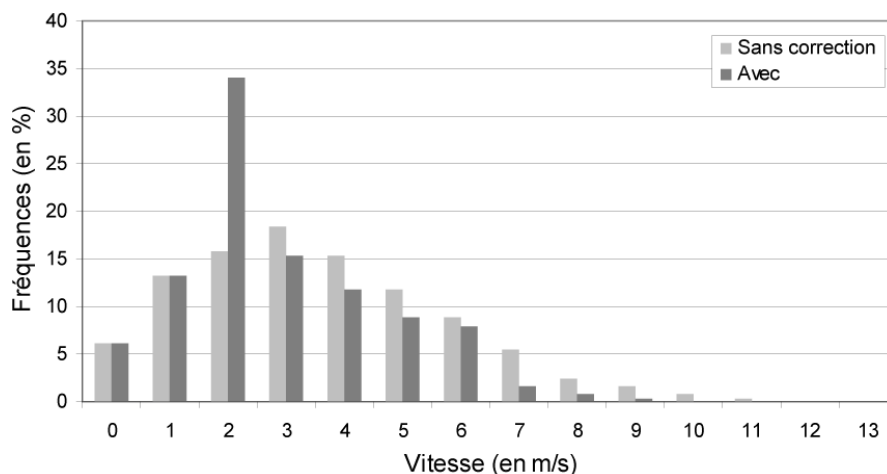


Figure VIII.1 : Fréquences des vitesses de vent à Reims-Courcy, avant et après correction (pour toutes les données trihoraires)

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Météo France

186. Par exemple, les *anciennes* vitesses de 1 m/s corrigées sont égales à 0.7, donc arrondies à 1 m/s : aucun changement.

VIII.1.2 - À l'échelle synoptique, un vent principalement de secteur sud-ouest

Dans l'Aperçu climatique sur la région Champagne-Ardenne [Météo France, n.d.], Météo France qualifie le climat de la région d'« océanique de transition ». Les types de temps associés (temps perturbés d'ouest pour les plus fréquents) amènent un flux d'ouest sur la région. Pour la station synoptique de Reims-Courcy, le vent vient préférentiellement du sud-ouest, comme le montre la rose des vents extraite de cet aperçu (Annexe A).

En se limitant aux données printanières (15/03-31/05 1998-2003) et nocturnes (21, 0, 3 et 6h UTC), la rose des vents (Figure VIII.2) a une forme relativement similaire à celle de Météo France réalisée à partir des moyennes 1961-1990 (Figure III.4, p. 63) : les vents du secteur sud-ouest sont assez fréquents et de vitesse relativement forte. Cette origine dominante du vent est confirmée, en toute logique, par la résultante vectorielle des directions, qui indique une direction de 243° (Figure VIII.2, Encadré VIII.1).

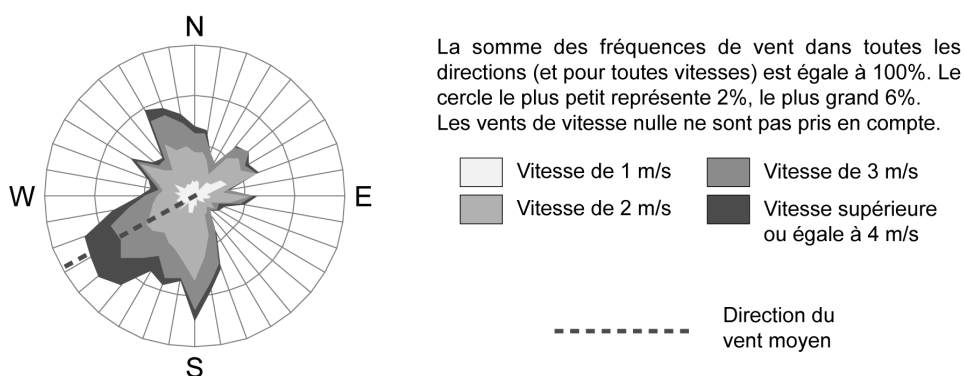


Figure VIII.2 : Rose des vents nocturnes printaniers à Reims-Courcy et direction du vent moyen

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; 21-6h Utc ; Météo France

Cependant, nous constatons quelques différences entre cette rose des vents nocturnes printaniers et celle proposée par Météo France sur l'ensemble de l'année (Figure III.4, p. 63). Par exemple, la direction 180° (sud) est sensiblement plus fréquente sur la rose des vents nocturnes printaniers, en particulier pour des vitesses modérées. Cette nuance peut s'expliquer par des différences quant aux types de temps (donc indirectement aux vents généraux) sur la période printanière par rapport à l'ensemble de l'année, voire sur les printemps sélectionnés (1998-2003). En réalité, cette *forte* fréquence ne ressort pas des fréquences de direction sur l'ensemble des heures de la période étudiée. Aussi cette direction sud, associée à des vitesses relativement faibles, est caractéristique de la nuit.

Encadré VIII.1 : Comment résumer le vent ?

Pour les données de vitesse, variables quantitatives, il est possible, pareillement aux températures, de calculer moyenne et médiane (les paramètres de dispersion usuels également). Par contre, les mêmes calculs ne sont pas directement possibles sur les directions, car il s'agit de données angulaires. Par exemple, la moyenne entre deux vents du nord, 10° et 360°, serait de 185° soit la direction opposée.

- Trois solutions pour résumer le vent sont possibles :
- le tableau des fréquences selon des grandes classes de vent (N, S, etc.), certes simple et classique, mais assez peu synthétique ;
 - la représentation des fréquences de directions sous la forme d'une rose des vents (selon la vitesse ou non) ;
 - le calcul du vent vectoriel moyen résultant.

Cette dernière solution consiste à considérer le vent comme un vecteur et donc à transformer chacune des données angulaires en deux composantes : la composante *u* selon la longitude soit le vent *zonal* et la composante *v* selon la *latitude*, le vent *méridien* (Figure VIII.3). Ces deux composantes peuvent ensuite être pondérées ou non selon la vitesse du vent.

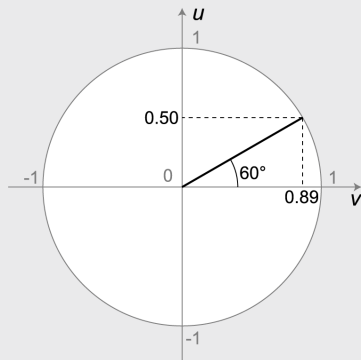


Figure VIII.3 : Schéma de la décomposition de la direction du vent selon la latitude (*u*) et la longitude (*v*) (pour un vent de vitesse unité)

Une fois cette transformation effectuée, il est possible de calculer une moyenne de plusieurs données (sur une nuit, pour une station, etc.) et ainsi déterminer un *vent moyen* (dont les coordonnées seront les moyennes de *u* et *v*). Sa direction est celle de la résultante vectorielle des différentes mesures prises en compte (Figure VIII.4). Sa vitesse est le module de cette

résultante ramené au nombre d'observations prises en compte.

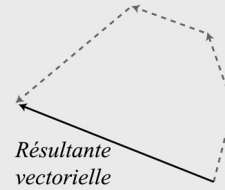


Figure VIII.4 : Schéma de la résultante vectorielle

Par ailleurs, d'autres méthodes statistiques, telles que les analyses de corrélation ou les Classifications Ascendantes Hiérarchiques, peuvent également être mises en œuvre grâce à cette décomposition de la direction du vent.

Ce *vent moyen* résume la distribution des vents, mais il peut parfois s'avérer peu pertinent. Par exemple, la direction du vent nocturne moyen pour la station de Vertus indique environ 330° (nord-nord-ouest). Or, en comparant ce résultat avec la distribution des directions représentée par une rose des vents (Figure VIII.5), on s'aperçoit que la direction du vent moyen n'est pas la plus adéquate pour résumer l'information, en raison de la bimodalité de la distribution (principalement le vent vient du nord-nord-est et du sud-sud-ouest).

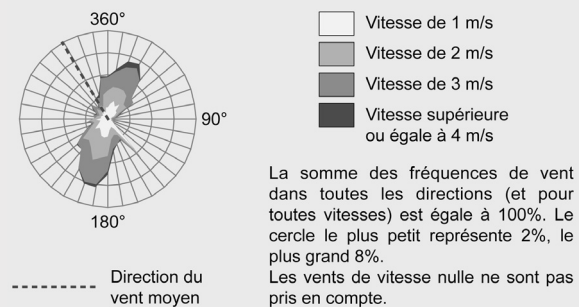


Figure VIII.5 : Distribution des directions de vent à Vertus (sous la forme d'une rose des vents) et direction du vent moyen

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; 21-6h URC ; CIVC

En somme, le calcul du vent moyen s'avère très utile, mais il ne faut pas négliger l'apport des méthodes plus courantes et plus simples de calcul des fréquences selon les directions.

VIII.1.3 - Variabilité du vent général au cours du printemps

Nous nous sommes demandé s'il existait une évolution de la direction du vent au cours des printemps sélectionnés. Le Tableau VIII.1 répertorie les fréquences des quatre grandes directions du vent et des vents nuls pour chaque printemps subdivisé ensuite par quinzaine. Pour l'ensemble des printemps, on constate à nouveau l'importance des vents de sud et d'ouest (27 et 26%, soit plus d'une nuit sur deux)¹⁸⁷.

187. Avec une classification des vents plus détaillée (huit classes + vent nul), les vents les plus fréquents sont sud (17%), sud-ouest (16%), ouest (12%) et nord (13%).

Même si des récurrences dans l'origine des vents au cours du printemps et selon les années apparaissent, l'alternance quotidienne des types de temps sur la France fait fortement varier ces pourcentages : la variabilité des directions de vent apparaît donc très importante au cours du printemps et selon les années.

Tableau VIII.1 : Fréquences (en%) des vents nocturnes printaniers à Reims-Courcy, selon quatre grandes classes de direction (E, W, S, N) et une de vent nul

Annee	Quinzaine	Nord	Est	Sud	Ouest	Vent nul
1998	Du 15/03 au 31/03	29%	10%	24%	24%	13%
	Du 01/04 au 15/04	7%	2%	68%	23%	0%
	Du 16/04 au 30/04	8%	20%	42%	22%	8%
	Du 01/05 au 15/05	30%	23%	12%	18%	17%
	Du 16/05 au 31/05	31%	19%	14%	19%	17%
1999	Du 15/03 au 31/03	22%	13%	21%	29%	15%
	Du 01/04 au 15/04	7%	12%	25%	52%	5%
	Du 16/04 au 30/04	17%	13%	42%	23%	5%
	Du 01/05 au 15/05	22%	17%	18%	37%	7%
	Du 16/05 au 31/05	19%	28%	20%	28%	5%
2000	Du 15/03 au 31/03	39%	9%	22%	29%	1%
	Du 01/04 au 15/04	27%	20%	40%	12%	2%
	Du 16/04 au 30/04	8%	28%	42%	15%	7%
	Du 01/05 au 15/05	43%	22%	8%	8%	18%
	Du 16/05 au 31/05	5%	3%	55%	36%	2%
2001	Du 15/03 au 31/03	6%	16%	43%	31%	4%
	Du 01/04 au 15/04	28%	3%	22%	40%	7%
	Du 16/04 au 30/04	20%	7%	43%	27%	3%
	Du 01/05 au 15/05	40%	15%	7%	15%	23%
	Du 16/05 au 31/05	25%	5%	13%	27%	31%
2002	Du 15/03 au 31/03	16%	15%	25%	26%	18%
	Du 01/04 au 15/04	37%	37%	7%	13%	7%
	Du 16/04 au 30/04	7%	3%	25%	47%	18%
	Du 01/05 au 15/05	37%	8%	25%	27%	3%
	Du 16/05 au 31/05	6%	13%	48%	25%	8%
2003	Du 15/03 au 31/03	21%	40%	4%	10%	25%
	Du 01/04 au 15/04	47%	23%	10%	8%	12%
	Du 16/04 au 30/04	18%	27%	35%	15%	5%
	Du 01/05 au 15/05	20%	2%	23%	43%	12%
	Du 16/05 au 31/05	19%	8%	19%	44%	11%
Tous les printemps	Du 15/03 au 31/03	22%	17%	23%	25%	13%
	Du 01/04 au 15/04	25%	16%	29%	25%	5%
	Du 16/04 au 30/04	13%	16%	38%	25%	8%
	Du 01/05 au 15/05	32%	14%	16%	25%	13%
	Du 16/05 au 31/05	17%	13%	28%	30%	12%
L'ensemble		22%	15%	27%	26%	10%

Le total de chaque ligne = 100%

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; 21, 0, 3 et 6h Utc ; Météo France
En gris, les pourcentages supérieurs à l'équirépartition des vents selon les cinq classes, pour chaque période de temps, soit 20%.

VIII.2 - Le vent nocturne printanier dans le vignoble marnais

Après cet aperçu du *vent général* à partir de la station synoptique de Reims-Courcy, nous nous intéressons, à présent, aux variabilités spatiale et temporelle du vent, à l'échelle de l'ensemble du vignoble marnais. Les 12 stations utilisées (dont Reims-Courcy) sont localisées sur la Carte IV.4 (p. 84).

VIII.2.1 - Le vent nocturne dans le vignoble marnais : un vent faible

En représentant l'évolution moyenne horaire de la vitesse du vent (Figure VIII.6), on remarque très nettement que le vent nocturne est faible. Pour toutes les stations (pas seulement celles prises comme exemple sur la Figure VIII.6), le profil moyen de la vitesse est similaire : la vitesse du vent est faible et assez peu variable pendant la nuit avec un (petit) minimum vers 5h (UTC), elle remonte de manière importante après le lever du soleil pour atteindre son maximum en milieu de journée, puis elle baisse rapidement jusqu'à 19h (vers le coucher du soleil). Cette variation diurne de la vitesse du vent, assez régulière, est liée à celle des températures (Figure VII.4, p. 136), l'échauffement solaire renforçant les turbulences pendant la journée.

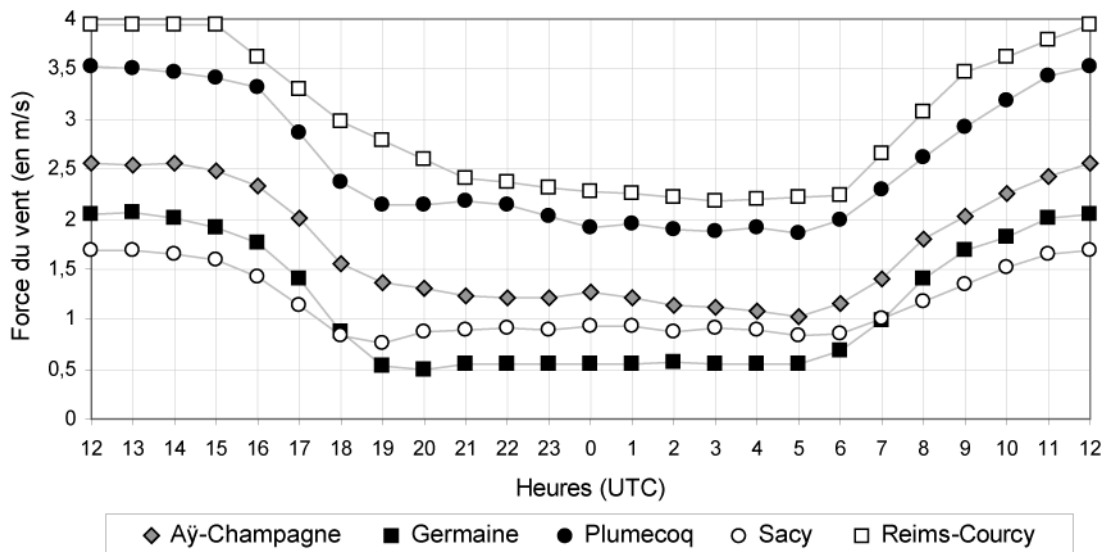


Figure VIII.6 : Évolution moyenne horaire de la vitesse du vent au cours d'une journée, pour quelques stations

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

Cette diminution de la vitesse du vent observée au cours de la nuit se manifeste également dans la fréquence importante des absences de vent (vitesse nulle), la nuit dans le vignoble marnais. La Figure VIII.7 représente, pour l'ensemble des stations, l'histogramme des fréquences de vitesses de vent mesurées (ou estimées pour Reims-Courcy) à 2 m. Les vents nuls sont les plus fréquents : plus de 40% des mesures de vent la nuit sont caractérisées par une absence de vent. L'examen de cette figure fait apparaître une distribution des vitesses, qui décroît de manière exponentielle¹⁸⁸. Outre l'importance des vents nuls, les faibles vents

188. Très souvent les distributions de la vitesse du vent sont comparées à une distribution théorique de probabilités : la distribution de Weibull.

sont fortement représentés également : plus des deux tiers des mesures sont inférieures ou égales à 1 m/s, plus des quatre cinquièmes à 2 m/s. L'importance de ces vents faibles, voire nuls, explique la faible valeur de la vitesse nocturne moyenne pour l'ensemble des stations, 1.1 m/s seulement. Ces résultats sont liés principalement à la hauteur des capteurs à 2 m/s (correction pour Reims-Courcy) et à un environnement non dégagé autour de la majorité des stations.

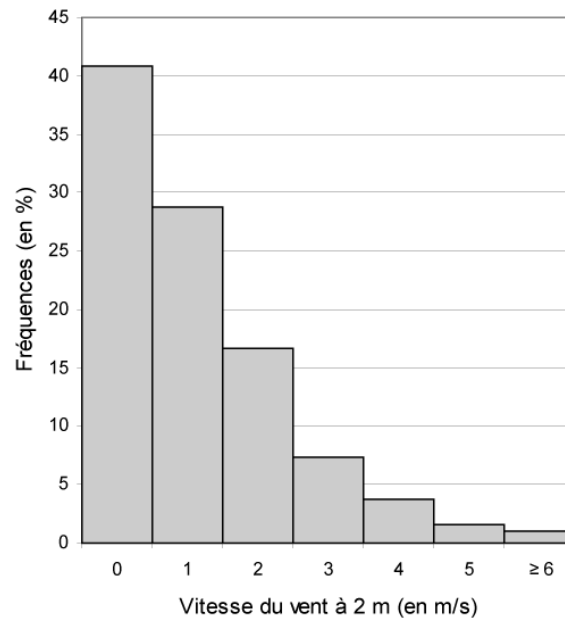
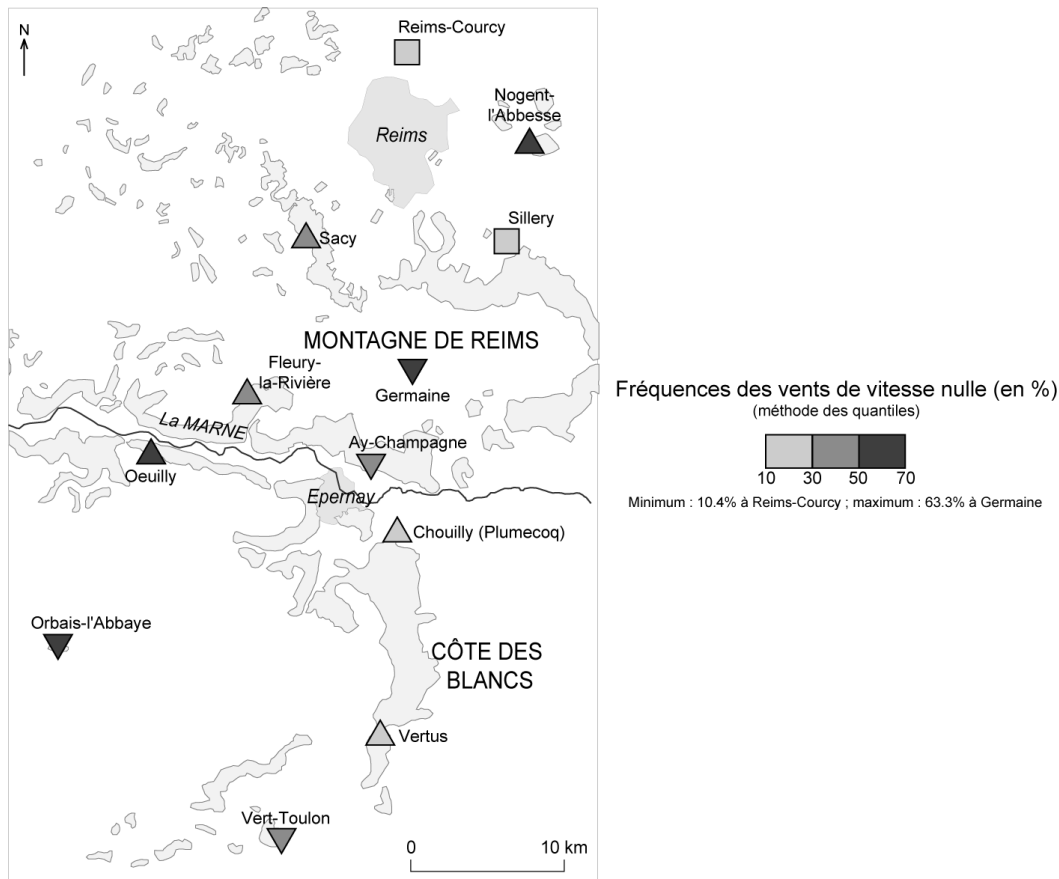


Figure VIII.7 : Fréquences des vitesses de vent à 2 m, la nuit, pour toutes les stations retenues

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; 21-6h Utc ; Civr, Météo France

Afin de mettre en évidence les nuances entre les stations, nous avons cartographié la part des vents nuls nocturnes (de 21 à 6h UTC ; données trihoraires pour Reims-Courcy et horaires pour les autres stations ; Carte VIII.1). Les deux stations de plaine, Reims-Courcy (10.4%) et Sillery (27.8%), ainsi que les stations de la Côte des Blancs, Plumecoq (19.2%) et Vertus (20.5%), enregistrent moins de vents nuls par rapport aux autres stations. Leur localisation dans des sites assez dégagés explique cette faible importance relative des vents de vitesse nulle. À l'inverse, les stations situées plus à l'ouest, dans des sites plus abrités, ont une forte prédominance de vents nuls (plus de la moitié des données nocturnes) : Œuilly, Orbais-l'Abbaye, Nogent-l'Abesse et Germaine. La topographie autour de la station joue donc un rôle important. Par exemple, la situation assez particulière de Nogent-l'Abesse sur la pente d'une butte semble l'abriter des vents assez forts et renforcer ainsi la fréquence des vents nuls.

Cette fréquence des vents nuls observée est primordiale si on s'intéresse aux phénomènes des gelées. En effet, nous avons déjà rappelé que, lorsque le brassage de l'air est *quasi* absent, les basses couches (à proximité du sol), celles où sont situées les vignes, se refroidissent d'autant plus. De plus, si le terrain est en pente, cet air froid et dense va glisser, par gravité, le long de la pente et s'accumuler en bas des versants ou au niveau d'un quelconque replat.



Carte VIII.1 : Fréquences des vents nuls nocturnes par station

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; 21-6h UTC ; CIVC, Météo France
 Les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

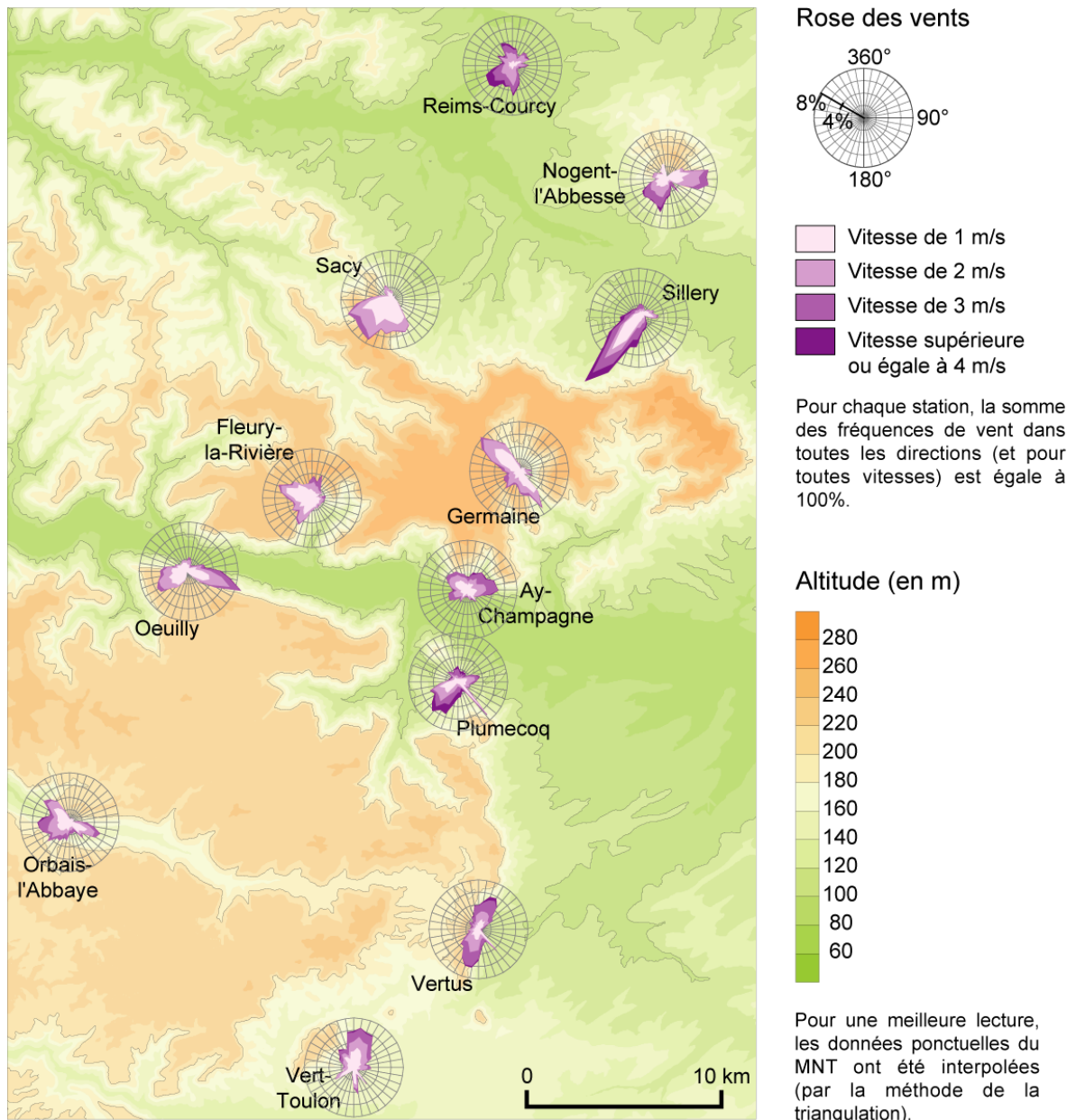
VIII.2.2 - Le champ de vent dans le vignoble marnais fortement lié au relief

Nous avons calculé, par station et pour l'ensemble des nuits printanières, les fréquences des directions de vent selon plusieurs classes de vitesse, ce qui nous permet de construire des roses des vents stationnelles. La Carte VIII.2 représente la répartition spatiale de ces roses des vents, ainsi que le relief de la zone d'étude (à partir du MNE), superposé pour faciliter l'interprétation.

En premier lieu, on observe très distinctement une forte variabilité spatiale des formes des roses des vents : selon les stations, les flux dominants sont unidirectionnels (par exemple sud pour Sillery), bidirectionnels (nord-sud pour Vertus) ou peu marqués (plus omnidirectionnels)¹⁸⁹. On retrouve pour les stations situées à la marge orientale de la cuesta d'Île-de-France des vents forts plus fréquents (Reims-Courcy, Sillery, Vertus, ...). Quant aux directions de vent, elles semblent être liées à la topographie. Ainsi, avec la carte du relief superposée, on s'aperçoit que la forme des roses suit les isolignes comme à Vertus le long de la Côte des Blancs et Orbais où les vents sont canalisés par la vallée. On observe

189. Dans la description de l'analyse critique des données météorologiques (p. 96), nous avons souligné la fréquence de la donnée 140° lorsque les vents sont faibles (blocage de la girouette). Même si des corrections ont été apportées, cette direction ressort *a priori* de manière trop importante pour certaines stations : en particulier Plumecoq, un peu moins Vertus et d'autres.

également des brises « de pente », parfois assez forts, par exemple pour Sacy et Fleury-la-Rivière.



Carte VIII.2 : Distribution des directions des vents nocturnes, sous forme de roses, dans le vignoble marnais

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; 21-6h Utc ; Cvc, Météo France ; BD Alti, IGN

La topographie a donc une influence certaine sur la distribution des données de vent :

- les vents sont plus forts pour les sites dégagés ;
- les écoulements peuvent être canalisés, notamment par les vallées ;
- les vents s'écoulent le long des coteaux et sont alors appelés brises « de pente ».

VIII.2.3 - La typologie des stations selon leurs fréquences directionnelles de vent

Sur la Carte VIII.2, on peut observer certaines ressemblances entre les formes des roses des vents, donc entre les stations (par exemple, Nogent-l'Abesse et Œuilly). Afin de s'affranchir de cette information seulement visuelle et dans l'optique de construire une typologie des stations, nous avons réalisé une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH ; distance euclidienne et méthode Ward ; Annexe E.4) à partir des fréquences des directions de vent (10°, 20°, etc.) et des vents nuls, pour chaque station. À partir de l'histogramme des indices de niveaux (Figure VIII.8), nous avons retenu une partition en quatre classes, avec une qualité de représentation de 53%.

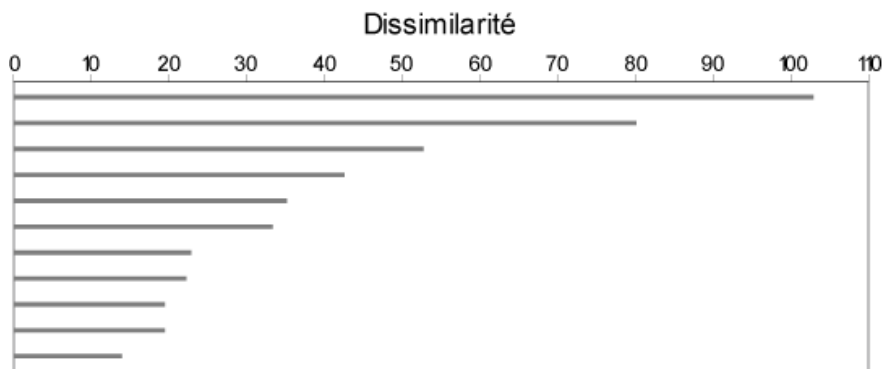
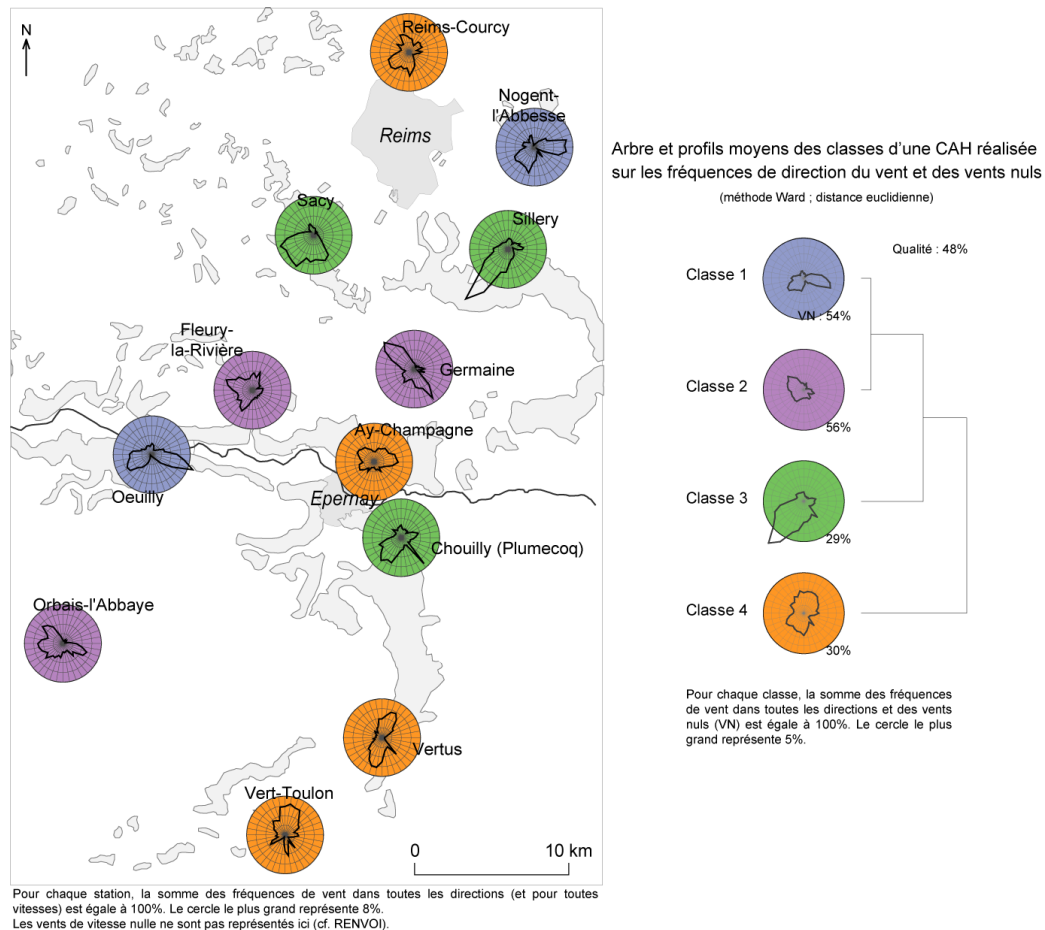


Figure VIII.8 : Histogramme des indices de niveaux de la CAH réalisée sur les fréquences des directions du vent et des vents nuls pour les stations du vignoble marnais

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

D'après les résultats de la CAH, les deux premières stations qui se ressemblent le plus sont Fleury-la-Rivière et Orbais-l'Abbaye : les vents y viennent principalement du secteur ouest. Le second regroupement réunit Nogent-l'Abesse et Œuilly, dont la forme des roses décèle une association est et sud-ouest et qui constituent la classe finale 1 (Carte VIII.3). La classe 2 regroupe des stations dont le vent vient très souvent du secteur ouest (particulièrement du nord-ouest) et plus rarement du sud-est : Fleury-la-Rivière, Germaine et Orbais-l'Abbaye. Ces deux classes se rejoignent assez rapidement dans l'arbre, du fait de l'importance des vents nuls (respectivement 54 et 56%). La classe 3 est caractérisée par des stations dont les vents sont plus forts en moyenne et proviennent du quart sud-ouest (Carte VIII.3). Enfin, la dernière classe réunit des stations dont les vents sont plus omnidirectionnels et plutôt d'origine nord à nord-est et sud à sud-ouest.



Carte VIII.3 : Typologie des stations du vignoble marnais à partir d'une CAH réalisée sur les fréquences des directions du vent et des vents nuls

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Cjvc, Météo France

VIII.2.4 - La dispersion, par station, de la donnée vent

Une information supplémentaire peut être lue à partir des roses des vents (Carte VIII.2) : la distribution des données du vent. Par exemple, pour la station de Sillery, le vent vient presque exclusivement du sud-ouest, alors que pour Aÿ-Champagne, aucune direction ne prédomine fortement. Souhaitant dépasser cette simple observation, nous avons cherché dans la littérature des méthodes de mesure de la dispersion adaptées aux données angulaires que sont les directions de vent. Deux méthodes, décrites plus précisément dans l'Encadré VIII.2, ont été retenues ici : l'une reposant sur la somme des variances selon les deux composantes nord-sud et est-ouest [Hanson *et al.*, 1992] ; l'autre sur un coefficient de stabilité calculé à partir de la comparaison de la moyenne des modules des vecteurs de vent au module de la résultante vectorielle [Wisdorff *et al.*, 1999].

Les deux méthodes évaluant la dispersion des données de vent ont été appliquées ici par station. L'objectif est de préciser l'information précédente sur les flux dominants par station (à partir de la réalisation des roses des vents) en ajoutant une information sur la dispersion de ces données. En d'autres termes, on cherche à savoir si la direction du vent fluctue de manière importante ou non pour chacune des stations. La Carte VIII.4 représente les résultats conjoints de ces deux mesures de la dispersion : elle montre que les conclusions peuvent différer selon la méthode utilisée. En effet, les répartitions ne sont pas similaires.

Encadré VIII.2 : Deux méthodes de calcul de la dispersion de la direction du vent

En s'intéressant à la dispersion de la direction du vent, on cherche à savoir si, pour certaines stations ou certaines nuits, le vent est préférentiellement dans une direction ou à l'inverse omnidirectionnel (forte dispersion). Toutefois, évaluer la dispersion de la donnée *vent* n'est pas simple compte tenu du caractère angulaire des données de direction.

Dans la littérature, nous avons trouvé deux solutions possibles :

- Somme des variances des composantes nord-sud et est-ouest

Cette méthode, mentionnée dans Hanson *et al.* [1992] consiste à sommer les variances des deux composantes horizontales nord-sud et est-ouest (Encadré VIII.1).

$$\sigma^2 = \sigma_{N-S}^2 + \sigma_{E-W}^2$$

Plus la somme est élevée, plus la dispersion des directions de vent est importante, et inversement.

- Le paramètre de stabilité du vent

Afin de vérifier la représentativité de la résultante vectorielle quotidienne du vent, Wisdorff *et al.* [1999] ont défini une variable (*STAB*) relative à la stabilité de la direction du vent au cours d'une journée :

$$STAB = 100.FFR / FFM$$

où *FFR* est le module de la résultante vectorielle des données de vent et *FFM* la somme arithmétique des différents modules.

Par exemple, lorsque les vents sont orientés globalement dans la même direction (Figure VIII.9 a), le module de la résultante (*FFR*) est presque égal à la somme des différents modules (*FFM*), le paramètre *STAB* est proche de 100. À l'inverse, si la répartition des vents est tous azimuts (Figure VIII.9 b), le paramètre *STAB* avoisine 0.

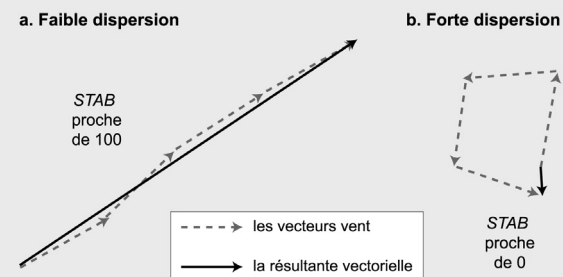
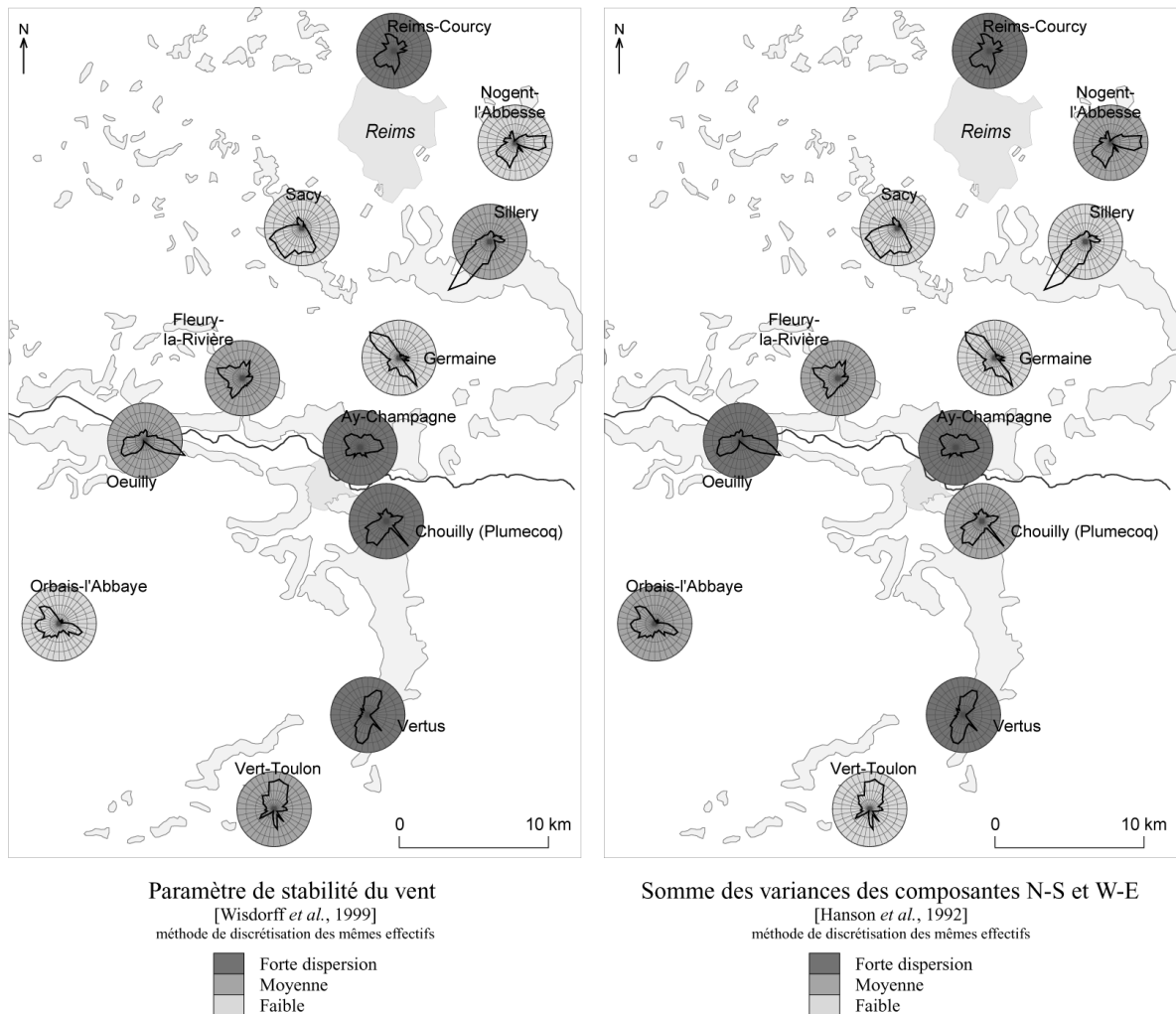


Figure VIII.9 : Schéma de la dispersion selon le coefficient *STAB* [Wisdorff *et al.*, 1999]

Dans l'étude de Wisdorff *et al.* [1999], ce paramètre est utilisé pour évaluer la stabilité au cours d'une journée. Pour notre part, nous l'utilisons pour les données nocturnes. Nous reprenons également cette méthode pour caractériser la dispersion des données de direction de vent par station.

Pour certaines stations, telles que Aÿ-Champagne et Sacy, les mesures corroborent les observations : respectivement forte et faible dispersion. Cependant, des différences substantielles apparaissent entre les résultats de ces deux méthodes et posent alors le problème du choix de la plus pertinente. Par exemple, pour le poste de Sillery, la rose des vents indique presque exclusivement des vents venant du sud-ouest. La méthode des variances indique une faible dispersion, ce qui n'est pas le cas pour le paramètre de stabilité (dispersion moyenne). Parfois les deux calculs amènent à des conclusions inattendues. Par exemple, pour Vertus, dont les vents dominants sont presque exclusivement nord et sud, le paramètre *STAB* et la somme des variances indiquent une forte dispersion. Ce résultat peut s'expliquer par l'opposition de ces deux directions. On se confronte alors aux problèmes liés aux distributions bimodales, renforcés ici, *a priori*, par la nature angulaire des données. En conclusion, ces deux mesures de la dispersion du vent donnent deux informations différentes. Elles incitent à être vigilant dans l'interprétation et soulignent la difficulté d'étudier des données angulaires.



Carte VIII.4 : La dispersion des données du vent nocturne printanier pour les stations du vignoble marnais¹⁹⁰

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; 21-6h Utc ; C1vc, Météo France

VIII.2.5 - Évolution de la direction du vent au cours de la nuit

Nous avons vu précédemment que la vitesse du vent était, en moyenne, stable et faible au cours de la nuit (après une diminution au coucher du soleil et avant une augmentation au lever). On s'intéresse à présent à la variabilité de la direction du vent au cours de la nuit.

Il est largement admis que la variation diurne de la direction du vent est souvent peu sensible [Rouch, 1948], excepté dans le cas des brises de terre et de mer et celui des brises de montagne et de vallée, lors des conditions de temps anticycloniques (avec un vent synoptique faible). En effet, aux moments du lever et du coucher du soleil, la direction de ces brises thermiques s'inverse : la transition entre les deux brises est appelée la « renverse » [Carrega, 1994 ; Fallot, 1992]. Dans le vignoble marnais, plusieurs travaux [Bridier, 2001 ; Bridier *et al.*, 1995 ; Sarmir, 1995] ont montré l'existence de brises thermiques, les *brises de pente*. Toutefois, compte tenu du relief peu accentué, ces brises de pentes n'ont pas l'ampleur des brises de montagne et de vallée.

190. Il est important de préciser à nouveau que les données de vent utilisées pour cette étude de la dispersion ont été exprimées selon les deux composantes *u* et *v* (Encadré VIII.1, p. 154). Les roses des vents construites à partir des fréquences selon les directions sont rappelées ici pour faciliter l'interprétation.

Mise en évidence du système diurne des brises thermiques

Dans sa thèse sur l'analyse spatio-temporelle des champs de vents (et de précipitations) en milieu urbain, C. Poirier [2000] a montré qu'on pouvait observer des différences significatives dans la forme des roses des vents entre le jour (en prenant les données de 9 à 15h) et la nuit (21-3h¹⁹¹) (pour des vents faibles : entre 1 et 3 m/s). Appliquée aux données du vignoble marnais, cette méthode comparative n'a pas donné de différences marquées entre le jour et la nuit.

En revanche, la représentation de l'évolution horaire, par station¹⁹², des directions des résultantes vectorielles sur l'ensemble des printemps (Encadré VIII.1, p. 154) donne des résultats intéressants. En effet, en restreignant notre étude aux vents faibles, de vitesse comprise entre 1 et 2 m/s, nous avons mis en évidence une renverse des brises de pentes.

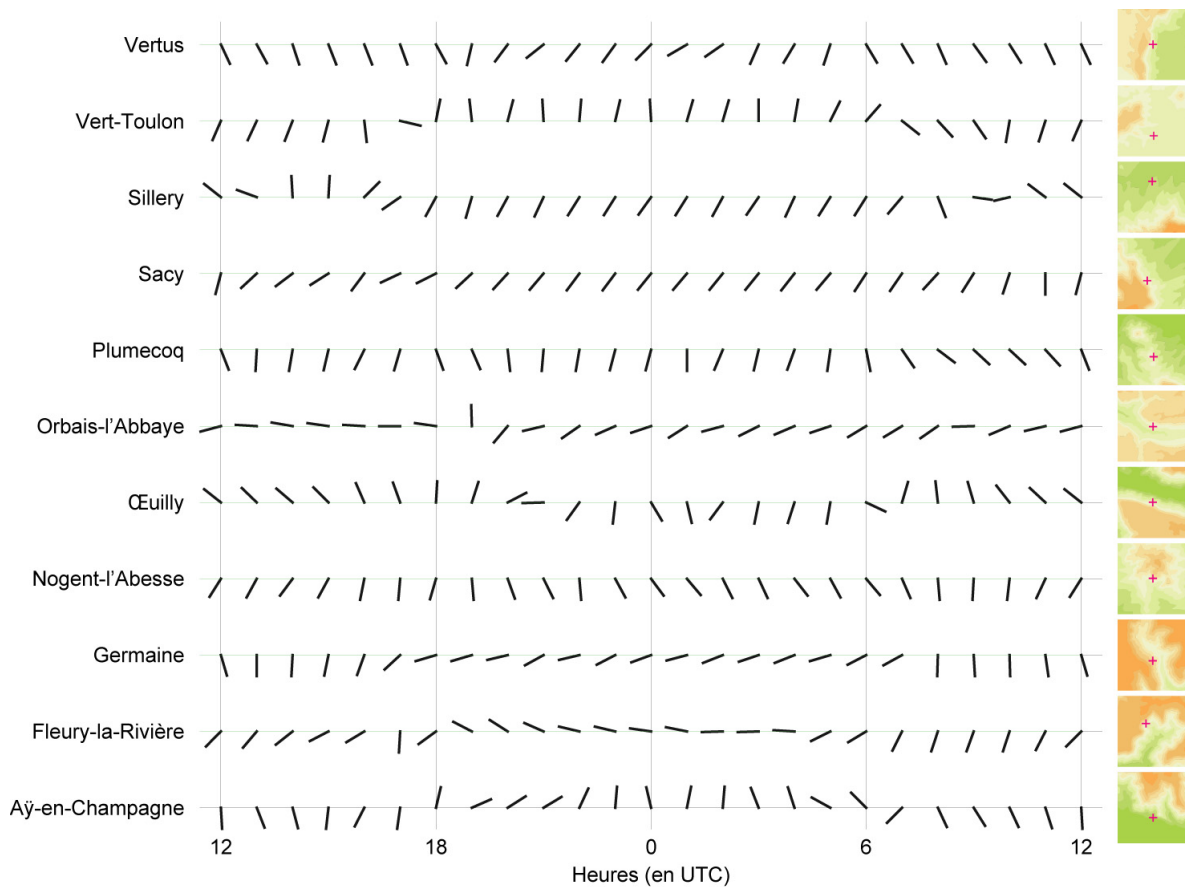


Figure VIII.10 : Direction des résultantes vectorielles horaires par station, pour les vents faibles

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

À droite, des cadres rappelant le relief autour des stations ont été ajoutés pour faciliter l'interprétation.

La Figure VIII.10 montre cette évolution moyenne horaire de la direction du vent par station. À droite, nous rappelons le relief autour de la station (5 km x 5 km) pour faciliter l'interprétation des directions obtenues¹⁹³. Pour la majorité des stations (excepté Sacy, Plumecoq et Nogent-l'Abesse¹⁹⁴), un changement de direction, plus ou moins important, apparaît entre le jour et la nuit. Ainsi, lorsque les vents sont faibles (1-2 m/s), les directions

191. Les tranches horaires ont été choisies afin d'écartier l'influence de la renverse [Poirier, 2000].

192. La station de Reims-Courcy, située en plaine et dans un site dégagé, n'a pas été retenue pour cette étude.

193. Le relief de l'ensemble de la zone d'étude est présenté sur la Carte VIII.2, p. 159.

194. La localisation particulière de cette station sur le versant sud d'un promontoire peut expliquer la direction sud de la résultante vectorielle, quelle que soit l'heure.

des résultantes vectorielles montrent, assez bien, le cycle diurne des brises de pentes, surtout pour les stations de Aÿ-Champagne, Fleury-la-Rivière, Germaine, Œuilly, Sillery. En effet, la nuit, la direction *moyenne* des vents faibles est celle de la pente (vents catabatiques) et inversement le jour. Ces brises nocturnes, entraînant l'air froid en bas des coteaux, ont un rôle important dans la variabilité spatiale de l'aléa gélif.

Variabilité du vent au cours de la nuit

Afin d'évaluer quantitativement la variabilité de la direction du vent au cours de la nuit, nous avons utilisé le paramètre de stabilité proposé par Wisdorff *et al.* [1999] et décrit dans l'Encadré VIII.2. Calculé à partir du rapport entre la moyenne des modules des vecteurs de vent et le module de la résultante vectorielle, ce paramètre (*STAB*) varie de 0% (dispersion maximale) à 100% (stabilité). Il a été évalué par station et pour chaque nuit. Il apparaît ainsi que la moyenne de ce paramètre, calculé par nuit, est relativement élevée pour chacune des stations : elle varie de 88% pour Sillery et Reims-Courcy, stations de plaine où la topographie joue un rôle plus mineur, à 96% pour Nogent-l'Abesse, station abritée par un promontoire. La moyenne des *STAB* nocturnes (sur les stations) est de 92%, la médiane de 93%, ce qui montre une très forte stabilité relative des directions de vent lors des nuits printanières.

Cependant, il peut arriver pour une station et une date donnée que les directions varient fortement d'une heure à l'autre. À titre d'exemple, nous avons sélectionné la nuit du 27 au 28 mars 1999. Le coefficient de stabilité le plus faible est pour la station Vertus (23%). Les vecteurs vent (Figure VIII.11) pour ce poste témoignent d'une forte variation de leur direction (vents de secteur nord, sud, est et ouest). Les stations Plumecoq et Sillery connaissent également, mais dans une moindre mesure, une variabilité des données de vent (avec un coefficient respectivement de 61 et 62%). Par contre, pour toutes les autres stations, les vents venaient, au cours de cette nuit, presque toujours de la même direction (par exemple, nord pour Aÿ-Champagne et Vert-Toulon ; nord-ouest pour Sacy, Germaine ou Reims-Courcy) ou étaient très faibles (Œuilly, Nogent-l'Abesse, etc.). Malgré cet exemple choisi volontairement comme atypique, retenons qu'il y a peu de fluctuations du vent lors de la nuit comme le montre le calcul du coefficient de stabilité, cela étant lié, en partie, à une turbulence faible. Notons que ce coefficient peut parfois s'avérer fragile. Par exemple, le 30/04/1999, la station de Sillery enregistre, de 21 à 6h UTC, des vents nuls, excepté deux vents très faibles (1 m/s) mais de directions opposées : 50° à 22h et 230° à 4h. Le coefficient indique alors une très forte variabilité, alors que le vent était sensiblement le même au cours de la nuit, c'est-à-dire faible.

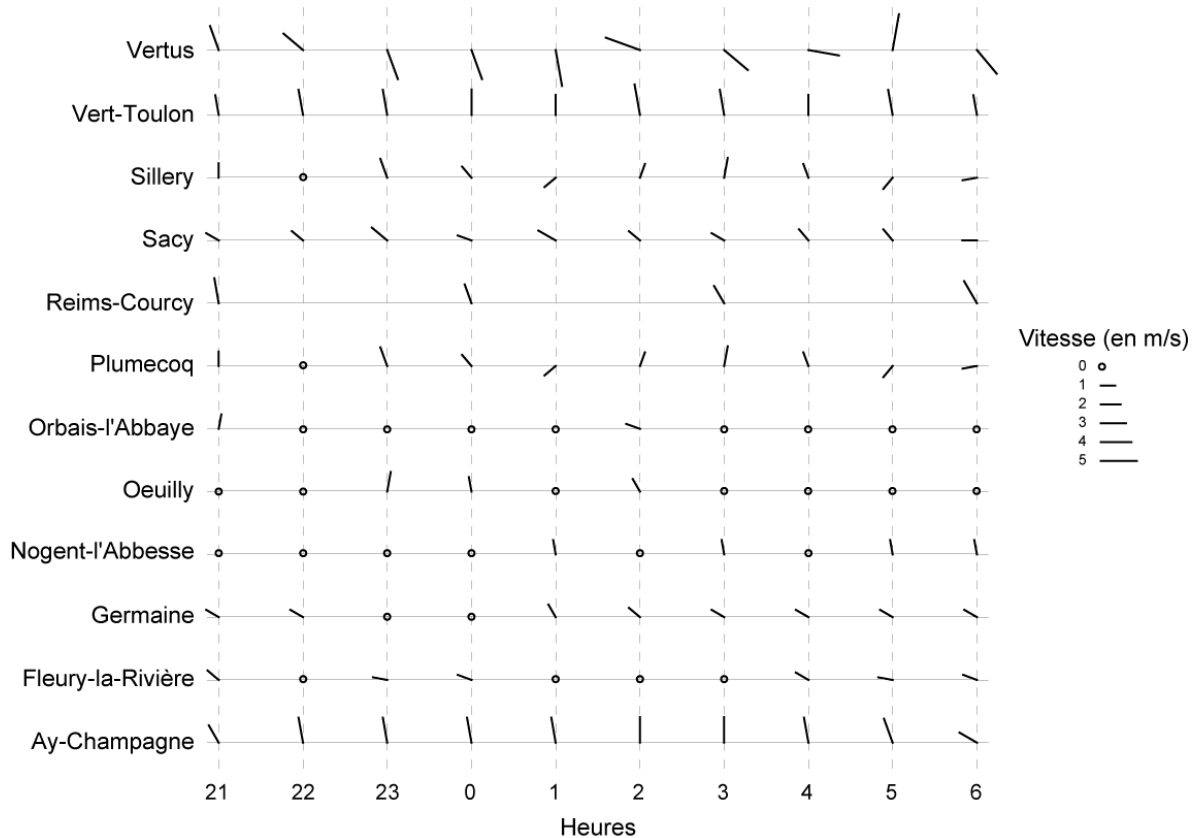


Figure VIII.11 : Vecteurs vent pour la nuit du 27 au 28 mars 1999 selon les stations et les heures

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; 21-6h UTC ; CVC, Météo France

VIII.3 - Représentativité de la donnée vent à Reims-Courcy

Dans le système de prévision des gelées de printemps de Météo France (p. 70), les données de vent à Reims et à 0h (UTC), ainsi que les observations de nébulosité, sont utilisées dans l'initialisation du modèle. Nous nous sommes interrogés sur la pertinence de cette donnée *vent*, dans le temps (0h par rapport à l'ensemble de la nuit) et dans l'espace (par rapport aux autres stations).

VIII.3.1 - Pertinence dans le temps

Nous avons montré précédemment que les données du vent étaient assez stables au cours de la nuit¹⁹⁵. Même si la situation de Reims-Courcy en plaine (ainsi que la hauteur de la girouette à 10 m) augmente légèrement la variabilité du vent, le paramètre de stabilité calculé sur chaque nuit est, en moyenne, encore très élevé (88%). En outre, nous avons testé les relations, par des tests du χ^2 (Annexe E.5) entre les données de vent à 0h UTC à Reims-Courcy (après une discrétisation en quatre grandes directions et une classe de vent nul) et celles à 21h, puis 3 et 6h : toutes sont significatives à 0.1%. La prise en compte de la donnée à Reims-Courcy à 0h dans l'initialisation du modèle apparaît donc pertinente. Il faut toutefois nuancer cette affirmation. Il est ainsi assez facile de trouver des *contre-exemples* : deux dates, où le vent à 0h est identique en intensité et en direction, mais connaissant des

195. Pour rappel, la moyenne des paramètres *STAB* nocturnes (Encadré VIII.2), toutes stations confondues, est de 92%.

évolutions différentes au cours de la nuit, et donc des écarts thermiques entre Reims-Courcy et les stations (données d'entrées de l'adaptation statistique, p. 71) différents. Une amélioration quant à la donnée d'entrée du vent à Reims-Courcy peut facilement être mise en œuvre, en prenant en compte la résultante vectorielle pour qualifier le vent la nuit à Reims-Courcy plutôt que l'information à 0h.

VIII.3.2 - Pertinence dans l'espace

Dans une deuxième étape, nous nous sommes intéressés à la représentativité de la donnée *vent* à Reims-Courcy par rapport à l'ensemble du vignoble.

En premier, nous avons testé la relation entre les mesures à Reims et celles des autres stations à l'aide de tests du χ^2 réalisés après une discrétisation en huit grandes directions (nord, nord-est, etc.) et une classe de vent nul. Tous les tests sont significatifs à des seuils bien inférieurs à 1%. Même si les directions dominantes ne sont pas les mêmes d'une station à une autre, pour l'ensemble des dates, il existe des relations significatives entre les classes de vent à Reims-Courcy et celles des autres stations.

Toutefois, ces résultats s'appuient sur une typologie de la donnée *vent*. Pour affiner l'analyse, il est possible d'utiliser une méthode plus complexe : la corrélation vectorielle (Encadré VIII.3). Le Tableau VIII.2 représente la matrice de ces corrélations : toutes les données de vent des stations marnaises sont corrélées (seuil : 1%). En se limitant aux résultats pour Reims-Courcy (première colonne), il apparaît que ce poste est l'un des mieux corrélés aux autres. Les trois stations les plus faiblement corrélées sont les seules situées dans la vallée de la Marne.

Tableau VIII.2 : Matrice de corrélation des données vectorielles de vent pour les stations

	Rei	Ay	Fle	Ger	Nog	Oeu	Orb	Pcq	Sac	Sil	Vtl	Vts
Rei	1											
Ay	0,42	1										
Fle	0,44	0,42	1									
Ger	0,60	0,45	0,48	1								
Nog	0,53	0,32	0,39	0,58	1							
Oeu	0,40	0,41	0,35	0,39	-0,40	1						
Orb	0,55	0,41	0,46	0,64	0,63	-0,48	1					
Pcq	0,65	0,50	0,53	0,66	0,58	0,44	0,63	1				
Sac	0,55	0,35	0,33	0,52	0,42	0,36	0,42	0,54	1			
Sil	0,59	0,34	0,39	0,62	0,54	0,34	0,55	0,66	0,48	1		
Vtl	0,57	0,44	0,53	0,65	0,44	0,41	0,55	0,66	0,58	0,48	1	
Vts	0,51	0,36	0,40	0,44	0,43	0,24	0,40	0,61	0,46	0,45	0,55	1

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France
 Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.
 En gras, les plus fortes corrélations, supérieures à 0.50.

Encadré VIII.4 : La corrélation vectorielle

Pour estimer la corrélation entre deux séries de vecteurs, il est nécessaire de généraliser le coefficient de corrélation classique utilisé pour quantifier la relation entre deux variables quantitatives scalaires. La méthodologie de B. Hanson *et al.* [1992], reprise ici, permet d'estimer la corrélation en *rotation* ou en *réflexion* de deux séries de données vectorielles (Figure VIII.12 ; les translations et les changements d'échelle ne changent pas la corrélation vectorielle).

Les vecteurs à deux dimensions (dans un plan) sont représentés par des nombres complexes $\bar{z} = x + iy$ avec ($i^2 = -1$). On cherche alors à estimer la corrélation entre deux séries de n vecteurs $\bar{z}_j = x_j + iy_j$, ($j = 1, \dots, n$) et $\bar{w}_j = u_j + iv_j$, ($j = 1, \dots, n$) où x_j et y_j (u_j et v_j) sont les composantes du vecteur \bar{z}_j (\bar{w}_j).

La variance σ_z^2 et la covariance σ_{zw} s'écrivent alors :

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\bar{z}_j - \bar{z})^* (\bar{z}_j - \bar{z}) = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$$

et

$$\sigma_{zw} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\bar{z}_j - \bar{z})^* (\bar{w}_j - \bar{w}) = (\sigma_{xu} + \sigma_{yv}) + i(\sigma_{xv} - \sigma_{yu})$$

où $\bar{z}_j^* = x_j - iy_j$ est le conjugué complexe de \bar{z}_j et la barre indique la moyenne arithmétique.

Plusieurs coefficients de corrélation sont définis dans la littérature pour exprimer une relation selon une rotation ou selon une réflexion. Par exemple, B. Hanson *et al.* [1992] proposent un indice de rotation/réflexion $\xi = \sigma_{xu}\sigma_{yv} - \sigma_{xv}\sigma_{yu}$ qui indique une relation *rotation* s'il est positif et une relation *réflexion* s'il est négatif. Le coefficient de corrélation est alors :

$$\rho = \left(\frac{\xi}{|\xi|} \right) \sqrt{\frac{(\sigma_{xu})^2 + (\sigma_{yv})^2 + (\sigma_{xv})^2 + (\sigma_{yu})^2 + 2|\xi|}{\sigma_z^2 \sigma_w^2}}$$

Il vaut +1 pour une corrélation *rotation* parfaite, -1 pour une corrélation *réflexion* parfaite et 0 dans le cas de données complètement décorrélées.

Il est possible ensuite de modéliser la relation par la régression vectorielle. Pour plus de précisions, se reporter à l'article de B. Hanson *et al.* [1992].

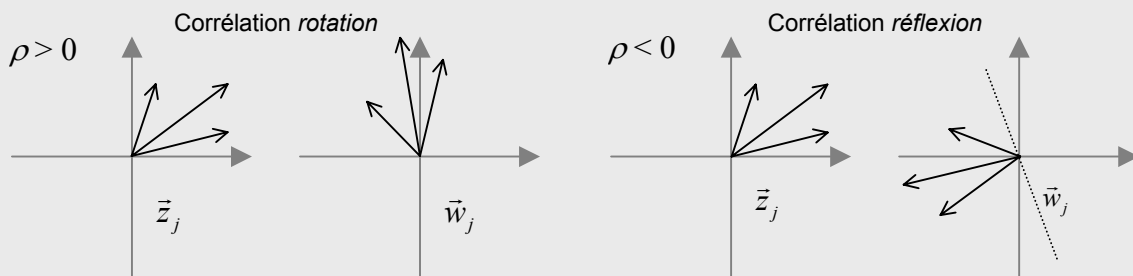


Figure VIII.12 : Schéma des deux types de corrélation vectorielle : par rotation et par réflexion

Conclusion du chapitre VIII

Dans ce chapitre, nous avons étudié la double donnée *vent*, direction et vitesse, afin de caractériser les variabilités spatiale et temporelle de ce paramètre, au cours des nuits printanières, dans le vignoble marnais. Alors qu'à une échelle synoptique, le vent provient principalement du sud-ouest, au niveau du vignoble marnais, le vent nocturne est surtout caractérisé par de faibles vitesses et par une influence certaine de la topographie. Nous avons ainsi pu mettre en évidence l'existence de *brises de pente* induites par un relief, somme toute, peu contrasté.

Enfin, même si les vents nocturnes ne sont pas les mêmes pour toutes les stations, nous avons montré que la prise en compte de la donnée à Reims-Courcy dans l'adaptation statistique du système de prévision du CDM 51 était pertinente, dans le temps et dans l'espace. Toutefois, une analyse plus approfondie permettrait, sans doute, de dégager différentes structures de champs de vent variant selon les conditions synoptiques. Elle fera l'objet de recherches

Chapitre IX - L'INFLUENCE DES CONDITIONS ATMOSPHERIQUES SUR LES TEMPERATURES MINIMALES

Dans les deux précédents chapitres, nous avons observé et analysé, en adoptant une approche séparative, les variabilités spatiale et temporelle des températures minimales et des écoulements de l'air, au printemps dans le vignoble marnais. Dans ce chapitre IX, nous approfondissons l'étude des températures minimales dans le vignoble marnais, en tentant de dégager une influence des conditions atmosphériques, définies ici à partir du vent et de la nébulosité. Pour cela, nous avons choisi trois pistes de recherche, intéressantes quant à l'aléa gélif : le refroidissement nocturne, la variabilité spatiale et l'inversion thermique.

IX.1 - Le refroidissement nocturne

Dans le chapitre VII, nous avons étudié l'évolution moyenne des températures au cours d'une nuit (Figure VII.4, p. 136). Ainsi, nous avons vu qu'à partir de 14-15h (UTC), les températures diminuaient, assez linéairement (-0.4°C par heure entre 21h et 4h), jusqu'à atteindre vers 4-5h, un minimum. En définissant le refroidissement nocturne comme la différence entre les températures horaires (sous abri et à 2 m) relevées à 19h (la veille) et à 4h du matin¹⁹⁶, nous avons montré que celui-ci était plus accentué pour les stations situées en bas de coteau. Cela nous laissait supposer alors l'influence de l'accumulation des écoulements d'air froid dans les zones basses, renforcée sous des conditions atmosphériques stables, c'est-à-dire un ciel clair et un vent calme. Dans cette partie, nous testons cette hypothèse en étudiant l'influence de la nébulosité puis du vent sur le refroidissement.

IX.1.1 - Relation entre l'intensité du refroidissement et la nébulosité

La nébulosité est un paramètre connu pour influencer le refroidissement nocturne, en compensant en partie la perte énergétique du sol (rayonnement infrarouge). Ainsi, par temps clair, le refroidissement est *a priori* plus intense que par temps couvert (en ne tenant pas compte des masses d'air en jeu). Pour appréhender l'effet de la nébulosité sur le refroidissement, nous avons calculé et représenté sur la Figure IX.1 les écarts thermiques moyens entre 19 et 4h UTC, pour toutes les stations et par date, en fonction des moyennes quotidiennes des observations nocturnes de nébulosité à Reims-Courcy¹⁹⁷ (18, 21, 0, 3 et 6h). On constate que, pour les nuits de ciel clair (moyenne inférieure à 2 octats), la *quasi*-totalité des refroidissements est comprise entre 4° et 9°C, ce qui peut être considéré comme

196. Soit, en moyenne, entre l'heure du coucher du soleil et la plus froide.

197. Les observations de nébulosité sont disponibles uniquement pour cette station synoptique.

des refroidissements intenses. Par contre, pour les nuits où la nébulosité est importante, les refroidissements sont légèrement plus faibles (on assiste même à des réchauffements pour quelques dates, liés à des advections chaudes). Cela étant, les écarts thermiques moyens entre 19 et 4h sont parfois importants pour des nuits où le ciel était couvert à très couvert. Il peut alors s'agir d'une advection froide (venant, par exemple, du secteur nord-est) accompagnée de nuages ou encore de situations nuageuses avec quelques trouées de ciel clair favorisant la baisse des températures localement [Beltrando, 1998].

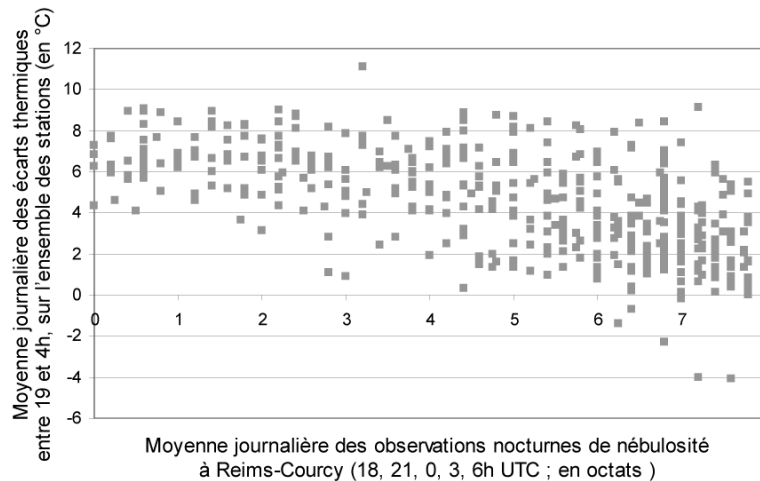


Figure IX.1 : Le refroidissement nocturne journalier (moyenné sur l'ensemble des stations) en fonction de la nébulosité moyenne (à Reims-Courcy)

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; 19 et 4h UTC ; Civc, Météo France
Chaque point représente une nuit.

Ce graphique cartésien (Figure IX.1) nous amène à supposer l'existence d'une relation, certes faible, entre la nébulosité et le refroidissement nocturne, relation que nous avons testée en calculant le coefficient de corrélation linéaire de Bravais Pearson. La valeur obtenue de -0.61 montre une relation négative assez forte, significative pour un risque d'erreur inférieur à 0.01% : plus la nébulosité de la nuit à Reims-Courcy est faible, plus le refroidissement a tendance à être intense dans le vignoble.

IX.1.2 - Relation entre l'intensité du refroidissement et la vitesse du vent

Le vent faible ne favorise pas le brassage de l'air, ce qui peut accentuer l'intensité du refroidissement. On peut alors supposer que les forts refroidissements sont liés à des vents nocturnes peu intenses. Nous avons testé s'il existe une relation entre les moyennes nocturnes des vitesses de vent (pour toutes les stations disposant de capteurs, Carte IV.4, p. 84) et des écarts thermiques, pour l'ensemble des stations. Le coefficient de Bravais Pearson significatif ($r = 0.31$ pour 461 degrés de liberté, risque d'erreur inférieur à 1%) indique une tendance statistique, qui peut cependant être contestée par le graphique cartésien croisant les valeurs de ces deux variables (Figure IX.2) : quelle que soit la vitesse du vent, le refroidissement peut être plus ou moins fort¹⁹⁸. Une importante diminution des

198. De plus, on peut observer un léger effet de masse (vents faibles). Nous avons alors transformé chaque variable (quantitative continue) en qualitative ordinale, puis effectué un test de Spearman. Celui-ci indique également une relation significative (risque d'erreur 1%).

températures pendant la nuit peut donc être induite par une composante radiative ou par une composante advective (vent de nord et de nord-est).

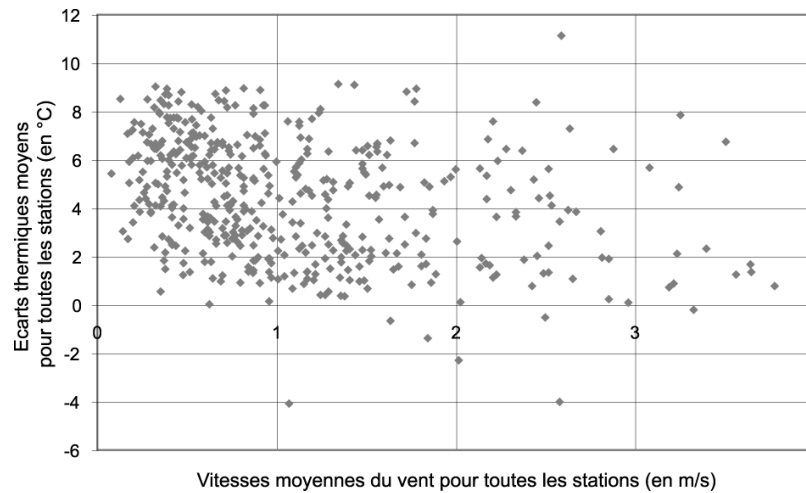


Figure IX.2 : Le refroidissement nocturne pour les stations du vignoble marnais, en fonction de la vitesse du vent

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; 19 et 4h UTC ; Civc, Météo France

IX.1.3 - Relation entre l'intensité du refroidissement et la direction du vent

Nous avons enfin cherché s'il existait une relation entre le refroidissement nocturne et la direction du vent synoptique nocturne (à Reims-Courcy, à 0h¹⁹⁹). Cette direction *moyenne* du vent nocturne a ensuite été discrétisée selon les huit grandes directions (N, NE, E, etc.). La Figure IX.3 représente pour chacune de ces classes le refroidissement moyen. Excepté les nuits où le vent est nul, pour lesquelles le refroidissement est le plus intense en moyenne (6.3°C), les vents venant du secteur nord à est conduisent aux plus forts écarts thermiques mesurés entre 19 et 4h UTC : 4.7°C pour nord, 5.6°C pour nord-est et 5.1°C pour est. Cela s'explique, très logiquement, par l'arrivée d'air froid de nord, originaire des hautes latitudes, par exemple, à la présence d'un anticyclone centré sur le nord-est de l'Europe.

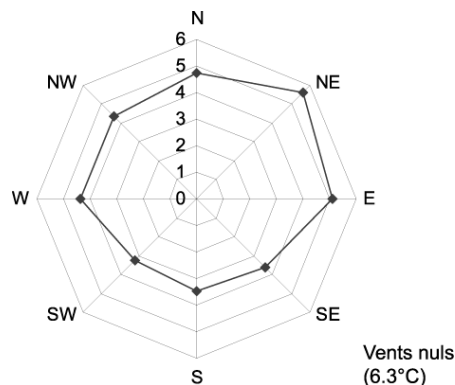


Figure IX.3 : Moyennes du refroidissement nocturne (19-4h UTC) pour toutes les stations, selon les grandes directions de vent (Reims-Courcy ; 0h)

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

199. Seule cette station synoptique est retenue ici pour qualifier le vent *général* sur l'ensemble de la zone d'étude. Bien que nous définirons plus tard un vent moyen par nuit (à partir de la résultante vectorielle, Encadré VIII.1, p. 154), nous avons préféré utiliser ici, par commodité, la mesure à 0h (UTC).

IX.1.4 - Typologie des nuits en fonction des refroidissements nocturnes

Ayant étudié l'influence des conditions atmosphériques sur le refroidissement, nous avons ensuite cherché à classer les nuits des six printemps étudiés (1998-2003) en fonction de l'intensité du refroidissement. L'objectif était de voir si des conditions atmosphériques particulières se dégagent à travers cette typologie.

Pour cela, nous avons réalisé une Classification Ascendante Hiérarchique (distance euclidienne, méthode Ward, données standardisées ; Annexe E.4) à partir des refroidissements nocturnes journaliers de chaque station. L'histogramme des premiers indices de niveaux (Figure IX.4) indique une dichotomie assez nette des nuits printanières. Ces deux classes révèlent un fort effet de masse ; elles distinguent un faible et un fort refroidissement. Nous avons retenu une partition plus fine en quatre classes expliquant 74% de la variabilité intraclasse.

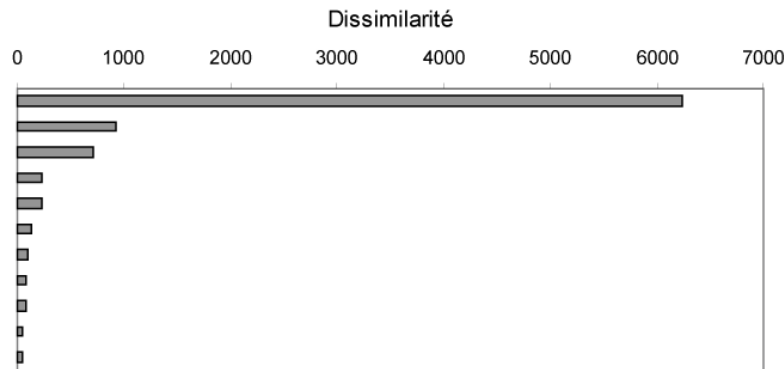


Figure IX.4 : Histogramme des premiers indices de niveaux de la CAH réalisée sur les refroidissements nocturnes journaliers de chaque station du vignoble marnais

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

Les quatre classes retenues traduisent un refroidissement plus ou moins intense : de très faible pour la première classe (1.30°C en moyenne, Tableau IX.1) à très fort pour la dernière (8.18°C). Il apparaît également que ces classes se différencient également par leur étendue (différences entre le refroidissement moyen le plus fort et le plus faible). Par conséquent, plus les nuits connaissent un fort refroidissement, plus la variabilité spatiale serait importante.

Tableau IX.1 : Caractéristiques générales du refroidissement nocturne, pour chaque classe de la typologie retenue

	Moyenne des refroidissements	Étendue des refroidissements
Classe 1 : très faible refroidissement	1.30	0.40
2 : faible refroidissement	3.48	1.42
3 : fort refroidissement	5.91	2.44
4 : très fort refroidissement	8.18	4.25

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; 19 et 4h Utc ; Civc, Météo France

Afin de vérifier que cette dernière observation n'est pas liée à la classification, nous avons testé la relation entre la moyenne et l'étendue des refroidissements par station, pour chaque jour. À partir de la Figure IX.5, nous pouvons supposer une relation positive entre ces deux grandeurs, ce qui est vérifié par le coefficient de corrélation ($r = 0.62$, significatif pour

$\alpha < 1\%$) : ainsi, plus le refroidissement est intense, plus les stations ont tendance à se différencier. Dans ce cas-là, les conditions seraient alors radiatives.

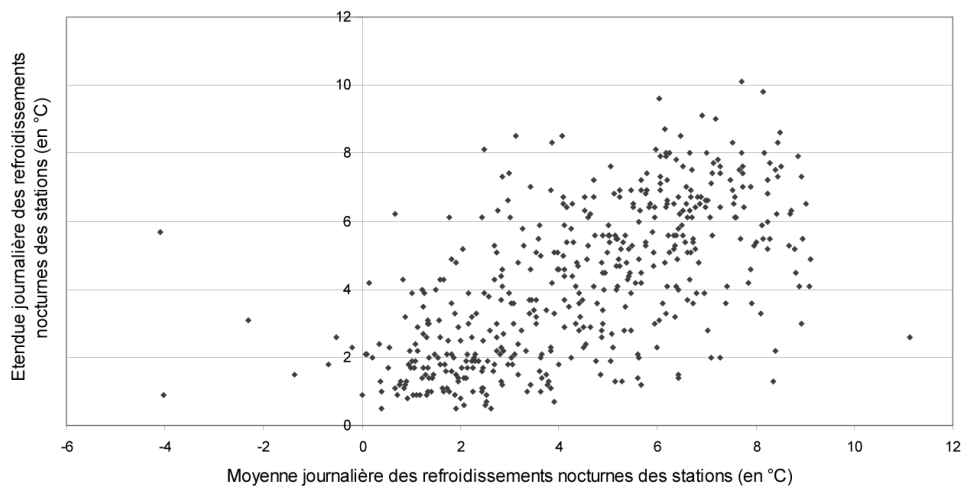


Figure IX.5 : Étendue des refroidissements nocturnes en fonction de leur intensité

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; 19 et 4h Utc ; Civc, Météo France

La Figure IX.6 représente la répartition temporelle de cette typologie des dates étudiées en quatre classes réalisée à partir du refroidissement, en fonction des jours (en lignes) et des années (en colonnes). Il apparaît une forte variabilité temporelle, avec pourtant certaines récurrences. Les classes 3 et 4 sont ainsi plus fréquentes à la fin du printemps (fin mai) qu'au début, sans doute en raison de l'augmentation des conditions anticycloniques au cours du printemps. De plus, 2003 et 2004 ont connu des refroidissements beaucoup plus intenses tout au long du printemps, surtout en 2003. Rappelons que, en ce début du mois d'avril 2003, le vignoble champenois a connu de très fortes gelées. Pendant la nuit du 7 au 8 avril caractérisée par un fort refroidissement (classe 3), les stations ont enregistré les températures minimales les plus froides des six printemps retenus (1998-2003), jusqu'à -9.1°C pour Chambrecy. Mais, puisque la vigne n'était pas globalement encore au stade phénologique du débourrement, les gelées *agronomiques* n'ont pas été observées. Par contre, quelques jours après, dans la nuit du 10 au 11 avril, de nombreuses parcelles du vignoble marnais ont connu des dégâts gélifs. Pourtant, le refroidissement de cette nuit n'était pas, relativement, très intense (le fond de l'air était déjà froid). Ce point témoigne, à nouveau, de l'écart entre gelée *météorologique* et gelée *agronomique*.

Nous avons précédemment mis en évidence les relations, peu intenses mais relativement systématiques, entre d'une part le refroidissement et d'autre part la nébulosité, la direction et la vitesse du vent. Nous avons souhaité comparer à présent la typologie en quatre classes de refroidissement avec ces informations relatives à la masse d'air.

Pour la nébulosité, nous avons vérifié, à partir d'un test du χ^2 (Annexe E.5), la relation entre les classes retenues de la CAH et une variable binaire : *ciel clair / nébulosité variable*. Ces deux classes de nébulosité reposent sur les observations trihoraires de nébulosité à Reims-Courcy, de 21 à 6h UTC [Madelin *et al.*, 2002] : si au moins trois heures sur quatre ont une nébulosité inférieure ou égale à 2 octats, alors la classe *ciel clair* est attribuée à la nuit (sinon nébulosité variable).

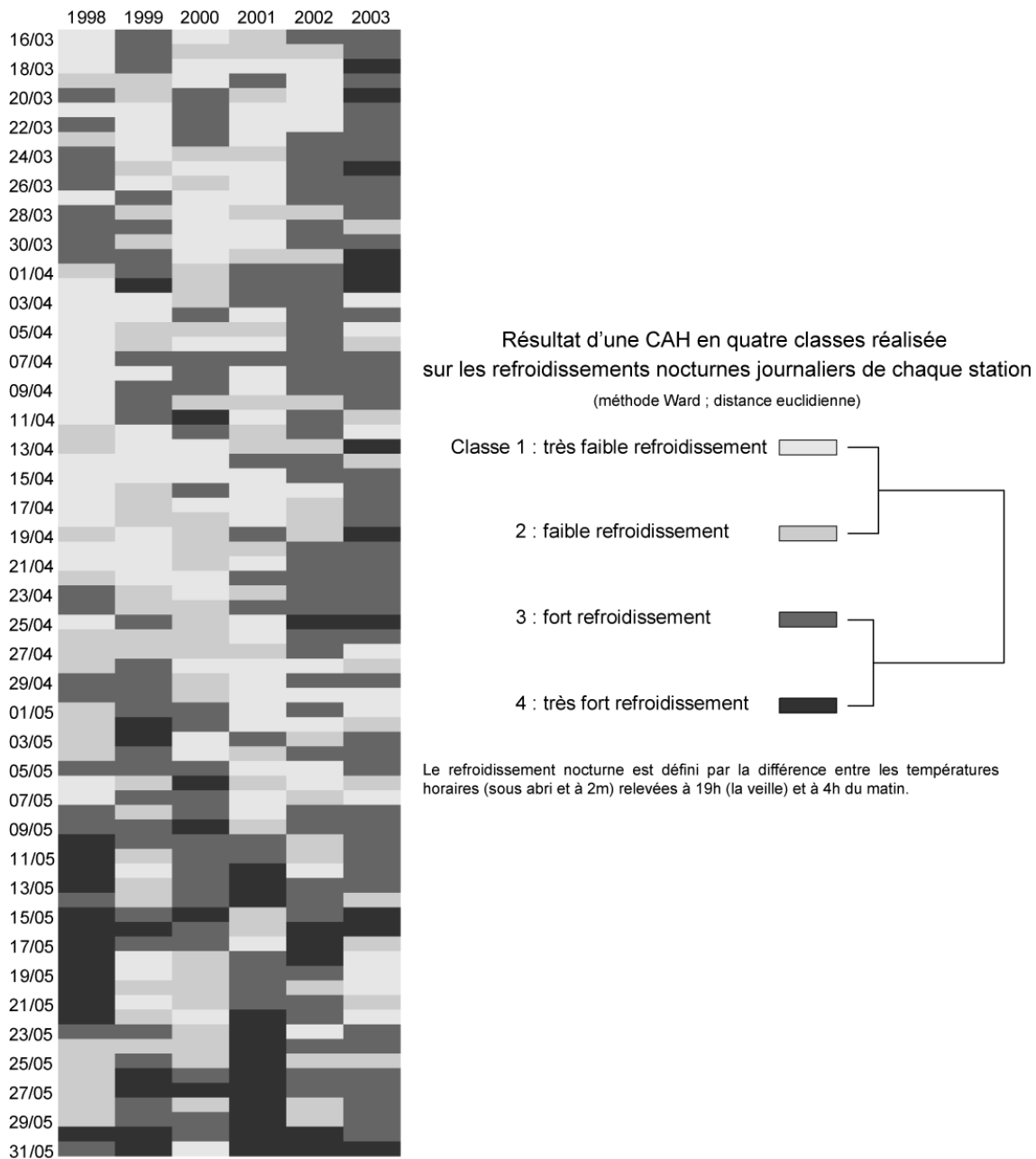


Figure IX.6 : Typologie des nuits printanières à partir d'une CAH réalisée sur les refroidissements nocturnes journaliers de chaque station

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

Les résultats de ce test du χ^2 sont présentés par les tableaux de contingence (Tableau X.1.a), des profils en ligne (b) et en colonne (c). La valeur obtenue du χ^2 (102 pour 3 degrés de liberté) indique une très forte relation entre la typologie des refroidissements et la nébulosité (pour un risque d'erreur très inférieur à 1%). Ainsi, les nuits, où le ciel est considéré comme clair, sont *quasi* exclusivement classées dans les forts et très forts refroidissements (88.5%). De plus, les nuits connaissant un très fort refroidissement sont plus caractérisées par un ciel clair (57.9%) que par une nébulosité variable (42.1%)²⁰⁰. Cette étude confirme donc que les nuits de ciel clair favorisent de forts refroidissements.

200. Ces pourcentages sont à comparer avec les rapports 1/4 de ciel clair et 3/4 de nébulosité variable sur l'ensemble des dates printanières.

Tableau IX.2 : Résultat d'un test du χ^2 effectué entre les typologies des nuits selon le refroidissement et selon la nébulosité

a - Tableau de contingence

		Typologie des nuits selon leur refroidissement				L' ensemble
		Très faible	Faible	Fort	Très fort	
Classes de nébulosité	Ciel clair	1	12	67	33	113
	Nébulosité variable	119	101	105	24	349
L' ensemble		120	113	172	57	462

b - Profils en ligne

		Typologie des nuits selon leur refroidissement				L' ensemble
		Très faible	Faible	Fort	Très fort	
Classes de nébulosité	Ciel clair	0.9%	10.6%	59.3%	29.2%	100.0%
	Nébulosité variable	34.1%	28.9%	30.1%	6.9%	100.0%
L' ensemble		26.0%	24.5%	37.2%	12.3%	100.0%

b - Profils en colonne

		Typologie des nuits selon leur refroidissement				L' ensemble
		Très faible	Faible	Fort	Très fort	
Classes de nébulosité	Ciel clair	0.8%	10.6%	39.0%	57.9%	24.5%
	Nébulosité variable	99.2%	89.4%	61.0%	42.1%	75.5%
L' ensemble		100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

Enfin, nous avons testé la relation entre les classes de refroidissement et la vitesse moyenne du vent, à l'aide d'une analyse de la variance. Cette vitesse moyenne est calculée, par nuit, à partir des données horaires²⁰¹ (de 21 à 6h UTC) de l'ensemble des 12 stations mesurant cette grandeur. Le test de la variance indique une relation très significative ($\alpha < 0.1\%$) entre cette vitesse et l'intensité du refroidissement. Les nuits où la décroissance des températures est importante sont plutôt caractérisées par des vents faibles relativement à la moyenne (Tableau IX.3).

Tableau IX.3 : Les vitesses moyennes du vent selon l'intensité du refroidissement

	Moyennes des vitesses (en m/s)
Très faible refroidissement	1,64
Faible refroidissement	1,11
Fort refroidissement	1,02
Très fort refroidissement	0,76
L' ensemble	1,17

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

La vitesse moyenne est calculée à partir des données nocturnes horaires (ou trihoraires pour Reims-Courcy) des 12 stations mesurant le vent.

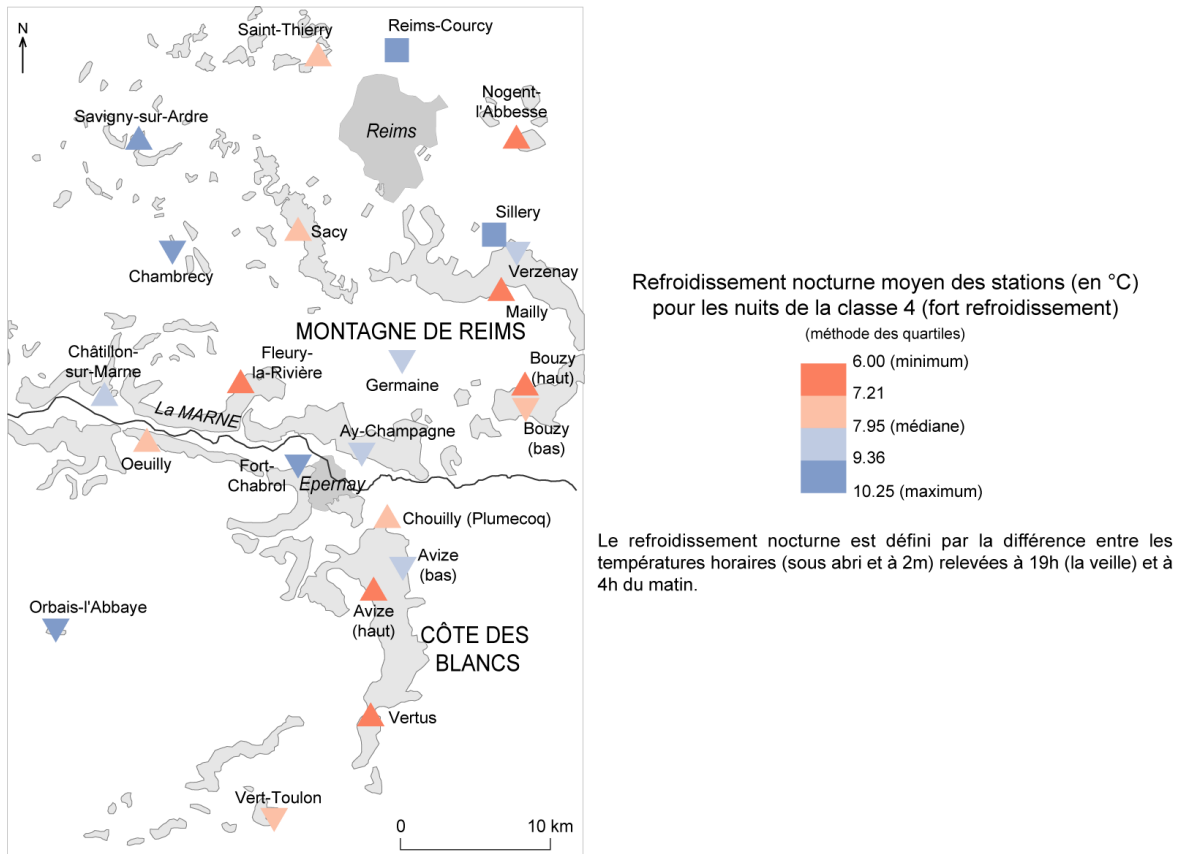
IX.1.5 - Les nuits de très forts refroidissements

Nous avons vu que la classe 4 de la CAH était caractérisée par un fort refroidissement et par une variabilité interstationnelle importante. Même si cela ne signifie pas forcément des gelées dommageables pour les bourgeons de la vigne, il est important de mieux connaître la répartition spatiale de ces très forts refroidissements nocturnes lors de ces 57 nuits

201. Données trihoraires pour la station de Reims-Courcy.

particulières, où l'estimation d'un aléa gélif est difficile. Ce sont ces nuits qui nous intéressent.

La Carte IX.1 représente la répartition spatiale de ces refroidissements nocturnes moyens lors des nuits de la classe 4, soit à très fort refroidissement. Aucune structure spatiale nette n'apparaît. Par contre, les facteurs locaux, en particulier la position sur le coteau, semblent influencer de façon notable l'intensité du refroidissement. Les stations de bas de coteau enregistrent ainsi des refroidissements moyens beaucoup plus forts pour cette sélection de nuits, ce qui laisse supposer que ces nuits sont caractérisées par des conditions atmosphériques stables, où l'accumulation de l'air froid dans les zones basses est favorisée.



Carte IX.1 : Refroidissement nocturne moyen lors des nuits de la classe 4 (fort refroidissement) d'une CAH réalisée sur les refroidissements nocturnes journaliers de chaque station

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France
 Les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

En conclusion, l'intensité du refroidissement nocturne varie selon les conditions atmosphériques de la nuit. Elle est ainsi influencée par la couverture nuageuse et par la vitesse du vent. En ne retenant que les nuits de très forts refroidissements, nous avons, à nouveau, mis en évidence l'importance de la position des stations sur le coteau sur l'intensité du refroidissement. Toutefois, il est important de rappeler que les nuits connaissant un fort refroidissement ne sont pas automatiquement des nuits de gel (différence entre gel météorologique et gel agronomique).

En outre, nous avons vu précédemment que le refroidissement nocturne n'était pas forcément linéaire (Figure VII.5, p. 137). Par conséquent, il pourrait être intéressant

d'étudier plus précisément les profils thermiques des nuits printanières, en mettant au point un indicateur plus complexe que celui fondé sur la seule différence entre deux heures données (comme c'est le cas ici).

IX.2 - La variabilité spatiale des températures minimales en fonction des conditions atmosphériques

Lorsque le refroidissement est dit *advectif* (II.1.1 -II.1.1 - Les différents types de refroidissement de l'air, p. 36), les températures sont froides sur l'ensemble de l'espace : le refroidissement est homogène et généralisé. À l'inverse, les conditions de ciel clair et de vent calme renforcent l'effet des facteurs locaux et favorisent une forte variabilité spatiale. Les zones basses ou plates sont alors particulièrement refroidies : l'air froid, descendant par gravité le long du coteau, s'accumule et s'ajoute au refroidissement radiatif.

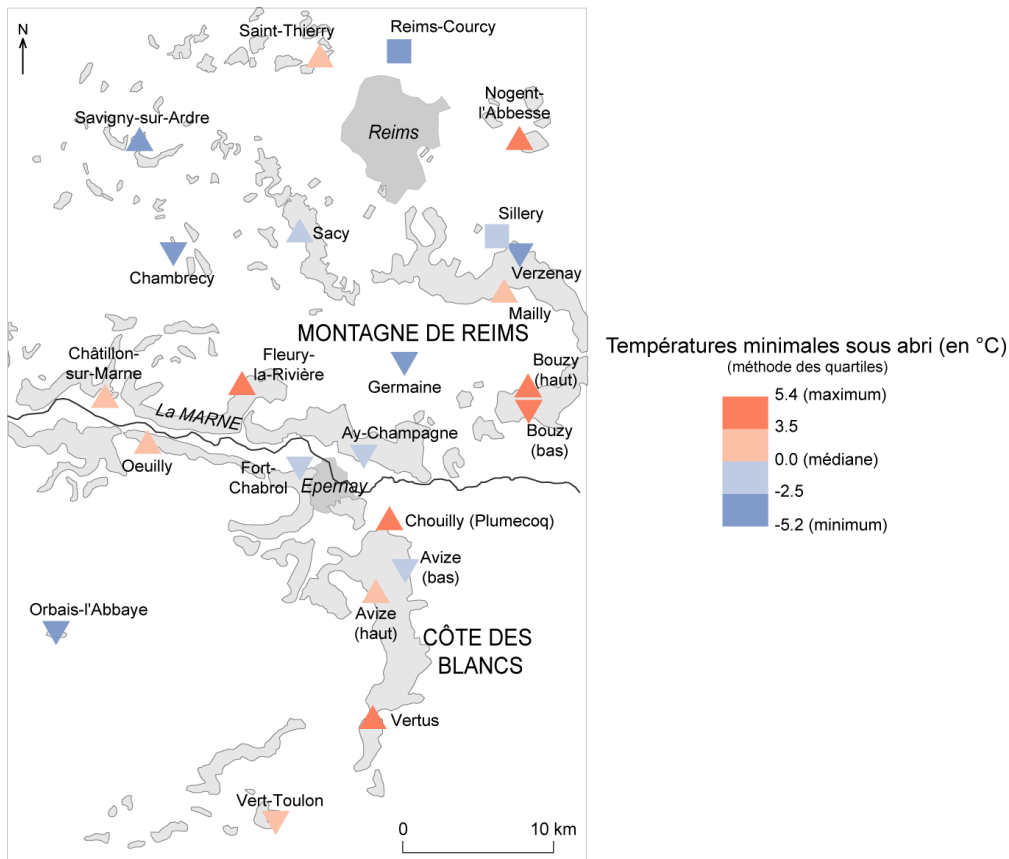
Cette distinction thermique entre les stations de bas de coteau et de mi-coteau a été mise en évidence précédemment à partir des moyennes (Figure VII.8, p. 141). Nous souhaitons, à présent, étudier plus précisément les nuits où de fortes différences thermiques entre stations sont observées. Ces nuits correspondent-elles uniquement à des conditions de ciel clair et de vent calme ?

IX.2.1 - Des contrastes thermiques particulièrement forts

Afin d'estimer la variabilité spatiale des températures minimales (sous abri, à 2 m) des stations, nous avons calculé les étendues journalières, soit les différences entre le maximum et le minimum. En moyenne de 4.5°C, ces étendues varient fortement d'une nuit à l'autre : de 1°C à 11.5°C. Les nuits où l'étendue thermique est maximale sont caractérisées par un *ciel clair* (classification décrite précédemment) et des vents faibles. Par exemple, lors de la nuit du 15 au 16 avril 2003, les observations de nébulosité à Reims-Courcy sont de 0 octat (excepté à 6h UTC, 1 octat) et la vitesse moyenne du vent (pour la nuit et pour toutes les stations) inférieure à 1 m/s. Les conditions étant alors radiatives, la variabilité spatiale est maximale : les températures minimales relevées à Chambrecy et à Bouzy haut, respectivement le minimum et le maximum, sont de 2.4°C et de 13.9°C (étendue de 11.5°C). La prise en compte de cette hétérogénéité, qui ne peut être appréhendée par les modèles numériques, s'avère essentielle lors des nuits gélives.

Par exemple, nous avons sélectionné la nuit du 18 au 19 mars 2003, où l'amplitude des températures minimales (sous abri, à 2 m) était de 10.6°C. La moitié des stations a connu des températures négatives, l'autre non. Les conditions atmosphériques observées sont un ciel clair²⁰² et un vent faible. Sur la Carte IX.2 des températures minimales, nous pouvons remarquer que les stations les plus froides, lors de cette nuit, sont plutôt exposées au nord. La position sur le coteau semble moins discriminante (par exemple, Bouzy bas et Vert-Toulon, toutes deux en bas de coteau, enregistrent des températures positives).

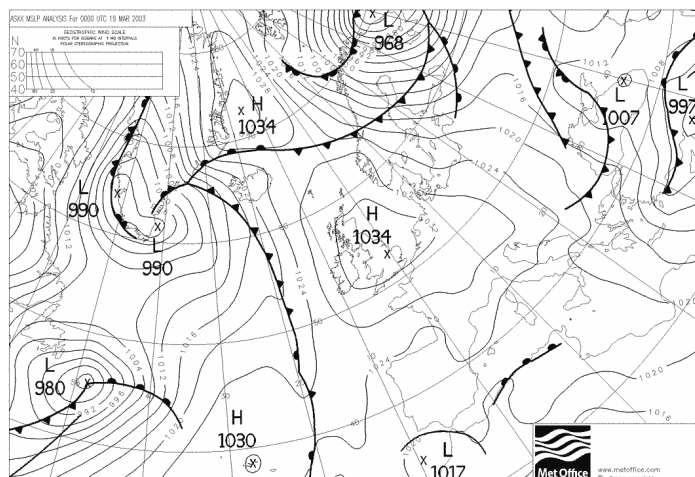
202. Les observations de nébulosité à la station synoptique de Reims-Courcy sont de 0 octat de 21 à 3h UTC et de 1 octat à 6h. La moyenne des vitesses de vent pour toutes les stations et sur la nuit (21-6h) est de 0.8 m/s.



Carte IX.2 : Températures minimales (sous abri, à 2 m) relevées le 19 mars 2003

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France
Les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

Les conditions synoptiques de cette nuit du 18 au 19 mars 2003 étaient caractérisées par la présence d'un anticyclone centré sur la Grande-Bretagne (Carte IX.3). Le vent, de vitesse faible, enregistré à la station synoptique de Reims-Courcy avait une direction principalement de nord-est²⁰³. Cette situation explique les températures négatives enregistrées pour les stations d'orientation nord (effet advectif).



Carte IX.3 : Champ de pression en surface et fronts sur l'Europe de l'Ouest, le 19 mars 2003 à 0h UTC

Source : [http://infomet.am.ub.es]

203. De 21 à 6h UTC : 50°, 340°, absence de vent et 70°.

Plus généralement, l'analyse de la variabilité spatiale à partir de l'étendue peut être biaisée par des valeurs extrêmes. Nous avons alors estimé cette dispersion en calculant le coefficient de variation²⁰⁴ (pour chaque nuit, écart-type des températures minimales des stations ramené à la moyenne). Il s'avère que la différenciation des nuits par ce coefficient est similaire à celle des étendues²⁰⁵.

IX.2.2 - L'influence des conditions atmosphériques sur la variabilité spatiale des températures minimales

Les exemples des deux nuits avec une forte variabilité évoqués ci-dessus étaient relatifs à des nuits de ciel clair et de vent calme. Ce lien entre les conditions atmosphériques et l'homogénéité ou non des températures minimales est classiquement mentionné dans la littérature. Pour le vérifier, nous avons, à nouveau, pris comme paramètre de variabilité spatiale, la différence entre le minimum et le maximum des températures minimales, soit l'étendue.

La Figure IX.7 représente le graphique cartésien croisant cette étendue journalière avec la moyenne des vitesses de vent pour toutes les stations et sur l'ensemble de la nuit (de 21 à 6h UTC). Le nuage de points ne s'organise pas clairement selon un axe. Au contraire, pour des vitesses moyennes de vent nocturne faibles (inférieures à 1.5 m/s), la variabilité spatiale des températures minimales entre stations peut être très faible comme très forte. Par contre, nous observons que les vitesses de vent plus élevées sont associées à de faibles étendues, en raison du brassage de l'air et donc de l'homogénéisation des températures minimales.

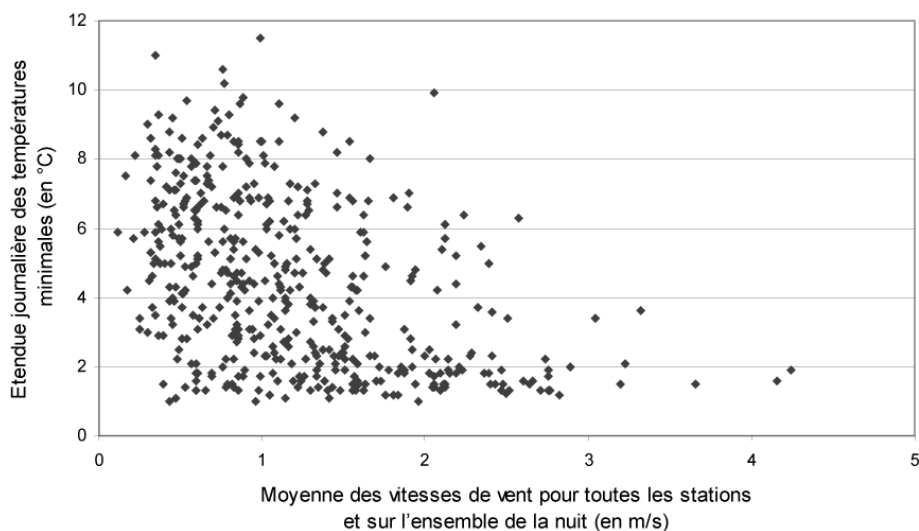


Figure IX.7 : Écart des températures minimales en fonction de la vitesse moyenne du vent nocturne (pour l'ensemble des stations marnaises)

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; C1vc, Météo France

204. Les températures en degrés Celsius ont été converties en degrés Kelvin afin d'éviter les valeurs négatives.

205. Le coefficient de corrélation calculé sur les étendues et les coefficients de variation indique une relation très fortement significative et positive : $r = 0.98$.

Nous avons ensuite testé la relation entre la variabilité spatiale (définie par l'étendue) et la nébulosité nocturne moyenne à Reims-Courcy²⁰⁶. D'après la Figure IX.8, nous pouvons supposer une relation linéaire significative et négative entre l'étendue et la nébulosité à Reims-Courcy, ce qui est confirmé par un fort coefficient de corrélation en valeur absolue ($r = -0.70$) : plus la couverture nuageuse est importante, plus les températures minimales sont homogènes pour l'ensemble des stations retenues. De plus, l'écart entre le minimum et le maximum des températures minimales observées est, en moyenne, plus important lors des nuits de ciel clair (6.7°C) que lors de celles où la nébulosité est qualifiée de variable (3.7°C)²⁰⁷. Par conséquent, au vu de ces résultats, il semble que la nébulosité ait une influence plus déterminante sur les écarts thermiques observés entre stations que la vitesse du vent.

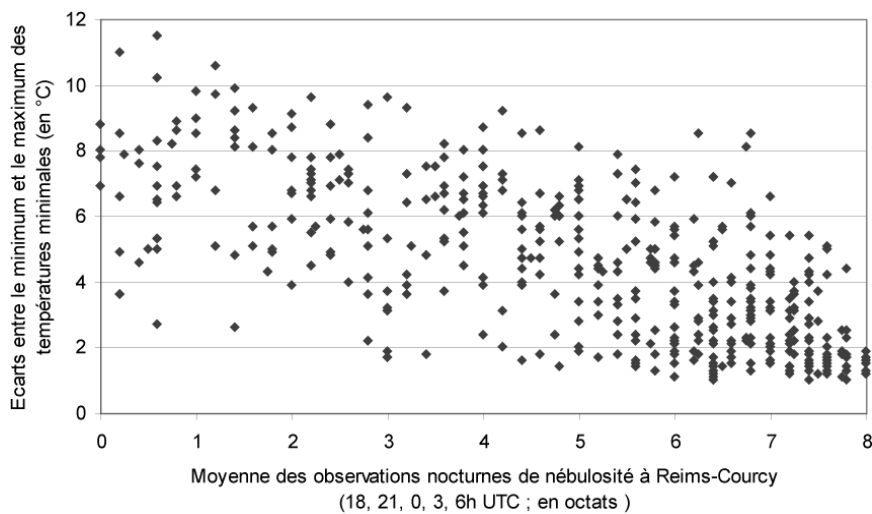


Figure IX.8 : Étendue des températures minimales en fonction la nébulosité nocturne moyenne à Reims-Courcy

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

IX.3 - L'inversion thermique

L'inversion thermique est définie, dans les basses couches, par une croissance des températures avec l'altitude. Les conditions atmosphériques de ciel dégagé et de vent calme favorisent ce phénomène, en raison de la stagnation de l'air froid près du sol et du faible brassage de l'air, et sont associées à une certaine stabilité de l'air (cf. L'inversion thermique, p. 39).

Nous avons souhaité étudier plus précisément ce phénomène à deux échelles :

- à une échelle ponctuelle, en étudiant les températures mesurées à différentes hauteurs (à 10-50 cm et à 2 m) ;
- puis, à l'échelle des coteaux viticoles, à partir des trois couples de stations implantées en bas et à mi-coteau.

L'objectif est d'estimer l'importance de ce phénomène d'inversion thermique et de vérifier que les conditions atmosphériques de ciel clair et de vent calme le favorisent.

206. Rappelons que les seules observations de nébulosité, faites à cette station synoptique, ne sont pas forcément représentatives de la couverture nuageuse pour l'ensemble du vignoble.

207. La classification ciel clair / nébulosité variable est exposée précédemment (Encadré VII.1, p. 148).

IX.3.1 - Différences thermiques entre les capteurs des températures minimales à 2 m (sous abri) et à 10-50 cm (hors abri)

Nous avons vu que le phénomène d'inversion thermique nocturne apparaît à une micro-échelle dans l'écart, par station, entre les températures minimales et les minima actinothermiques moyens (Figure VII.8, p. 141). La position du capteur en indice actinothermique près du sol explique cette différence thermique de 0.8°C en moyenne et toutes stations confondues. Nous avons vu que cet écart variait d'une station à l'autre (Tableau VII.2, p. 145), notamment en raison de la hauteur du capteur, entre 10 et 50 cm²⁰⁸. En outre, cet écart positif traduisant une inversion thermique est également lié à la position hors abri du capteur en indice actinothermique, celui mesurant alors une part du rayonnement terrestre. Cela étant, l'étude de l'écart thermique entre ces deux capteurs permet de dégager les nuits où l'inversion thermique est accentuée, c'est-à-dire *a priori* par ciel clair et vent calme.

Sur la Figure IX.9, nous avons représenté, pour chaque jour, la moyenne journalière des écarts entre les deux capteurs de températures minimales et la moyenne des données de nébulosité à Reims-Courcy. Le nuage de points a une forme assez allongée selon un axe et montre une relation négative : plus le ciel est dégagé, plus l'inversion thermique a tendance à s'accroître. Le coefficient de corrélation ($r = -0.62$) confirme l'existence d'une relation négative (pour un risque d'erreur inférieur à 1%).

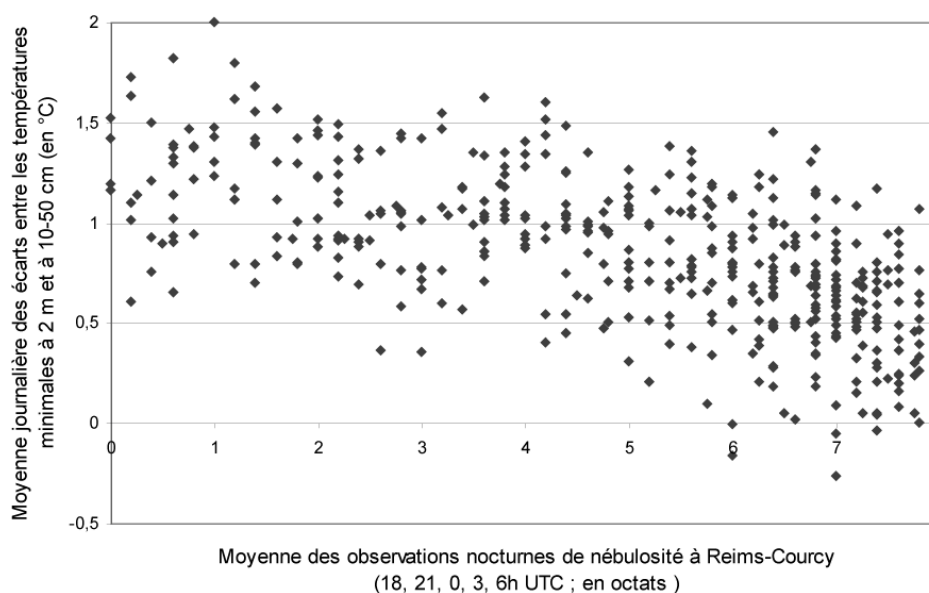


Figure IX.9 : Écarts moyens journaliers entre températures minimales et minima actinothermiques selon la nébulosité nocturne moyenne à Reims-Courcy

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

Par contre, l'étude de la relation entre la vitesse moyenne du vent sur l'ensemble du vignoble marnais et l'inversion thermique, rappelons-le ici définie par l'écart entre les températures minimales à 2 m et à 10-50 cm, nous donne des résultats similaires à ceux relatifs à la variabilité spatiale (Figure IX.7, p. 179) : les nuits calmes connaissent des

208. Compte tenu des différences de hauteur des capteurs en indice actinothermique, nous avons préféré nous limiter aux températures à 2 m et sous abri pour décrire les variabilités spatiale et temporelle. Pourtant, la température des bourgeons est plus proche de celle des capteurs actinothermiques hors abri et situés plus près du sol.

faibles ou des fortes inversions thermiques (Figure IX.10). Cependant, la relation entre ces deux variables est significative à 1% ($r = -0.34$).

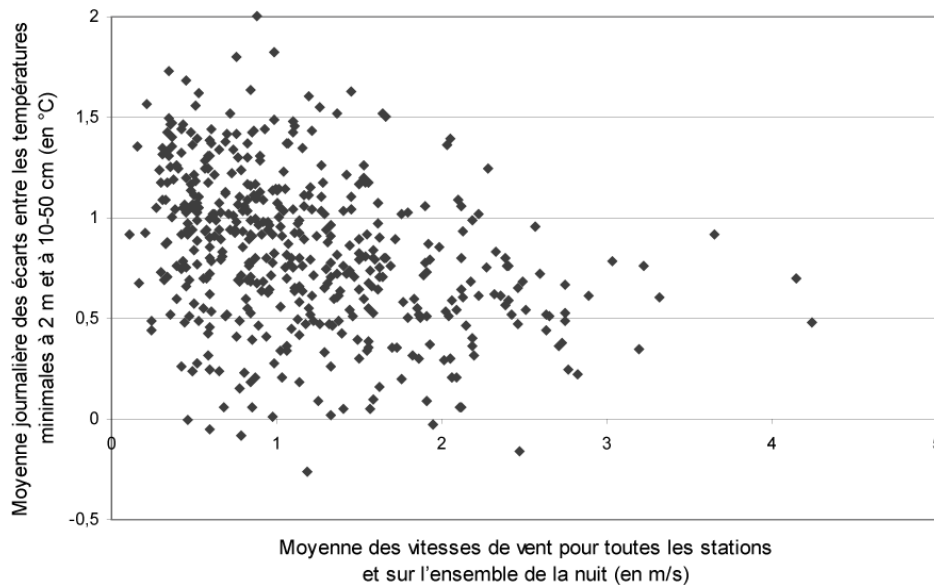


Figure IX.10 : Écarts moyens journaliers entre températures minimales et minima actinothermiques selon la vitesse moyenne du vent nocturne (pour l'ensemble des stations marnaises)

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

La Figure IX.11 représente les moyennes journalières des écarts thermiques pour toutes les stations (températures minimales – minima actinothermiques) en fonction des températures minimales moyennes (toutes les stations). Nous constatons une relation négative significative, même si elle est très faible, entre ces écarts thermiques à deux hauteurs et la température minimale (pour un seuil inférieur à 1%). Ce résultat contredit les travaux de M.-F. de Saintignon [1998-1999] qui indique, dans un rapport sur la probabilité du gel thermique dans le vignoble champenois, qu'il n'existe pas de relation entre ces deux variables.

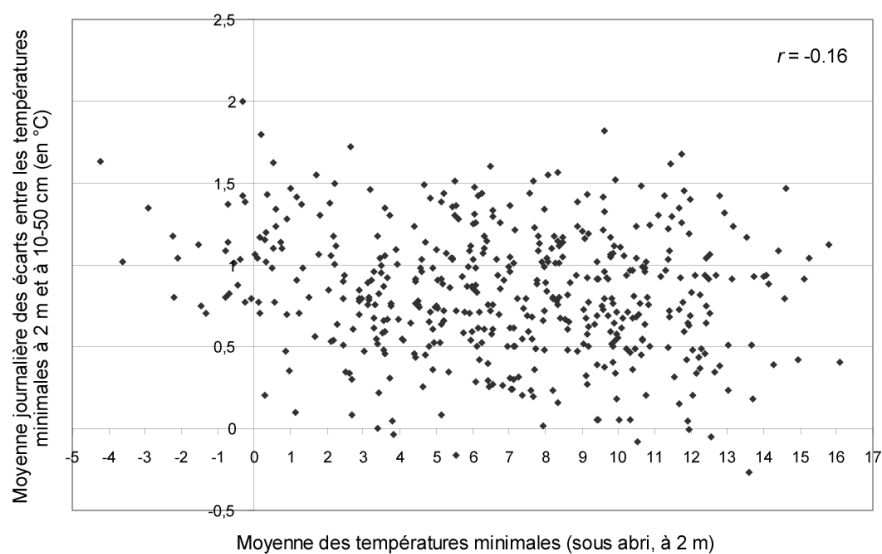


Figure IX.11 : Écarts moyens journaliers entre températures minimales et minima actinothermiques selon les moyennes journalières des températures minimales

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France
Le coefficient de corrélation (r) calculé sur les deux variables est également indiqué. Il est significatif au seuil de 1%.

En conclusion, le phénomène d'inversion thermique, ici défini à partir des deux capteurs thermiques, est donc accentué lorsque le ciel est clair, mais pas nécessairement lorsque le vent est faible. L'amplitude des écarts de certaines nuits, peut dépasser les 4°C pour les stations de l'ancien réseau AGREMAM. Cela étant, les inversions thermiques mises en évidence se limitent ici aux premiers mètres au-dessus du sol.

IX.3.2 - Les couples de stations

Dans la présentation du réseau de stations retenues, nous avons mentionné l'existence de trois couples de stations situées à différentes hauteurs sur un même coteau : Avize bas / Avize haut ; Bouzy bas / Bouzy haut ; Sillery en bas²⁰⁹ / Mailly en haut. Les orientations générales des coteaux où sont implantés ces trois couples sont respectivement est, sud et nord. Leur étude permet un changement d'échelle en ce qui concerne l'inversion thermique. Le Tableau IX.4 rappelle les températures minimales moyennes (sous abri et à 2 m). Les trois stations situées en haut des coteaux sont plus chaudes que celles en bas. Nous pouvons observer un classement de ces stations en fonction de leur position sur le coteau.

Tableau IX.4 : Les températures minimales moyennes (sous abri, à 2 m) pour les trois couples de stations

		Avize	Bouzy	Sillery/Mailly	Verzenay/Mailly
Situation sur le coteau	bas	7.0	7.2	6.3	6.6
	haut	7.6	7.9	7.5	

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France

Ces températures moyennes plus froides dans les zones basses s'observent quelle que soit l'heure de la nuit²¹⁰. Nous pouvons constater une variation horaire de l'écart thermique entre le bas et le haut du coteau (Figure IX.12). Une différence nette apparaît entre le jour et la nuit. À partir du coucher du soleil, l'écart augmente fortement jusqu'à atteindre un *palier* (de minuit à 4-5h UTC), puis diminue. Le palier correspond *a priori* au moment où le lac d'air froid est rempli.

209. Nous avons également ajouté la station de Verzenay située à proximité.

210. À partir des moyennes horaires des températures sous abri, de 21 à 6h UTC.

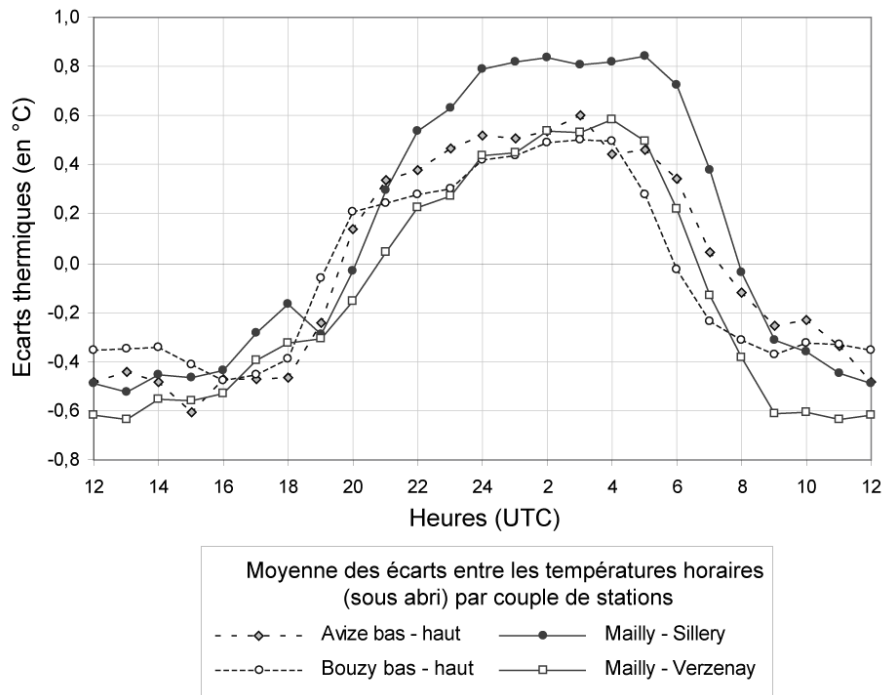


Figure IX.12 : Écarts moyens des températures horaires (à 2 m, sous abri) pour les couples de stations « bas-haut »

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

Cette différenciation entre bas et haut de coteau au cours de la nuit peut s'illustrer également à partir des coefficients de corrélation. En effet, même si toutes les relations sont très fortes et positives, nous pouvons observer, sur la Figure IX.13, un « décrochement », une diminution de l'intensité des relations de 18 à 8h UTC. Cette différenciation nocturne s'expliquerait par les écoulements de l'air froid vers les zones plus basses.

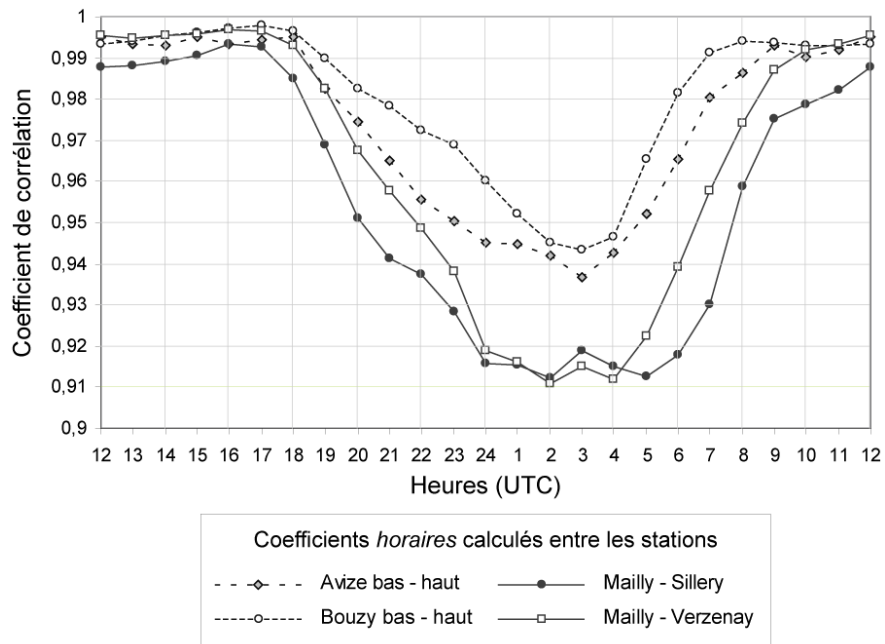


Figure IX.13 : Coefficients de corrélation calculés sur les températures horaires (à 2 m, sous abri) pour les couples de stations « bas-haut »

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

Ce phénomène de brises de pente est particulièrement important lors des nuits stables, caractérisées par un ciel clair et un vent calme. À partir de la classification des nuits selon les conditions atmosphériques rappelée dans l'Encadré VII.1 (p. 148) et adaptée de Choissnel *et al.* [1993], nous avons voulu vérifier cette affirmation en calculant les écarts moyens entre les températures minimales (sous abri, à 2 m) de chaque couple de stations, pour les nuits de ciel clair et de vent calme, puis pour les autres (Tableau IX.5). Les écarts sont systématiquement plus forts lors des nuits dont les conditions atmosphériques sont stables²¹¹.

Tableau IX.5 : Les écarts moyens des températures minimales (sous abri, à 2 m) pour les trois couples de stations et selon les conditions atmosphériques des nuits

		Avize	Bouzy	Sillery/Mailly	Verzenay/Mailly
Classification des nuits	Ciel clair et vent calme	1.64	1.32	2.44	1.95
	Nébulosité variable et/ou vent non calme	0.38	0.41	0.90	0.58

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civo, Météo France

Ciel clair : si au moins 3 des observations nocturnes de nébulosité à Reims-Courcy (sur 4) sont inférieures ou égales à 2 octats. Vent calme : si la moyenne des vitesses de vents pour toutes les stations est inférieure à 2 m/s.

Les différences observées entre les couples de stations dépendent de la différence d'altitude entre le *bas* et le *haut* : par exemple, presque 50 m pour le coteau de Bouzy et 80 m pour Sillery/Mailly. En ne retenant que ces nuits de ciel clair et de vent calme, nous avons alors calculé un gradient altitudinal des températures minimales sur les coteaux marnais à partir de ces trois couples, en ramenant à une même différence altitudinale. Le gradient pour toutes les nuits de ciel clair et de vent calme varie alors entre 2.5 et 3°C/100 m²¹² en moyenne, ce qui démontre l'importance du phénomène d'inversion thermique. Pour certaines dates, il peut même dépasser les 6°C/100 m.

Conclusion du chapitre IX

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux relations entre les températures minimales relevées dans le vignoble marnais et les conditions atmosphériques. Que ce soit à partir de l'étude du refroidissement nocturne, de sa variabilité spatiale ou encore du phénomène d'inversion thermique, la couverture nuageuse semble toujours jouer un rôle prépondérant par rapport au vent (vitesse et direction). En revanche, il nous a souvent été difficile de mettre clairement en évidence l'influence de la vitesse moyenne du vent. Rappelons que les données de nébulosité ne sont disponibles qu'à la station synoptique de Reims-Courcy. Cette étude repose donc sur l'hypothèse sous-jacente d'une couverture nuageuse uniforme. Or, plusieurs auteurs ont montré une variabilité spatiale de la nébulosité : une déchirure ponctuelle de cette couche peut, par exemple, être accompagnée

211. Cette observation est confirmée par quatre analyses de la variance montrant une relation entre les écarts thermiques journaliers et les conditions atmosphériques (deux classes), quelque soit le couple de stations retenu (pour des risques d'erreur inférieurs à 1%).

212. Plus précisément, pour Avize 2.57, pour Bouzy 2.74, pour Mailly/Sillery 3.08 et pour Mailly/Verzenay 2.46°C/100 m.

Les altitudes des stations sont extraites du Modèle Numérique d'Élévation et correspondent au point le plus proche. Sillery et Verzenay sont alors considérés à la même altitude, ce qui explique la différence importante des gradients thermiques pour Mailly/Sillery et Mailly/Verzenay.

d'un refroidissement plus important en dessous. En outre, les types de nuages, notamment leur hauteur, peuvent également modifier les données du bilan radiatif.

Compte tenu de notre problématique, les nuits qui nous semblent les plus intéressantes à étudier sont celles dont les conditions sont stables (ciel clair et vent calme) : elles connaissent un fort refroidissement, le phénomène d'inversion thermique et surtout une variabilité importante. La topographie intervient alors fortement dans la variabilité spatiale des températures minimales. Au terme de l'étude de ces trois pistes de recherche abordées dans ce chapitre, nous avons constaté qu'il n'était pas facile de distinguer ces nuits en particulier. La réalité est plus complexe ; les limites ne sont pas toujours aussi claires. Aussi notre distinction des nuits de ciel clair et de vent calme peut-elle être nuancée par ces observations.

Chapitre X - LES NUITS DE GEL

Nous avons précédemment rappelé que le gel était défini, *stricto sensu*, par une température inférieure à 0°C. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux nuits où les températures à 2 m (sous abri) sont descendues en dessous de ce seuil 0°C, que nous qualifions alors de *nuits gélives*. Cependant, pour le vigneron, le phénomène des gelées est une combinaison entre un état physiologique de la plante et des températures très basses : ainsi, au printemps, après la reprise de la croissance végétale, le seuil retenu le plus souvent est de -2°C en température de l'air. Selon les analyses, nous choisirons l'un ou l'autre de ces seuils thermiques, parfois pour avoir des échantillons importants et d'autres fois pour étudier les nuits particulièrement gélives.

Cette étude commencera par une description, dans une approche phénoménologique, des gelées particulièrement intenses du mois d'avril 2003, à travers la description des conditions synoptiques qui ont amené à ces très basses températures, mais aussi à travers les répercussions sur le vignoble champenois. Puis nous nous analyserons les variabilités spatiale et temporelle du *gel météorologique*, approche-clef de cette partie. Nous rechercherons ensuite si les conditions atmosphériques, en particulier la couverture nuageuse et le vent, modifient l'occurrence et l'intensité d'une gelée.

X.1 - Étude dynamique des fortes gelées d'avril 2003

Afin de décrire et d'expliquer un épisode gélif, plusieurs auteurs s'appuient sur l'étude dynamique du phénomène, c'est-à-dire sur l'analyse des situations atmosphériques à l'échelle synoptique. Par exemple, P. Blondeau et J. Gravier [1995] ont étudié, selon cette approche phénoménologique, les gelées d'avril 1991 sur les vergers de la Sarthe. Dans sa thèse, M. Roten [1964] a cherché les conditions météorologiques menaçant, par des températures froides, les cultures du Valais (Suisse).

Pour étudier la dynamique du gel printanier dans le vignoble marnais, l'idéal serait d'analyser de manière systématique et de classer les situations dangereuses à partir des cartes synoptiques générales sur l'Europe de l'Ouest (à partir des classifications des types de temps classiquement utilisées : [Bénichou, 1985 ; Paul (P.), 1994]). Ce travail a été entrepris par S. Dumagnou dans une thèse sur les gelées en Champagne, mais il n'a pas été achevé et aucune autre étude n'a été engagée.

Par manque de temps, nous avons choisi ici de nous limiter aux plus fortes gelées de nos six printemps (1998-2003) : la période du 7 au 11 avril 2003. Celle-ci a retenu notre attention en raison des très basses températures sur le vignoble marnais (moyenne des températures minimales à 2 m inférieure à -1.5°C) et en raison des importants dégâts sur la vigne qu'elles ont provoqués.

Le vignoble de Champagne a connu, avant cette période particulièrement froide, un mois de mars avec des journées douces, sèches et très ensoleillées (une insolation de 211h contre 129h en moyenne [Langellier, 2003a]), surtout la deuxième quinzaine. Le développement de la vigne n'était donc pas en retard.

Les conditions synoptiques, présentées sur les BHER de l'Annexe F, du début avril (à partir du 02/04/03) sont caractérisées par une ondulation du *jet stream* en altitude. La France est alors sous l'influence d'une goutte froide en altitude, qui va conduire à une forte instabilité en ce début avril (grêle le 03/04 par exemple). Au sol, l'anticyclone, situé au large de l'Angleterre le 2 avril, va se déplacer vers l'est et s'étendre, de plus en plus, les jours suivants. Le nord de la France est alors traversé par quelques résidus nuageux (stratus et stratocumulus) associés à la queue d'un front chaud, ce qui limite le refroidissement nocturne.

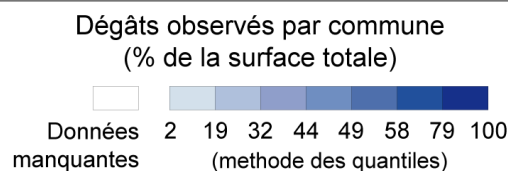
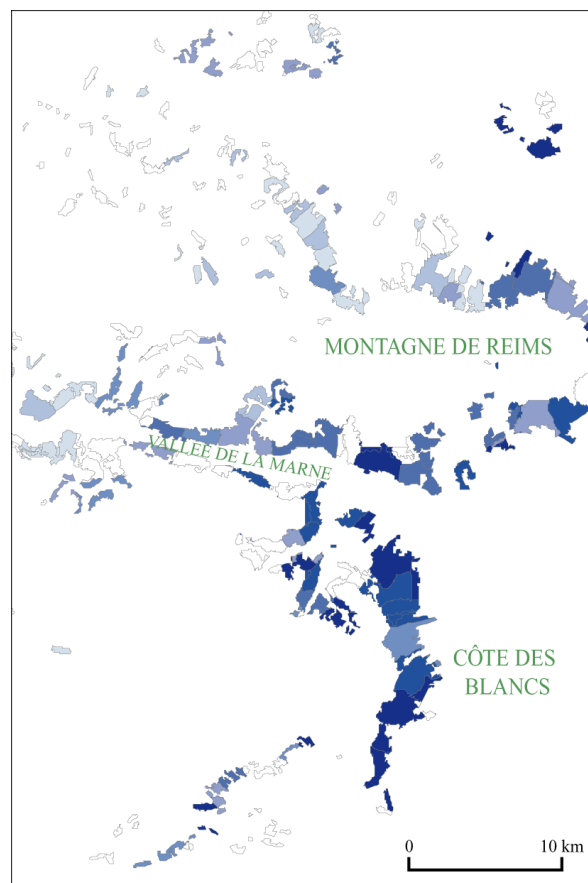
À partir du 6 avril 2003, le flux de nord-est a une orientation de plus en plus nettement d'est et devient donc plus froid et plus sec. Le quart nord-est de la France connaît alors des températures négatives dans la nuit du 6 au 7 avril, en raison des conditions anticycloniques au sol et de l'assèchement de l'air (par contre, la journée est très ensoleillée). Le 8 avril, le haut géopotential se décale vers le nord et, en raison de la dorsale anticyclonique en surface et de l'air froid et sec venant de l'est, le grand quart nord-est de la France subit de fortes gelées. Dans la Marne, les températures sous abri (à 2 m) descendent jusqu'à -9.1°C pour Chambrecy (toutes les stations enregistrent des températures négatives). Cette nuit du 7 au 8 avril est exceptionnellement froide, mais ne connaît pas de dégâts importants du fait de la non reprise de la croissance végétative pour la majorité des ceps et du fait également de la sécheresse :

« Ces conditions un peu particulières [de sécheresse] ont des conséquences favorables. Les jeunes pousses, lors du gel, ne sont pas humectées et en l'occurrence ne sont pas recouvertes de givre ; leur résistance au froid est donc meilleure. » [Langellier, 2003b]

Les jours suivants sont encore caractérisés par des temps ensoleillés en journée et des températures négatives la nuit. À partir du 10 avril, la remontée d'air chaud liée à une perturbation va buter sur l'air froid installé sur le nord du pays [Météo France, 2003], ce qui provoque quelques chutes de pluie voire de neige. En Champagne, l'humidité apportée par la neige dans la soirée du 10 avril va fragiliser les bourgeons de vigne. Les dégâts sont alors très importants : en moyenne, la perte totale est estimée à 43% des surfaces plantées, surfaces ramenées à 100% de perte [Langellier *et al.*, 2003].

F. Langellier (CIVC) nous a fourni les résultats d'une enquête sur les dégâts gélifs observés sur la vigne pour le printemps 2003. Les informations, communiquées par des vigneron, correspondants locaux de l'AVC et par les Services Techniques du CIVC (observations de terrain), représentent le pourcentage, par commune viticole, de la surface touchée par les gelées (par rapport à la superficie totale). Comme nous l'avons mentionné, ces dégâts ont été observés essentiellement le 11 avril 2003. Malheureusement les résultats de cette enquête sont donnés à l'échelle communale et ne prennent donc pas en compte la disparité entre les différentes parcelles d'une même commune (perte d'information).

La Carte X.1 représente, par commune, la répartition du pourcentage de surface viticole ayant subi des dégâts gélifs lors du printemps 2003. Elle témoigne donc du phénomène des gelées d'un point de vue agronomique, qui n'est pas identique à l'aléa gélif (gel météorologique). Il apparaît, sur cette carte, que les coteaux situés à l'est du vignoble (Montagne de Reims et Côte des Blancs) ont connus des dégâts gélifs importants à la différence du nord de la Montagne de Reims (moins de 32% des surfaces) et, dans une moindre mesure, de la Vallée de la Marne. Or, les coteaux orientaux (Côte des Blancs) sont, en général, plus chauds que les secteurs au nord (Carte VII.2, p. 143). Cette différence des dégâts s'explique, ici, essentiellement par la répartition des cépages : les zones ayant subi peu de dégâts sont plantées, principalement, de Pinot Meunier (Carte III.3, p. 65). Ce cépage connaît un débourrement plus tardif²¹³ que le Chardonnay et le Pinot Noir, ce qui lui a permis de résister à ces gelées précoces.



Carte X.1 : Répartition des dégâts par commune lors du printemps 2003

Données : Enquête AVC - CIVC
À l'origine, l'information disponible est à l'échelle communale.
Nous avons ici appliqué un masque afin d'isoler les zones viticoles (à partir de la BD Carto - IGN).

213. Pour le printemps 2003, les dates moyennes de débourrement (sur l'ensemble du vignoble) étaient le 4 avril pour le cépage Chardonnay, le 9 pour le Pinot Noir et le 13 pour le Pinot Meunier.

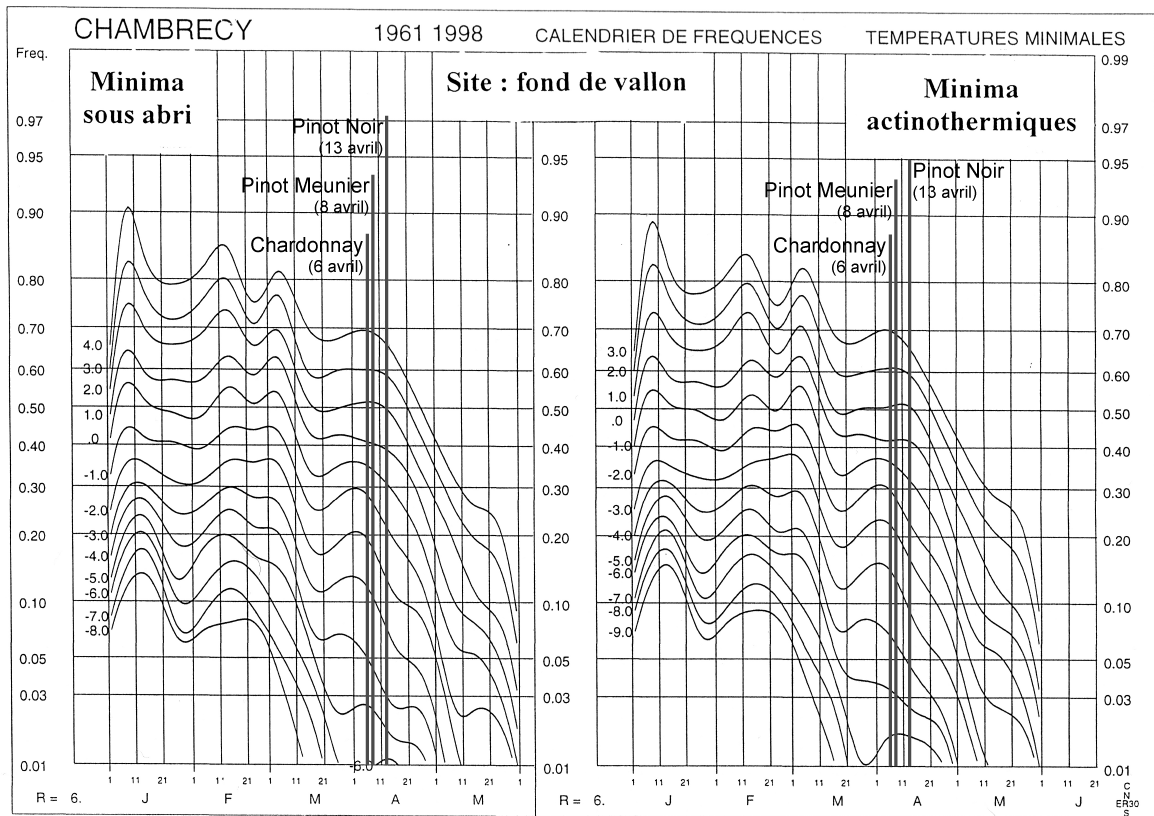
À une échelle beaucoup plus fine, les influences de la date de la taille et de la couverture du sol ont pu également être mises en évidence dans la variabilité spatiale des dégâts des gelées :

« On remarquait parfois une répartition étonnante des dégâts le long des bois fructifères : bourgeons tournés vers le ciel détruits et protégés sous le bois indemnes ; de la même façon de nombreux bourgeons protégés par un piquet ou une charpente échappaient à la destruction ; il est probable que le dépôt de neige ou le mouillage par la pluie ait eu une incidence directe sur les dégâts. Le long des coteaux on assistait à des comportements assez étranges liés justement à ce caractère très précoce des gelées par rapport au développement de la vigne. Les fonds étaient parfois moins touchés que les hauteurs : on peut expliquer ceci par un développement retardé en bas de coteau et donc une moindre sensibilité. » [Langellier, 2003b]

X.2 - Les gelées printanières dans le temps

Pour représenter la variation des gelées au cours d'une année, il est très fréquent d'utiliser les calendriers de probabilités. Rappelons que leur construction repose sur les fréquences journalières d'occurrence de températures inférieures à certains seuils thermiques. Ces fréquences sont calculées sur une longue période de mesures (30 ans le plus souvent), même si M.-F. de Saintignon [1998-1999] a montré la possibilité d'une reconstitution de séries plus courtes.

Nous présentons, sur la Figure X.1, les calendriers de fréquences de températures inférieures à plusieurs seuils thermiques pour la station de Chambrecy [de Saintignon, 1998-1999]. L'occurrence de températures très froides diminue fortement au cours du printemps. Nous pouvons, à nouveau, remarquer la période plutôt froide début avril. Afin de mieux replacer l'aléa gélif face à une vulnérabilité agronomique, nous avons ajouté, sur la Figure X.1, les dates moyennes du débourrement pour les trois cépages plantés en Champagne : le Chardonnay (le 6 avril), le Pinot Meunier (le 8) et le Pinot Noir (le 13) (période 1954-1990 ; [Avc, 1991]). Il apparaît très clairement que cette reprise de la croissance végétative coïncide avec la période relativement froide de début avril. Cette période est donc très critique pour le gel des bourgeons. Cela étant, ces conclusions reflètent seulement une *image moyenne* et chaque printemps est unique (forte variabilité temporelle). Pour peu que les conditions de mars fussent plutôt défavorables (températures froides, faible ensoleillement), la vigne, alors en retard végétatif, sera épargnée des gelées météorologiques pouvant survenir début avril (et inversement).



Reconstitutions réalisées à partir de la série des minima sous abri de Reims (1961-1998) et des échantillons de calage : - minima sous abri : 1993-1998 (début au 25-01-1993) - minima actinothermiques : 1993-1998

Figure X.1 : Calendrier de probabilités d'occurrence de températures inférieures à plusieurs seuils (de -8 à 4°C) à Chambrecy

Source : [Avc, 1991 ; de Saintignon, 1998-1999]

Afin d'étudier la variabilité temporelle des gelées météorologiques pour les six printemps retenus, 1998-2003, la Figure X.2 montre la répartition des nuits où au moins une station du vignoble marnais a enregistré une température inférieure à 0°C²¹⁴. Nous avons choisi de représenter ces jours de gel par année afin d'indiquer également la variabilité interannuelle de l'aléa gélif 0°C (en outre, une information sur l'intensité est précisée). Il apparaît très nettement une forte variabilité du gel entre les années, tant en intensité que dans le temps. Même si les températures inférieures à 0°C sont plus fréquentes, en toute logique, dans la première moitié du printemps, les dates diffèrent d'une année à l'autre. Par exemple, en 1998, les dates de gel se situent plutôt à la fin du mois de mars, à l'inverse du printemps 2001. En outre, nous observons également que ces dates *gélives* sont consécutives et représentent alors des *épisodes de froids matinaux*.

214. Au total, cela représente 76 dates.

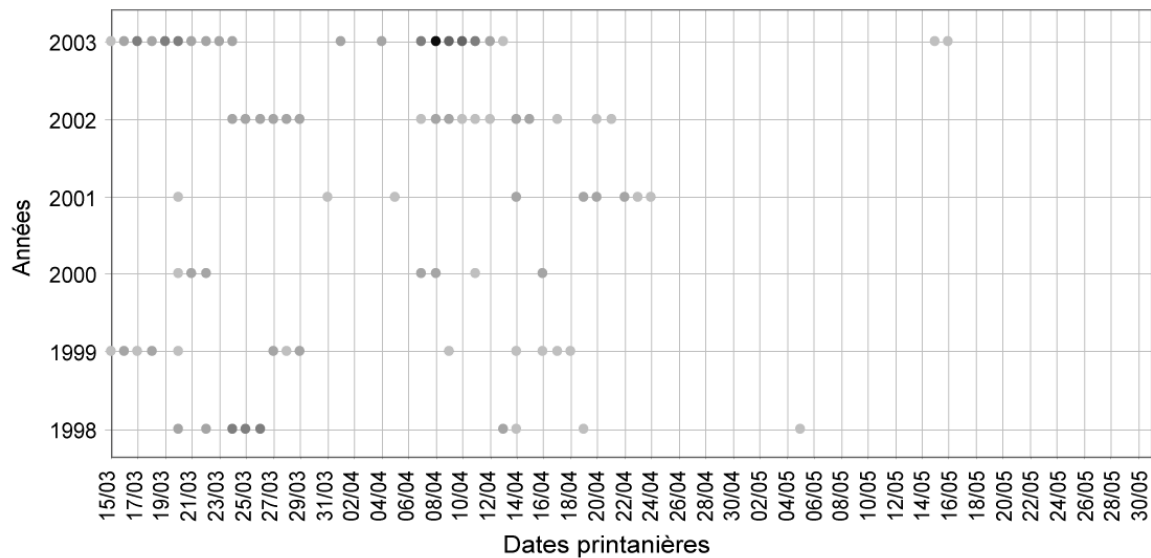


Figure X.2 : Dates printanières, pour chaque année, où le minimum des températures minimales des stations (sous abri, à 2 m) est inférieur à 0°C

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

Cette Figure X.2 rappelle surtout combien le printemps 2003 a été particulièrement froid (en comparaison des cinq autres) : deux périodes gélives, du 15 au 24 mars et du 7 au 13 avril, se distinguent nettement par leur intensité et leur durée. Lors de cette deuxième période, le vignoble marnais a connu des gelées dommageables, comme nous l'avons vu précédemment.

X.3 - La variabilité spatiale des gelées

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés à la variabilité spatiale de ces températures négatives. Le Tableau X.1 répertorie, par station, les fréquences des températures inférieures à 0°C²¹⁵ pour les quatre premières décades²¹⁶ (soit du 15 mars au 23 avril). Nous avons écarté ici les décades suivantes où les températures inférieures à 0°C ne sont qu'anecdotiques (trois dates gélives pour Chambrecy et Germaine²¹⁷). Il ressort que, quelle que soit la décade, toutes les stations ont enregistré, au moins pour une date, une température négative. Cela étant, des différences très importantes s'observent entre stations, par exemple entre Bouzy haut (jamais plus de 9% de nuits gélives par décade) et Chambrecy (toujours plus de 20%). Ce dernier poste, déjà décrit comme particulièrement froid, connaît, pour les quatre premières décades, une nuit *gélive* sur cinq à plus d'une sur trois (fin mars). Les stations de Germaine et de Reims-Courcy, et dans une moindre mesure

215. Ce seuil a été retenu ici pour obtenir des échantillons assez représentatifs. En prenant le seuil de -2°C, une différence d'une date entre deux stations modifiait la fréquence de 1.6 point. Compte tenu des faibles effectifs des nuits *gélives* au seuil de -2°C (en moyenne, 3.9%, pour toutes les stations et toutes les décades sélectionnées), ces différences pouvaient influencer fortement l'interprétation de la variabilité du phénomène des gelées entre stations.

216. L'évaluation d'un aléa gélif avec un pas de temps décadaire est souvent retenue. Elle permet de s'affranchir de la variation des dates auxquelles sont atteints les stades repères [de Villele *et al.*, 1993].

217. Dans le détail : -0.5°C le 05/05/98 à Chambrecy ; -0.2°C le 24/04/01 à Germaine ; les 15 et 16/05/03, -0.5 et -0.7°C à Chambrecy, -0.3 et -0.2°C à Germaine.

Orbais-l'Abbaye, Sillery et Saint-Thierry, enregistrent également, de manière fréquente, des températures négatives. Excepté Saint-Thierry, ces différentes stations mises en valeur sont situées au tiers inférieur des coteaux (approximativement) ou en plaine (Reims-Courcy et Sillery). À nouveau, la topographie semble jouer un rôle sur la répartition des secteurs touchés par un aléa gélif.

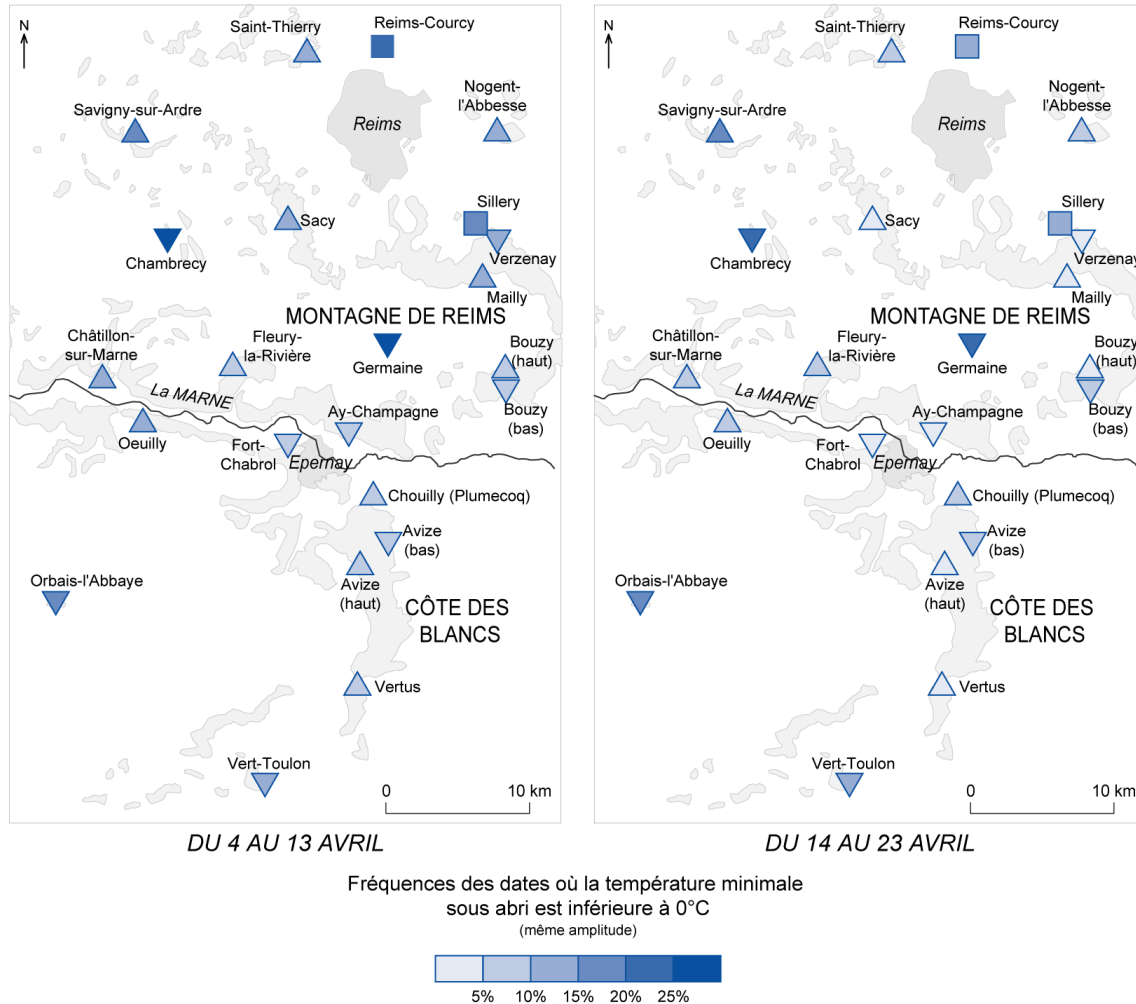
Tableau X.1 : Tableau des fréquences (en%) des températures minimales négatives par station et pour les quatre premières décades des périodes printanières retenues

Stations	Du 15 au 24 mars	Du 25 mars au 3 avril	Du 4 au 13 avril	Du 14 au 23 avril
Avize (bas)	16,7%	13,3%	10,0%	6,7%
Avize (haut)	5,0%	8,3%	8,3%	1,7%
Aÿ-Champagne	11,7%	13,3%	8,3%	3,3%
Bouzy (bas)	3,3%	10,0%	6,7%	10,0%
Bouzy (haut)	1,7%	3,3%	8,3%	3,3%
Chambrecy	38,3%	20,0%	28,3%	25,0%
Châtillon-sur-Marne	3,3%	5,0%	11,7%	8,3%
Fort-Chabrol	1,7%	3,3%	10,0%	6,7%
Fleury-la-Rivière	5,0%	8,3%	8,3%	5,0%
Germaine	35,0%	18,3%	26,7%	21,7%
Mailly	6,7%	5,0%	11,7%	3,3%
Nogent-l'Abesse	6,7%	3,3%	11,7%	6,7%
Œuilly	5,0%	10,0%	11,7%	8,3%
Orbais	28,3%	15,0%	18,3%	16,7%
Plumecoq	6,7%	5,0%	10,0%	8,3%
Reims-Courcy	31,7%	15,0%	25,0%	11,7%
Sacy	18,3%	6,7%	11,7%	1,7%
Savigny-sur-Ardre	10,0%	5,0%	11,7%	6,7%
Sillery	28,3%	16,7%	18,3%	18,3%
Saint-Thierry	30,0%	16,7%	16,7%	15,0%
Vert-Toulon	10,0%	15,0%	13,3%	15,0%
Vertus	5,0%	5,0%	8,3%	3,3%
Verzenay	18,3%	15,0%	13,3%	5,0%
Toutes les stations	14,2%	10,3%	13,4%	9,2%

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

En considérant toutes les stations, la proportion de températures minimales (sous abri) négatives diminue, d'une manière générale, au cours du printemps, en relation avec l'augmentation générale des températures. Cependant, à la lecture du Tableau X.1, nous constatons que la décade du 4 au 13 avril connaît un aléa gélif plus important que la précédente (25/03-03/04). Cette observation d'un début avril relativement froid a été déjà faite lors de l'étude de l'évolution printanière des températures minimales (Figure VII.2, p. 133) et sur le calendrier de probabilités de Chambrecy (Figure X.1). Pour certaines stations, telles que Bouzy (haut), Châtillon-sur-Marne, Fort-Chabrol, etc. (stations situées approximativement au tiers supérieur du coteau), cette décade apparaît même comme la plus *gélive*. Comme les périodes les plus précoces de la reprise de la croissance végétative interviennent début avril, cette observation prend toute sa dimension quant au risque de gel (combinant des températures froides et un stade phénologique de la plante). Aussi, nous avons souhaité cartographier les fréquences des températures minimales négatives (sous

abri) pour cette décade (Carte X.2). Rappelons que les dates de débourrement des cépages champenois sont en moyenne entre le 6 et 13 avril [AVC, 1991], mais cela varie fortement d'une année à l'autre (par exemple, en 1997, pour le Pinot noir : 23 avril [Personnic, 1999]). Nous avons également représenté la quatrième décade, soit du 14 au 23 avril (Carte X.2). Certes l'aléa gélif est moins élevé, mais la fragilité du végétal l'est plus.



Carte X.2 : Répartition des températures minimales sous abri était inférieure à 0°C pour les deux décades

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CiviC, Météo France
 Les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

Sur la Carte X.2, la répartition des fréquences stationnelles des températures minimales négatives est, en toute logique, sensiblement similaire à celle observée pour les températures minimales (Carte VII.2, p. 143). À nouveau, les stations situées sur la Côte des Blancs et au sud de la Montagne de Reims sont relativement plus chaudes que les stations au nord. De plus, les postes mentionnés précédemment comme très froids (Chambrecy, Germaine, Reims-Courcy, etc.) s'individualisent fortement, notamment lors de la deuxième décade sélectionnée. Par exemple, du 14 au 23 avril, alors que l'aléa gélif est inférieur à 5% pour Aÿ-Champagne, pour la station de Germaine, située à quelques kilomètres seulement, plus d'une nuit sur cinq, les températures sont négatives.

X.4 - Relation avec la nébulosité et le vent

Nous nous sommes ensuite intéressés aux conditions atmosphériques associées aux dates gélives. Pour cela, nous avons dans un premier temps sélectionné 46 nuits pour lesquelles la température minimale sous abri est descendue, au moins pour une station du vignoble marnais, en dessous de -2°C^{218} . Nous avons alors comparé les données de vent et de nébulosité (station synoptique de Reims-Courcy) pour ces nuits *gélives* par rapport à l'ensemble des 468 dates printanières.

X.4.1 - Selon l'occurrence du gel

Le Tableau X.2 répertorie, pour les deux échantillons de dates (nuits de gel / toutes les nuits), la proportion des nuits selon la nébulosité et les vitesses nocturnes à Reims-Courcy. Pour la nébulosité, nous proposons une partition simple en « ciel clair » et en « nébulosité variable » : si au moins trois des observations nocturnes (sur quatre : 21, 0, 3 et 6h UTC) sont inférieures ou égales à 2 octats, alors le ciel est considéré comme dégagé. Quant aux vitesses du vent, nous avons calculé les moyennes nocturnes à Reims-Courcy (ici arrondies à l'unité pour permettre une partition commode).

Tableau X.2 : Proportion des nuits avec ou sans gel, selon les typologies de nébulosité et de vitesse de vent (à Reims-Courcy)

		Nuits de gel	Toutes les nuits
Classes de nébulosité	« Ciel clair »	65%	25%
	« Nébusosité variable »	35%	75%
Moyenne des vitesses nocturnes à Reims-Courcy	0 m/s	8,70%	2,77%
	1 m/s	54,35%	37,31%
	2 m/s	23,91%	26,23%
	3 m/s	13,04%	18,34%
	supérieure à 4 m/s	-	15,35%

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Cvc, Météo France
 Les classes de nébulosité reposent sur les observations trihoraires de nébulosité à Reims-Courcy, de 21 à 6h (UTC) : si au moins trois heures sur quatre ont une nébulosité inférieure ou égale à 2 octats, alors « ciel clair », sinon « nébulosité variable ». Les vitesses nocturnes du vent à Reims-Courcy (21-6h) ont été arrondies à l'unité. 46 nuits de gel (si au moins une station enregistre une température minimale inférieure à -2°C) sur 468 nuits printanières (78 dates x 6 printemps)

Nous pouvons observer que les conditions de ciel clair sont beaucoup plus fréquentes pour les nuits de gel (65% ; Tableau X.2). Un test de comparaison des proportions a permis de confirmer cette observation : la part des conditions de ciel clair est significativement plus élevée lors des nuits gélives que sur l'ensemble des dates (risque d'erreur inférieur à 0.01%). Ce résultat n'est pas surprenant, une faible nébulosité favorisant le refroidissement nocturne et donc l'aléa gélif.

Lorsque le vent est faible, le brassage de l'air est moins important et la stagnation de l'air froid peut alors accentuer l'aléa gélif. Nous avons testé cette affirmation à partir de notre sélection de 46 dates gélives. D'après le Tableau X.2, nous constatons que ces nuits de gel connaissent des vents relativement plus faibles : les vitesses moyennes nocturnes de 0 et 1 m/s sont en effet plus fréquentes pour ces nuits (63% contre 40% pour l'ensemble des

218. En prenant le seuil plus élevé de 0°C , nous sélectionnions des dates, somme toute, assez peu gélives. Aussi, nous avons préféré un seuil plus bas.

nuits)²¹⁹. À l'inverse, les vitesses moyennes supérieures à 4 m/s ne se rencontrent pas lors des nuits gélives.

Au final, les nuits gélives sont plutôt caractérisées, en moyenne, par un ciel dégagé et par des vents de vitesse faible, ce qui corrobore de nombreux travaux [Roten, 1964 ; Sarmir, 1995...].

Même si le vent est faible lors des nuits définies comme gélives, nous avons souhaité comparer les directions du vent de ces nuits par rapport à l'ensemble des dates. À nouveau, cette étude repose sur les données de la station synoptique de Reims-Courcy. La Figure X.3 représente les roses des vents selon les 8 grandes directions (N, NE, etc.) pour l'ensemble des nuits et pour l'échantillon des nuits *gélives*. Précédemment, nous avons montré que le vent à Reims venait principalement du sud-ouest, ce que confirme la première rose (à gauche). La forme de la seconde rose relative aux nuits gélives est totalement différente : les vents (dont l'intensité est plus faible, comme nous venons de le montrer) ont une origine presque exclusivement du quadrant nord à est (N 23%, NE 27% et E 16%).

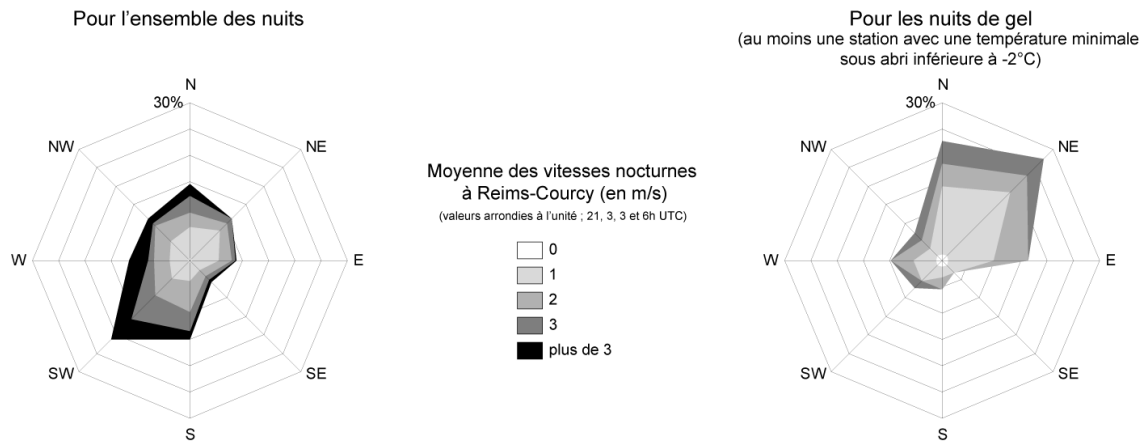


Figure X.3 : Répartition des grandes directions de vent à Reims-Courcy pour l'ensemble des 468 nuits printanières et pour les 46 nuits gélives

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CVC, Météo France

Les types de temps à l'échelle synoptique expliquent ces résultats, avec en particulier l'importance des situations anticycloniques ou à la marge lors des nuits gélives. La région connaît alors des advections d'air froid d'origine nord à est (air polaire le plus souvent). Le refroidissement peut alors être renforcé par une faible nébulosité, comme nous l'avons vu pour les gelées importantes d'avril 2003.

X.4.2 - Selon l'intensité du gel

Toujours à partir de notre sélection de dates dites *gélives*, nous nous sommes plus intéressés à l'intensité du gel qu'à sa seule occurrence. Nous venons d'évoquer l'importance de la nébulosité et du vent (intensité et direction) dans la manifestation d'un aléa gélif. Qu'en est-il de son intensité ? Est-ce que les conditions de ciel clair et de vent calme sont les plus

219. Une analyse de la variance des vitesses moyennes nocturnes selon qu'il y ait eu *gel* ou non a montré que pour un risque d'erreur inférieur à 5%, la vitesse moyenne est significativement plus faible lors des nuits gélives.

favorables à un très fort refroidissement nocturne ? Ce dernier est-il alors généralisé à l'ensemble du vignoble marnais ou seulement pour quelques postes météorologiques ?

Pour répondre à ces différentes questions, nous avons cherché à savoir si l'intensité du gel était associée d'une part à une variabilité spatiale importante, d'autre part à la nébulosité et à la vitesse du vent. Pour définir une *intensité* du gel, nous avons choisi la moyenne des températures minimales sur l'ensemble des stations (pour chacune des 46 dates gélives)²²⁰. La variabilité spatiale de ces données thermiques a été évaluée à partir du coefficient de variation. Ce paramètre de dispersion relative (pour comparer les différentes dates) ne s'appliquant pas à des valeurs négatives, nous avons transformé les températures (en degrés Celsius) en degrés Kelvin. Enfin, quant aux informations sur la nébulosité et la vitesse du vent, nous avons repris les variables utilisées précédemment :

- pour la nébulosité, moyenne des observations trihoraires nocturnes à Reims-Courcy (21-6h UTC) ;
- pour la vitesse du vent, moyenne des mesures trihoraires nocturnes à Reims-Courcy (21-6h UTC).

L'étude des corrélations entre ces variables (Tableau X.3) montre que, lors des nuits gélives, plus les températures minimales sont froides, en moyenne, sur l'ensemble du vignoble marnais, plus la dispersion relative de ces températures a tendance à être faible (coefficient de corrélation de 0.41, significatif avec un risque d'erreur de 1%). Autrement dit, les gelées intenses tendent à être généralisées à l'ensemble des stations. Par contre, alors que nous avons établi, précédemment, des liens entre l'occurrence du gel et les caractéristiques du vent et de la nébulosité, nous ne pouvons pas confirmer ici l'hypothèse d'un lien avec les conditions atmosphériques, du moins selon les variables retenues ici. Il semble donc que les fortes gelées soient plus imputables à des refroidissements advectifs, en accord avec les résultats de I. Sarmir [1995].

Tableau X.3 : Corrélations entre l'intensité du gel, sa variabilité spatiale et les conditions atmosphériques (nébulosité et vitesse du vent) pour les nuits retenues comme gélives

	Moyenne des températures minimales
C.V. des T_N	0,41
Nébulosité	-0,07
Vitesse du vent	-0,18

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CVC, Météo France
 Avec C.V. des T_N : coefficient de variation (calculé sur les températures en Kelvin, en raison des valeurs négatives de l'échelle thermométrique Celsius) ;
 Nébulosité : moyenne des observations trihoraires nocturnes de nébulosité à Reims-Courcy (21-6h UTC) ;
 Vitesse : moyenne des vitesses trihoraires nocturnes à Reims-Courcy.
 En gras, les corrélations significatives au seuil de 1%.

Conclusion du chapitre X

Dans ce chapitre, nous avons montré combien la variabilité temporelle du gel était importante. Ainsi, même si la période critique se situe en début de printemps, chaque année est différente de la précédente ou de la suivante. L'étude de la variabilité spatiale des gelées montre clairement l'importance de la topographie, comme cela a déjà été remarqué avec les

220. Nous avons également testé d'autres variables relatives aux températures minimales. Les résultats avec la médiane journalière sont similaires à ceux présentés ici avec la moyenne. Enfin, en prenant en compte le minimum absolu, seule la relation avec le coefficient de variation est significative. Elle est de même intensité et sens que celle avec la moyenne.

températures minimales. Les stations de bas de coteau connaissent ainsi un aléa gélif beaucoup plus important, ce qui peut s'expliquer par les phénomènes d'inversion thermique et d'écoulements d'air froid vers les zones basses.

Dans un second temps, nous avons cherché à savoir si les conditions atmosphériques pouvaient influencer l'occurrence et l'intensité de ces gelées météorologiques. Si les conditions de ciel clair et de vent calme favorisent l'apparition de températures négatives, ces conditions ne semblent pas jouer sur leur intensité. Les gelées les plus fortes sont ainsi associées à des refroidissements advectifs accompagnés d'une faible couverture nuageuse, comme ce fut par exemple le cas en avril 2003. L'étude détaillée des dommages gélifs de ce printemps nous a cependant permis de mettre en évidence l'influence de la répartition des cépages et de souligner l'écart entre les gels météorologique et agronomique.

Quatrième partie

Modélisations spatiales des températures minimales

Actuellement, le système opérationnel de Météo France Marne permet d'estimer, à court terme, un aléa gélif pour quatre points du vignoble. Or, nous avons montré, dans la partie précédente, que les températures minimales présentaient une forte variabilité spatiale, accentuée les nuits de ciel clair. Nous cherchons, dans cette partie, à modéliser les données ponctuelles des stations afin de spatialiser l'aléa gélif.

Dans un premier chapitre, nous présentons des travaux qui visent à améliorer l'adaptation statistique de Météo France en augmentant le nombre de stations. Nous discutons la qualité des sorties de cette modélisation statistique, dont les résultats restent cependant ponctuels.

Ensuite, nous dressons un panorama des méthodes de spatialisation couramment utilisées en climatologie. Ces méthodes peuvent être regroupées selon deux grandes familles : géostatistiques et multi-critères. Dans les chapitres suivants, nous présentons les résultats obtenus à partir de ces deux types d'approche. Le chapitre XIII est ainsi consacré à la recherche de structures spatiales dans le champ des températures minimales du vignoble marnais. Puis, dans le chapitre XIV, nous déterminons les facteurs locaux à l'origine de la variabilité spatiale de ces températures. Dans le chapitre XV, nous proposons finalement plusieurs exemples de spatialisation, combinant ces deux approches.

Enfin, dans un dernier chapitre, nous discutons une amélioration possible de nos modèles à partir des résultats de simulation du modèle MESO NH pour une date donnée, qui prend en compte les écoulements de l'air.

Chapitre XI - AMELIORATION DE L'ADAPTATION STATISTIQUE DE METEO FRANCE

Le CDM de la Marne utilise, depuis 1990, un système opérationnel de prévision du risque de gel, qui se base sur une adaptation statistique réalisée au préalable à partir des données de quatre stations sur neuf années [Choisnel *et al.*, 1993]. Toutefois, lors des situations météorologiques favorables à un fort refroidissement nocturne, caractérisées par un ciel clair et un vent calme, il peut y avoir de grandes différences de température, d'une station à une autre : en fin de nuit, des écarts de plusieurs degrés sont courants pour des stations distantes de quelques kilomètres [Beltrando, 1998]. La prévision de la température à la hauteur des bourgeons pour seulement quatre points, sur un vignoble aussi morcelé dans l'espace, s'avère donc relativement insuffisante.

Afin d'améliorer cette estimation de l'aléa gélif dans le vignoble marnais, nous avons repris la même méthode en l'étendant à un plus grand nombre de stations (19)²²¹ [Madelin, 1998]. Toutefois, cette nouvelle adaptation s'appuie sur un nombre limité de dates printanières (seulement sur les printemps 1995 à 1998), en raison de l'installation relativement récente du réseau de stations automatiques. Dès lors, des mises à jour annuelles ont été apportées (jusqu'en 2001) [Madelin *et al.*, 2002] et ont été fournies à Météo France afin que le CDM de la Marne les intègre à son système de prévision, à titre expérimental.

Nous présentons ici la dernière mise à jour de l'adaptation statistique locale, réalisée sur les printemps 1995 à 2000. Nous décrivons plus spécifiquement les quelques améliorations apportées par rapport à la méthode de E. Choisnel *et al.* [1993]. À partir d'un test effectué sur le printemps 2001, nous discuterons ensuite de la qualité de cette nouvelle adaptation statistique. Cette analyse critique s'appuiera sur les données d'entrée du modèle (qui influencent fortement sa qualité), puis sur les sorties des indices actinothermiques des stations du vignoble marnais, donc sur la qualité opérationnelle de la nouvelle adaptation statistique.

XI.1 - Quelques améliorations apportées à la méthode originelle de Choisnel et al. [1993]

Prenant en compte de nouvelles stations récemment installées, il ne nous a pas été possible d'avoir des séries aussi longues que celles de l'adaptation de Météo France (six années au lieu des neuf utilisées dans l'ancienne adaptation) d'autant plus que, pour cette étude statistique, ne sont utilisées que les données du printemps (15 mars - 31 mai) au lieu de l'année entière. Le choix de travailler uniquement sur les données du printemps nous paraît

221. Cela a été possible grâce à l'installation d'un réseau de stations automatiques dans le vignoble champenois [Panigai, Langellier, 1992] (IV.1.3 - Le réseau Zonage du vignoble, p. 80).

justifié par le fait que l'humidité relative moyenne de l'air de cette saison est différente de la moyenne annuelle. Ceci a des répercussions sur les échanges radiatifs et par conséquent sur l'absorption du rayonnement solaire et finalement sur les températures de l'air près de la surface. Toutefois, les écarts moyens par station et par type de masse d'air sont calculés à l'aide d'un nombre relativement limité de mesures, ce qui, dans certains cas de figure, restreint la validité de ces écarts.

À partir des dates printanières retenues, nous appliquons le même principe de calcul des écarts moyens que E. Choissnel *et al.* [1993] :

- d'une part, à partir des écarts journaliers entre les températures minimales des postes et de Reims-Courcy : $T_N(i) - T_M(Rei)$;
- d'autre part, entre les indices actinothermiques (IA) et les températures minimales des stations : $T_N(i) - IA(i)$.

Pour chaque nuit étudiée, un type de masse d'air a été attribué selon la couverture nuageuse et le vent (à Reims-Courcy). Ces paramètres sont pris en compte dans le calcul des écarts moyens :

- la nébulosité et la classe de vent (selon sa direction et sa vitesse) pour les écarts $T_N(i) - T_M(Rei)$;
- la vitesse du vent pour les seconds $T_N(i) - IA(i)$.

Dans la précédente méthode, l'existence d'une fraction d'insolation supérieure ou égale à 80% la veille et le jour même à Reims-Courcy classait la nuit en « nébulosité variable » (et l'inverse en « ciel clair ») [Choissnel *et al.*, 1993]. En se rapprochant d'une méthodologie déjà exposée précédemment (Encadré VII.1, p. 148), nous avons préféré définir la couverture nuageuse des nuits à partir des données trihoraires de nébulosité de 21, 0, 3 et 6h UTC (à Reims-Courcy) : si au moins trois mesures sur quatre sont inférieures ou égales à deux octats, la couverture nuageuse de la nuit est qualifiée de « ciel clair », sinon à « nébulosité variable ».

Ensuite, E. Choissnel *et al.* [1993] distinguent les nuits selon la direction et la vitesse du vent à Reims-Courcy à 0h. Dans une première étape, nous avons légèrement modifié la classification des vents (Figure III.6, p. 71), en particulier en scindant la classe SW-W (classe V) en deux (sa fréquence étant trop importante). Cela étant, lorsque nous avons voulu tester la qualité de cette nouvelle adaptation statistique, nous nous sommes heurtés aux classes prédéfinies dans le logiciel opérationnel de l'INRA [Cellier et Itier, 1984] (utilisé au CDM de la Marne). Aussi sommes-nous revenus à la classification initiale des directions de vents pour être en adéquation avec le modèle. Enfin, aucune modification n'a été apportée quant à la vitesse du vent.

À partir des écarts moyens calculés, des caractéristiques générales ont été relevées : dans l'ensemble, la valeur absolue des écarts est plus grande par nuit de ciel clair que par nuit de nébulosité variable. Le signe des premiers écarts moyens $T_N(i) - T_M(Rei)$ correspond à la distinction stations chaudes / stations froides, alors que les seconds $T_N(i) - IA(i)$, unipolaires (positifs) montrent la prépondérance des inversions thermiques sur la période d'étude pour tous les types de masse d'air.

XI.2 - Analyse critique des entrées de l'adaptation statistique

En utilisant les écarts thermiques moyens calculés dans l'adaptation statistique, nous pouvons estimer les indices actinothermiques des 19 postes du vignoble marnais, à partir des prévisions de la température minimale et de la masse d'air à Reims-Courcy. Il est évident que la qualité de l'estimation des indices actinothermiques est liée à ces deux paramètres d'entrée.

XI.2.1 - Qualité de la prévision de la température minimale à Reims-Courcy

Les indices actinothermiques étant estimés à partir de la température minimale sous abri prévue à Reims-Courcy, il est alors évident que la qualité de cette estimation (plus largement celle de l'adaptation statistique) dépend fortement de la qualité de la prévision de la température minimale à Reims-Courcy. Pendant la campagne de prévision des gelées de printemps, cette température minimale est prévue soit par le prévisionniste en situation dite advective (à l'aide des modèles numériques de Météo France), soit par le modèle simplifié de l'INRA en situation radiative [Cellier et Itier, 1984].

Une analyse critique des prévisions quotidiennes météorologiques de Météo France a été réalisée sur des données de températures (températures minimales et maximales) pour la station de Reims-Courcy de juin 1993 à juin 1997 (rapport de stage en annexe de [Madelin, 1998]). Cette étude a montré que, sur l'ensemble des quatre années étudiées, la moyenne des valeurs absolues des différences entre l'observation et l'estimation des températures minimales à Reims-Courcy était d'environ 1.7°C. Quant aux mois qui nous intéressent, avril et mai, cette *erreur moyenne* est respectivement de 1.83°C et de 1.66°C.

Pour le printemps 2001 (avril et mai), la prévision des températures minimales sous abri s'écarte d'environ 1.1°C de la mesure²²². La Figure XI.1 montre la variation au cours de ce printemps des températures minimales prévues sous abri (prévision à 17h, heure locale, la veille) et celles observées à Reims-Courcy. Pour ces deux mois, 63% des prévisions des températures minimales s'écartaient des observations d'1°C au maximum²²³. Toutefois, pour certaines dates, l'écart entre la mesure et la prévision est très important (par exemple, supérieur à 3°C, les 9 et 19 avril, le 15 mai). Il s'agit alors de sous- ou de surestimation des températures minimales à Reims-Courcy, avec parfois une alternance bien caractérisée : par exemple, les 7 et 8 avril 2001, la température minimale a été surestimée, alors que le lendemain, elle a été fortement sous-estimée, peut-être en réaction avec les jours précédents. L'interprétation et la décision du prévisionniste sont alors décisives.

222. Cette moyenne est calculée sur 49 dates, du 5 avril (début de la *Campagne Vignoble*) au 31 mai 2001. Les données manquantes sont liées à un non-archivage des températures minimales prévues.

223. Rappelons que le prévisionniste donne une température arrondie à l'unité (10°C pour 9.5-10.5°C) alors que la mesure l'est au dixième près.

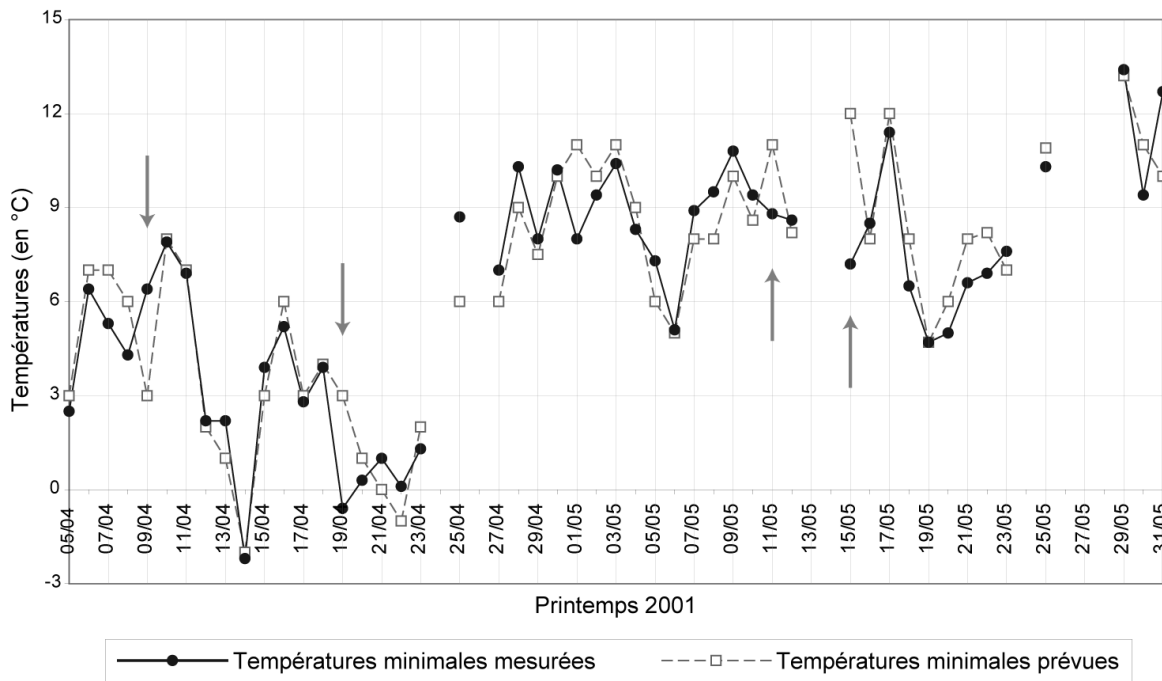


Figure XI.1 : Températures minimales sous abri prévues (à 17h locale la veille) et relevées à Reims-Courcy (entre 18h la veille et 18h le jour même) pour le printemps 2001

Données : 05/04-31/05 2001 ; Météo France
 Les données manquantes sont liées à un non-archivage des températures minimales prévues.
 Les flèches correspondent à des dates mentionnées dans le texte.

En somme, la qualité de la prévision de la température minimale à Reims-Courcy peut donc être considérée comme relativement correcte, même si cette conclusion reste encore relativement fragile quant à la prévision du risque de gel.

XI.2.2 - Qualité de la prévision du type de masse d'air

Outre la température minimale prévue à Reims, les indices actinothermiques sont estimés à partir de la masse d'air à Reims-Courcy. Le météorologiste entre dans le modèle une estimation de la couverture nuageuse pendant la nuit (« ciel clair » / « nébulosité variable »), puis une classe de direction de vent (p. 71) et enfin sa vitesse. Nous avons cherché à connaître la qualité de ces prévisions de la masse d'air.

Cette analyse critique repose sur les dates archivées des campagnes Vignoble des printemps 1995 à 2000, soient sur 301 dates. Les classes de nébulosité, de direction et de vitesse prévues, relevées sur les sorties papier des Campagnes, ont été comparées à celles déterminées à partir des données observées et mesurées (comme dans l'initialisation de l'adaptation statistique).

La prévision de la nébulosité (« ciel clair » / « nébulosité variable ») est identique pour 79% des nuits à celle observée. Les classes de direction et de vitesse du vent sont correctes respectivement dans 44 et 23% des cas. Cette qualité, plus faible, pour le vent peut s'expliquer par la forte variabilité de ce paramètre. Par contre, en associant les trois, la qualité descend à 9%. La prévision du type de masse d'air à Reims-Courcy apparaît donc comme difficile. Ce résultat remet en cause le principe même de l'adaptation statistique : les écarts moyens correspondant précisément aux conditions atmosphériques de la nuit sont attribués pour seulement 9% des nuits.

XI.3 - Analyse critique des sorties de l'adaptation statistique, soit de la qualité opérationnelle

XI.3.1 - Qualité générale de l'adaptation statistique

Pour quantifier la qualité générale de l'adaptation statistique, nous avons calculé, pour l'ensemble des dates du printemps 2001 (05/04-31/05) et pour les 19 stations du vignoble, la moyenne des valeurs absolues des différences entre les valeurs mesurées et estimées des indices actinothermiques. L'erreur moyenne, ainsi définie, est de 1.3°C pour toutes les stations (écart-type : 1.0).

Plus précisément, le Tableau XI.1 répertorie les fréquences de ces écarts entre la mesure et l'estimation (en valeur absolue), selon des bornes arbitrairement choisies (0–1 ; 1–2 ; 2–3 et au-delà de 3). Une grande proportion d'indices actinothermiques est relativement bien estimée : 48.1% des valeurs absolues des différences entre l'estimation et l'observation sont inférieures à 1°C. Seules 6.8% des estimations des indices actinothermiques peuvent être considérées comme très mauvaises (écarts supérieurs ou égaux à 3°C). Ces fortes erreurs sont essentiellement imputables à la mauvaise estimation de la température minimale à Reims-Courcy : en effet, les deux tiers de ces écarts supérieurs ou égaux à 3°C (en valeur absolue) correspondent au 9 avril 2001, au 19 avril, au 11 mai et au 15 mai (Figure XI.1).

Tableau XI.1 : Répartition des fréquences des valeurs absolues des différences entre l'estimation et l'observation des indices actinothermiques sur l'ensemble des stations et des dates

Valeurs comprises entre	[0 ; 1 [[1 ; 2 [[2 ; 3 [≥ 3
Fréquences (en%)	48.1	32.2	12.9	6.8

Données : 05/04-31/05 2001 ; Civc, Météo France

La Figure XI.2 représente le nuage de points croisant les indices actinothermiques mesurés (sur l'axe des abscisses) et ceux estimés (sur l'axe des ordonnées). Les points se répartissent assez uniformément autour de la première bissectrice, dont les points correspondraient à une estimation parfaite. La qualité générale de l'adaptation statistique peut donc être qualifiée de bonne. Toutefois, la Figure XI.2 met en évidence quelques valeurs qui s'écartent assez fortement de cette bissectrice, notamment celles correspondant aux jours avec une mauvaise prévision de la température minimale à Reims-Courcy, signalées précédemment.

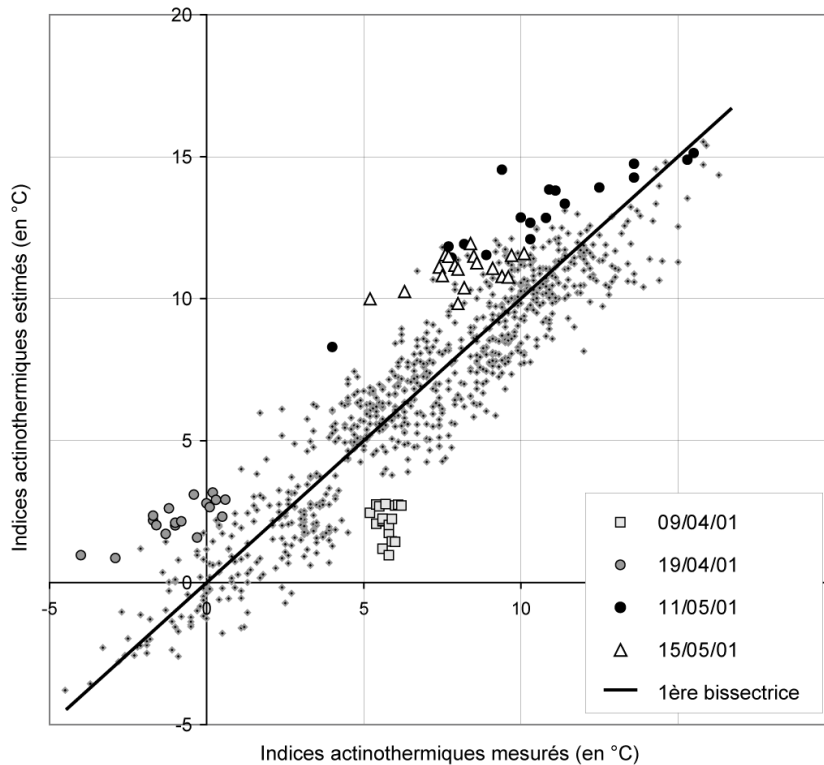


Figure XI.2 : Nuage de points croisant les valeurs mesurées et estimées des indices actinothermiques

Données : 05/04-31/05 2001 ; Civc, Météo France

XI.3.2 - Qualité selon les stations

Nous avons ensuite voulu savoir si la qualité de l'adaptation statistique (bonne dans l'ensemble) était variable selon les stations. Le Tableau XI.2 donne, pour chaque station, les coefficients de corrélation linéaire entre les indices actinothermiques mesurés et ceux estimés. Ils sont tous significativement positifs et forts, la qualité de l'adaptation statistique locale ne se différenciant pas nettement d'une station à l'autre. Cependant, les stations Bouzy haut, Œuilly, Nogent-l'Abesse et Saint-Thierry (0.94) sont caractérisées par des meilleures qualités d'adaptation que les stations Chambrecy et Sillery (0.85 et 0.88).

D'une manière générale, les valeurs les moins fortes concernent les stations de bas de coteau. Dans ces sites, l'air froid, qui s'écoule du coteau par gravité, a tendance à stagner (en particulier lors des nuits calmes). La direction du vent local pourrait alors modifier l'intensité du refroidissement. À partir de mesures sur le terrain, G. Beltrando *et al.* [1992] ont en effet montré qu'un vent faible ou modéré opposé à la pente pouvait bloquer l'air froid accumulé dans le bas du versant.

Tableau XI.2 : Coefficients de corrélation entre l'observation et l'estimation des indices actinothermiques pour chaque station

Stations	Position sur le coteau	Coefficient de corrélation
Avize bas	Bas de coteau	- *
Chambrecy	Fond de vallée	0.85
Sillery	Bas de coteau	0.88
Chatillon	Mi-coteau	0.90
Orbais	Bas de coteau	0.91
Savigny	Mi-coteau	0.91
Vert-Toulon	Bas de coteau	0.91
Aÿ	Bas de coteau	0.92
Bethon	Mi-coteau	0.92
Avize haut	Mi-coteau	0.93
Bouzy bas	Bas de coteau	0.93
Fleury-la-Rivière	Mi-coteau	0.93
Mailly	Mi-coteau	0.93
Sacy	Mi-coteau	0.93
Vertus	Mi-coteau	0.93
Bouzy haut	Mi-coteau	0.94
Nogent-l'Abesse	Mi-coteau	0.94
œuilly	Mi-coteau	0.94
Saint Thierry	Mi-coteau	0.94

Données : 05/04-31/05 2001 (n = 50) ; Civc, Météo France
* Série incomplète

XI.3.3 - Qualité de la prévision de l'aléa gélif

L'objectif de l'adaptation statistique réalisée est, à terme, d'améliorer l'estimation d'un aléa gélif. Aussi, avons-nous testé sa qualité quant à cette prévision. Après la reprise de la croissance végétative (débourrement), la vigne est sensible au gel pour des températures inférieures à -2°C .

En prenant ce seuil, nous avons construit des *tables de vérité Observation / Estimation* des indices actinothermiques (d'après E. Choissnel *et al.* [1993]). Ici, nous présentons la table sur l'ensemble de la période (Tableau XI.3), en répertoriant le nombre de jours vérifiant la modalité d'un indice estimé inférieur ou égal à -2°C (oui ou non) et celle d'un indice mesuré inférieur à ce seuil (oui ou non).

Tableau XI.3 : Table de vérité Observation / Prévision de l'aléa gélif (seuil fixé à -2°C)

		Observation	
		oui	non
Estimation	oui	8	5
	non	6	881

Données : 05/04-31/05 2001 ; Civc, Météo France

Le Tableau XI.3 montre que l'adaptation statistique nécessite quelques améliorations quant à la prévision de l'aléa gélif. En effet, celui-ci, fixé à -2°C , a été bien prévu dans huit cas sur 14. Les six cas non prévus et les cinq fausses alertes²²⁴ peuvent être imputables à plusieurs facteurs, mais les imprécisions de la prévision de la température minimale sous

224. En fait, deux fausses alertes (le 14/04/2001) peuvent être considérées comme des bonnes estimations : les minima actinothermiques ont été estimés à -2.1°C (Sacy) et à -2.2°C (Saint-Thierry) alors que ceux mesurés était de -1.9°C .

abri à Reims-Courcy semblent être les plus importants. La validité des écarts thermiques moyens de chaque classe (parfois calculés sur des échantillons relativement faibles) ainsi qu'une mauvaise connaissance du champ de vent sur la région sont aussi responsables de ces imperfections.

Conclusion du chapitre XI

Par sa simplicité, la méthode utilisée, dans ce chapitre, peut être facilement applicable, à partir de données climatiques relativement simples, pour tout espace où les enjeux économiques sont importants, à condition de disposer d'un réseau de stations météorologiques. Dans cette nouvelle adaptation, le nombre de points pour lesquels l'indice actinothermique est prévu est nettement supérieur à celui du modèle antérieur (19 au lieu de 4). L'estimation des indices actinothermiques peut être qualifiée de bonne. Néanmoins, la prévision de l'aléa gélif pour les bourgeons (seuil fixé à -2°C) mériterait d'être améliorée.

De plus, dans l'analyse critique des entrées du modèle, nous avons montré que les écarts calculés au préalable (adaptation statistique) ne sont appliqués, de manière appropriée par rapport à la masse d'air, qu'une nuit sur dix. Afin d'améliorer le modèle de prévision d'un aléa gélif, il est nécessaire alors de réfléchir, en partenariat avec le CDM de la Marne, sur la définition des types de masse d'air et de proposer, en conséquence, des ajustements au logiciel²²⁵.

En outre, même si la couverture spatiale de la prévision d'un aléa gélif est meilleure que précédemment, l'estimation des indices actinothermiques est toujours ponctuelle (stations). Or nous avons vu précédemment combien la variabilité spatiale des températures minimales pouvait être importante, en particulier lors des nuits de ciel clair et de vent calme. Cette information ponctuelle de l'aléa gélif peut alors s'avérer insuffisante pour les viticulteurs. Pour affiner l'estimation de cet aléa gélif, nous proposons ainsi de spatialiser les températures minimales à l'ensemble du vignoble marnais, à partir des méthodes d'interpolation spatiale.

225. Par exemple, les écarts stationnels entre température minimale et indice actinothermique sont calculés selon des classes de vitesses à Reims-Courcy : 0, 1, 2, 3, 4, 5 et ≥ 6 m/s. On peut alors réfléchir sur la pertinence du calcul des écarts moyens (température minimale – indice actinothermique), par exemple pour la station de Vert-Toulon, située à plus de 50 km de Reims-Courcy, selon une vitesse de vent à Reims-Courcy de 0 m/s, puis 1 m/s, etc.
En outre, dans l'aperçu sur le vent, nous avons proposé d'utiliser la moyenne des vitesses et les résultantes vectorielles pour toutes les données nocturnes (21, 0, 3 et 6h) dans l'initialisation du modèle, c'est-à-dire dans l'adaptation statistique.

Chapitre XII - QUELQUES REFERENCES SUR LA SPATIALISATION DES DONNEES PONCTUELLES

Si les éléments atmosphériques (températures, humidité de l'air, ...) sont de nature continue dans l'espace, les mesures sont réalisées le plus souvent ponctuellement, en particulier par les stations météorologiques. Or cette connaissance spatiale discrète peut s'avérer insuffisante, notamment dans l'estimation d'un aléa gélif. Comment peut-on alors généraliser le résultat d'observations ponctuelles à l'ensemble de l'espace ? Pour cela, il existe des méthodes, communément appelées *méthodes d'interpolation spatiale*, permettant de passer d'une information initiale ponctuelle à l'estimation du phénomène pour tout point de l'espace (Figure XII.1). L'interpolation est définie comme un « calcul de valeurs entre deux bornes connues, par application d'une fonction mathématique de proportionnalité » [Brunet *et al.*, 1993]. Rigoureusement, cette méthode permet d'estimer la valeur entre les points de mesure à la différence de l'extrapolation qui le fait au-delà de la zone définie par ces points. Dans ce travail, nous modélisons la répartition spatiale à l'intérieur et à l'extérieur de la zone *stricto sensu* définie par la localisation des stations retenues. Afin d'éviter tout malentendu, nous utiliserons le terme *spatialisation* pour désigner les démarches permettant de passer d'une information discrète à une continue. Cependant, il peut nous arriver, par abus de langage, d'employer le terme *interpolation* pour les caractériser.

Spatialiser un paramètre météorologique ou climatique revient alors à déterminer, à partir des valeurs de ce paramètre mesurées pour quelques postes météorologiques répartis de manière souvent irrégulière sur un espace donné, sa valeur en tout point non instrumenté de l'espace [Merlier, 2001]. Ceci permet donc de créer une information là où les mesures sont absentes²²⁶. En outre, la spatialisation, par sa dimension visuelle indéniable, permet de s'approcher de la répartition spatiale du phénomène, à l'origine continu²²⁷.

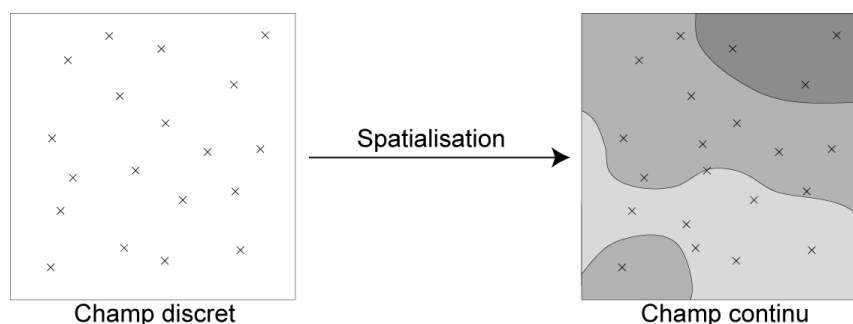


Figure XII.1 : Schéma de la spatialisation des données ponctuelles

226. Dans l'analyse temporelle (chronique), l'interpolation permet de reconstituer des lacunes.

227. Ces méthodes ne sont pas utilisées exclusivement pour des phénomènes continus. Elles peuvent s'avérer intéressantes pour représenter différemment des phénomènes de nature discrète (population, etc.).

Les méthodes de *spatialisation* sont maintenant utilisées dans de nombreuses disciplines (géologie, hydrologie, épidémiologie, etc.). Outre l'intérêt purement méthodologique qu'elles présentent, elles reflètent une demande croissante des professionnels :

« Un agriculteur est nettement plus intéressé par l'occurrence du gel sur les zones qu'il cultive qu'à l'aérodrome voisin où est implantée la station météorologique la plus proche. Inversement, un responsable d'aménagement hydraulique voudra connaître les risques sur l'ensemble du bassin versant qui le concerne plutôt qu'en un nombre réduit de points instrumentés. De la même façon, une compagnie d'assurances pourra gérer son portefeuille de manière optimale grâce à la connaissance de l'ensemble des éléments susceptibles d'occasionner des dédommagements sur le territoire qu'elle couvre. De telles exigences en matière de précision de l'information météorologique sont de plus en plus fortes dans la société moderne où nous vivons et dans laquelle l'homme désire se prémunir autant que faire se peut contre les désagréments occasionnés par la nature. » [Merlier, 2001]

Même si ces démarches sont largement adoptées, reconstituer un champ, par exemple thermique ou pluviométrique, n'est pas aisé. Par exemple, puisque la spatialisation s'appuie sur des données ponctuelles, le réseau de mesure (ou semis de points) de référence est primordial [Charre et de Saintignon, 1997]. Il doit être le plus représentatif possible de la diversité climatique de la zone et avoir des séries de mesures homogènes, c'est-à-dire représentatives de la variabilité temporelle du phénomène [Feyt *et al.*, 1995]. Outre ces biais liés à une insuffisance du réseau et à la représentativité des mesures des stations, la qualité de la reconstitution d'un champ continu va dépendre de la variabilité spatiale et temporelle du paramètre considéré, ainsi que du choix de la méthode de spatialisation [Vigneau, 1994].

Il existe, en effet, plusieurs méthodes possibles pour spatialiser les données. Dans un article répertoriant ces différentes démarches, G. Feyt *et al.* [1995] distinguent deux grandes familles : l'interpolation géostatistique et l'interpolation *multicritère*²²⁸. Les premières postulent que la valeur de la variable étudiée en tout point dépend de celles des postes autour et de la distance à ces postes, alors que les secondes s'appuient sur l'hypothèse selon laquelle des facteurs locaux peuvent influencer la valeur de la variable étudiée (telles l'altitude ou encore la pente). De manière parallèle, J. Charre et M.-F. de Saintignon [1997] désignent deux principes ou deux modèles de répartition à la base de toute spatialisation : l'autocorrélation spatiale et la prise en compte de facteurs locaux. Toutefois, signalons que le terme *interpolation spatiale* est très souvent utilisé dans la littérature pour désigner l'ensemble des outils relevant de la première famille, la géostatistique. Les méthodes prenant en compte les effets locaux sont en effet beaucoup moins référencées. Pourtant, elles permettent également d'estimer une valeur pour tout point de l'espace. Elles appartiennent donc, *stricto sensu*, à l'interpolation spatiale.

En reprenant cette classification des méthodes de G. Feyt *et al.* [1995] et de J. Charre et M.-F. de Saintignon [1997], nous présenterons brièvement, dans ce chapitre, quelques exemples de spatialisation de données météorologiques et climatologiques extraits de la littérature.

228. Cette typologie proposée est très souvent reprise. Cependant, d'autres classifications sont proposées. Par exemple, D. Creutin *et al.* [1980] distinguent les méthodes purement spatiales, de nature déterministe (spline) ou statistique (krigeage), et les méthodes « climatologiques » (interpolation optimale de Gandin ; Analyse Harmonique de Processus). Voir également l'article de synthèse de H. Dobesch *et al.* [2001].

XII.1 - Interpolation géostatistique

La géostatistique est définie comme un « ensemble de techniques d'analyse statistique qui introduisent directement la position relative des individus observés parmi les variables prises en compte » [Brunet *et al.*, 1993]. Les méthodes d'interpolation associées reposent sur l'hypothèse qu'il existe une relation de dépendance de voisinage²²⁹, ce qui revient à supposer l'existence d'une *autocorrélation spatiale*. Celle-ci se mesure, le plus souvent, par la construction d'un variogramme²³⁰, graphique représentant un indice d'autocorrélation spatiale selon différents pas de distances²³¹. Il permet de déterminer si le phénomène est structuré dans l'espace ou spatialement aléatoire. D'après M.-F. Cicéri *et al.* [1977], il est rare qu'une distribution spatiale ne présente aucune autocorrélation spatiale ou soit complètement autocorrélée. Dans le cas général, chaque point est autocorrélé avec ses voisins situés à une certaine distance, définissant ainsi la portée de la structure spatiale et pouvant être lue sur un variogramme.

Cette approche ne s'appuie donc que sur les valeurs ponctuelles issues des mesures. Elle postule que la valeur de la variable étudiée (descripteur) en tout point de l'espace ne *dépend* que des valeurs rencontrées dans les postes environnants et de la distance à ces mêmes postes. Les méthodes d'interpolation géostatistique sont très variées : celles basées sur des relations simples de distance (méthode de la distance inverse), sur la minimisation de la variance (*krigeage*) ou encore sur un critère de minimisation de rugosité (fonctions spline). Elles sont exposées brièvement dans l'Encadré XII.1.

L'évolution de ces techniques d'interpolation spatiale est liée essentiellement à des recherches en géologie (minière) [Matheron, 1970] et en hydrologie [Obled, 1987 ; Creutin *et al.*, 1980 ; Laborde, 1982 ; etc.], ainsi que des progrès informatiques permettant une amélioration des possibilités de calculs mais aussi de la *numérisation* de l'information géographique (images satellites, GPS, etc.). Actuellement, les applications de la géostatistique sont nombreuses et variées, notamment en climatologie. Nous pouvons citer, par exemple, les applications de ces méthodes pour reconstituer des champs de précipitations [Creutin *et al.*, 1980 ; Lebel *et al.*, 1987] et de températures [Hudson et Wackernagel, 1994 ; Tveito et Førland, 1999 ; ...]. Nous présentons ici brièvement quelques exemples.

229. « [...] un point connu renseigne sur son voisinage, et tout point inconnu a des ressemblances avec les points connus voisins. » [Charre et de Saintignon, 1997]

230. Il est également possible et utile de construire un corrélogramme, représentant les coefficients de corrélation en fonction de la distance.

231. Ou ordre de contiguïté quand les unités spatiales étudiées sont des polygones. Alors les indices de Moran et Geary sont très souvent utilisés.

Encadré XII.1 : Les méthodes géostatistiques pour l'interpolation spatiale

Pour reconstituer en tout point l'intensité d'un phénomène donné à partir de quelques informations recueillies ponctuellement, les méthodes géostatistiques prennent en compte les valeurs aux points de mesure ainsi que la distance entre ces points.

L'objectif ici n'est pas de détailler chacune de ces méthodes, mais de présenter quelques éléments sommaires de compréhension des méthodes les plus connues. Un même exemple permettra d'illustrer les différences entre ces diverses techniques (Figure XII.2). Le lecteur intéressé par un exposé plus détaillé de ces méthodes pourra se référer à [Arnaud et Émery, 2000 ; Burrough et McDonnell, 2000 ; Cicéri *et al.*, 1977 ; Journel et Huijbregts, 1978 ; Mitas et Mitasova, 1999].

▪ *Les polygones de Thiessen (1911)*

Utilisée à l'origine en hydrologie pour estimer une lame d'eau sur un bassin versant, cette technique ancienne, d'une grande simplicité, se base sur le plus proche voisin (PPV) : pour tout point de l'espace, on affecte la valeur du PPV, après avoir construit les *polygones de Thiessen* (à partir des médiatrices des segments joignant les points de mesure). La qualité de cette méthode d'interpolation, dite « en escalier » (valeurs constantes par polygones), dépend fortement de la densité des observations*.

▪ *Les « facettes planes »*

Cette méthode repose sur l'approximation locale de la valeur en un point par un plan défini à partir des trois points les plus proches. À l'intérieur de triangles dont les sommets sont les points de mesure, on réalise des interpolations linéaires. Même si l'interpolation est plus fine que celle obtenue à partir des polygones de Thiessen, elle reste néanmoins fortement dépendante du réseau initial. En outre, elle suppose une évolution linéaire du phénomène.

▪ *Les moyennes pondérées*

En supposant la continuité des phénomènes météorologiques ou climatiques, on affecte, à tout point de l'espace, la moyenne des postes les plus proches, pondérée par l'inverse d'une puissance des distances. La puissance la plus couramment utilisée est le carré, mais il est possible de la faire varier et donc de faire décroître plus ou moins vite la pondération des points en fonction de la distance. On peut également jouer sur la définition des postes considérés comme voisins, c'est-à-dire sur le « rayon d'influence ».

▪ *Les interpolations polynomiales*

L'objectif de cette méthode est d'approcher la surface, déterminée à partir des points de mesure, par une surface polynomiale pouvant être de plusieurs ordres. Le premier est une fonction du type $a+bx+cy$ (définissant donc un plan) ; le deuxième est obtenu en ajoutant un terme du type $dx^2+exy+fy^2$ et ainsi de suite. Les différents ajustements reposent très fréquemment sur la méthode des moindres carrés. Ces surfaces polynomiales, aussi appelées *surfaces de tendances*, sont décrites plus précisément par la suite (Encadré XIII.1, p. 225).

▪ *Les fonctions splines*

Les fonctions *splines* représentent une famille de fonctions possédant des « variations très lisses » (techniquement, il s'agit de fonctions qui minimisent une énergie de déformation). La surface obtenue en

interpolant à partir de ces fonctions est la plus lisse possible et ressemble à ce que l'on obtiendrait en forçant une plaque mince et flexible à passer par les points connus.

▪ *Le krigeage*

Dans les années 1960, G. Matheron [1970] a formalisé, à travers la *théorie des variables régionalisées*, la méthode d'interpolation appelée *krigeage*** . Cette méthode, basée sur la théorie des fonctions aléatoires, envisage les valeurs du phénomène sur un espace donné comme une réalisation d'une fonction aléatoire. Au prix d'une hypothèse de *stationnarité* du phénomène considéré, cette réalisation de la fonction aléatoire peut être vue comme un ensemble de réalisations d'une variable aléatoire, ce qui permet alors d'appliquer des outils statistiques. En outre, cette méthode offre l'avantage de fournir également une estimation sur l'erreur d'interpolation.

La technique du krigeage repose sur deux étapes essentielles : l'analyse de la *dérive* caractérisant les variations de la moyenne avec la distance et donc l'écart à la stationnarité ; puis la construction du *variogramme* (Encadré XIII.2, p. 233) qui permet de vérifier l'existence d'une autocorrélation spatiale du phénomène étudié. Cette dérive et ce variogramme permettent alors d'interpoler les valeurs du phénomène sur l'espace étudié.

Plusieurs types de krigeage sont distingués : le krigeage simple (variable stationnaire de moyenne connue), krigeage ordinaire (variable stationnaire de moyenne inconnue), krigeage universel (variable non stationnaire, connaissant une tendance appelée *dérive*), co-krigeage (introduisant le *variogramme croisé* entre le champ étudié et le champ complémentaire, par exemple la topographie [Chauvet *et al.*, 1976]).

Cette méthode d'interpolation, considérée comme la plus précise, est la plus utilisée (parfois même sans que l'hypothèse de stationnarité et/ou l'existence d'une autocorrélation soient vérifiées).

Plusieurs typologies de ces méthodes sont souvent mentionnées dans la littérature :

- méthodes *déterministes* (polygone de Thiessen, distance inverse ; régression polynomiale) / *stochastiques* reposant sur les fonctions aléatoires (krigeage) ;
- interpolations *exactes* (les valeurs initiales se retrouvent après modélisation) / *inexactes* ou *approximatives* ;
- méthodes *globales* (prenant en compte tous les points de mesure) / *locales* (seulement les points dans un voisinage autour des stations)

* De manière générale, la densité du réseau de mesures influence fortement la qualité d'une interpolation spatiale.

** En référence au précurseur, l'ingénieur minier sud-africain, D. Krige.

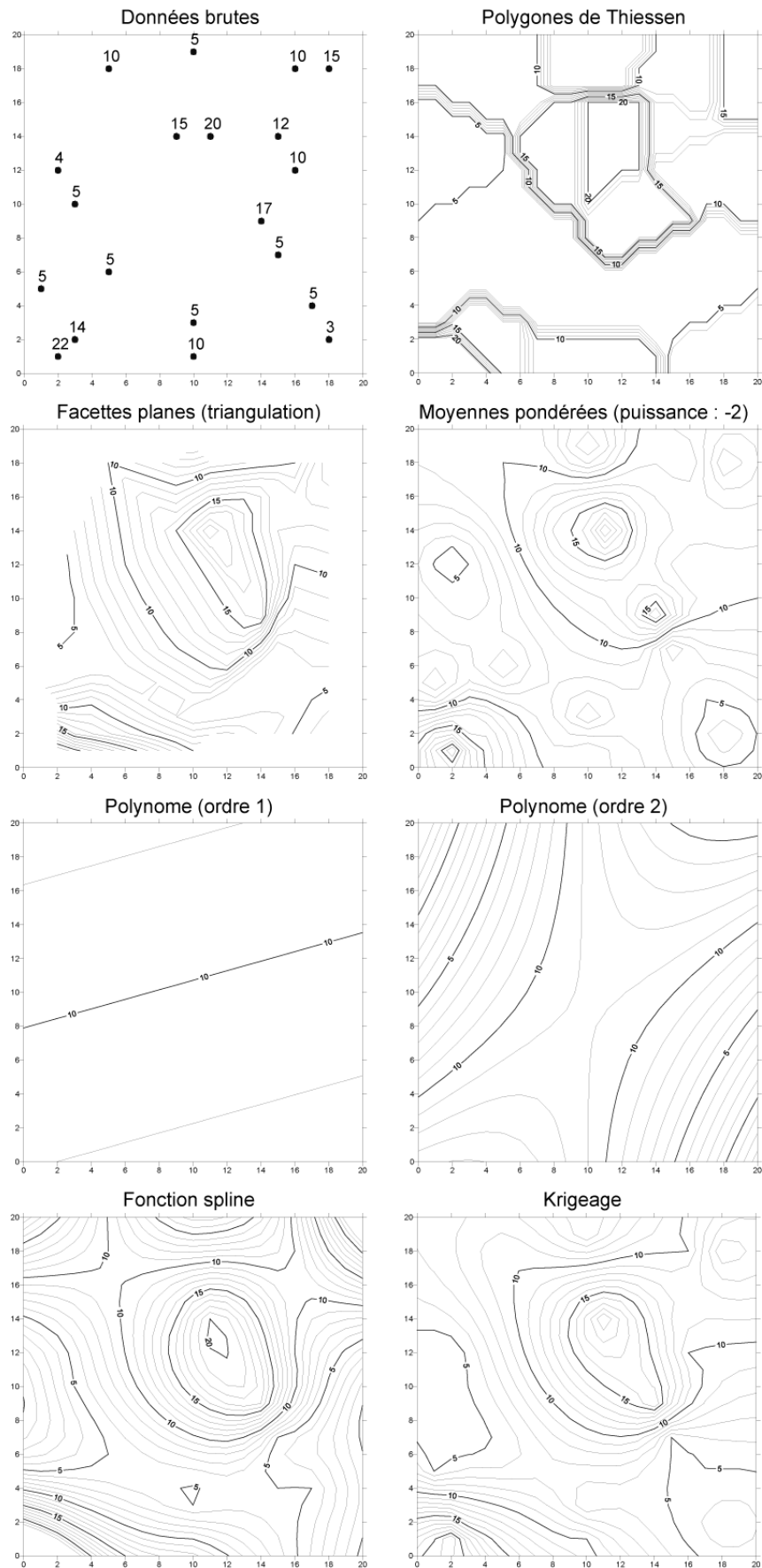


Figure XII.2 : Différentes méthodes d'interpolation géostatistique utilisées pour spatialiser un même ensemble d'observations

Les interpolations ont été ici réalisées avec le logiciel Surfer®.

Un exemple de spatialisation par la technique géostatistique du krigeage est celle appliquée pour la réalisation d'un atlas expérimental des risques de pluies intenses dans la région Cévennes-Vivarais [Bois *et al.*, 1995]. À partir de l'analyse des précipitations maximales d'automne à pas de temps fins dans cette région, l'objectif des auteurs était de fournir sous forme cartographique un document mettant de manière opérationnelle les résultats de leur recherche à disposition des utilisateurs concernés : 18 cartes de la répartition spatiale de la précipitation décennale, centennale et du gradex (paramètre de forme de la distribution) pour les pas de temps de 1, 2, 4, 6, 12 et 24 heures, ainsi que deux cartes de cernes de qualité délimitant les zones de plus grande robustesse de l'estimation.

Il est en réalité assez rare que les interpolations basées sur le krigeage soient réalisées sur les données *brutes*. Très souvent, les tendances spatiales (dérive interne) ou les variations liées à d'autres facteurs (dérive externe ou cokrigeage²³²) sont prises en compte. Par exemple, G. Hudson et H. Wackernagel [1994] ont comparé deux spatialisations des températures moyennes de janvier (1951-1980) en Écosse (400 km x 300 km ; maille de 5 km) : l'une prenant en compte seulement une dérive interne (diminution des températures vers le nord) ; l'autre réalisée en ajoutant l'altitude comme dérive externe. Les auteurs montrent que la qualité de l'interpolation est améliorée dans la seconde méthode.

Au lieu d'appliquer une dérive quelconque, une autre utilisation du krigeage peut être faite en l'utilisant sur les résidus d'une régression multiple prenant en compte des facteurs de variabilité du champ à interpoler. C'est ce que proposent O.E. Tveito et E.J. Førland [1999] pour les températures moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles du sud de la Norvège (période 1961-1990) : krigeage réalisé sur les résidus d'une régression utilisant l'altitude et la distance à la mer. Ils montrent que la combinaison des méthodes déterministes (régression) et stochastiques (krigeage) permet d'améliorer sensiblement la qualité de leur spatialisation. Ils soulignent, malgré un apport visuel indéniable du krigeage, la nécessité de bien appréhender les facteurs de variation du champ étudié pour obtenir une interpolation *optimale* et que, là, des progrès sont à faire sur la définition de ces facteurs.

Ces trois exemples concernaient des espaces de plusieurs kilomètres carrés et des grandeurs mensuelles, ce qui est très souvent le cas dans la littérature sur l'interpolation des données climatiques. Il est plus rare de spatialiser des données sur un temps plus court et/ou à une échelle plus fine. Toutefois, nous pouvons donner l'exemple des travaux de L. Lindqvist et S. Lindqvist [1997] à l'échelle microclimatique (un espace de 300 m x 300 m) : krigeage simple des moyennes mensuelles des températures minimales lors des événements gélifs. Leur réseau de mesure sur ce petit espace est particulièrement dense. Dans une approche très méthodologique, les auteurs s'intéressent aux modifications des résultats des krigeages réalisés selon différentes résolutions spatiales. Ils montrent que la résolution des résultats dépend fortement de l'échelle initiale des points de mesure.

232. S'il existe une relation linéaire entre le champ à modéliser et un autre, alors dérive externe, sinon cokrigeage. Nous ne détaillerons pas les différences de ces deux méthodes, se reporter à [Arnaud et Émery, 2000 ; Hudson et Wackernagel, 1994].

Pour ces différents exemples, l'approche centrale de l'étude des phénomènes est spatiale, même si les facteurs locaux ne sont pas pour autant négligés. D'une manière générale, plusieurs auteurs critiquent les approches purement spatiales :

« L'autocorrélation, très opératoire en cartographie, correspond à des lois physiques : plus les lieux sont proches, plus ils subissent les mêmes facteurs et les mêmes événements. Mais appliquer ce seul principe revient à faire comme si le réseau de mesure était placé sur une plaine uniforme, c'est-à-dire comme si d'une part les points de mesure n'avaient pas des caractéristiques particulières liées à des facteurs locaux, d'autre part comme si aucun facteur local n'influencerait les autres. » [Charre et de Saintignon, 1997]

XII.2 - Interpolation multicritère

Cette méthode s'appuie sur l'hypothèse que plusieurs facteurs locaux de natures diverses (altitude, occupation du sol, ...) sont susceptibles d'interférer dans la variabilité spatiale que connaît la variable étudiée entre les points de mesures. Le rôle de ces composantes explicatives est établi à partir de l'étude de leurs relations avec le phénomène étudié (le plus souvent linéaires). Ensuite, le modèle final est construit couramment à partir d'une régression multiple pas à pas (Encadré XII.2), prenant en compte le rôle des descripteurs indépendamment les uns des autres. L'équation de cette régression est alors utilisée pour spatialiser le phénomène en tout point de l'espace (en fonction de ses paramètres locaux).

Dans cette méthode, intervient alors la difficulté du choix des facteurs explicatifs à prendre en compte, de leur importance relative et de leur formulation sous une forme numérique exploitable dans le cadre d'un modèle statistique. Elle nécessite donc de bien connaître les facteurs de variabilité spatiale du phénomène et de hiérarchiser les effets des différents niveaux de processus climatiques, souvent perturbés de plus par l'imbrication des causes et des effets observables aux différentes échelles de temps et d'espace. En outre, il est nécessaire de disposer de l'information en tout point de l'espace.

Compte tenu de la recherche des facteurs pouvant intervenir dans la variabilité du phénomène, cette démarche est plus explicative que la précédente. Pour J. Charre et M.-F. de Saintignon [1997], « elle transfère le problème de la connaissance du climat en tout lieu à celui de la connaissance des facteurs du climat en tout lieu ».

Afin d'illustrer cette approche multicritère, nous décrivons succinctement quelques exemples de la littérature, qui ont été déterminants pour nos choix futurs.

Encadré XII.2 : La régression linéaire, simple et multiple

L'objectif de la régression linéaire est de modéliser la variation d'un phénomène en fonction de la variation d'un ou de plusieurs autres facteurs, en supposant que la relation est linéaire. Si le modèle de régression est jugé satisfaisant, il est alors possible d'utiliser l'équation de la droite de régression pour prédire les valeurs du phénomène étudié en fonction de celles des facteurs explicatifs.

▪ *La régression linéaire simple*

Dans le cas où l'existence d'une relation linéaire significative entre deux variables quantitatives est mise en évidence*, il est possible de *modéliser* cette relation par un ajustement linéaire**, le plus souvent par la méthode des moindres carrés : cette méthode statistique s'appelle la *régression linéaire* [CHADULE, 1997 ; Sanders et Durand-Dastès, 1985].

Il s'agit de trouver la droite qui s'ajuste le mieux au nuage de points croisant les valeurs des deux variables (x et y) :

$$y = ax + b + \varepsilon$$

où y est la *variable à expliquer* (ou *dépendante****), x la *variable explicative* (ou *indépendante*), a la pente de la droite, b son ordonnée à l'origine et ε le résidu (c'est-à-dire l'écart entre la valeur observée et la projection sur la droite de régression).

Une fois la régression établie, le coefficient de détermination (r²) donne la proportion de la variance expliquée par le modèle, soit, en d'autres termes, la qualité du modèle. En outre, une analyse des résidus au modèle (ε = valeurs observées – valeurs estimées) peut dégager une structure spatiale particulière, qui s'explique par d'autres facteurs non pris en compte (c'est la composante *résiduelle* [Sanders et Durand-Dastès, 1985]).

Pour valider le modèle de régression, les résidus doivent répondre à trois exigences : distribution uniforme, indépendance à Y et homoscedasticité (homogénéité de leur variance).

▪ *La régression linéaire multiple*

S'appuyant sur le même principe d'ajustement linéaire par les moindres carrés d'un nuage de points, la régression multiple prend en compte plusieurs variables explicatives. L'équation du phénomène étudié est alors :

$$y = a_1x_1 + \dots + a_ix_i + \dots + a_nx_n + b + \varepsilon$$

Pour déterminer les poids respectifs de chaque variable explicative, on calcule classiquement les coefficients de corrélation partielle, qui mesurent la corrélation de chaque variable quand les autres sont maintenues constantes, soit l'importance relative de chaque facteur. Une autre possibilité consiste à rendre

sans dimension les coefficients de régression en les standardisant [Carrega, 1994 ; CHADULE, 1997] :

$$a_1' = \frac{a_1 \cdot \sigma_{x_1}}{\sigma_y}$$

La qualité finale du modèle est estimée à partir du coefficient de détermination multiple (r²).

On distingue généralement deux types de régression linéaire multiple, liés à des approches différentes :

- soit on garde toutes les variables afin de comparer leurs poids respectifs ;

- soit on recherche la régression optimale, c'est-à-dire la plus explicative possible, en sélectionnant les paramètres significatifs un par un : *régression multiple pas à pas (stepwise)*****.

P. Carrega [1994] montre l'avantage du premier type de méthode pour pouvoir confronter les régressions mois après mois afin d'étudier une évolution temporelle.

Toutefois, une difficulté peut apparaître s'il existe une dépendance entre les régresseurs. Pour la première méthode, l'apport de ces facteurs est redondant, ce qui limite la validité des résultats. Pour la seconde, ce biais n'est pas introduit, puisque chaque facteur ajouté apporte une information supplémentaire (par construction). Cependant, afin d'optimiser le modèle, il est préférable de sélectionner des variables les plus indépendantes possibles, chacune apportant ainsi une nouvelle information, différente des autres.

Compte tenu de la dépendance entre nos descripteurs, nous avons privilégié, dans cette recherche, la régression linéaire multiple pas à pas ascendante. Cela étant, nous avons choisi au préalable une fenêtre par descripteur pour éviter une trop importante redondance (la plus corrélée).

* Calcul du coefficient de corrélation linéaire de Bravais Pearson (mesurant l'intensité et le sens de la relation ; note de bas de page n°181, p. 146) puis test de sa significativité à partir de la lecture de la table de Bravais Pearson.

** Avec une transformation logarithmique d'une ou des deux variables, il est possible de modéliser non pas des relations linéaires, mais des relations exponentielles ou puissances.

*** En réalité, il ne s'agit pas de lien de cause à effet comme ces termes peuvent le suggérer, mais de variation simultanée [CHADULE, 1997]

**** Le principe de la régression stepwise ascendante est de sélectionner la variable la plus corrélée. Ensuite, à partir des résidus de la régression faite à partir de cette variable, on recherche dans les descripteurs restants celui qui sera le plus corrélé, et ainsi de suite jusqu'à la non-significativité.

Interpolation « fonctionnelle »²³³ des températures dans les Alpes maritimes [Carrega, 1994]

P. Carrega [1994] modélise les températures mensuelles, minimales et maximales, en Lorraine et dans les Alpes maritimes, principalement à partir de cinq variables géographiques de base : l'altitude, la « position/aval »²³⁴, la « pente/amont »²³⁵, l'exposition, la continentalité (distance à la mer) de chaque station météorologique (Figure XII.3). La méthode utilisée est la régression linéaire multiple (avec tous les facteurs, afin de vérifier l'évolution de leurs influences dans le temps). Pour les Alpes maritimes, espace pour lequel l'auteur possède une information relative aux descripteurs pour chaque pixel (200 m), il cartographie ainsi automatiquement un champ thermique.

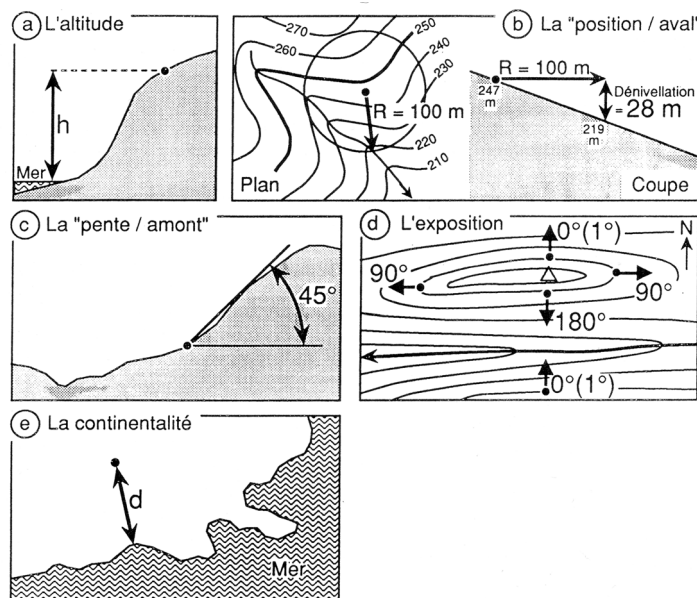


Figure XII.3 : Les cinq variables géographiques de base pour l'interpolation fonctionnelle

Source : [Carrega, 1994]

Interpolation à maille fine des températures en Franche-Comté [Joly et al., 1994]

D. Joly *et al.* [1994] ont reconstitué quelques champs thermiques journaliers de Franche-Comté (températures minimale et maximale) avec une résolution spatiale de 100 mètres. La méthode retenue repose sur une décomposition de la variance globale en une variance régionale et une variance d'échelle locale [Fury et Joly, 1995]. La première est modélisée à partir de régressions polynomiales sur les coordonnées géographiques des stations (longitude, latitude). Ensuite, les auteurs modélisent, à partir d'une régression multiple, les résidus de ces régressions en prenant en compte des facteurs d'échelle locale : l'altitude, la rugosité, la pente, l'orientation, l'occupation du sol et le rayonnement solaire théorique. En réalité, chacun de ces descripteurs possibles est défini selon plusieurs *fenêtres spatiales* centrées sur les sites (de 300 m x 300 m à 3.1 km x 3.1 km). Les températures de chaque

233. Cette méthode de spatialisation est qualifiée, par l'auteur, de « fonctionnelle », car chacun des descripteurs retenus est « choisi de manière à traduire au mieux l'intervention d'une loi physique » [Carrega, 1994].

234. La « position/aval » est définie comme la dénivellation aval maximale constatée dans un rayon de 100 m autour de la station.

235. La « pente/amont » est la valeur moyenne de la pente du versant sur environ 600 à 800 m en amont de la station.

pixel sont alors estimées à partir de ces deux composantes, régionales et locales, soit deux niveaux d'échelles²³⁶.

La méthode AURELHY [Bénichou et Le Breton, 1987]

Afin de spatialiser les données pluviométriques (normales de janvier) du Massif Central en prenant en compte le relief, P. Bénichou et O. Le Breton [1987] ont développé une méthode originale, appelée AURELHY²³⁷. Elle consiste à relever, sur un modèle numérique de terrain, les altitudes des points compris dans une certaine fenêtre (5 km x 5 km) autour du site à caractériser. Ces informations altitudinales, alors redondantes, sont condensées à partir d'une Analyse en Composantes Principales (ACP ; Annexe E.3). Les premières composantes, appelées « paysage de base », résument alors les caractéristiques locales du relief du Massif Central (encaissement, orientation, ... ; Figure XII.4).

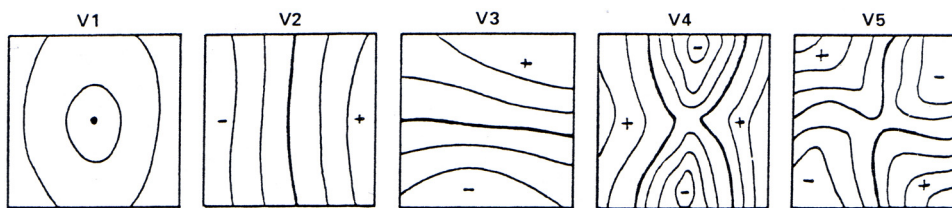


Figure XII.4 : Les cinq premiers paysages de base résumant le relief du Massif Central (fenêtre de 5 km x 5 km)

Source : [Bénichou et Le Breton, 1987]

Afin de modéliser la variation des précipitations observées, les coordonnées des stations sur ces composantes principales, ainsi que l'altitude, sont utilisées comme régresseurs dans une régression multiple. La partie non expliquée par ces relations avec le relief, c'est-à-dire la partie résiduelle du champ, est ensuite interpolée par krigeage. Ces deux étapes, qualifiées de « physique » et de « mathématique », permettent alors de reconstituer, de manière jugée satisfaisante, le champ pluviométrique en tout point de l'espace selon son « site topographique » et sa localisation spatiale.

Conclusion du chapitre XII

La littérature sur la spatialisation des données météorologiques et climatiques est vaste. Nous en avons ici donné un bref aperçu, à partir de quelques exemples qui ont participé à l'élaboration de notre méthodologie. Toutefois, même si l'une des deux approches, géostatistique ou multicritère, est souvent privilégiée, ces exemples ont montré combien les deux pouvaient être complémentaires. C'est pourquoi elles sont souvent tour à tour mises en œuvre : l'autocorrélation spatiale pour rendre compte des variations spatiales lentes, des *tendances spatiales* ; la méthode multicritère pour individualiser les facteurs locaux perturbant ces tendances spatiales [Charre et de Saintignon, 1997 ; Joly *et al.*, 1994]. Cela étant, l'ordre des méthodes utilisées n'est pas anodin, notamment en raison de la

236. D. Joly et R. Fury [1996] ont également testé cette méthode en inversant l'ordre de ces deux étapes. Deux autres éléments ont été également ajoutés dans les travaux ultérieurs : la distance qui sépare chaque station météorologique de la crête la plus proche et la dimension fractale des formations arborées. Signalons enfin que, dernièrement, la méthode a été utilisée pour reconstruire les champs thermiques du Spitzberg [Joly *et al.*, 2003].

237. AURELHY : Analyse Utilisant le RELief pour l'Hydrométéorologie.

dépendance spatiale des facteurs locaux. Il faudrait alors décomposer « la variance globale du champ en une variance d'échelle réduite expliquée au mieux par la topographie et une variance de [petite] échelle qui elle ne pose aucun problème d'interpolation » [Bénichou et Le Breton, 1987].

Notre démarche s'inspire de cette décomposition pour rendre compte de la variabilité des températures minimales dans le vignoble marnais. Nous chercherons donc, dans les chapitres suivants, à mettre en œuvre les différentes méthodes citées, à tester leur pertinence et leur qualité en matière d'ajustement des données thermiques.

Afin d'estimer un aléa gélif au niveau de la plante, le mieux serait de choisir les indices actinothermiques dont les capteurs sont situés à l'air libre, entre 10 et 50 cm. Cependant, nous avons vu précédemment (p. 143) que les températures mesurées étaient alors plus dépendantes de la hauteur du capteur que des facteurs locaux. Aussi, nous avons préféré *spatialiser* les températures minimales sous abri, référentiel commun à toutes les stations.

Plusieurs modélisations spatiales, à différentes échelles temporelles, seront mises en œuvre dans cette recherche. Dans un premier temps, nous nous placerons à une échelle climatologique, en modélisant la moyenne des températures minimales (à 2 m, sous abri) sur l'ensemble des dates. Toutefois, les mécanismes physiques à l'origine des champs thermiques dépendent des types de temps [Courault *et al.*, 1997]. Par conséquent, pour affiner notre modélisation du champ thermique et compte tenu de notre problématique, nous utiliserons la moyenne des températures minimales lors des nuits connaissant un fort refroidissement et une variabilité spatiale importante, c'est-à-dire les nuits de ciel clair et de vent calme. Enfin, nous réaliserons des modélisations à l'échelle journalière afin de mieux cerner les différents champs thermiques introduits par la variation des types de temps. Cette dernière étape permettra, en outre, de vérifier la stabilité des modèles.

Chapitre XIII - ANALYSE SPATIALE DU CHAMP THERMIQUE

Dans une première approche, nous avons recherché l'existence de structures spatiales dans le champ des températures minimales. En d'autres termes, il s'agit de savoir si la température en un point dépend de sa localisation géographique. En outre, nous cherchons à savoir si deux stations peu éloignées enregistrent, en moyenne, des températures minimales assez proches, donc à déterminer l'existence d'une autocorrélation spatiale. La *distance* est au cœur de ces questions et les méthodes, employées ici, relèveront de la géostatistique.

À partir d'un premier aperçu sur la répartition spatiale des températures minimales moyennes (Carte VII.2, p. 143), nous n'avons pas pu dégager de structure spatiale nette. Certes certaines stations septentrionales, telles Reims-Courcy, Chambrecy, Savigny-sur-Ardre et Sillery, enregistrent, en moyenne, des températures minimales plus froides que des stations au sud (notamment sur la Côte des Blancs), mais cette dichotomie spatiale nord-sud n'est pas simple. De même, les postes situés à l'est apparaissaient plus chauds que ceux à l'ouest, cela s'expliquant manifestement par l'emplacement des postes occidentaux dans des sites fermés. En outre, la position des stations sur le coteau semblait être un facteur prépondérant dans la répartition spatiale des températures minimales.

Dans ce chapitre, nous souhaitons confirmer ou infirmer ces premiers résultats, à partir de l'étude des tendances spatiales, c'est-à-dire savoir si les températures minimales peuvent s'expliquer par la localisation précise des stations météorologiques.

XIII.1 - Relations linéaires simples entre les températures minimales et les coordonnées géographiques des stations

Dans un premier temps, nous avons voulu tester si les températures minimales sous abri (à 2 m) des stations variaient selon leurs coordonnées géographiques et, plus précisément, étudier les relations simples linéaires entre les températures minimales et les coordonnées géographiques (X et Y). Il s'agit de déterminer, de manière systématique et rigoureuse, dans quelle mesure et dans quelle situation les stations localisées au sud sont plus chaudes et les stations orientales plus froides (compte tenu d'un effet de continentalité).

Pour répondre à ces questions, nous utilisons d'abord le graphique cartésien classique, représentant la variation des températures minimales en fonction de celle des coordonnées, ainsi que le coefficient de corrélation linéaire de Bravais Pearson mesurant l'intensité de la relation linéaire entre deux variables quantitatives²³⁸.

238. Se reporter à la note n°181, p. 146.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux moyennes des températures minimales journalières (sous abri, à 2 m), sur l'ensemble des printemps retenus. La Figure XIII.1 représente ces moyennes en fonction des coordonnées géographiques selon la composante méridienne. Aucune relation, qu'elle soit positive ou négative, ne se dessine clairement (coefficient de corrélation non significatif)²³⁹. En revanche, en enlevant la station froide de Germaine, qui se démarque très fortement (tout comme Chambrecy), une relation positive, statistiquement significative au seuil de 6%, peut être mise en évidence. Quoique d'intensité faible, elle traduit néanmoins une augmentation des températures minimales vers l'est, ce qui a déjà été observé et commenté précédemment.

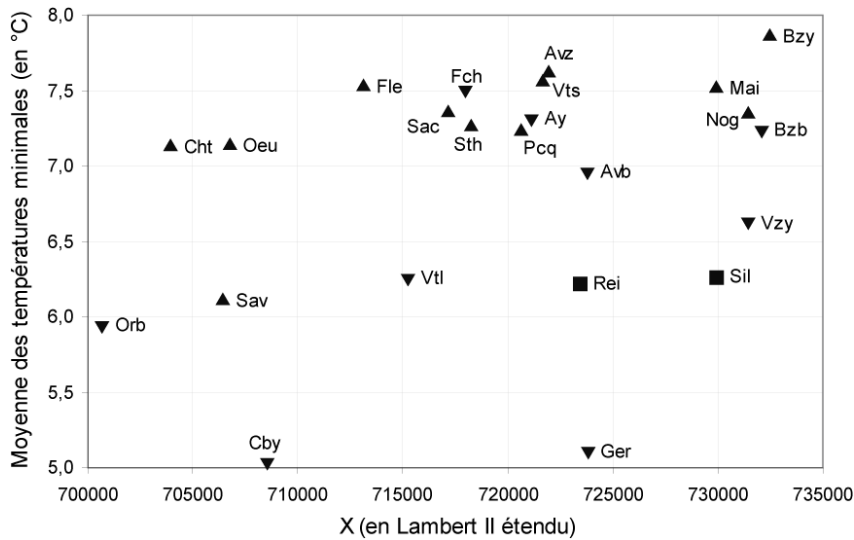


Figure XIII.1 : Températures minimales moyennes des stations en fonction de leurs coordonnées géographiques X

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France
 Les abréviations des stations ainsi que les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

Quant aux coordonnées géographiques Y (composante zonale), le nuage de points (Figure XIII.2) ne s'allonge pas selon un axe : il n'existe donc pas de relation significative. Le très faible coefficient de corrélation (-0.14) confirme cette absence de relation.

239. En outre, l'analyse des corrélations simples a également été réalisée sur les valeurs minimales, maximales, médianes des températures minimales journalières, ainsi que sur les premiers et troisièmes quartiles. Les résultats sont sensiblement identiques, ce qui renforce la conclusion d'une absence de relation significative entre températures minimales et X (en prenant en compte des valeurs synthétiques).

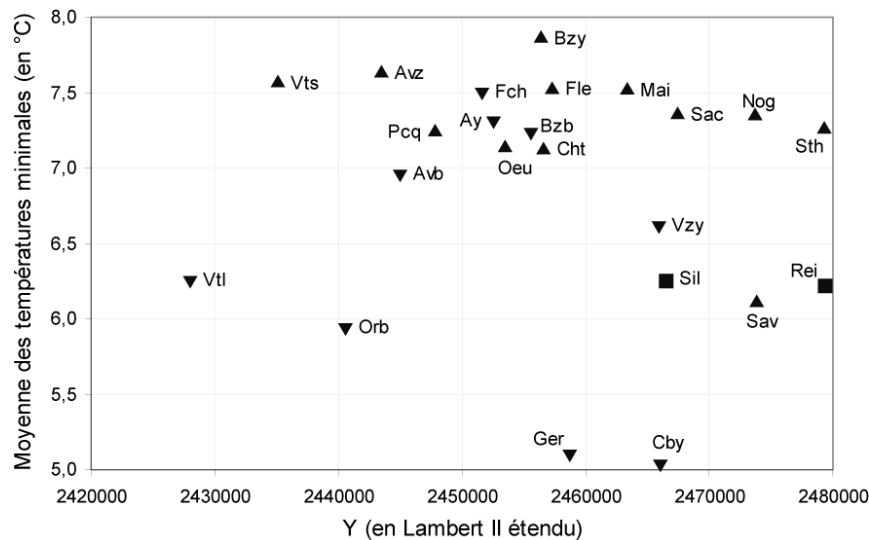


Figure XIII.2 : Températures minimales moyennes des stations en fonction de leurs coordonnées géographiques Y

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; C1vc, Météo France
 Les abréviations des stations ainsi que les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

En partitionnant l'ensemble des nuits suivant la dichotomie ciel clair, vent calme ou l'inverse (Encadré VII.1, p. 148), nous n'avons pas non plus obtenu de relations significatives entre ces deux composantes, zonales et méridiennes, et les moyennes de ces deux classes de nuits.

Nous avons ensuite reproduit la même méthode sur les dates successivement (en prenant en compte les températures minimales journalières), pour tenter de dégager des nuits pour lesquelles la modélisation à partir des coordonnées géographiques était possible. S'il est possible d'observer des corrélations importantes avec X ou Y pour certaines dates, pour la moitié des nuits (49.1%), aucune relation n'est significative. De plus, il faut souligner qu'il ne nous a pas été possible d'expliquer ces différences journalières par les conditions atmosphériques, définies ici à partir de la nébulosité et du vent.

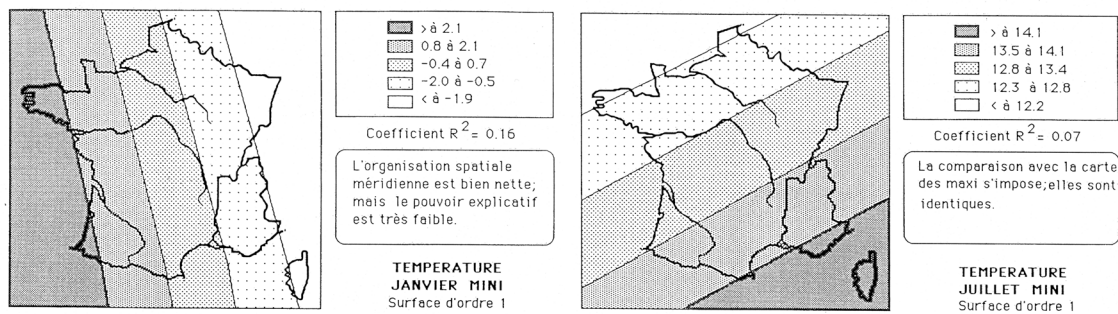
En résumé, nous n'avons pas pu mettre en évidence des relations linéaires significatives entre les températures minimales et les coordonnées géographiques, prises une à une. L'analyse en surfaces de tendances, combinant les deux dimensions spatiales, permettra d'approfondir l'étude des tendances spatiales.

XIII.2 - Les surfaces de tendances ou surfaces d'ajustements

Il est largement admis que les températures minimales en un lieu (et plus généralement tout paramètre climatique) sont influencées par des facteurs globaux ou zonaux (principalement cosmiques), synoptiques (circulation des masses d'air sur l'Europe de l'Ouest) et locaux (tels que la présence de surfaces en eau, le relief, etc.). À l'échelle topoclimatique, qui est celle où nous nous plaçons ici, la prépondérance des facteurs locaux est cependant souvent mise en évidence.

Afin de prendre en compte les dimensions multi-échelles, l'analyse en surfaces de tendances²⁴⁰ (Encadré XIII.1) constitue une méthode adéquate que P. Waniez et Y. Le Gauffey [1987] définissent comme « une méthode d'analyse en composantes d'échelles où localisations et distances jouent un rôle prépondérant ». Les processus généraux, régionaux et locaux à l'origine de la répartition spatiale d'un phénomène peuvent ainsi être appréhendés.

Plusieurs géographes font appel aux surfaces de tendances. Par exemple, A. Dauphiné et J.-Y. Ottavi [1985] proposent, dans leur *Atlas structurel des climats de la France*, des analyses de la répartition, à l'échelle du pays, de divers éléments climatiques (températures minimales et maximales, précipitations, etc.) à partir des méthodes de classification hiérarchique ascendante et à partir des surfaces de tendances²⁴¹. Pour les températures minimales, paramètre qui nous intéresse, ils cartographient, entre autres, les surfaces de premier ordre de janvier et de juillet (Carte XIII.1), dont le pouvoir explicatif est relativement faible (respectivement de 16% et de 7%). Sur ces deux cartes, nous pouvons clairement remarquer un gradient est-ouest en hiver (du plus froid au plus doux) et un gradient nord-sud en été (de plus en plus chaud), structures spatiales simples très souvent mentionnées dans la littérature.



Carte XIII.1 : Surfaces de tendances du premier ordre des températures minimales sur la France, en janvier et en juillet

Source : [Dauphiné et Ottavi, 1985]

Nous avons rappelé dans le chapitre XII, que l'analyse des surfaces de tendances pouvait être couplée à une interpolation multicritère [Joly *et al.*, 1994]. Plusieurs auteurs soulignent le caractère explicatif et exploratoire des surfaces de tendances, le but n'étant pas d'obtenir le meilleur ajustement :

« Bien que proche d'une simple technique de lissage sur le plan des calculs mis en oeuvre, l'Analyse en surfaces de tendances s'en éloigne en raison de son caractère itératif : on ne cherche pas directement le meilleur ajustement, mais on examine la signification des étapes successives qui permettent de l'atteindre. » [Waniez, Le Gauffey, 1987]

Enfin, bien que ce ne soit pas leur objectif premier, les régressions polynomiales peuvent aussi être employées dans les méthodes d'interpolation *visuelle* (lissage).

240. Appelées également surfaces curvilignes ou surfaces polynomiales.

241. Certaines de ces cartes sont reprises, en couleur, dans le volet Milieux et ressources de l'Atlas de France [Wieber *et al.*, 1995].

Encadré XIII.1 : La méthodologie des surfaces de tendances

L'objectif de l'analyse en surfaces de tendances est de séparer les composantes d'échelle supérieure (échelle régionale) des composantes d'échelle inférieure (échelle locale) [Haggett, 1973 ; Unwin, 1981]*, ce qui s'avère particulièrement pertinent dans une étude de processus géographiques :

« Véritable méthode d'analyse des structures de l'espace géographique, l'analyse en surfaces de tendances a un domaine d'application immense, recoupant toutes les branches de la géographie ; qu'elle soit physique ou régionale, la recherche géographique anglo-saxonne a abondamment fait appel, depuis plus d'un quart de siècle, à cet ensemble de techniques également connu sous le nom de cartographie des surfaces de tendances, la carte constituant à la fois le matériau et le produit de l'analyse. » [Waniez, Le Gauffey, 1987].

Le plus souvent, les surfaces de tendances sont établies à partir de régressions polynomiales, définies selon plusieurs ordres. Pour le premier, le modèle est identique au modèle de régression linéaire (ajustement par les moindres carrés de type $y=ax+b$) mais deux variables explicatives, les coordonnées géographiques (X et Y), soient les composantes zonales et méridiennes, sont introduites (Figure XIII.3). L'équation d'ajustement d'une régression polynomiale de premier ordre est alors :

$$y = a + bX + cY$$

où b est la pente dans le sens sud-nord et c dans le sens est-ouest.

On peut alors calculer l'intensité du gradient par la racine de $(a^2 + b^2)$ et la direction du gradient par l'arctangente du rapport (b/a) .

Cela revient à ajuster un plan de tendance donnant une idée générale de l'orientation et de l'inclinaison de la distribution [Haggett, 1973], faisant référence à l'idée de gradient.

Ensuite, le second ordre permet de combiner cette échelle générale à une plus fine. L'équation du modèle est alors basée sur un polynôme de second ordre (Figure XIII.3). La surface de tendances obtenue est appelée « surface quadratique ». Il est possible encore d'affiner en appliquant un ordre trois (surface cubique), puis quatre, etc.

De nombreux géographes, étudiant un phénomène selon les surfaces de tendances, mettent en garde sur la pertinence de l'utilisation des ordres élevés. Ainsi, il est communément admis qu'il n'est pas nécessaire de modéliser au-delà du troisième ordre, car surviennent alors des problèmes d'interprétation. On s'éloignerait de la finalité de la méthode qui est de dégager des tendances spatiales et non de retrouver les valeurs observées [Waniez, Le Gauffey, 1987]. Par exemple, dans cette recherche, la modélisation à partir des régressions polynomiales est une première approche permettant de dégager les tendances spatiales générales, avant d'étudier plus précisément les

facteurs locaux liés notamment, pour les températures minimales, à la topographie.

À chaque étape, c'est-à-dire à chaque niveau d'ajustement (ordre), il est intéressant d'étudier et d'interpréter les répartitions spatiales obtenues, sans oublier d'analyser les résidus exprimant des effets locaux. Ainsi, il faut s'intéresser à la variance expliquée par chaque ordre afin de constater sa variation en fonction de l'augmentation des niveaux, soit l'apport d'un changement d'ordre. Enfin, pour valider le modèle, il est nécessaire de vérifier que la répartition d'un ordre inférieur est présente à l'ordre supérieur.

Logiquement, cette méthode d'interpolation spatiale dépend du nombre de points de mesure utilisés, ainsi que de leur répartition. En outre, il s'avère que les surfaces de tendances présentent des évolutions très importantes dans les zones où l'échantillonnage est faible, particulièrement sur les bords [Burrough et McDonnell, 2000]. M.-F. Cicéri *et al.* [1977] proposent alors d'utiliser des points de contrôle en dehors de la zone étudiée afin de contrôler cet effet de bord.

La méthode, exposée dans cet encadré et retenue pour notre étude, est celle de la construction de régression à base de polynômes. Toutefois d'autres méthodes, plus adaptées à d'autres problématiques, sont mentionnées dans l'ouvrage de P. Waniez et Y. Le Gauffey [1987]. Par exemple, les auteurs citent la méthode de Wrigley sur les données binaires ou discrètes (avec un faible nombre de modalités), qui revient à calculer la probabilité pour chacune des modalités (0, 1, etc.) avec un modèle Logit. Une autre, celle de Lemay, est mentionnée : elle consiste à exprimer, par régression simple, la valeur en un point quelconque à partir de la distance à un point de référence localisé à partir des valeurs observées. Bien qu'elle soit limitée au premier ordre et moins commode informatiquement que les précédentes (plus longue en temps de calcul, automatisation à construire), cette dernière méthode peut être grandement utile aux géographes voulant exprimer un phénomène en fonction d'une distance non euclidienne (distance-temps, distance-coût, etc.)

Enfin, retenons que ce type d'analyse peut s'avérer particulièrement pertinent pour étudier un phénomène spatial : il permet de rendre compte des processus à une macro-échelle, puis les fluctuations régionales (mésos-échelle) et de dégager les effets purement locaux.

* P. Haggett [1973] rappelle l'origine de la cartographie des surfaces de tendances : en météorologie [Holloway, 1958] et dans la prospection pétrolière [Krumbein, 1959].

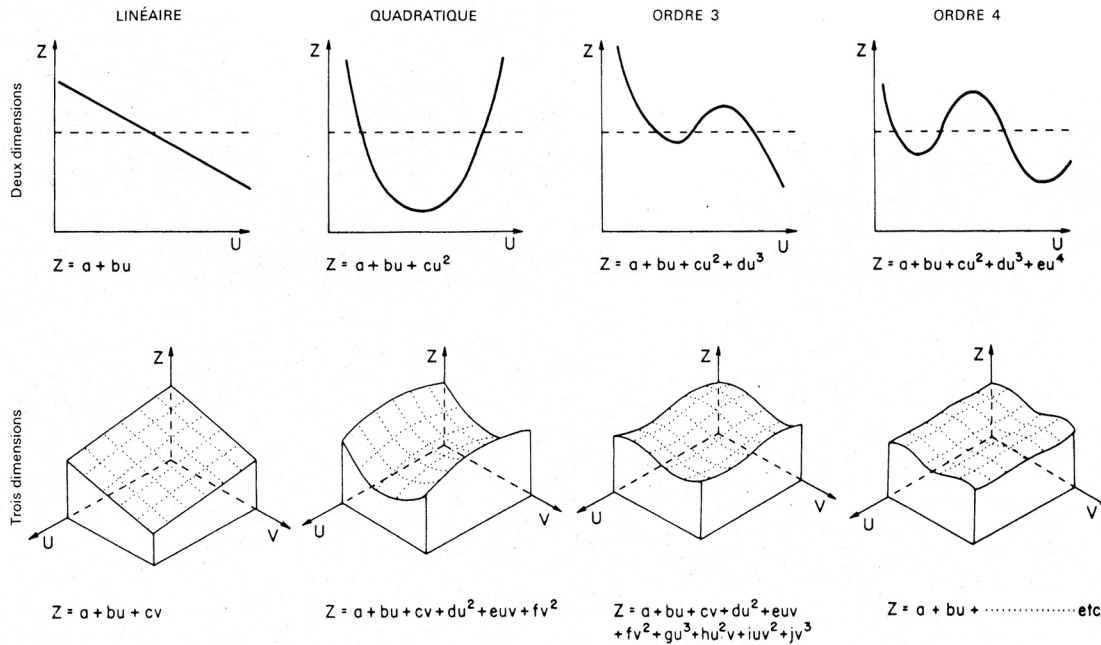


Figure XIII.3 : Correspondance entre courbes à deux dimensions et surfaces à trois dimensions

Source : Chorley et Haggett, Krumben [Haggett, 1973]

Notre objectif ici est d'utiliser les surfaces de tendances afin de mettre en évidence l'existence de *tendances spatiales* dans les températures minimales printanières (à l'échelle du vignoble marnais). Les variations spatiales des températures sont-elles zonales, méridiennes ou plus complexes ? En outre, la recherche de ces tendances générales permettra dans un second temps d'étudier également l'importance des effets locaux [Dauphiné et Ottavi, 1985 ; Haggett, 1973]. Ces deux étapes, précisément mises en valeur par les travaux de D. Joly *et al.*²⁴² [1994], seront reprises dans notre démarche de spatialisation des températures minimales printanières dans le vignoble marnais.

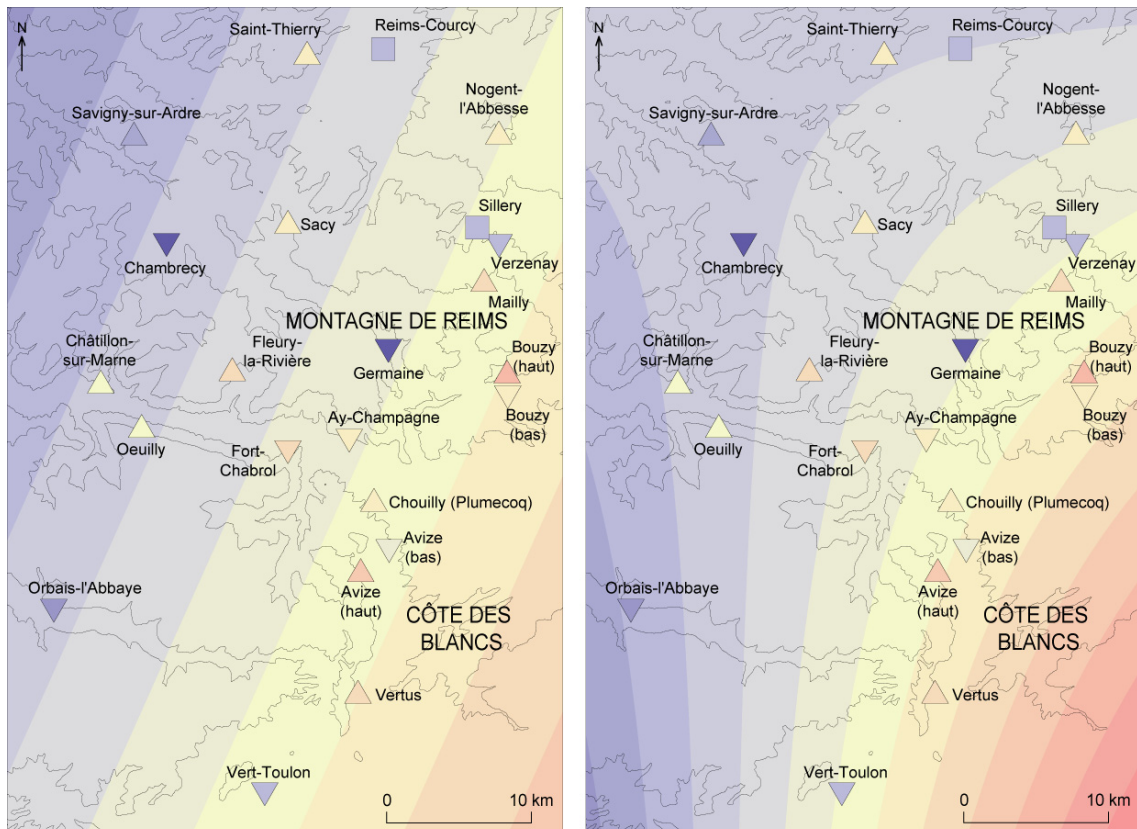
Dans un premier temps, nous avons réalisé une analyse en surfaces de tendances des moyennes printanières des températures minimales. Puis, à partir de régressions polynomiales réalisées jour par jour, nous avons tenté de dégager une structure spatiale générale commune à ces dates printanières et d'étudier les variations journalières.

XIII.2.1 - Les surfaces de tendances des températures minimales moyennes

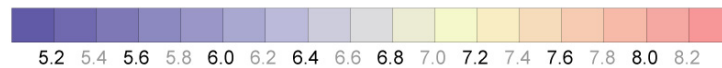
Les études présentées précédemment (notamment dans la troisième partie et ci-dessus) ont montré qu'aucune structure spatiale générale des températures minimales moyennes ne se dégageait réellement. Par contre, les facteurs locaux, en particulier topographiques, influencent fortement le champ thermique à l'échelle de notre zone d'étude et du printemps. Nous avons donc voulu vérifier la pertinence de cette observation par une analyse en surfaces de tendances.

242. Ces auteurs nous ont conseillé de réaliser la spatialisation des températures minimales en dégagant ainsi les tendances générales puis les facteurs locaux.

Une solution simple et rapide pour représenter les surfaces de tendances est l'utilisation du logiciel d'interpolation spatiale Surfer®. À partir d'un tableau d'information sur les stations (coordonnées géographiques²⁴³ et moyenne des températures minimales sous abri²⁴⁴), nous avons cartographié les surfaces de tendances du premier et du second ordre (Carte XIII.2).



Températures moyennes sous abri (en °C)



Carte XIII.2 : Températures minimales moyennes par station et surfaces de tendances, d'ordres 1 et 2, des températures minimales moyennes réalisées automatiquement à l'aide du logiciel Surfer®

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; C1vc, Météo France
Les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

Ces cartes montrent un gradient thermique allant du nord-ouest (plus froid) au sud-est (plus chaud), très légèrement modifié par l'utilisation d'un polynôme d'ordre 2. Nous avons vu précédemment que les postes situés au nord-ouest de notre zone d'étude (Chambrecy en particulier) étaient plutôt plus froids que ceux le long de la Côte des Blancs et à l'est de la Montagne de Reims. La Carte XIII.2 exprime donc cette variation du champ thermique. Toutefois, la superposition des moyennes calculées sur l'ensemble des températures minimales journalières indique des écarts importants avec les structures spatiales générales, les remettant ainsi en cause.

Après avoir utilisé, comme premier aperçu, l'automatisation de Surfer®, nous avons calculé l'équation des régressions polynomiales (des deux premiers ordres). Nos doutes

243. Les coordonnées des stations ont été mesurées sur le terrain à l'aide d'un récepteur GPS.

244. P. Waniez et Y. Le Gauffey [1987] appellent ce type de tableau une « matrice d'information tendancielle » : identifiant de chaque unité, coordonnées géographiques, mesure du phénomène étudié.

précédents se sont alors confirmés : aucune des relations entre les températures moyennes et les coordonnées géographiques (qu'elles soient combinées ou exposées à des puissances) n'est significative au seuil de 10%. Ainsi, aucune surface de tendances ne peut être dégagée, comme cela était prévisible, compte tenu de l'échelle spatiale (topoclimatique) de notre zone d'étude. Même si les *images* délivrées par Surfer® sont séduisantes par leur commodité et leur simplicité, nos vérifications nous indiquent que la variabilité des moyennes des températures minimales (sous abri) à l'échelle de notre zone d'étude n'est pas liée à des tendances générales, mais bien à des effets locaux, d'ordre de grandeur inférieure, pour l'ensemble de l'espace considéré.

XIII.2.2 - Les surfaces de tendances des températures minimales journalières sous abri

Dans la partie précédente, les régressions polynomiales reposaient, dans une première approche des tendances générales, sur des moyennes (des températures minimales sous abri et à 2 m) calculées sur l'ensemble des dates printanières retenues dans cette recherche. Nous mettons alors ensemble des contextes atmosphériques bien différents : par exemple, des flux généraux de sud-ouest (avec, *a priori*, un gradient thermique positif du sud-ouest au nord-est), des advections froides venant du nord (de moins en moins froid du nord au sud) et des situations de ciel clair et de vent calme (fonds de vallée et bas de coteau plus froids, absence de structure spatiale)²⁴⁵.

Notre hypothèse étant que ces différents contextes atmosphériques peuvent contribuer à engendrer des surfaces de tendances différemment structurées, nous avons réalisé des régressions polynomiales pour chacun des jours. Les résultats, que ce soit au niveau des qualités d'ajustement ou des paramètres retenus, sont très variables et montrent une diversité des structures spatiales obtenues.

Régressions polynomiales de premier ordre

Sur les 468 dates printanières, nous remarquons, pour un peu moins des deux tiers, une relation significative (à 10%) entre la température relevée à une station et sa position géographique (X et/ou Y). Pour les 179 dates restantes, aucune structure spatiale ne peut être dégagée, laissant supposer que les effets locaux ont un pouvoir explicatif plus fort sur la variabilité du champ thermique lors de ces nuits. Nous avons alors cherché à vérifier si ces dates étaient plutôt caractérisées par une couverture nuageuse et un vent faibles, conditions atmosphériques favorisant la variabilité spatiale.

En séparant nos dates à partir de la possibilité ou non d'un ajustement polynomial (289 ajustements *possibles* et 179 *impossibles*), nous avons calculé les moyennes de la nébulosité par nuit à Reims-Courcy²⁴⁶ et de la vitesse du vent nocturne (pour toutes les stations ; 21-6h UTC), moyennes répertoriées dans le Tableau XIII.1. Les calculs montrent que les nuits pour lesquelles aucune structure spatiale générale ne peut être dégagée, le ciel

245. Ces hypothèses de répartitions spatiales des températures minimales (qui sont indiquées entre parenthèses) sont inspirées de la littérature sur les phénomènes atmosphériques.

246. La nébulosité nocturne a été définie précédemment : moyenne des observations trihoraires de nébulosité à Reims-Courcy, de 21 à 6h (UTC).

est, en moyenne, plus couvert²⁴⁷ (5.14) et que la vitesse du vent est similaire pour les deux catégories de nuits. Ce résultat s'oppose donc à notre hypothèse de lien systématique entre les conditions atmosphériques et l'existence de structures spatiales simples dans la répartition des températures minimales.

Tableau XIII.1 : Moyennes de la nébulosité par nuit (21-6h ; à Reims-Courcy) et des vitesses du vent la nuit (pour toutes les stations), selon la possibilité ou non d'un ajustement par régression polynomiale (d'ordre 1)

	Moyenne de la nébulosité nocturne	Moyenne de la vitesse du vent nocturne
Ajustement polynomial impossible	5.14	2.08
possible	4.65	2.05

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France

Si nous nous concentrons sur les seules dates où le modèle polynomial du premier ordre a pu être appliqué, les qualités d'ajustement, en moyenne de 27%, sont très variables d'une date à l'autre : de 9.6 à 72.1% (ajustement très performant). Toutefois, la majorité des régressions polynomiales obtenues expliquent moins de 30% des différenciations dans la répartition des températures minimales dans le vignoble marnais (dissymétrie à gauche).

Par ailleurs, quand ils sont significatifs, les facteurs *X* et *Y* interviennent différemment suivant les dates, ce qui se traduit par des valeurs et des signes différents. Le gradient le plus fréquent (observé pour 29% des dates) définit une décroissance des températures du sud-est au nord-ouest, structure spatiale révélée précédemment par la sortie de Surfer®. *A priori*, comme nous le mentionnons en introduction, cette structure spatiale varie selon l'origine du flux général. S'il n'a pas été possible de dégager une typologie claire des gradients de température minimale selon la direction du vent général, nous avons pu remarquer que 39% des nuits où les températures augmentaient du nord au sud connaissaient une advection froide venant du nord (c'est typiquement l'exemple de la nuit du 6 avril 2000 où la qualité de l'ajustement polynomial est la plus élevée – 72%) et 19% une advection froide venant du nord-est. Excepté cette observation, il semble que ce soient les caractéristiques propres des stations (localisation, situation sur le coteau, etc.) qui influent le plus fortement sur la répartition des températures minimales pour notre zone d'étude²⁴⁸.

Régressions polynomiales aux ordres supérieurs

Pour affiner ces structures spatiales simples, nous avons effectué des régressions polynomiales d'ordre 2 puis 3. Dans l'ensemble, l'élévation des polynômes améliore très

247. Ici l'étude repose sur la moyenne des nébulosités nocturnes. En prenant un autre indicateur de la nébulosité (la dichotomie *ciel clair / nébulosité variable* présentée précédemment, Encadré VII.1, p. 148), les résultats se confirment : 29.4% des nuits où l'ajustement polynomial est possible ont une nébulosité variable contre 16.8% pour les autres nuits (ciel clair).

248. Les températures minimales prises en compte ici ne sont pas atteintes forcément à la même heure. Pour tester l'existence de ce biais éventuel, nous avons réalisé cette étude, non pas sur les températures minimales absolues, mais sur les températures horaires à 5h UTC. Dans l'ensemble, les résultats sont similaires. Aussi n'avons nous pas poursuivi dans cette direction.

peu les qualités d'ajustement : entre les ordres 1 et 2, +1.4 point en moyenne ; entre le 2 et 3, +0.6 point²⁴⁹.

En résumé, ces analyses en surfaces de tendances ont montré des résultats contrastés. Il n'a pas été possible de dégager une tendance spatiale générale à partir des moyennes des températures minimales. La possibilité d'un ajustement polynomial, la qualité de celui-ci et enfin sa forme (équation) sont très variables d'un jour à l'autre, ce qui sous-entend l'influence des contextes atmosphériques. Cependant, il paraît évident que d'autres facteurs sont en jeu simultanément, rendant ces influences observables, de façon significative, pour certaines nuits seulement. Pour expliquer la faible qualité, dans l'ensemble, de nos ajustements par les surfaces de tendances, nous avons supposé deux causes possibles, l'une d'ordre statistique, l'autre climatique :

- la prise en compte d'un nombre trop faible de points de mesure ;
- des stations reflétant plus les topoclimats et ne pouvant donc pas appréhender une échelle supérieure.

Afin de vérifier ces deux hypothèses, nous avons constitué un deuxième réseau, plus vaste, prenant en compte 33 stations synoptiques du nord de la France (sur 33 départements). À partir des températures minimales relevées au début du mois d'avril 2003 pour ces stations, nous avons réalisé une nouvelle analyse en surfaces de tendances. Les qualités d'ajustements sont légèrement supérieures à celles sur les 23 stations du vignoble champenois aux mêmes dates. Nous avons ensuite testé la robustesse de nos différents modèles en confrontant les analyses sur le réseau des 33 stations synoptiques, sur notre réseau d'étude (23 postes) et sur la combinaison des deux. Les différents modèles obtenus se sont révélés instables face à un changement d'échelle.

Ces surfaces de tendances ont donc montré que, s'il peut effectivement exister un problème d'ordre statistique qui diminue la significativité des tendances spatiales, il semble que l'échelle à laquelle nous travaillons soit le principal élément explicatif des faibles structures spatiales mises en évidence. En d'autres termes, l'espace de référence est trop petit pour que des gradients liés à la longitude et à la latitude jouent un rôle important. Les phénomènes locaux sont sans doute prédominants à ce niveau géographique.

Les surfaces de tendances prennent en compte l'ensemble des points de mesure. Or, nous avons vu précédemment qu'un phénomène pouvait être, certes, spatialement structuré mais selon une certaine portée.

« Si l'on peut supposer que la structure régionale est très forte, c'est-à-dire que tous les points de l'espace sont solidaires d'une certaine façon (la variable en un point est fonction des mesures en tous les autres points), on peut ajuster une fonction mathématique aux observations [(analyse en surfaces de tendances, analyse spectrale)]. [...] Si l'hypothèse d'une solidarité complète de toutes les parties de l'espace paraît difficilement soutenable, la construction d'un variogramme permet de décrire la ou les structures spatiales. » [Cicéri *et al.*, 1977]

249. À partir des températures minimales en Franche-Comté, R. Fury et D. Joly [1994] ont obtenu des qualités d'ajustement polynomial d'environ 50% (ordre 3). Leurs meilleurs résultats peuvent être imputables à un échantillon de stations plus important.

La théorie des variables régionalisées semble alors plus adaptée pour spatialiser les températures minimales.

XIII.3 - Autocorrélation spatiale des températures minimales journalières

Les méthodes d'autocorrélation spatiale supposent que l'influence de la valeur (du phénomène étudié) en un point diminue avec la distance. Pour mesurer cette influence et sa portée, deux méthodes sont très souvent appliquées : le corrélogramme et surtout le variogramme.

XIII.3.1 - Le corrélogramme des températures minimales journalières

La construction d'un corrélogramme permet de mettre en évidence l'autocorrélation spatiale [Obled, 1987]. Il s'agit d'un graphique croisant le coefficient de corrélation calculé, pour chaque couple de stations, sur les températures minimales (en ordonnée) et la distance entre les stations (en abscisse)²⁵⁰. Lorsque le nuage de points montre une décroissance régulière des relations avec la distance, le champ étudié présente une autocorrélation spatiale négative : les températures minimales d'une station *dépendent* plus des valeurs mesurées aux postes voisins que de celles des postes éloignés. Il est alors possible d'ajuster ce nuage de points, ce qui permet, dans une deuxième étape, de spatialiser les données.

La Figure XIII.4 représente le corrélogramme réalisé à partir des températures minimales journalières²⁵¹. Il apparaît très nettement que les relations sont très fortes entre les stations, ce qui a déjà été soulevé précédemment (Tableau VII.3, p. 146), et ce, quelle que soit la distance (ceci est particulièrement visible sur l'encart). Toutefois, nous notons une très légère décroissance des coefficients de corrélation avec la distance.

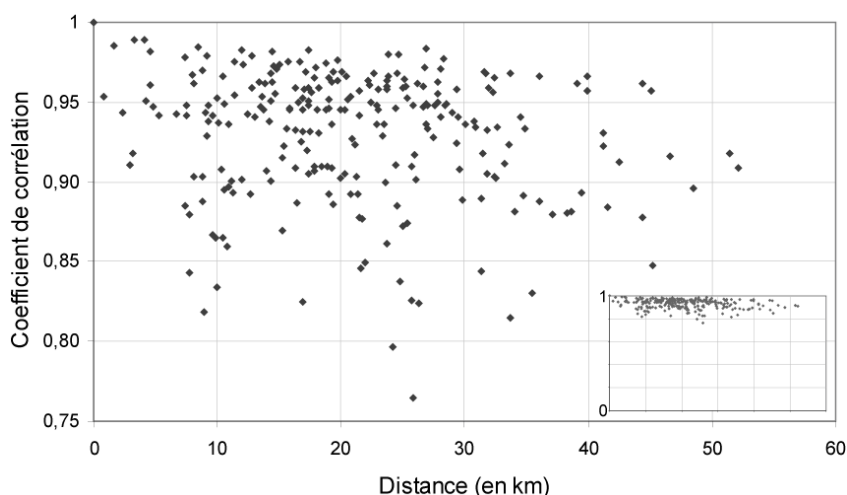


Figure XIII.4 : Corrélogramme des températures minimales journalières

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France

L'encart représente le même graphique mais avec un changement d'échelle de l'axe des ordonnées.

250. De manière similaire, il est également possible de tracer le covariogramme à partir des covariances.

251. Le corrélogramme sur les températures horaires nocturnes, non présenté ici, a une allure très similaire.

Ces très fortes corrélations entre les stations retenues est liée essentiellement à la taille de la zone d'étude. Elles définissent une *histoire climatique commune* mentionnée précédemment. Cette *dépendance* entre les températures minimales des différentes stations est telle qu'elle masque toute structure d'autocorrélation spatiale, si celle-ci existe.

En outre, S.M. Robeson et K.A. Shein [1997] (sur l'autocorrélation des données de vent) indiquent qu'un biais peut être introduit dans ce type d'analyse lorsque les données ne sont pas stationnaires dans le temps (variance et moyenne constantes). Ici, les coefficients de corrélation sont calculés sur les températures minimales journalières de six printemps. La température augmentant au cours du printemps, nous avons donc une juxtaposition de six croissances dans le temps. Les données utilisées ne sont donc pas stationnaires. S.M. Robeson et K.A. Shein [1997] recommandent alors l'utilisation du variogramme. Étant donné que celui-ci est construit à partir des écarts entre les valeurs observées et la moyenne, il évite le biais de la non-stationnarité dans le temps.

XIII.3.2 - Le variogramme des températures minimales moyennes

Dans un second temps, nous avons analysé le champ thermique par variogramme (Encadré XIII.2), ce qui consiste alors à établir si, en moyenne, la température d'un poste est plus proche de celle des postes localisés aux environs (selon une certaine portée) que de celle des postes éloignés.

Encadré XIII.2 : Le variogramme

Le variogramme permet de mesurer l'autocorrélation spatiale et plus précisément la portée d'un phénomène, au-delà de laquelle les fluctuations sont considérées comme aléatoires [Dauphiné et Voiron-Canicio, 1988].

Concrètement, le variogramme est construit à partir des valeurs mesurant le degré de dissimilarité entre les points en fonction de leurs distances :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_1^{n_h} (Y_x - Y_{x+h})^2$$

avec h le pas de distance, n le nombre de points, et Y_x la valeur au point x .

Le choix du pas influence l'allure du variogramme. Il doit, au moins, être inférieur à la moitié de la plus grande distance entre les points de mesure utilisés [Journel et Huijbregts, 1978]. Ces auteurs précisent également que le nombre de paires doit être supérieur à 30.

À partir de cette formule, on construit un graphique appelé *variogramme* : pour chaque pas, on représente la valeur gamma (Figure XIII.5). Ensuite, trois éléments sont à lire sur un variogramme : le comportement à l'origine, le comportement à longue distance et enfin le comportement directionnel.

▪ Le comportement à l'origine :

En premier, il faut regarder s'il existe un *effet de pépîte*, c'est-à-dire si la dissimilarité n'est pas nulle pour des distances très faibles. Le variogramme présente alors un écart des valeurs de la variable pour deux points très proches. Cet effet de pépîte peut être lié à un faible nombre de points de mesure. Le réseau ne permet pas alors de mettre en évidence les variations à une échelle très fine.

Outre l'observation d'un effet de pépîte, il est également intéressant de caractériser le comportement à l'origine à partir de la tangente à l'origine. Si celle-ci est proche de la verticale, le champ étudié présente

une forte irrégularité. À l'inverse, une grande régularité est décrite par une croissance de la dissimilarité faible (tangente horizontale).

▪ Le comportement à longue distance :

La deuxième étape d'analyse d'un variogramme est le comportement à longue distance. Il s'agit concrètement de déterminer le *palier* et donc d'en déduire la portée du phénomène. Théoriquement, à l'intérieur de cette portée, plus les postes sont proches, plus ils influencent la valeur au point considéré. Au contraire, deux points, séparés par une distance supérieure à cette portée, ont des valeurs non corrélées.

Signalons qu'il est possible d'observer plusieurs paliers et portées associées. Le phénomène est alors structuré selon plusieurs échelles spatiales emboîtées.

▪ Le comportement directionnel :

Il est possible de tester une autocorrélation spatiale en supposant l'espace isotrope (non orienté) ou anisotrope (différencié selon les directions). Dans ce dernier cas, les valeurs γ sont alors exprimées selon les directions nord-sud, est-ouest, ... Il est alors intéressant d'étudier les différences observées (ou non) sur les graphiques résultants.

Une fois, le variogramme construit et décrit, l'étape suivante est celle de l'ajustement de ce nuage par une fonction. Cette dernière peut être de plusieurs types : linéaire, exponentiel, gaussien, sphérique, etc. (Figure XIII.6). Les valeurs de chaque point de l'espace peuvent alors être estimées à partir de cette fonction et des données initiales des postes de mesure les plus proches (selon une certaine portée).

Pour plus de précisions, le lecteur s'orientera vers [Arnaud et Émery, 2000 ; Cicéri et al., 1977 ; Dauphiné et Voiron-Canicio, 1988 ; Obled, 1987].

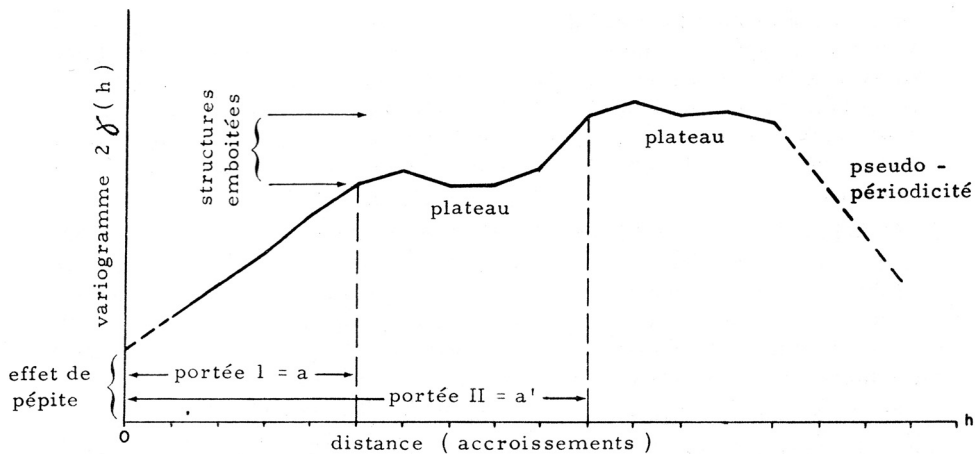


Figure XIII.5 : Schématisation du variogramme et de ses différents éléments (portée, palier ou plateau, effet de pépîte)

Source : [Cicéri et al., 1977]

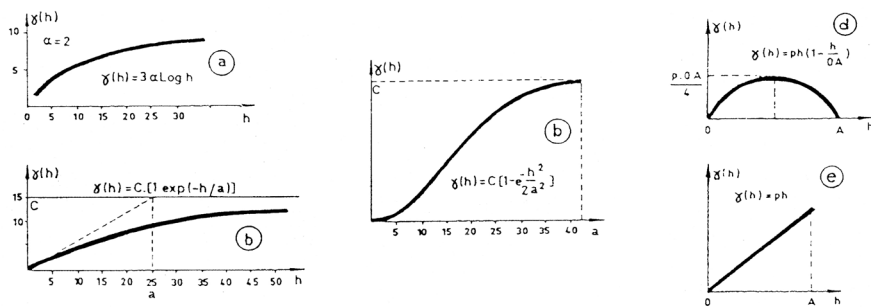


Figure XIII.6 : Quelques modèles d'ajustement possibles des variogrammes

Source : [Dauphiné et Voiron-Canicio, 1988]

Nous avons calculé les valeurs γ (Encadré XIII.2) en considérant l'espace, dans un premier temps isotrope, puis anisotrope (selon les directions nord-sud et est-ouest). Afin de déterminer un *pas*, nous avons calculé la moyenne des distances minimales entre stations (*plus proche voisin*) : environ 5 km (la médiane, 4 km). Plusieurs essais autour de cette distance nous ont incité à retenir un pas de 3 km.

La Figure XIII.7 représente le variogramme des moyennes des températures minimales, construit à partir des valeurs γ calculées. Aucune structure spatiale claire ne se dégage, quelle que soit la direction. En effet, il existe une forte variabilité des valeurs γ selon le pas. Parfois, nous sommes amenés à conclure que des stations éloignées sont plus proches thermiquement que les stations géographiquement proches. En somme, il apparaît que chaque point de mesure a une faible influence sur ses voisins.

Nous avons supposé que la non-observation d'une structure spatiale pouvait être liée à la faible taille de l'échantillon. M. Arnaud et X. Émery [2000] proposent alors de réaliser une nuée variographique : pour chaque couple de stations, la valeur γ calculée est représentée, sur un graphique, en fonction de la distance séparant les deux points. Cette nuée variographique permet alors d'observer d'éventuelles valeurs aberrantes, de déterminer un pas de distance optimal, etc. Sur la Figure XIII.8, la nuée variographique, réalisée ici à partir des moyennes des températures minimales des stations, ressemble (logiquement) au corrélogramme construit précédemment (Figure XIII.4). Plusieurs valeurs γ sont nulles ou *quasi* nulles, et ce même pour des distances importantes. L'exemple extrême est celui du couple de stations les plus éloignées (52 km), Vert-Toulon et Reims-Courcy, dont la valeur du semi-variogramme est proche de 0. Ces deux stations, de plaine et de bas coteau, ne se différencient pas par leurs températures minimales moyennes. À l'inverse, Bouzy (haut) et Germaine, distantes de moins de 9 km, ont un écart thermique important. En somme, la réalisation de cette nuée variographique nous montre que l'allure des variogrammes précédents (Figure XIII.7) n'est pas liée à un faible échantillon mais bien à une absence de structure spatiale forte.

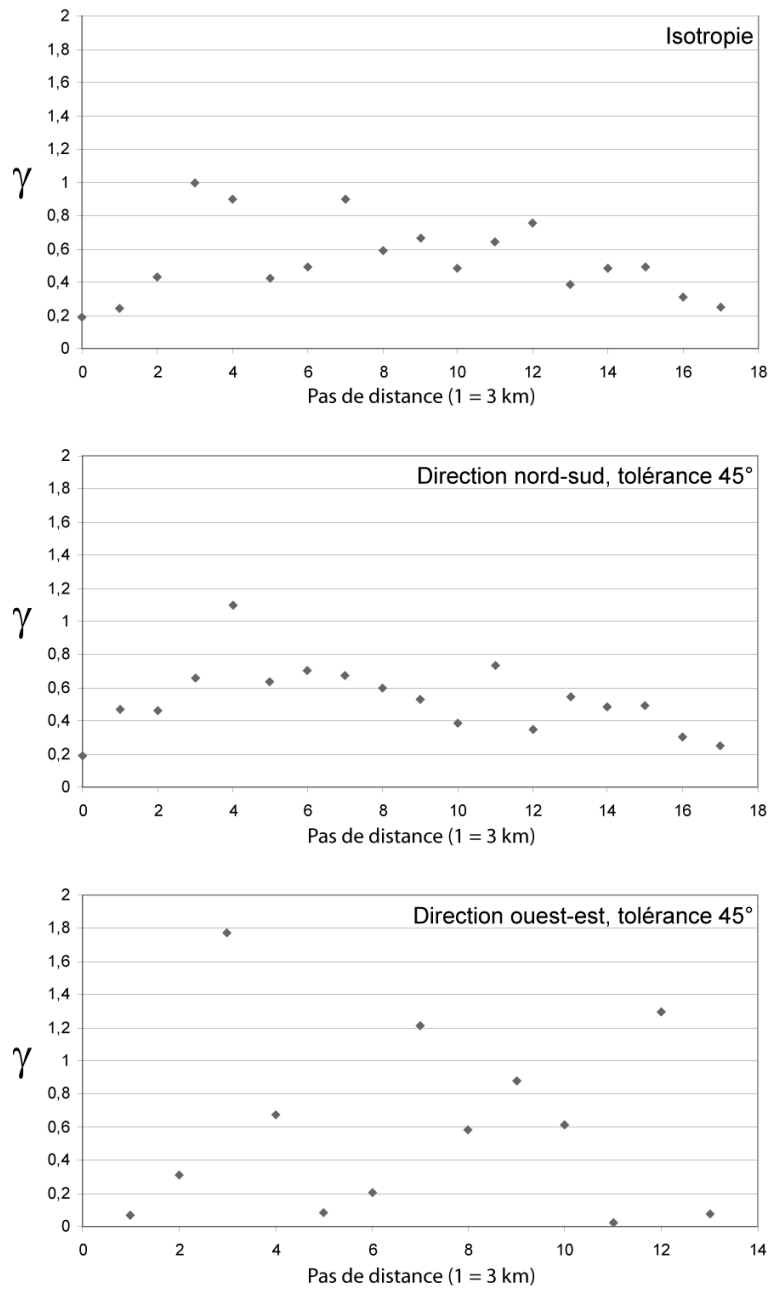


Figure XIII.7 : Variogrammes des températures minimales moyennes en supposant une isotropie, puis une anisotropie (selon les directions nord-sud et ouest-est)

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civi, Météo France

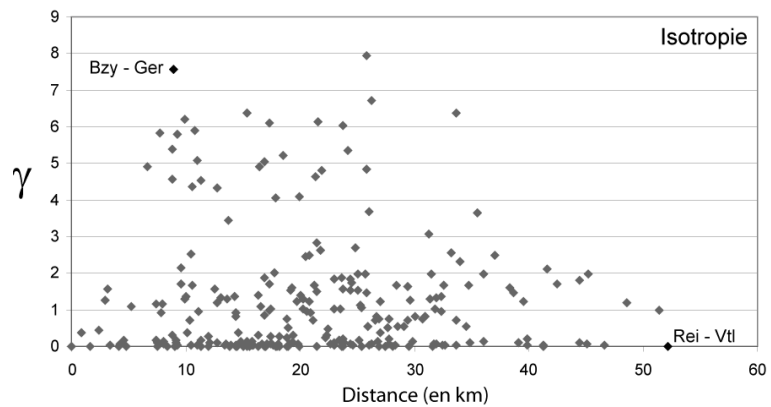


Figure XIII.8 : Nuée variographique des températures minimales

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civi, Météo France

L'étude du corrélogramme et l'analyse variographique, réalisées ici, n'ont pas révélé d'autocorrélation spatiale. Il ressort que, même si toutes les stations ont des températures minimales fortement corrélées, la distance entre elles ne joue pas. En moyenne, les facteurs locaux auraient donc une influence prépondérante sur la localisation relative des stations les unes par rapport aux autres.

Les analyses variographiques s'appuient sur des données thermiques moyennes. Il est facile d'imaginer qu'à une échelle journalière, l'analyse variographique pourrait révéler, pour certaines dates, une autocorrélation spatiale. Cette étude n'a pas été approfondie ici. Nous avons préféré retenir l'analyse en surfaces de tendances. Celle-ci, d'utilisation plus simple, nous permet de dégager, pour chaque date, la tendance spatiale (si elle est significative) des températures minimales ou des résidus des régressions à partir des facteurs locaux.

Conclusion du chapitre XIII

Dans ce chapitre, nous avons tenté de modéliser la dépendance spatiale du champ des températures minimales dans le vignoble marnais en utilisant différentes méthodes issues de la géostatistique. Ni les surfaces de tendances, ni l'analyse variographique n'ont dégagé de structures spatiales claires au niveau des moyennes printanières. Toutefois, à l'échelle journalière, nous avons pu observer des tendances pour quelques dates, compatibles parfois avec le vent général. Tout semble donc indiquer que les facteurs les plus importants dans la variation des températures minimales du vignoble marnais sont des facteurs locaux, ce qui a été observé dans la précédente partie et ce qui est souvent souligné dans la littérature pour l'échelle topoclimatique adoptée ici.

Chapitre XIV - PRISE EN COMPTE DES FACTEURS LOCAUX

De nombreuses études ont montré l'importance des facteurs locaux, tels l'altitude, la pente ou encore l'état hydrique et la nature du sol, sur les phénomènes météorologiques et climatiques. Dans le chapitre II, nous avons rappelé les facteurs influençant plus spécifiquement les températures minimales et intervenant à plusieurs échelles spatiales. Nous avons montré ensuite, dans la troisième partie, que la position des stations sur les coteaux viticoles marnais influait fortement sur les températures minimales relevées.

Après avoir étudié les structures spatiales du champ thermique, nous souhaitons à présent vérifier l'existence de relations entre les températures minimales et les descripteurs environnementaux. La première étape consiste à calculer et à quantifier ces paramètres locaux, en introduisant différentes échelles. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les travaux de R. Fury et de D. Joly [1995], qui définissent des *fenêtres spatiales*. Par exemple, une pente calculée dans un voisinage de 50 m autour d'une station automatique peut être sensiblement différente de celle calculée sur l'ensemble d'un coteau viticole (Figure XIV.1).

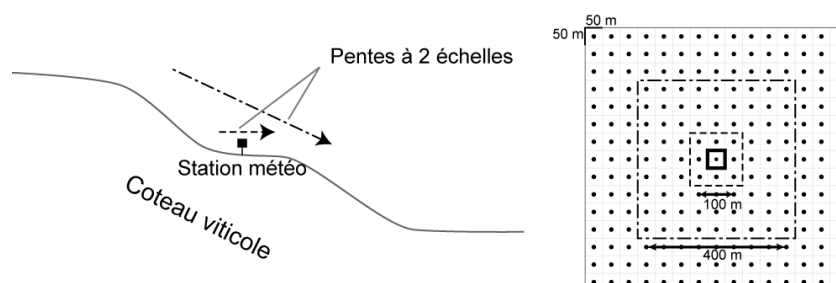


Figure XIV.1 : Schéma de la prise en compte des échelles par l'utilisation des fenêtres spatiales

Pour chaque point de la base environnementale (résolution de 50 m), nous définissons ainsi plusieurs paramètres locaux. À partir des coordonnées mesurées sur le terrain par récepteur GPS (Annexe G) ou données par le CIVC, la position des 23 postes météorologiques est ensuite intégrée dans cette base *environnementale*. Nous pouvons alors extraire, pour chaque station, des informations relatives à la topographie et à l'occupation du sol, selon dix fenêtres spatiales emboîtées²⁵². Il s'agit ensuite d'étudier les relations possibles entre ces descripteurs et les températures minimales relevées.

Par ailleurs, le choix des descripteurs possibles, suggéré par nos lectures, résulte également de plusieurs contraintes. Au-delà de la pertinence des facteurs, c'est-à-dire de leur rôle *a priori* dans la variation des températures minimales, il fallait que l'information puisse être facilement numérisable pour les analyses de relation. Par exemple, nous avons écarté l'état

252. La taille maximale a été fixée à 1 000 m. Au-delà, les tests de corrélation étaient moins significatifs.

hydrique des sols influant sur les températures minimales. Seul un modèle numérique puissant²⁵³ permet d'appréhender cet état en prenant en compte la nature du sol ou encore les précipitations, qui sont des facteurs trop difficiles à mesurer, à l'échelle journalière, dans le cadre de cette thèse. Nous nous sommes alors limités aux facteurs pouvant être définis à partir de notre base de données environnementales. En outre, une seconde contrainte est liée à l'automatisation des calculs de ces régresseurs. En effet, même si les relations entre les facteurs locaux et les températures minimales sont testées à partir des données relatives à l'environnement des stations, il fallait imaginer ensuite une généralisation du calcul à l'ensemble de la zone (c'est-à-dire pour les 883 940 points de la base environnementale). Se posent alors les problèmes d'automatisation algorithmique et de capacité informatique.

Dans ce chapitre, nous décrivons le calcul des différents descripteurs, ainsi que leurs relations éventuelles avec les températures minimales mesurées par les stations automatiques. Notre approche est hypothético-déductive : des facteurs intervenant *a priori* sont formalisés en variables puis nous vérifions leurs influences sur la variation des températures minimales. Nous présenterons ici les corrélations linéaires simples réalisées d'une part à partir des moyennes sur l'ensemble des dates et d'autre part sur la sélection des nuits de ciel clair et de vent calme (Encadré VII.1, p. 148). En somme, les questions auxquelles nous souhaitons répondre sont les suivantes : quels sont les facteurs jouant un rôle sur la répartition des températures ? Interviennent-ils à différentes échelles ? Et enfin existe-il des différences notables pour les nuits de ciel clair et de vent calme ? Cette étape nous permettra de sélectionner les facteurs locaux pour les modélisations futures (Chapitre XV).

XIV.1 - Quelques éléments caractéristiques du relief

Nous avons décrit précédemment l'influence du relief dans la répartition des températures minimales. Le relief est souvent défini à partir de l'altitude, de la pente, de l'orientation ou encore de l'encaissement. Ces données topographiques ont été extraites directement du MNE pour l'altitude *brute* ou encore dérivées de cette information (altitude lissée, pente, orientation).

Le logiciel Surfer® permet de calculer directement des variables dérivées d'un MNE. Cependant, étant donné notre choix de prendre en compte plusieurs fenêtres spatiales, nous n'avons pas utilisé ces procédures informatiques automatiques puisqu'elles constituaient de réelles *boîtes noires* dont la modification s'avérait difficile. Nous avons alors développé des procédures de calculs spécifiques, en particulier à l'aide de la programmation par calcul matriciel, en utilisant le module IML de SAS®²⁵⁴.

253. Par exemple, nous pouvons citer le modèle ISBA [Noilhan et Planton, 1989], dont les sorties sont utilisées comme données d'entrée des simulations MESO-NH pour la nuit du 16 au 17 mars 2003 (Chapitre XVI).

254. D'une manière générale, le logiciel SAS® nous a permis de gérer assez facilement nos bases de données importantes. Grâce au module IML (Interactive Matrix Language), nous avons développé nos propres programmes de calcul des altitudes lissées, des altitudes relatives, des pentes et orientations associées selon différentes fenêtres spatiales (le programme du calcul des altitudes lissées est joint en Annexe H à titre d'exemple).

XIV.1.1 - L'altitude

D'une manière générale, les températures diminuent avec l'altitude, la densité de l'air étant plus faible (le seuil de $-0.55^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ est largement admis). Toutefois, notre terrain d'étude ne présente pas une topographie complexe et une variation altitudinale importante (l'altitude variant de 60 à 290 m ; Carte V.4, p. 115). C'est pourquoi la décroissance des températures avec l'altitude ne s'observe pas. Au contraire, nous avons vu que les stations en bas de coteau et en plaine, donc à des altitudes relatives basses, étaient plutôt plus froides que les stations situées en haut de coteau, à des altitudes relatives plus élevées. Cette observation a été confirmée par une analyse de la variance montrant une relation significative à 1% entre la température minimale moyenne et la position sur le coteau d'une station (Annexe E.2). Ceci est lié à la stagnation de l'air froid en bas de coteau [Bootsma, 1976 ; Geslin, 1956], en particulier lors des nuits de ciel clair et de vent calme. Ces temps stables apparaissent plus souvent en mai qu'en mars et de préférence, à l'échelle synoptique, dans les régions où les hautes pressions dominent (plus dans le sud de la France qu'en Champagne).

Ces premières observations, ainsi que la littérature dans ce domaine, nous amènent donc à supposer l'existence d'une relation positive entre les températures minimales et l'altitude : plus les stations sont situées à une altitude basse, plus elles auraient tendance à avoir des températures minimales froides. Est-ce le cas ici ou n'est-ce pas plutôt l'altitude *relative* qui traduirait le mieux la stagnation de l'air froid en bas de coteau ?

Relation linéaire simple avec l'altitude des stations

À partir des coordonnées des stations, nous avons extrait, de la base de données environnementales, leur altitude. La Figure XIV.2 représente le graphique cartésien croisant ces altitudes avec les moyennes des températures minimales calculées sur l'ensemble des dates des printemps retenus. Même si le nuage de points suppose une relation positive faible, le coefficient de corrélation de Bravais Pearson (0.08) ne confirme pas cette hypothèse (à 10%). Il n'y a donc pas de relation significative entre les températures minimales moyennes et l'altitude.

Toutefois, l'éloignement de la station Germaine²⁵⁵ par rapport au nuage nous a amené à tester à nouveau la relation en l'excluant. Le coefficient de corrélation (0.37) montre alors une relation significative au seuil de 10%²⁵⁶. En ne considérant que les nuits de ciel clair et de vent calme, la relation est plus significative encore (0.52). Par conséquent, les phénomènes locaux induits par l'altitude expliquent, en partie, la variabilité spatiale des températures minimales lors des nuits de ciel clair et de vent calme (station de Germaine exclue).

255. Cette station, située à l'altitude la plus élevée, enregistre des températures minimales, en moyenne, très froides. Sa position en bas de coteau jouerait sûrement dans ce sens.

256. Nous avons alors testé la robustesse de ce coefficient, en enlevant, outre Germaine, les différents postes itérativement. Les coefficients de corrélation sont le plus souvent proches de 0.37 et varient entre 0.32 (sans Reims-Courcy) et 0.48 (sans Fort-Chabrol).

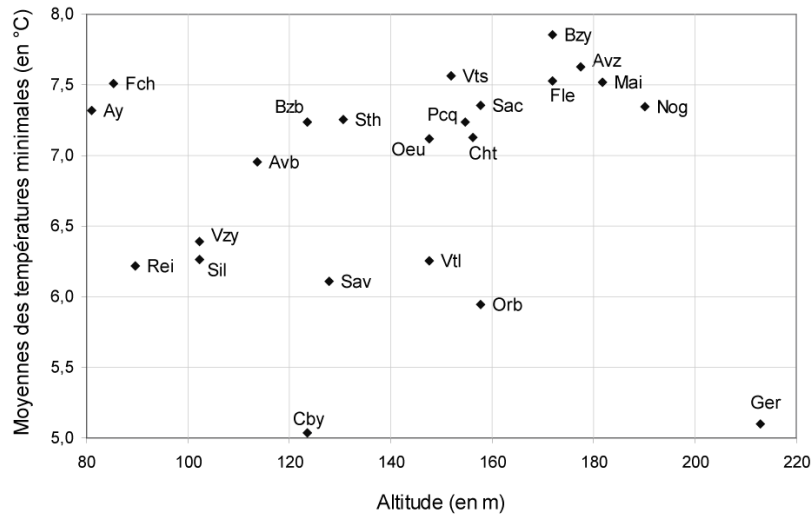


Figure XIV.2 : Graphique cartésien croisant les températures minimales moyennes en fonction de l'altitude des stations

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France / BD Altitude – IGN
Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

Nous avons ensuite étudié la variation, selon l'échelle, de l'intensité de cette relation entre l'altitude et la moyenne des températures minimales pour les nuits de ciel clair et de vent calme (sans Germaine). Plusieurs altitudes ont donc été calculées, à partir des moyennes sur des fenêtres spatiales carrées (dont le côté variait de 100 à 1 000 m). La Figure XIV.3 représente l'évolution des coefficients de corrélation en fonction de la taille de ces fenêtres (tous sont significatifs à 5%). Plus la taille de la fenêtre augmente, moins la relation est forte (excepté pour une fenêtre de 100 m). Le lissage des altitudes au-delà de 100 m, n'améliore donc pas la relation.

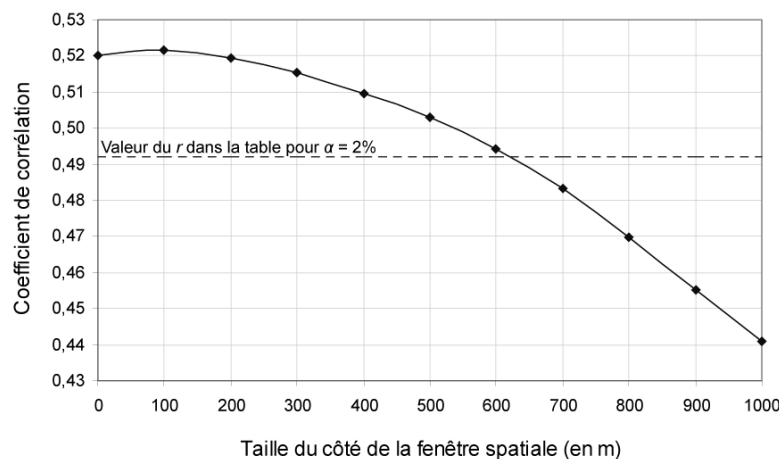


Figure XIV.3 : Évolution des coefficients de corrélation, en fonction de l'augmentation de la taille des fenêtres carrées, entre températures minimales et altitude (sans la station Germaine)

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France / BD Altitude – IGN

En prenant en compte, non pas les températures minimales moyennes, mais les données journalières, l'analyse des relations montre des résultats bien différents. En premier lieu, l'altitude ne ressort pas quotidiennement comme un facteur significatif de la variation des températures minimales. Par exemple, en retenant l'altitude des stations (fenêtre 0) et un risque d'erreur de 10%, la relation entre température minimale et altitude n'est significative

que pour 175 nuits (sur 468). De plus, pour ces nuits, le sens même de la relation varie d'un jour à l'autre : les trois quarts font apparaître une relation négative. Rappelons que nous avons relevé, sur l'étude précédente effectuée sur les moyennes des températures minimales, une relation positive (sans Germaine). Le phénomène d'inversion thermique n'est donc pas aussi significativement fréquent, que pouvait le laisser penser la Figure XIV.2. Les conditions atmosphériques des deux sous-ensembles correspondant à respectivement à des corrélations positive et négative se distinguent très nettement :

- les 42 nuits, où une inversion thermique est observée (relation négative), ont des vents faibles (en moyenne, pour l'ensemble des stations : 0.56 m/s) et un ciel plutôt clair ;
- les 133 autres nuits sont caractérisées par une nébulosité variable²⁵⁷ et des vents plus forts (en moyenne, 1.6 m/s).

La Figure XIV.4 représente deux exemples illustratifs de cette opposition : décroissance des températures minimales (sous abri, à 2 m) avec l'altitude pour le 6 avril 2001 et augmentation pour le 1^{er} avril 2003. Au-delà de la différence très nette dans le sens de la relation, nous pouvons également remarquer l'amplitude marquée pour la nuit de ciel clair et de vent calme (presque 9°C). La situation spécifique de Germaine est particulièrement remarquable au cours de cette nuit-là.

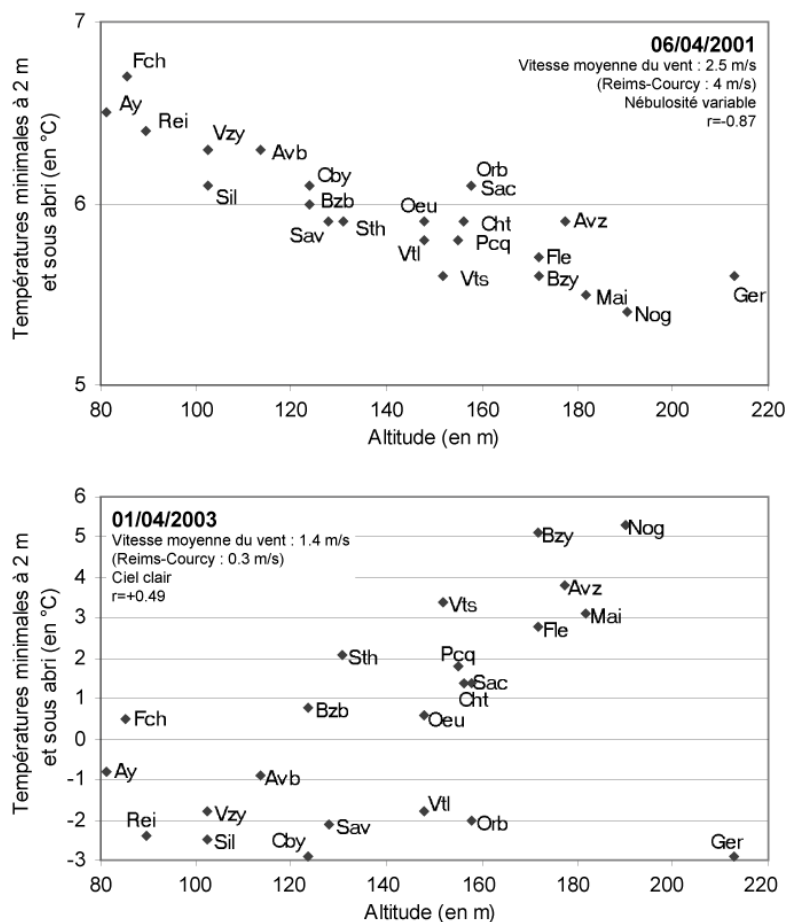


Figure XIV.4 : Deux exemples d'évolution des températures minimales en fonction de l'altitude

Données : 06/04/2001, 01/04/2003 ; CVC, Météo France / BD Alti – IGN
Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

257. Seulement deux nuits ont un ciel clair (Encadré VII.1, p. 148).

Ces résultats montrent que l'analyse des relations à partir des moyennes peut fausser l'interprétation. Les différences journalières observées incitent à prendre en compte les conditions atmosphériques.

Relation linéaire simple avec l'altitude relative des stations

Exclure la station de Germaine, pour avoir une relation significative entre altitude et température minimale, ne nous semblait pas une solution satisfaisante. C'est pourquoi nous avons cherché une autre expression du paramètre altitudinal. Les résultats de l'analyse de la variance avec la position sur le coteau²⁵⁸ nous amènent ainsi à penser que l'altitude à prendre en compte serait une altitude relative. La température minimale moyenne d'une station serait liée à sa position relative selon le coteau viticole, les bas de coteau étant plus froids en raison de la stagnation de l'air froid (en particulier lors des nuits de vent calme et de ciel clair).

La Figure XIV.5 montre l'altitude des stations et leur position sur le coteau. Dans l'ensemble, les stations de bas de coteau (triangle orienté vers le bas) sont situées à des altitudes basses et inversement. Cependant, on remarque que les stations de Germaine, Orbais-l'Abbaye et Vert-Toulon, de bas de coteau, sont à des altitudes relativement élevées (et le contraire pour Saint-Thierry et Savigny-sur-Ardre). La prise en compte de l'altitude relative semble donc plus pertinente pour modéliser les températures minimales.

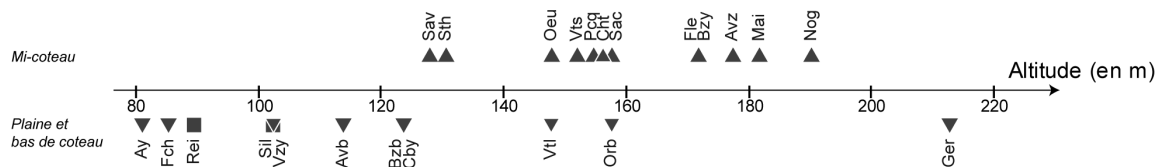


Figure XIV.5 : Altitude et position sur le coteau des stations

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France / BD Alti – IGN
 Les abréviations des stations ainsi que les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

Dans l'optique d'une application du modèle à l'ensemble des points de la zone d'étude (espacés tous les 50 m), il est souhaitable de dépasser cette typologie *position sur le coteau* et, par-là même, de quantifier cette altitude relative. Pour cela, il est courant de calculer la différence entre l'altitude de la station et le point le plus bas situé à une distance définie²⁵⁹.

Nous avons choisi ici plusieurs voisinages (250, 500, 1 000 et 2 000 m²⁶⁰) autour des stations afin de calculer les altitudes relatives. L'écart altitudinal entre la station et le point le plus bas dans l'espace défini par ces différentes distances (Figure XIV.6) est ainsi calculé et ensuite utilisé comme facteur explicatif dans la modélisation des températures minimales.

258. Rappelons que cette typologie *position sur le coteau* comprend trois modalités possibles : plaine, bas de coteau (au tiers inférieur), mi-coteau (au tiers supérieur).
 259. P. Carrega [1994] définit ainsi une variable *élévation* : dénivellation maximale dans un rayon de 1 000 m autour de la station.
 260. Ces distances ont été retenues après plusieurs tests.

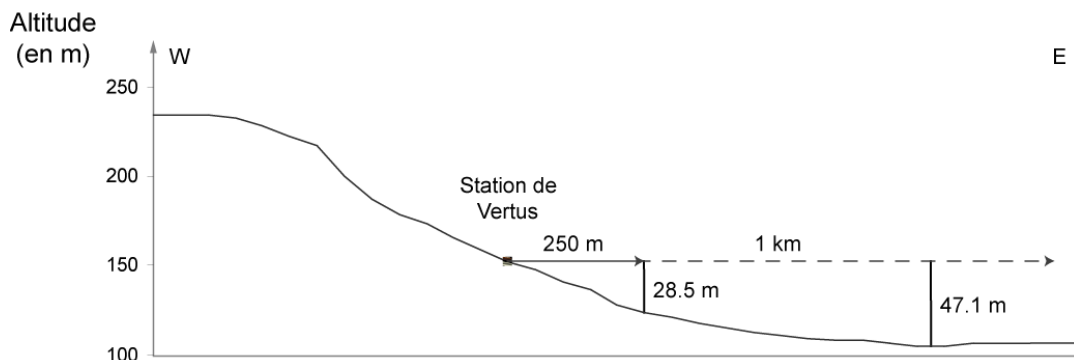


Figure XIV.6 : Schéma des altitudes relatives de Vertus à 250 m et à 1 km, avec un transect ouest-est

Données : BD Alti – IGN

Le Tableau XIV.1 répertorie les coefficients de corrélation de Bravais Pearson entre l'altitude relative selon plusieurs voisinages et les moyennes des températures minimales. Pour l'ensemble des nuits, la relation n'est pas significative, pour un risque d'erreur fixé à 10%, quelque soit la portée du voisinage, excepté pour celle de 1 000 m. Par contre, les coefficients de corrélation pour les nuits de vent calme et de ciel clair sont plus élevés. Ils traduisent des relations significatives, positives et relativement fortes avec les températures minimales, d'autant plus pour une portée de 1 000 m. Par conséquent, plus la station est située dans une altitude relative basse (en bas de coteau, vallée, etc.), plus elle a tendance à enregistrer, en moyenne, des températures froides lors des nuits de ciel clair et de vent calme. À nouveau, nous voyons que les facteurs locaux jouent un rôle non négligeable lors de ces nuits où le refroidissement est essentiellement radiatif.

Tableau XIV.1 : Coefficients de corrélation entre l'altitude relative selon plusieurs voisinages et les moyennes des températures minimales pour l'ensemble des nuits retenues et pour les nuits de vent calme et de ciel clair

	Moy. des températures minimales (n = 468)	Moy. des températures minimales pour les nuits de vent calme et de ciel clair (n = 108)
Altitude relative selon un voisinage de 250 m	0,28	0,36*
500 m	0,32	0,40*
1 000 m	0,35*	0,44**
2 000 m	0,33	0,42**

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; C1vc, Météo France / BD Alti – IGN

* Significatif à 10%, ** à 5%

La définition des nuits de ciel clair et de vent calme est rappelée dans Encadré VII.1 (p. 148).

L'étude des relations entre les températures minimales journalières et ces altitudes relatives montre ainsi des résultats très contrastés voire contradictoires, comme nous l'avons précédemment observé avec les altitudes *brutes*. Pour certaines nuits, dont les conditions atmosphériques sont caractérisées par une nébulosité variable et des vitesses de vent plutôt moyenne à forte, nous observons une décroissance des températures minimales (sous abri, à 2 m) avec l'altitude relative²⁶¹. À l'inverse, nous observons une inversion thermique, c'est-

261. Ces nuits, où la relation est négative, sont approximativement les mêmes que celles repérées à partir des altitudes *brutes*.

à-dire une relation positive significative à 10%, pour presque une nuit sur quatre²⁶². Les quatre altitudes relatives donnent des résultats assez similaires, même si le voisinage de 2 km semble être le plus adéquat. La couverture nuageuse lors des ces nuits est classée tant en ciel clair qu'en nébulosité variable. Par contre, la faible vitesse du vent semble jouer un rôle prépondérant dans l'observation d'une inversion thermique.

XIV.1.2 - La pente

Plusieurs auteurs ont mis en évidence l'influence de la pente dans les écoulements de l'air froid le long du coteau (par gravité). Lorsqu'elle est faible (vallée, plaine), l'air, qui a tendance à s'accumuler, refroidit l'atmosphère (cf. Chapitre II).

Nous avons exposé précédemment les différentes manières de calculer la pente (Encadré V.2, p. 103). La Figure V.2 correspond au schéma de l'information altitudinale pour la première fenêtre. Ici la pente (et l'azimut) au point central (i,j) est calculée à partir des deux gradients suivants (troisième méthode de l'encadré) :

$$(\Delta z / \Delta x)_{i,j} = (z_{i+1,j} - z_{i-1,j}) / 2\Delta x$$

$$(\Delta z / \Delta y)_{i,j} = (z_{i,j+1} - z_{i,j-1}) / 2\Delta y$$

$z_{i-1,j+1}$	$z_{i,j+1}$	$z_{i+1,j+1}$
$z_{i-1,j}$	$z_{i,j}$	$z_{i+1,j}$
$z_{i-1,j-1}$	$z_{i,j-1}$	$z_{i+1,j-1}$

Figure XIV.7 : Exemple d'une fenêtre 3 x 3 pour le calcul des dérivées des altitudes²⁶³

Ainsi l'équation de la pente est :

$$Pente = ArcTan\sqrt{(\Delta z / \Delta x)^2 + (\Delta z / \Delta y)^2}$$

En augmentant la taille des fenêtres spatiales, nous nous sommes interrogés sur la donnée altitudinale à prendre en compte pour le calcul des gradients nord-sud et est-ouest. La Figure XIV.8a représente le schéma des deux transects pour une fenêtre spatiale de 300 m : la pente attribuée au point central (gris foncé) est calculée à partir des altitudes *brutes* (gris plus clair). Toutefois, l'utilisation des fenêtres spatiales permet la prise en compte de phénomènes à une échelle plus large. L'objectif est alors de rechercher une adéquation entre les échelles de l'altitude et de la pente. C'est pourquoi nous avons préféré prendre, pour calculer les pentes selon les différentes fenêtres spatiales, les altitudes lissées au lieu des données *brutes*. De cette manière, un *accident* topographique, important localement, sera atténué pour une fenêtre plus grande. La taille de la fenêtre du lissage des altitudes prise en compte est alors inférieure de 50 ou 100 m à celle de la fenêtre définissant la pente (comme le montre la Figure XIV.8b).

262. Avec l'altitude du point, ces inversions thermiques ne représentaient que 9% des nuits. Il semble donc que l'altitude relative *explique* mieux les températures minimales.

263. Rigoureusement, nos informations altitudinales ne sont pas sous la forme *raster* comme le laisse supposer la figure, mais selon des points espacés tous les 50 m. Par souci de lisibilité, nous avons préféré utiliser des carrés pour chaque point. Cette simplification est réappliquée pour plusieurs schémas par la suite.

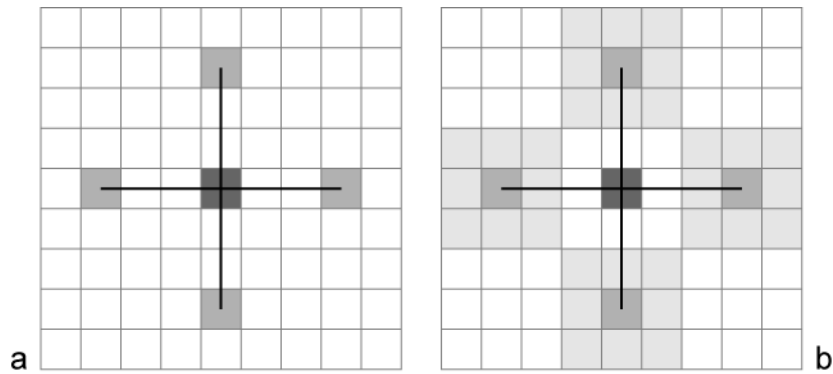


Figure XIV.8 : Altitudes (a) ou altitudes lissées (b) pour le calcul de la pente

Le Tableau XIV.2 présente les coefficients de corrélation linéaire entre les températures minimales moyennes (pour l'ensemble des dates et pour la sélection de nuits de vent calme et de ciel clair) et les pentes calculées selon différentes fenêtres spatiales. À partir de la table de Bravais Pearson, nous pouvons confirmer l'hypothèse de relations significatives (à 10%). Les coefficients sont tous positifs : plus la pente est faible, plus les températures minimales ont tendance à être froides. Dans ces zones de faibles pentes, l'air froid a tendance à s'accumuler.

Tableau XIV.2 : Coefficients de corrélation entre la pente selon plusieurs fenêtres spatiales et les moyennes des températures minimales pour l'ensemble des nuits retenues et pour les nuits de vent calme et de ciel clair

	Moy. des températures minimales ($n = 468$)	Moy. des températures minimales pour les nuits de vent calme et de ciel clair ($n = 108$)
Pente sur une fenêtre de 100 m de côté	0,39*	0,47**
200 m	0,40*	0,46**
300 m	0,43*	0,48**
400 m	0,44**	0,48**
500 m	0,45**	0,48**
600 m	0,43**	0,45**
700 m	0,41*	0,44**
800 m	0,40*	0,43**
900 m	0,41*	0,44**
1 000 m	0,42**	0,46**

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIRC, Météo France / BD Alti – IGN
* Significatif à 10%, ** à 5%

L'influence de la pente sur les températures minimales apparaît plus forte lors des nuits de ciel clair et de vent calme, et cela d'autant plus que le nombre de dates (n) est inférieur pour ces nuits. Quant à l'échelle du phénomène, les pentes les plus corrélées sont celles calculées sur une fenêtre de 500 m de côté (Tableau XIV.2)²⁶⁴. Au-delà les coefficients sont moins forts.

Nous avons ensuite étudié les relations entre ces pentes et les températures minimales au niveau de chacune des journées. Les coefficients de corrélation font apparaître une

264. Pour les nuits de ciel clair et de vent calme, les coefficients de corrélation sont assez proches pour les fenêtres de 100 à 500 m de côté (Tableau XIV.2).

opposition entre, d'une part les nuits de vent calme et plutôt de ciel clair, qui sont caractérisées par une relation positive, et d'autre part, les nuits où le vent est plus fort et la couverture nuageuse plus importante, pour lesquelles cette relation est au contraire négative. Ce résultat, montrant l'effet des conditions atmosphériques sur la relation, va dans le même sens que ceux à partir des altitudes (*brutes* et relatives). Ainsi, lors des nuits de ciel clair et de vent calme, les températures minimales ont tendance à diminuer à la fois avec les altitudes relatives et avec les pentes. Ceci pourrait s'expliquer par l'existence d'une relation entre la pente et l'altitude des stations. Ce point sera abordé à la fin de ce chapitre.

XIV.1.3 - L'orientation

Les relations linéaires simples entre l'orientation (ou l'exposition) des stations et les moyennes de leurs températures minimales ont été testées d'une part sur l'ensemble des dates et d'autre part sur le sous-ensemble constitué des seules nuits de vent calme et de ciel clair. L'orientation est définie comme la direction de la pente calculée précédemment. Elle est donnée en degrés par rapport au nord géographique²⁶⁵. Compte tenu du caractère angulaire de ces données, nous les avons transformées selon les composantes nord-sud et ouest-est, en reprenant la méthodologie exposée précédemment pour l'étude de la donnée *vent* (Encadré VIII.1, p. 154).

Seuls deux coefficients de corrélation entre les températures minimales moyennes et les orientations (selon les deux composantes et pour chacune des fenêtres de côté 100 à 1 000 m) sont significatifs pour un risque d'erreur de 10%. Il s'agit de la composante nord-sud pour les deux premières dimensions de fenêtre (côté de 100 et de 200 m), montrant une (très) faible relation négative²⁶⁶ : plus les stations sont orientées vers le nord, plus elles ont tendance à avoir des températures minimales moyennes basses. En revanche, si nous limitons l'analyse à la moyenne des nuits de ciel clair et de vent calme, il n'y a aucune relation. Nous pouvons alors supposer (avec de nombreuses réserves) que ce résultat témoigne des advections froides du nord et nord-est.

Les résultats obtenus à l'échelle journalière vont dans le même sens. Les relations entre les températures minimales et les deux composantes sont très rarement significatives, quelle que soit la fenêtre spatiale considérée : pour l'orientation nord-sud, entre 13.0 et 19.9% des dates selon les fenêtres spatiales et pour l'orientation est-ouest, entre 12.4 et 18.4%. En outre, lorsqu'une ou les deux composantes interviennent significativement dans la variation des températures minimales, elles n'interviennent pas de la même manière selon les nuits. Nous retrouvons cependant certaines récurrences (pour toutes les fenêtres) :

- la composante est-ouest est souvent positive : plus les stations sont orientées à l'est, plus leurs températures minimales ont tendance à être moins froides²⁶⁷ ;
- les stations orientées vers le nord ont tendance à être plus froides (la composante nord-sud est souvent négative).

265. Une orientation de 90° correspond à une exposition est, une de 180° à une sud et ainsi de suite.

266. Les coefficients de corrélation sont alors respectivement de -0.36 et -0.37.

267. Ceci avait été précédemment observé dans la troisième partie.

Nous avons supposé que cette dernière observation était liée aux advections d'air froid, venant principalement du quadrant nord-est. Pour le vérifier, nous avons représenté, sur la Figure XIV.9, les coefficients de corrélation journaliers pour la fenêtre de 1 000 m de côté (en ordonnée) en fonction du vent nocturne général (en abscisse), défini à partir de la résultante vectorielle du vent nocturne à Reims-Courcy. Nous avons ajouté les droites indiquant les valeurs-seuils des coefficients de corrélation pour un risque d'erreur de 10%. Pour la grande majorité des nuits, les coefficients ne sont pas significatifs. Toutefois, en ne retenant que les dates où les coefficients de corrélation sont significatifs (à 10%), nous constatons que les relations avec la composante nord-sud sont négatives pour des vents d'origine nord à est (72 dates) et, à l'inverse, positives pour des vents de sud à sud-ouest (21 dates). En d'autres termes :

- lorsque le vent à l'échelle synoptique vient du quadrant nord-est, les températures minimales ont très légèrement tendance à être plus froides pour les stations orientées nord ;
- par contre, lorsque ce vent a une origine sud/sud-ouest, alors les stations avec une orientation sud sont plutôt plus froides.

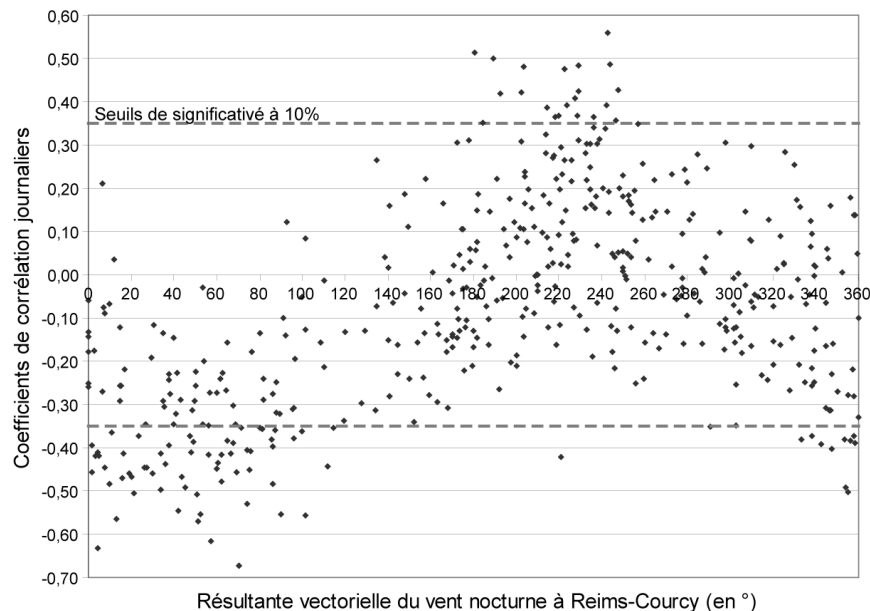


Figure XIV.9 : Coefficients de corrélation journaliers entre les températures minimales et la composante nord-sud de l'orientation (fenêtre de 1 000 m de côté), en fonction du vent nocturne général sur la Marne (résultante sur les données de 21, 0, 3 et 6h UTC)

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France / BD Alti – IGN

Cette observation corrobore les mesures sur le terrain et les hypothèses de G. Beltrando *et al.* [1992] et de I. Sarmir [1995] : un vent, à l'échelle synoptique, opposé à l'orientation d'un coteau bloquerait l'accumulation d'air froid liée la brise de pente (Figure II.7, p. 43). Cependant, s'il est possible effectivement d'observer la réalité de ce phénomène pour un certain nombre de nuits, plus fréquent encore est le cas d'une absence de relation entre température minimale et orientation, alors que le vent à l'échelle synoptique est clairement de sud/sud-ouest ou de nord.

Enfin, signalons qu'il existe de nombreux autres facteurs morphométriques mentionnés dans la littérature sur la spatialisation des températures : la rugosité traduisant les irrégularités du terrain pouvant modifier les écoulements de surface [Joly *et al.*, 1994], l'indice d'abri topographique [Harrisson et Kelly, 1996], le *sky view factor* [Oke, 1981] équivalent à l'indice de fermeture du paysage [Jacquet et Morlat, 1997] ou encore la localisation des talwegs et crêtes [Bridier, 2001]. Ces différents paramètres n'ont pas été pris en compte ici en raison d'une trop lourde mise en œuvre (notamment automatisation difficile) et/ou parce que mal adapté ici (par exemple, les stations sont plutôt dans des environnements dégagés).

Cependant, nous avons testé un autre paramètre descripteur, directement à partir du logiciel Surfer® : le *plan curvature*. Très souvent utilisé en hydrologie, ce calcul de la courbure traduit le taux de variation de la pente. Décrivant l'encaissement autour de la station, il permet de repérer les zones de divergence (valeur négative) et de convergence (valeur positive) des écoulements supposés de l'air. Toutefois, il n'y a pas ici de relation significative entre cette variable et les températures minimales des stations.

XIV.2 - Une approche plus synthétique : la méthode AURELHY

La méthode AURELHY, que nous avons exposée précédemment (p. 218), a permis, à P. Bénichou et O. Le Breton [1987], de reconstituer les champs pluviométriques du Massif Central à partir de *paysages-types* du relief (premiers facteurs d'une ACP ; Annexe E.3). Cette démarche, s'appuyant sur une synthèse des données altitudinales, nous a séduit, notamment parce qu'elle intègre, par construction, la dimension multi-échelle. Aussi avons-nous testé si ces facteurs topographiques synthétiques apportaient un plus dans la modélisation spatiale des températures minimales dans le vignoble marnais.

La première étape consiste à sélectionner, pour chaque point du MNE, les valeurs altitudinales des points voisins, selon une certaine taille de fenêtre. P. Bénichou et O. Le Breton [1987] ont retenu une fenêtre carrée de 50 km de côté. La résolution de leur MNE étant de 5 km, ils ont sélectionné 121 points. Compte tenu de la résolution de 50 m de notre MNE, si nous avons pris le même nombre de données altitudinales autour de chaque point, notre fenêtre décrivant les paysages de base du relief aurait une dimension de 500 m x 500 m. Cette taille nous a semblé insuffisante pour décrire le relief, surtout du fait de son caractère peu accentué en Champagne. Nous avons alors cherché à agrandir cette fenêtre de sélection. Toutefois, cette opération nécessitant des ressources informatiques importantes, nous avons dû restreindre le nombre de points pris en compte. Après plusieurs essais, nous avons finalement retenu les 121 points dans un cadre de 3 km, avec des espacements de 300 m (Figure XIV.10). Cette solution constitue un bon équilibre entre une trop forte tendance au lissage pour des espacements trop importants et une survalorisation des effets d'encaissements locaux du relief.

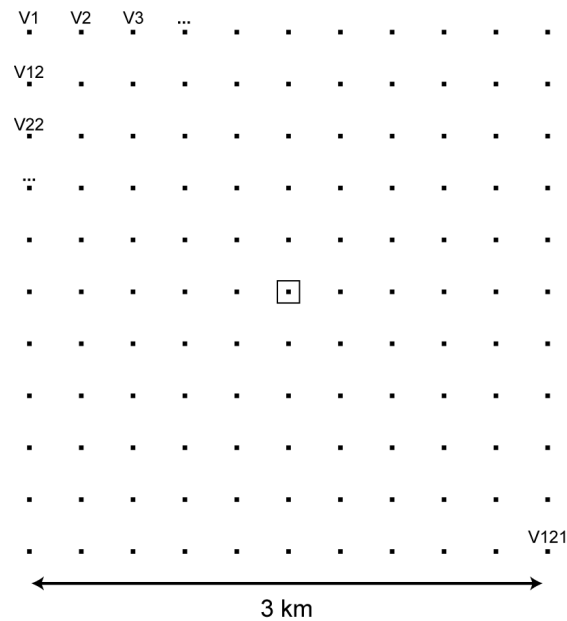


Figure XIV.10 : Sélection des 121 altitudes dans une fenêtre de 3 km

Le tableau de base sur lequel est réalisée l'ACP indique, pour chaque point du MNE²⁶⁸ (unité spatiale en ligne), les 120²⁶⁹ altitudes des points *voisins* (variables). Comme résultats de l'ACP, nous obtenons les valeurs propres de chaque composante principale, ainsi que les projections (coordonnées) des variables, puis des individus sur ces composantes. Les variables étant ici les altitudes des points voisins, nous pouvons cartographier les coordonnées des variables (Figure XIV.11). Les *images* obtenues décrivent les paysages de base du relief, somme toute assez proches de ceux de P. Bénichou et O. Le Breton [1987] (Figure XII.4, p. 218). Toutefois, nous dégagons moins de facteurs significatifs (6²⁷⁰ au lieu de 15), ce qui peut s'expliquer par la faible complexité du relief de notre zone d'étude. Les six paysages de base retenus (Figure XIV.11) résument d'ailleurs 94.6% de l'information initiale et décrivent les principales caractéristiques locales du relief :

- le premier facteur F1 (76.8%) décrit l'encaissement ;
- le second F2 (9.2%) la pente nord/sud ;
- le troisième F3 (3.9%) la pente ouest/est ;
- la quatrième F4 (2.1%) un effet de *col* ou de *vallée* nord-ouest/sud-est ;
- le cinquième F5 (1.5%) un léger effet de *col* ou de *dépression* nord-est/sud-ouest ;
- et enfin le sixième F6 (1.1%) un effet de *col* ou de *vallée* nord/sud.

Par construction, chaque facteur apporte une information supplémentaire qui n'est pas redondante avec celle des facteurs précédents. Ici, le premier facteur relatif à l'encaissement résume plus des trois quarts de l'information initiale²⁷¹, ce qui peut s'expliquer par la non-complexité du relief de notre zone d'étude.

268. En réalité, nous n'avons pas une information pour chaque point du MNE initial : pour réaliser ces calculs, nous avons exclu les marges du domaine.

269. En reprenant la méthodologie de P. Bénichou et O. Le Breton [1987], nous avons exclu l'altitude du point ; elle sera utilisée par la suite comme prédicteur, au même titre que les premiers facteurs de l'ACP.

270. Au-delà du sixième, les facteurs apportent moins d'information qu'une variable et sont donc rejetés.

271. Dans les travaux de P. Bénichou et O. Le Breton [1987], l'effet d'encaissement global n'expliquait que 39% de la variance.

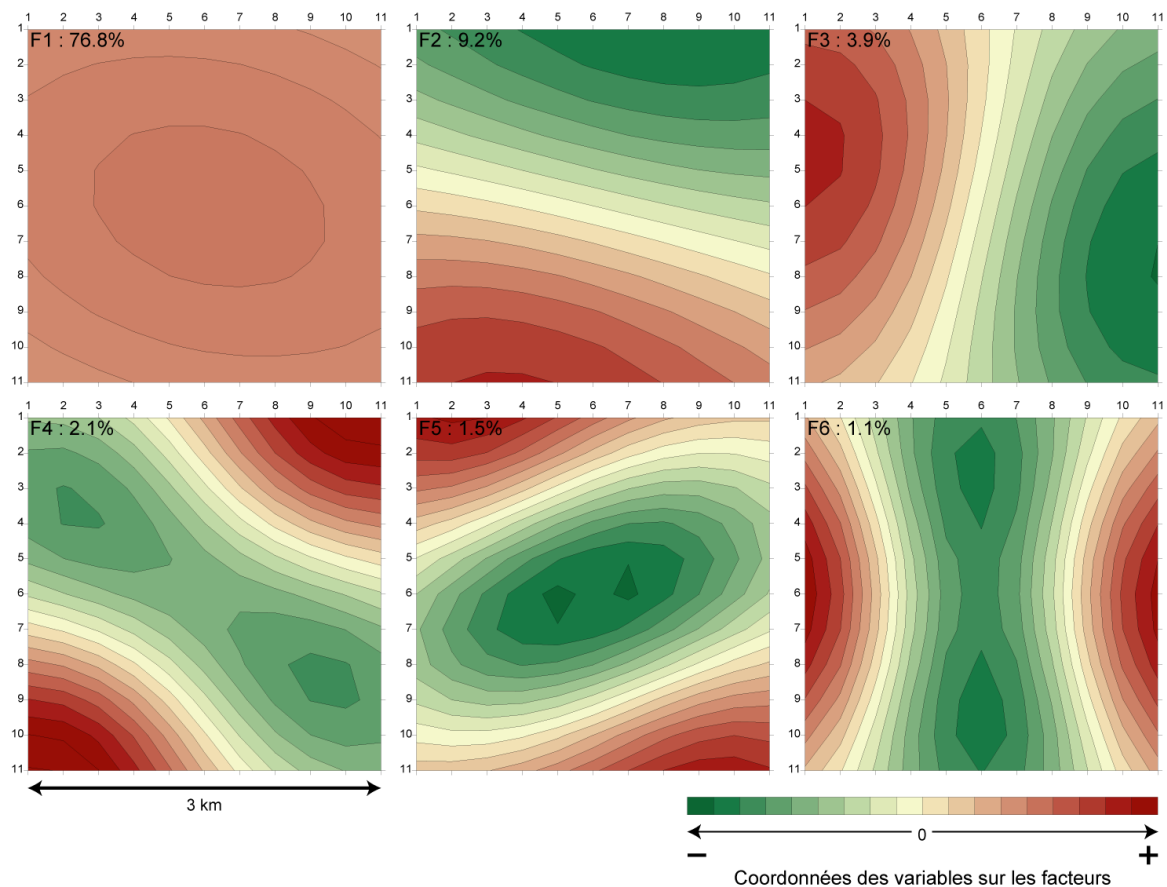
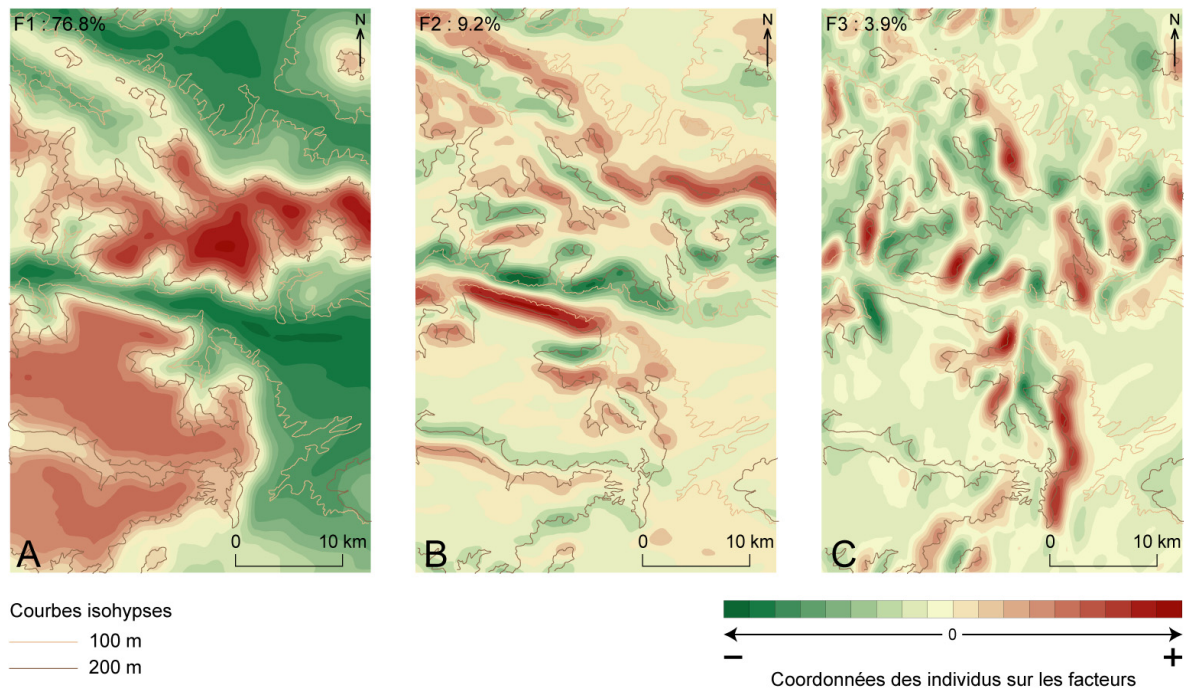


Figure XIV.11 : Les six premiers paysages de base du relief construits à partir des projections des variables sur les composantes principales

Données : BD Alti – IGN
 Les projections ont été interpolées par triangulation.

L'information synthétique de ces six principaux facteurs apparaît pertinente pour décrire le relief de notre zone d'étude. Sur la Carte XIV.1, nous avons représenté les coordonnées des individus, c'est-à-dire de chaque point du MNE, sur les trois premières composantes. La Carte XIV.1A est une image lissée du relief et reflète très bien les parties hautes et basses (encaissement). La Carte XIV.1B oppose les coteaux orientés nord et sud, la Carte XIV.1C les coteaux orientaux et occidentaux.



Carte XIV.1 : Projections des points du MNE (individus) sur les trois premières composantes principales

Données : BD Alti – IGN
 Les projections ont été interpolées par triangulation.
 Pour visualiser clairement les répartitions spatiales, l'échelle des coordonnées n'est pas identique pour chaque carte.

À partir des résultats de l'ACP, nous avons extrait, pour chaque station météorologique, les coordonnées sur les différentes composantes, afin de tester l'existence de relation entre ces coordonnées et les températures minimales. Pour aucune des composantes, il n'y a de relation significative au seuil de 5% avec les moyennes des températures minimales, qu'il s'agisse de l'ensemble des dates ou de la sélection des nuits de ciel clair et de vent calme. Toutefois, nous observons une faible relation positive entre le facteur 3 (gradient ouest/est) et la moyenne des températures minimales lors des nuits de ciel clair et de vent calme ($r = 0.36$, significatif à 10%) : plus les stations sont orientées vers l'est, plus elles ont tendance à être chaudes (d'autant plus quand la pente est importante). Ce résultat s'expliquerait par les températures minimales plutôt chaudes pour les stations de la Côte des Blancs et de l'est de la Montagne de Reims.

La méthode AURELHY a permis ici de résumer de manière satisfaisante le relief de notre zone et de montrer la *quasi*-absence de relation entre les variations des températures minimales et les différences de position des stations relativement à ces formes de relief élémentaires. Cela peut s'expliquer par le faible nombre de stations, par la non-complexité du relief ou encore par d'autres facteurs, notamment locaux. En raison du faible apport des composantes, nous avons décidé de ne pas les utiliser par la suite dans la modélisation des températures minimales.

XIV.3 - L'occupation du sol

Un autre facteur possible de la variation des températures minimales est l'occupation du sol. Ainsi, à une échelle microclimatique, nous avons mentionné précédemment les différences thermiques observées, la nuit, sur des divers types de sols (tassé, en herbe, etc.). À une échelle moins fine, de très nombreuses recherches portent sur les modifications thermiques apportées par la présence d'une ville (l'îlot de chaleur urbaine [Oke, 1987]). On peut également citer la formation de lacs froids au-dessus des zones de grandes cultures [Cellier, 1993] ou encore le rôle du couvert forestier qui, de manière schématique, diminue les températures le jour et les augmente la nuit [Geiger *et al.*, 1995].

Ces différentes influences mentionnées dans la littérature nous ont amené à considérer l'occupation du sol comme un des facteurs possibles de la variation spatiale des températures minimales. Aussi avons-nous utilisé le thème *Occupation du sol* de la base de données BD Carto, présenté précédemment (V.2 - Données d'occupation du sol, p. 109), afin de définir des descripteurs potentiels.

À nouveau, l'approche *multi-échelle*, c'est-à-dire en considérant plusieurs fenêtres spatiales, a été adoptée ici. Elle se justifiait d'autant plus que la majorité des stations, soit 15 sur 23, est située dans le vignoble (quatre postes en zone urbaine et quatre classés en grandes cultures). Par contre, à l'inverse des variables décrivant le relief, le type d'occupation du sol est une variable qualitative. Cette discrétisation des données n'offre pas les mêmes possibilités de calculs que précédemment.

Afin de chercher une influence éventuelle de l'occupation du sol sur les températures minimales, nous avons calculé, pour chaque station, la distance minimale à plusieurs types d'occupation (Tableau V.1, p. 110) :

- la classe *Autre* caractérisée essentiellement par des grandes cultures ;
- la classe *Espace bâti* et *Infrastructures de communication* ;
- et enfin la classe *Formations boisées*.

À partir de l'analyse des corrélations entre ces distances minimales et les températures minimales moyennes (pour l'ensemble des dates et pour la sélection des nuits de ciel clair et de vent calme), il apparaît que seule la distance minimale à la classe *Autre* intervient significativement ($\alpha = 5\%$) dans la variation des températures minimales. Ainsi, plus les stations sont proches des zones de grandes cultures, plus leurs nuits ont tendance à être froides. Ce résultat pourrait nous satisfaire pleinement puisqu'il correspond à des hypothèses initiales. Cependant, les grandes cultures situées à proximité des postes météorologiques étant principalement à des altitudes basses, l'information apportée par cette variable représente *a priori* plutôt une altitude relative. En outre, la relation est plus faible pour les nuits de ciel clair et de vent calme ($r = 0.49$) que pour l'ensemble des nuits (0.56). Or, généralement, les effets locaux sont plus renforcés lors de ces nuits proches des conditions *radiatives*. Par conséquent, nous avons préféré écarter ce descripteur.

En somme, pour la modélisation future des températures minimales à partir des facteurs locaux, nous n'avons pas retenu de variables relatives au type d'occupation du sol. Cela étant, le type d'occupation du sol apporte *a priori* une information redondante aux données

relatives au relief. En effet, la réalisation d'un test du χ^2 a permis de conclure à l'existence d'une relation très forte entre l'occupation du sol et l'altitude, discrétisée en plusieurs classes. Cette concordance des répartitions spatiales a déjà été évoquée et illustre l'*image classique* du vignoble : en dessous des plateaux occupés principalement par les forêts, les coteaux viticoles surplombent les zones de grandes cultures de la plaine.

Conclusion du chapitre XIV

Dans ce chapitre, nous avons identifié les facteurs locaux pouvant influencer ou non la variation des températures minimales dans le vignoble marnais. Pour cela, nous avons calculé, à partir des données disponibles pour notre zone d'étude, plusieurs facteurs, souvent mentionnés dans la littérature, en adoptant une démarche multi-échelle par le biais des fenêtres spatiales. Alors que ces facteurs sont très souvent décrits en termes qualitatifs, nous avons cherché à leur donner systématiquement une expression quantitative. Les relations entre ces facteurs et les températures minimales (moyennes sur l'ensemble des dates, sur les nuits de ciel clair et de vent calme, données journalières) ont ensuite été discutées.

Les fenêtres spatiales nous ont permis de décrire l'environnement autour des stations. Les régressions linéaires simples par facteurs ont montré que ce n'était pas forcément la première fenêtre (celle classiquement utilisée dans les logiciels) qui modélisait le mieux la variation des températures minimales. Notons toutefois que les paramètres évoluent assez peu selon les fenêtres (excepté l'altitude relative).

Afin d'éviter les redondances des descripteurs, nous avons retenu, pour les modélisations finales présentées dans le chapitre suivant, ceux correspondant aux fenêtres les plus pertinentes : l'altitude moyennée sur une fenêtre de 100 m de côté, l'altitude relative sur 1 000 m et la pente sur 500 m. Par ailleurs, ayant constaté que l'orientation ne ressortait pas de manière significative, nous avons choisi de prendre l'orientation associée à la pente retenue, soit les composantes nord-sud et est-ouest sur 500 m.

Pourtant, il ne faut pas imaginer que les descripteurs retenus soient indépendants pour notre zone d'étude, comme l'illustrent certains exemples de la Figure XIV.12 (altitude et altitude relative, pente et altitudes, etc.²⁷²).

272. La forme particulière du graphique cartésien *Orientation nord-sud / Orientation est-ouest* est liée à la définition trigonométrique de ces deux facteurs.

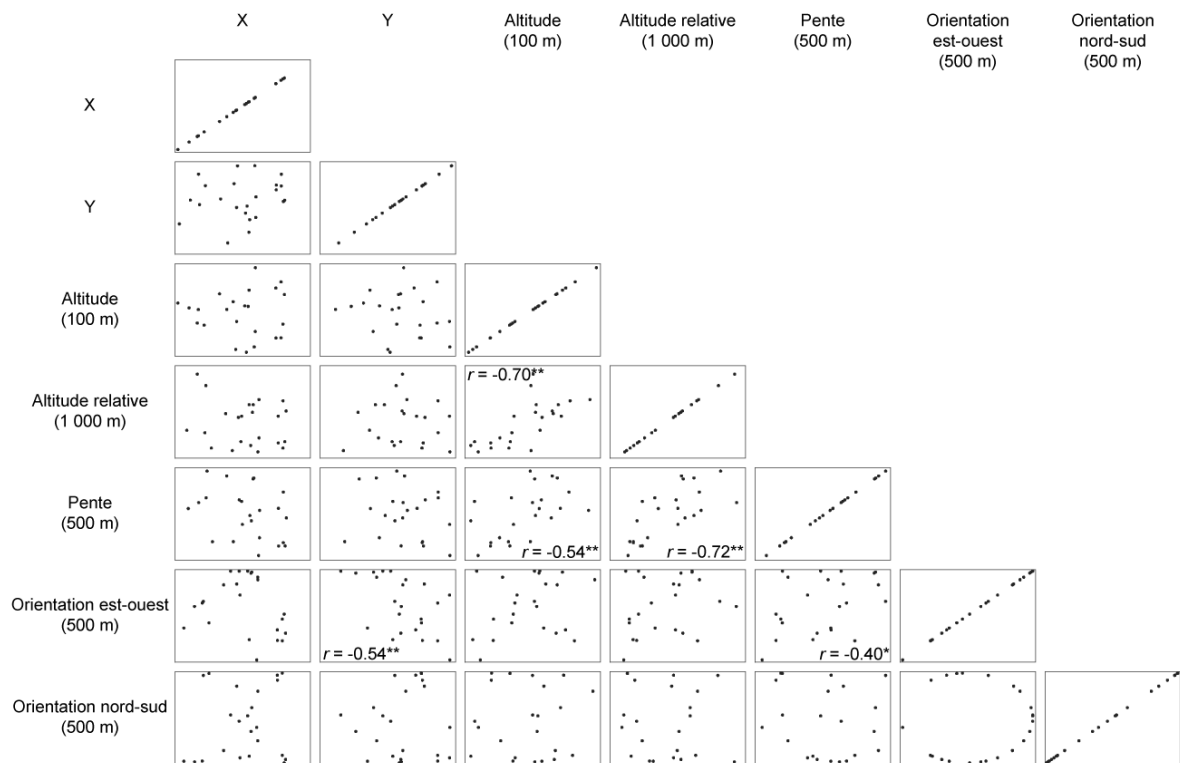


Figure XIV.12 : Matrice des corrélations entre les descripteurs retenus

Données : BD Alti – Ign

Signalons enfin qu'il existe de nombreux autres facteurs non pris en compte ici pour diverses raisons. Par exemple, il est évident que l'humidité des sols ou encore la nébulosité seraient des paramètres intéressants à intégrer pour expliquer la variation spatiale des températures minimales.

Chapitre XV - SPATIALISATIONS DES TEMPERATURES MINIMALES

Dans les deux chapitres précédents, nous avons testé l'existence de relations entre les températures minimales et les coordonnées géographiques, puis plusieurs facteurs topographiques. Les résultats étaient contrastés : si l'influence de la pente autour des stations était très significative dans la variation des températures minimales, celle de leur localisation spatiale ne semblait pas intervenir. Dans ce chapitre, nous proposons une modélisation des températures minimales, à partir de l'ensemble des descripteurs retenus, en procédant en deux étapes : *tendances spatiales* et *facteurs locaux*. Au vu des résultats montrant des répartitions spatiales peu structurées et, à l'inverse, une influence prépondérante des facteurs topographiques, nous avons décidé de privilégier ces derniers. Nous commencerons ainsi la modélisation en intégrant d'abord les *facteurs locaux* puis les *tendances spatiales* (surfaces de tendances du premier ordre²⁷³ sur les résidus des premières régressions multiples).

En adoptant une démarche similaire à celle suivie jusqu'à maintenant, nous avons modélisé les températures minimales en retenant plusieurs variables explicatives afin d'appréhender différentes échelles temporelles et de discuter la stabilité des résultats : moyennes sur l'ensemble des dates de ciel clair et de vent calme, puis données journalières qui permettront de dégager des récurrences. Les différents modèles construits sont utilisés pour spatialiser les températures minimales, à l'échelle temporelle adoptée, sur l'ensemble de la zone d'étude. Ils donneront ainsi une estimation de la répartition spatiale de l'aléa gélif.

XV.1 - Modélisation des températures minimales moyennes lors des nuits de ciel clair et de vent calme

Dans un premier temps, nous avons cherché à modéliser la moyenne des températures minimales (sous abri, à 2 m) pour les nuits de ciel clair et de vent calme. Nous avons vu précédemment que l'analyse en surfaces de tendances sur ces données ne permettait pas de dégager une tendance spatiale. Cela suppose que seuls les facteurs locaux ont une influence significative. Plusieurs relations linéaires simples ont été ainsi mises en évidence : par exemple, avec la pente ou encore l'altitude relative. Il s'agit à présent de construire un modèle résumant l'apport de chaque facteur indépendamment des autres. Pour cela, nous avons réalisé une régression multiple pas à pas (Encadré XII.2, p. 216) en prenant comme variable *dépendante* les moyennes des températures minimales des stations (pour les nuits de ciel clair et de vent calme) et comme variables *indépendantes* les descripteurs retenus.

273. Nous avons vu précédemment que les ordres supérieurs amélioraient assez peu les modèles en surfaces de tendances (XIII.2.2 - Les surfaces de tendances des températures minimales journalières sous abri, p. 228).

XV.1.1 - Le modèle retenu

Le premier facteur expliquant la variation des températures minimales est la pente (sur 500 m) : plus cette pente est faible autour d'une station, plus les températures minimales ont tendance à être froides en moyenne. Ce résultat s'explique par la stagnation de l'air froid dans les zones basses ou les replats, lors des nuits de ciel clair et de vent calme. La qualité du modèle est alors de 23.2%. Ensuite, la procédure de régression multiple indique que, indépendamment de la pente, la variation des températures minimales s'explique par la composante nord-sud de l'orientation (sur une fenêtre de 500 m x 500 m) : en d'autres termes, plus les stations ont une orientation nord (indépendamment de l'information apportée par la pente), plus elles ont tendance à être froides les nuits de ciel clair et de vent calme. Aucun autre facteur local ne joue alors un rôle significatif, toutes choses étant égales par rapport à la pente et l'orientation nord-sud.

Le modèle final peut alors s'écrire :

$$MoyT_{N(CC,VC)} = 4.32 + 0.31 * Pente_{500m} - 0.59 * OrientationNS_{500m}$$

La constante, 4.32, est du même ordre de grandeur que la moyenne des températures minimales lors des nuits de ciel clair et de vent calme (5.7°C). Elle fixe l'ordre de grandeur thermique sur l'ensemble de la zone d'étude, que les facteurs locaux *Pente* et *Orientation nord-sud* modifieraient localement. En outre, le modèle retenu explique 31.8% de la variation des températures minimales moyennes (ciel clair, vent calme). Ce pourcentage, certes assez bas, peut s'expliquer par le faible nombre de stations et/ou par la non prise en compte d'autres effets. De plus, les moyennes des températures minimales des stations masquent la variabilité temporelle. En effet, l'amplitude printanière des températures minimales lors des nuits de ciel clair et de vent calme est d'environ 20°C (médiane). Les moyennes utilisées dans la régression multiple présentent donc une forte dispersion. Cela peut également expliquer la faible qualité du modèle.

XV.1.2 - La robustesse du modèle à partir d'une *validation croisée*

Nous avons ensuite cherché à tester la robustesse du modèle précédemment construit. Avec un échantillon de stations plus important, nous aurions pu choisir de modéliser sur une sélection de stations et de tester sur le reste. Cependant, le faible nombre de stations retenues (23) dans cette recherche ne nous le permettait pas. Nous avons alors réalisé une *validation croisée* : il s'agit de modéliser les températures minimales en enlevant successivement une station. La Figure XIV.10 représente les qualités d'ajustement, c'est-à-dire les coefficients de détermination multiple (r^2), en fonction de la station enlevée. Les stations de Savigny-sur-Ardre et de Orbais-l'Abbaye se démarquent de manière assez importante. En construisant un modèle sans les prendre en compte, il serait possible d'*expliquer* plus de 40% de la variation des températures minimales moyennes pour les nuits de ciel clair et de vent calme. À l'inverse, le poste de Chambrecy, qui se distingue par des températures très froides, participe fortement à la qualité du modèle²⁷⁴.

274. La température moyenne très basse de cette station peut être attribué à un effet de *taille*.

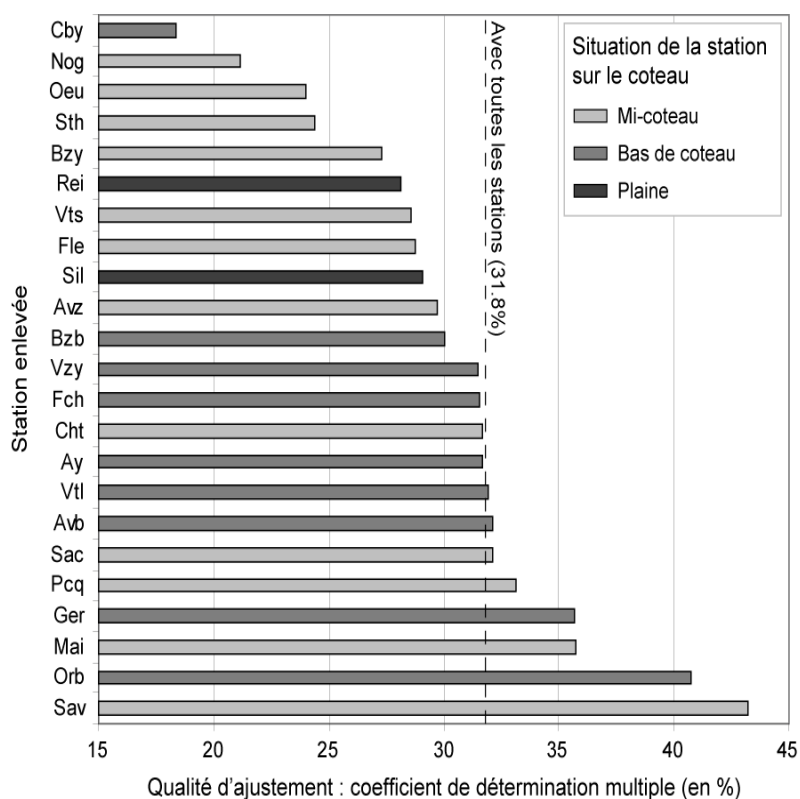


Figure XV.1 : Qualités d'ajustements des modèles calculés, selon les stations enlevées lors de la phase de validation croisée

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIRC, Météo France / BD Alti – IGN
Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

Au-delà de cette qualité d'ajustement, les paramètres pris en compte sont très souvent les mêmes et leurs coefficients de corrélation partielle sont de même signe et assez similaires (Tableau XV.1). La variable *Orientation nord-sud* ne ressort pas systématiquement, à la différence de la *Pente*. Toutefois, nous pouvons remarquer qu'en enlevant la station de Germaine, l'altitude relative (sur 1 km) semble avoir une influence plus importante. Nous avons vu précédemment que cette station était assez mal décrite par les variables d'altitude. D'une manière générale, cette validation croisée montre que le modèle est assez robuste²⁷⁵.

275. Pour tester la robustesse du modèle, nous avons également modifié les fenêtres des paramètres locaux : les résultats sont stables.

Tableau XV.1 : Résultats (constante, coefficients de corrélation partielle et qualité) des régressions multiples réalisées sur les moyennes des températures minimales (sous abri, à 2 m), en enlevant successivement une station

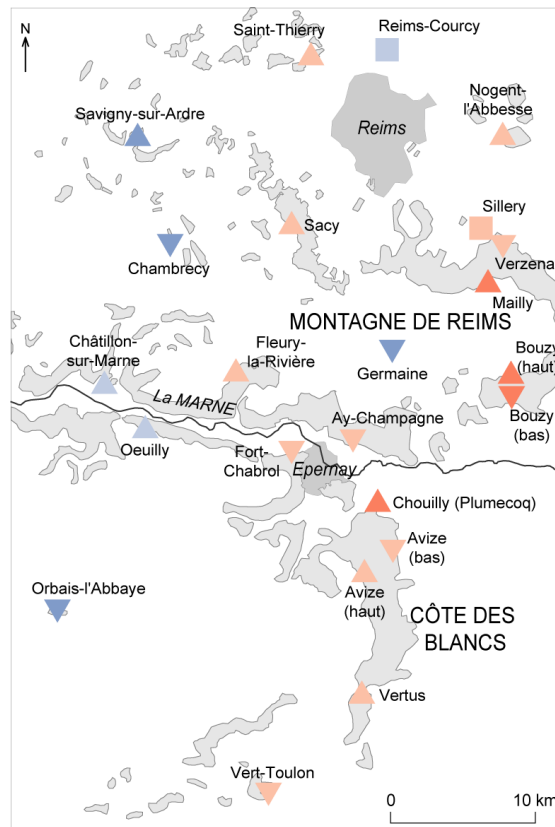
Station enlevée	Constante	Altitude relative 1000m	Pente 500m	Orientation NS 500m	Qualité
Avb	4.27	0.60	0.49	-0.28	0.32
Avz	4.39		0.44	-0.32	0.30
Ay	4.32		0.49	-0.29	0.32
Bzb	3.99		0.55		0.30
Bzy	4.18		0.52		0.27
Cby	4.73		0.43		0.18
Cht	4.32		0.48	-0.30	0.32
Fch	4.32		0.48	-0.30	0.32
Fle	4.33		0.45	-0.30	0.29
Ger	4.55				0.36
Mai	4.27		0.48	-0.36	0.36
Nog	4.35		0.46		0.21
Oeu	4.24		0.49		0.24
Orb	4.39		0.51	-0.38	0.41
Pcq	4.26		0.49	-0.30	0.33
Rei	4.49		0.43	-0.31	0.28
Sac	4.32		0.48	-0.30	0.32
Sav	4.29		0.53	-0.38	0.43
Sil	4.31		0.45	-0.29	0.29
Sth	4.24		0.49		0.24
Vtl	4.25	0.48	-0.30	0.32	
Vts	4.37	0.44	-0.30	0.29	
Vzy	4.22	0.47	-0.31	0.31	

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France / BD Alti – IGN
Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

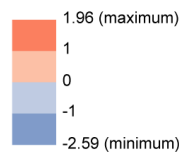
XV.1.3 - Analyse en surfaces de tendances des résidus du modèle

Nous avons ensuite cartographié les résidus de ce modèle afin de dégager d'éventuelles structures spatiales non prises en compte ou d'autres facteurs locaux. La Carte XV.1 montre une opposition assez nette entre les stations situées à l'ouest avec des résidus très négatifs et les stations à l'est avec des résidus positifs. En d'autres termes, pour les postes occidentaux de Orbais-l'Abbaye, Chambrecy, Savigny-sur-Ardre ainsi que Germaine, la température minimale moyenne mesurée (ciel clair, vent calme) est bien inférieure à celle estimée par le modèle. À l'inverse, les températures minimales des postes orientaux, précédemment qualifiés de plutôt chauds, sont sous-estimées.

Cette répartition spatiale nous amène à supposer l'existence d'une relation entre les résidus et la coordonnée géographique X . Nous avons alors réalisé une analyse en surfaces de tendances (premier ordre retenu). Les résultats nous révèlent certes, ce gradient ouest-est, mais également une décroissance des températures vers le nord. La combinaison des deux traduit donc un gradient nord-ouest – sud-est. L'introduction de la variable X explique 39.8% des variations des résidus, le modèle polynomial final 47.3%. L'analyse en surfaces de tendances se révèle donc pertinente pour modéliser les résidus de la régression à partir des facteurs locaux.



Résidus du modèle de la variation des températures minimales moyennes, prenant en compte la pente et l'orientation nord-sud (en °C)



Carte XV.1 : Répartition spatiale des résidus du modèle de variation des températures minimales moyennes (sous abri, à 2 m) lors des nuits de ciel clair et de vent calme

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France / BD Alti – IGN

Une autre approche, souvent utilisée pour interpoler les paramètres climatiques, consiste à *kriger* les résidus. Étant donné qu'aucune structure spatiale nette n'a pu être dégagée de l'analyse variographique des résidus de notre modèle, cette étape n'a pas été réalisée ici.

En somme, la variation des températures minimales moyennes (sous abri, à 2 m), pour les nuits de ciel clair et de vent calme, est modélisée à partir des facteurs locaux, ici la pente et l'orientation nord-sud, puis à partir des tendances spatiales (X et Y). La qualité du modèle final est de 64.1%.

XV.2 - Modélisation des températures minimales journalières

Compte tenu de la forte dispersion des températures minimales au cours du printemps, chercher à modéliser leur moyenne peut s'avérer insuffisant. En outre, les phénomènes physiques à l'origine de la répartition des minima thermiques ne sont pas identiques chaque jour. Par exemple, l'origine des masses d'air ou encore leur humidité ne vont pas conduire à

la même variabilité spatiale. La prise en compte des conditions atmosphériques s'avère alors essentielle.

À partir des modèles journaliers (*facteurs locaux* puis *tendances spatiales*), nous comparons, dans un premier temps, les qualités variables selon les nuits. Puis nous cherchons s'il existe des récurrences dans les facteurs significatifs et tentons alors de les expliquer, notamment par les conditions atmosphériques. En somme, nous tentons de dégager une typologie des nuits en fonction des modèles d'interpolation des températures minimales obtenus.

XV.2.1 - Des qualités très variables selon les nuits

Régressions multiples pas à pas réalisées à partir des facteurs locaux retenus

La qualité des modèles obtenus est fortement variable d'un jour à l'autre et assez faible globalement. En effet, la moitié des coefficients de détermination multiple (sur 468 dates printanières) est inférieure à 29.6%. En outre, pour plus d'une nuit sur dix²⁷⁶ (Figure XV.2), aucune modélisation à partir des descripteurs topographiques ne peut être retenue (avec un risque d'erreur fixé à 15%). Toutefois, pour près de 15% des dates, les facteurs topographiques expliquent plus de la moitié des variations des températures minimales.

Nous pouvons alors supposer que les conditions atmosphériques associées à ces qualités correctes sont proches des conditions dites *radiatives*, où les variations thermiques sont fortement liées aux effets locaux. En réalité, nous constatons l'inverse : ces nuits avec une qualité correcte sont caractérisées par une nébulosité nocturne à Reims-Courcy importante (6.5 octats en moyenne) et par un vent nocturne relativement plus intense (1.6 m/s) que pour l'ensemble des dates²⁷⁷.

En outre, il est facile d'imaginer que la qualité des modèles journaliers dépend de la variabilité spatiale des températures minimales : une forte hétérogénéité thermique serait plus difficile à modéliser. En prenant l'étendue des températures minimales (sous abri, à 2 m) comme indicateur de la variabilité, nous constatons que les qualités importantes sont relatives à des nuits présentant une certaine homogénéité thermique : par exemple, les 30 dates avec une qualité supérieure à 60% sont caractérisées par une étendue moyenne de 1.6°C²⁷⁸. Nous avons montré précédemment, dans la troisième partie, que les faibles étendues sont observées avec une nébulosité importante, ce qui permet d'expliquer la précédente remarque sur la relation entre la qualité d'ajustement des modèles et les conditions atmosphériques.

276. Plus exactement, 13.9% des dates.

277. Pour l'ensemble des dates, les moyennes des observations nocturnes de nébulosité à Reims-Courcy (21, 0, 3 et 6h UTC) et des mesures de vitesse du vent pour l'ensemble des stations (de 21 à 6h) sont respectivement de 4.8 octats et de 1.2 m/s.

278. Aucune étendue pour cette sélection ne dépasse 2.5°C (l'étendue moyenne sur l'ensemble des dates est de 4.5°C). Cependant, même si les meilleures qualités sont associées à des étendues faibles, l'inverse ne se vérifie pas.

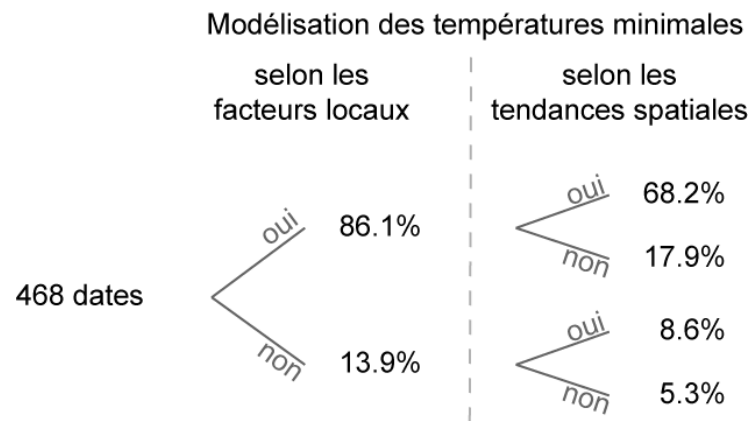


Figure XV.2 : Proportions des dates pour lesquelles les modèles font ressortir les facteurs locaux et/ou les tendances spatiales

Amélioration des modèles journaliers avec les surfaces de tendances

La deuxième étape de la spatialisation des températures minimales journalières consiste à déterminer les répartitions spatiales des résidus des régressions précédentes (facteurs locaux). Nous réalisons pour cela des analyses en surfaces de tendances pour chaque date (seul le premier ordre a été retenu ici).

Cette nouvelle modélisation permet d'améliorer les qualités précédentes. Par exemple, parmi les 65 dates (13.9% de l'ensemble) pour lesquelles les facteurs topographiques retenus n'expliquaient pas la variation des températures minimales, nous pouvons proposer un gradient thermique pour 40 dates, soit 8.6% de l'ensemble des dates printanières (Figure XV.2). Il nous reste alors seulement 25 dates (5.3%) pour lesquelles aucune spatialisation n'a été possible. Cette deuxième étape de spatialisation à partir des coordonnées géographiques permet d'améliorer de 21.2 points, en moyenne, les qualités des modèles journaliers. Pour la moitié des dates, nous avons une qualité finale supérieure à 49.2%, le maximum étant de 90.1% (15/04/2001).

Nous avons à nouveau cherché à savoir si la qualité des modèles journaliers variait selon les conditions atmosphériques. La Figure XV.3 représente ces qualités en fonction des vitesses moyennes du vent nocturne sur l'ensemble du vignoble (A ; données horaires et trihoraires de 21 à 6h UTC) et en fonction de la nébulosité nocturne moyenne à Reims-Courcy (B ; données trihoraires de 21 à 6h UTC). Ces graphiques cartésiens ne montrent pas de relations probantes, en particulier pour la vitesse du vent. Toutefois, nous pouvons remarquer que les nuits de ciel clair, qui nous intéressent plus généralement compte tenu de notre problématique, présentent des modélisations assez performantes (entre 40 et 80%).

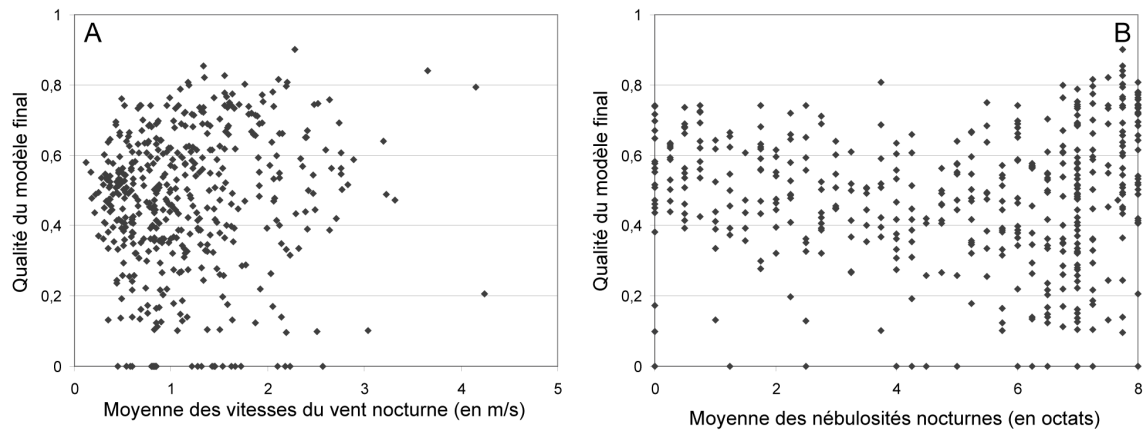


Figure XV.3 : *Qualités des modèles journaliers en fonction de la vitesse moyenne du vent nocturne sur l'ensemble du vignoble (A) et de la nébulosité nocturne moyenne à Reims-Courcy (B)*

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France / BD Alti – IGN
 Pour définir les conditions atmosphériques nocturnes, les données utilisées sont horaires et/ou trihoraires, de 21 à 6h (UTC).

XV.2.2 - Vers une typologie des nuits basée sur les modèles des températures minimales

Au-delà de la variation journalière des qualités, les facteurs topographiques et les coordonnées géographiques n'ont pas la même influence, chaque nuit, sur les températures minimales. Par exemple, certaines nuits, les températures diminuent avec l'altitude (Figure XIV.4, le 04/04/01, p. 241), alors que, pour d'autres, les stations dans un site plat enregistrent les plus basses températures (en raison des écoulements d'air froid). En outre, les coefficients de corrélation partielle des coordonnées géographiques ne traduisent pas toujours les mêmes gradients thermiques.

Nous pouvons alors supposer que les paramètres des modèles journaliers dépendent des conditions atmosphériques. À partir d'un classement des nuits selon les types de temps, nous aurions pu proposer un modèle pour chacun d'entre eux. Nous avons préféré ici rechercher des récurrences dans la variation des facteurs significatifs. En les confrontant aux conditions atmosphériques observées (vent et nébulosité), nous proposons une typologie des nuits basée sur les résultats des modélisations des températures minimales journalières.

Des récurrences dans le signe des coefficients

Tous les facteurs ne ressortent pas dans les modèles finaux de régression multiple (pas à pas), ce qui peut s'expliquer par une non-indépendance statistique des descripteurs et/ou par des conditions atmosphériques différentes. Même s'il est délicat d'isoler un descripteur en particulier (modèles multiples), nous avons calculé les occurrences des signes des coefficients de chaque descripteur (sans prendre en compte leurs interactions). Le Tableau XV.2 montre ainsi plusieurs récurrences dont l'origine peut s'expliquer par des mécanismes physiques particuliers.

Le descripteur altitude ressort assez souvent dans les modèles de régression et avec un coefficient négatif, toutes choses étant égales par rapport aux autres facteurs. Cette décroissance des températures minimales avec l'altitude a déjà été observée précédemment.

Cette tendance s'oppose au phénomène d'inversion thermique, qui, par contre, est pris en compte par d'autres variables altitudinales, l'altitude relative et la pente. Ainsi, plus les stations ont une altitude relative basse, plus elles ont tendance à être froides la nuit, toutes choses étant égales par ailleurs. Le calcul de ce descripteur apparaît pertinent pour compléter la seule information *brute* altitudinale, les signes des coefficients étant opposés (Tableau XV.2). Indépendamment des autres facteurs, la pente illustre également les phénomènes d'accumulation de l'air froid dans les zones plates. En outre, l'orientation est-ouest montre que plus les stations sont situées à l'est, plus leurs températures minimales ont tendance à être chaudes (toutes choses étant égales par rapport aux autres facteurs). Ce résultat corrobore les observations faites précédemment, qui indiquaient une localisation à l'est des stations « chaudes » (Côte des Blancs). Enfin, comme autre descripteur topographique, l'orientation nord-sud intervient négativement le plus souvent, indépendamment des autres facteurs : les stations orientées au nord ont donc tendance à être plus froides. Nous pouvons alors supposer que les jours concernés connaissent des advections d'air froid venant du nord et du nord-est (position d'abri pour les stations sud).

Tableau XV.2 : Effectifs des signes des coefficients des différents descripteurs dans les modèles journaliers de spatialisation des températures minimales

	Descripteur retenu	Signe négatif	Signe positif
Facteurs locaux	Altitude (100 m)	176	1
	Altitude relative (1 000 m)	11	77
	Pente (500 m)	5	141
	Orientation Est-Ouest (500 m)	29	98
	Orientation Nord-Sud (500 m)	97	30
Tendances spatiales	X	17	258
	Y	152	71

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France / BD Alti – IGN

Des structures-types dans les modèles de régression

Pour approfondir l'étude précédente, nous avons commencé par dégager des *structures-types* dans les modèles (combinaisons des signes des coefficients des facteurs, compte tenu de leurs significativités), que nous avons ensuite comparées aux caractéristiques de la masse d'air. Par jour, chaque descripteur ressort ou non du modèle. Si c'est le cas, alors son coefficient peut être positif ou négatif. En considérant les deux étapes de la modélisation (*facteurs locaux + tendances spatiales*), le nombre de combinaisons possible est beaucoup trop élevé et ne permet pas de repérer des récurrences. Nous nous sommes alors limités aux seuls facteurs locaux.

Le Tableau XV.3 répertorie les sept structures-types les plus fréquentes. Par exemple, le type A, qui ressort pour 55 nuits (sur 468), montre une décroissance des températures minimales avec l'altitude. Cette typologie englobe assez bien l'ensemble des nuits : 68% des nuits pour lesquelles un modèle peut être proposé sont caractérisées par une de ces sept structures. Nous avons également ajouté dans ce tableau les conditions atmosphériques nocturnes classiquement utilisées dans cette recherche : nébulosité moyenne à Reims-Courcy, vitesse moyenne du vent (pour toutes les stations) et direction du vent dominante à Reims-Courcy (la plus fréquente).

Tableau XV.3 : Typologie en sept structures-types des modèles – facteurs locaux

	Eff.	Altitud e 100m	Altitude relative 1000m	Pente 500m	Orientation EW 500m	Orientation NS 500m	Nébulosité moyenne (en octats)	Vitesse moyenne du vent (en m/s)	Vent dominant
A	55	-					6.89	1.64	SW
B	25	-		+			6.67	1.37	S
C	28	-(1)				+(2)	6.93	1.51	N
D	45			+			4.06	0.76	S
E	30			+		-	2.13	1.13	E, NE
F	36				+	-	2.51	1.31	N
G	55		+				2.33	0.59	NE

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; C1vc, Météo France / BD Alt1 – Icn
 Les signes + et - indiquent le signe des coefficients de corrélation partielle de la régression multiple.
 Les indications (1) et (2) précisent l'ordre des variables dans les modèles finaux (s'il est stable).
 Nébulosité moyenne : moyenne des observations nocturnes de nébulosité à Reims-Courcy (21-6h UTC).
 Vitesse moyenne du vent : moyennes des mesures nocturnes pour toutes les stations (21-6h UTC).
 Vent dominant : la direction du vent nocturne (21-6h UTC), à Reims-Courcy, la plus fréquente.

Les trois premiers types (A, B, C) sont essentiellement caractérisés par le facteur *Altitude*, qui intervient de manière négative (toutes choses étant égales par ailleurs). Les nuits associées présentent une forte nébulosité et une vitesse de vent non négligeable. Les vents proviennent plutôt du secteur sud-sud-ouest (excepté pour le type C). Pour les quatre autres structures, le ciel est nettement plus dégagé. Le phénomène d'inversion thermique semble intervenir pour les cas D, E et G, puisque les températures minimales (sous abri, à 2 m) ont tendance à être plus froides pour les stations caractérisées par une faible altitude relative ou par une faible pente, toutes choses étant égales par ailleurs. L'orientation, indépendamment des autres facteurs, intervient également (C, E et F), avec des vents dominants associés du quadrant nord-est. Les signes des coefficients des deux composantes de l'orientation indiquent que les stations orientées nord et nord-ouest enregistrent des températures minimales plutôt plus froides.

Le cas des nuits de ciel clair et de vent calme

Compte tenu de notre problématique, les nuits de ciel clair et de vent calme (Encadré VII.1, p. 148) nous intéressent en raison de leur fort refroidissement et de leur variabilité spatiale importante des températures minimales. En adoptant une démarche un peu différente de celle de la section précédente, nous nous sommes demandé si nous retrouvions, pour ces nuits avec des conditions stables, les mêmes structures dans les modèles de variation des températures minimales.

Le Tableau XV.4 répertorie les 15 modèles pour les nuits de ciel clair et de vent calme. Il apparaît une stabilité dans le signe des coefficients, qui sont similaires aux signes les plus fréquents dans le Tableau XV.2. Le modèle le plus fréquent fait intervenir uniquement *Altitude relative* (M1 : 30 fois). Ce facteur altitudinal, avec un coefficient positif traduisant l'inversion thermique, est parfois accompagné dans la modélisation par l'*Orientation nord-sud* (M2). La pente (coefficient positif) est un autre facteur prépondérant (M3, M4, M5 et M6 : 23 fois), qui exprime *a priori* le même phénomène physique : la stagnation de l'air froid en bas de coteau, liée aux brises de pente.

Nous remarquons également, pour les nuits de ciel clair et de vent calme, une influence, non négligeable en termes d'effectif, des composantes de l'orientation (nord-sud négatif, est-ouest positif), qui pourrait être liée à l'origine du vent général, certes de vitesse faible.

L'interprétation reste toutefois délicate et mériterait une étude plus détaillée (par exemple, une typologie plus fine à l'intérieur de ces nuits de ciel clair et de vent calme). Enfin, signalons que le phénomène de décroissance des températures avec l'altitude apparaît négligeable pour notre sélection des nuits de ciel clair et de vent calme.

Tableau XV.4 : Les 15 structures observées dans les modèles (facteurs locaux) correspondant aux nuits de ciel clair et de vent calme

	Modèles	Effectif
M1	+ Altitude relative (1000m)	30
M2	+ Altitude relative (1000m) – Orientation NS (500m)	3
M3	+ Pente (500m)	12
M4	+ Pente (500m) – Altitude (100 m) – Orientation EW (500m)	2
M5	+ Pente (500m) – Orientation EW (500m) – Altitude (100 m)	2
M6	+ Pente (500m) – Orientation NS (500m)	7
M7	– Orientation NS (500m)	1
M8	– Orientation NS (500m) + Altitude relative (1000m)	2
M9	– Orientation NS (500m) + Orientation EW (500m)	11
M10	– Orientation NS (500m) + Orientation EW (500m) – Altitude (100 m)	1
M11	– Orientation NS (500m) + Pente (500m)	9
M12	+ Orientation EW (500m)	7
M13	+ Orientation EW (500m) – Altitude (100 m)	1
M14	+ Orientation EW (500m) – Orientation NS (500m)	8
M15	– Altitude (100 m) + Orientation NS (500m)	1

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civo, Météo France / BD Alti – IGN
Les signes + et – indiquent le signe des coefficients de corrélation partielle de la régression multiple.

XV.3 - Spatialisation des écarts thermiques à Reims-Courcy lors des nuits de ciel clair, vent calme

Dans une optique, *in fine*, de prévision opérationnelle de l'aléa gélif dans le vignoble marnais, la prise en compte des données de Reims-Courcy, station synoptique, est essentielle dans la mesure où y sont prévues la température minimale, la nébulosité, etc. (sorties du modèle, prévisionniste). Nous avons ici fait ce choix en modélisant les écarts entre les températures minimales des stations et celle de Reims-Courcy, pour les nuits de ciel clair et de vent calme.

Les modèles construits à partir des facteurs topographiques retenus, puis à partir des coordonnées géographiques (surfaces de tendances de premier ordre sur les résidus), ont une qualité moyenne de 50.2% (médiane : 52.8%), avec une distribution statistique dissymétrique à droite (Figure XV.4)²⁷⁹.

279. Signalons que les qualités d'ajustement sont identiques avec les données *brutes* (les températures minimales).

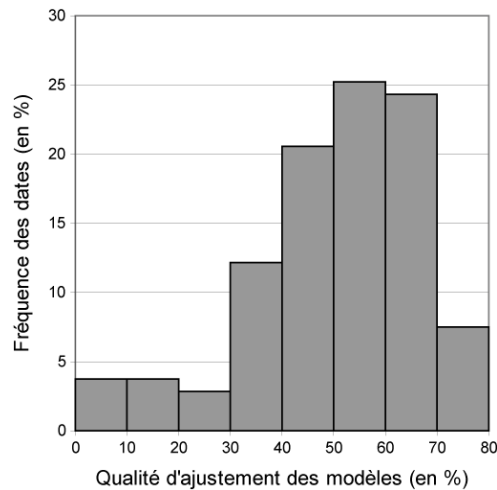


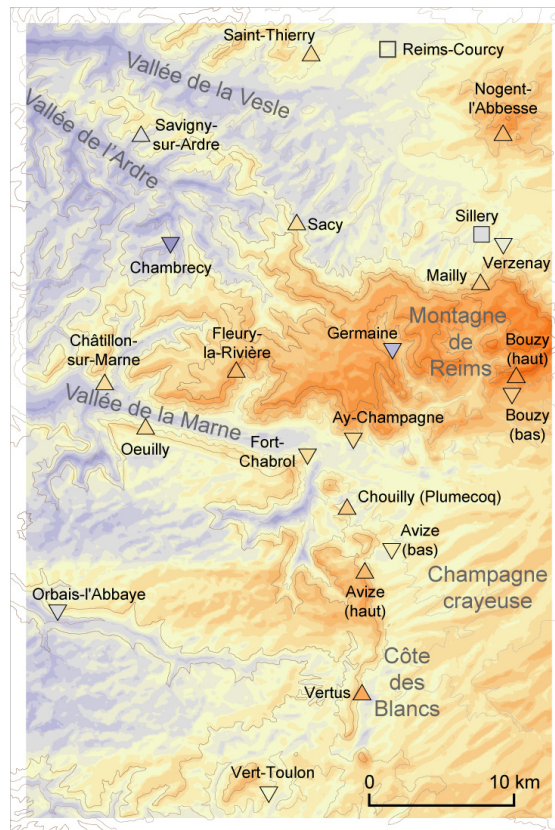
Figure XV.4 : Distribution statistique des qualités d'ajustement des modèles journaliers

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France / BD Alti – IGN

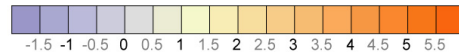
À partir de ces modèles journaliers des nuits de ciel clair et de vent calme, nous avons estimé les écarts journaliers des températures minimales pour chaque point de la base de données environnementales (résolution spatiale 50 m). La Carte XV.2 représente la répartition spatiale de la moyenne de ces écarts. Elle donne une *image* moyenne des zones froides lors des nuits de ciel clair et de vent calme. La spatialisation construite ainsi exprime un gradient des températures de ouest-nord-ouest vers est-sud-est, avec les vallées de la Vesle et de l'Ardre particulièrement froides et, à l'inverse, la partie occidentale de la plaine de la Champagne crayeuse plus chaude²⁸⁰. En outre, nous pouvons observer que la répartition spatiale des écarts des températures minimales à Reims-Courcy est fortement liée au relief²⁸¹ : la Montagne de Reims connaît, d'après nos modélisations, des températures minimales beaucoup plus chaudes que Reims-Courcy ou que les vallées et vallons. Cependant, nous pouvons remarquer que la station de Germaine, assez froide et située en altitude, est mal appréhendée par les modèles.

280. Nous pouvons supposer des effets de bords pour ces marges de notre zone d'étude, en raison de l'absence de points de mesure hors zone.

281. Ceci s'explique par le fait que les variables topographiques *Altitude relative* et *Pente* sont très souvent retenues par les modèles de régressions linéaires multiples.



Écarts moyens à Reims-Courcy (températures minimales) estimés pour les nuits de ciel clair et de vent calme (en °C)



Carte XV.2 : Spatialisation de la moyenne des écarts des températures minimales à Reims-Courcy, lors des nuits de ciel clair et de vent calme

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Cjvc, Météo France / BD Alti – IGN
 Les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.
 Pour faciliter la visualisation, les données ont été interpolées (triangulation).
 L'échelle thermique est centrée sur 1°C, Reims-Courcy étant une station plutôt froide.
 Les écarts moyens observés par station ont été ajoutés (même échelle thermique).

La Figure XV.5 représente les écarts thermiques moyens à Reims-Courcy (en températures minimales) mesurés en fonction de ceux estimés par les modèles, pour les nuits de ciel clair et de vent calme. La position de la première bissectrice (qui correspond à une estimation parfaite) par rapport au nuage de points formés nous montre que les modèles ont tendance, en moyenne, à sous-estimer les écarts à Reims-Courcy pour les stations « chaudes » et à les surestimer pour les stations « froides ». Ce résultat est assez souvent observé dans ce type de modélisation. En outre, la station de Germaine sur ce graphique se distingue très nettement, alors qu'au contraire les écarts thermiques pour Vert-Toulon semblent être bien appréhendés, ce que confirment les nuages de points *observation/estimation* de ces deux stations respectives (Figure XV.6). Même si quelques erreurs d'estimation supérieures à 2°C s'observent pour Vert-Toulon, celles-ci sont nettement plus importantes pour Germaine. Par exemple, le 24 mars 2003, l'écart thermique à Reims-Courcy pour Germaine est estimé à 4.6°C alors qu'il est en réalité de -2.2°C.

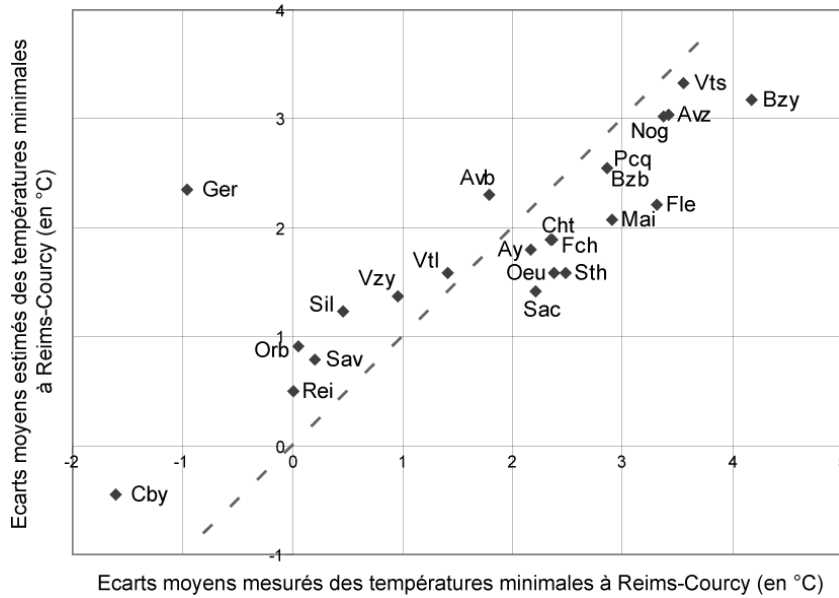


Figure XV.5 : Comparaison par station des écarts thermiques moyens à Reims-Courcy estimés à ceux mesurés, lors des nuits de ciel clair et de vent calme

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France
 Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

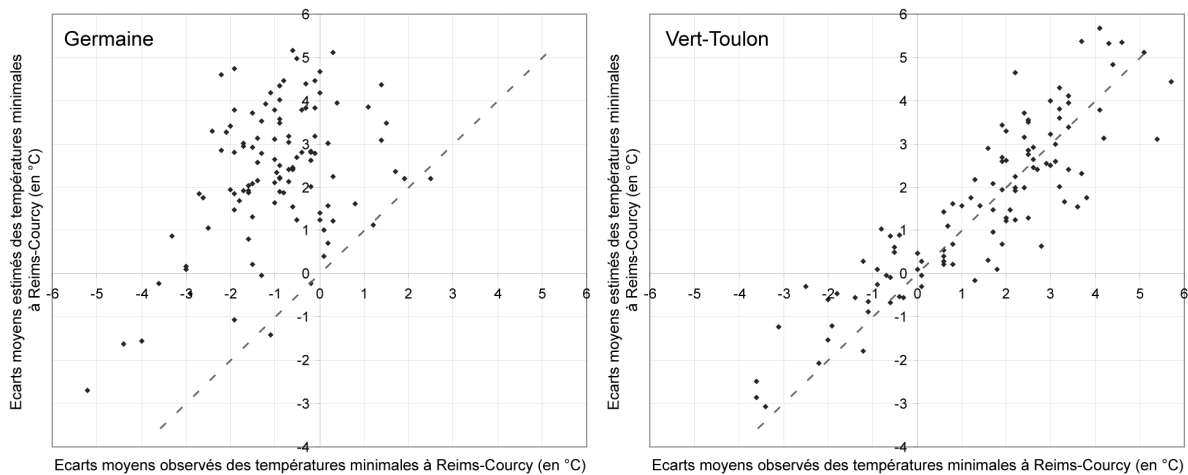


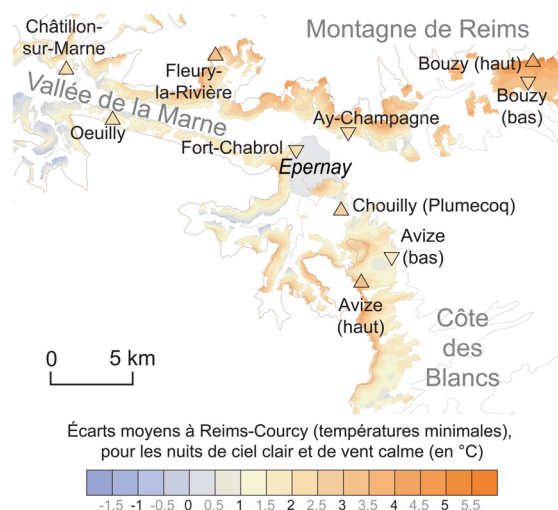
Figure XV.6 : Comparaison des écarts thermiques à Reims-Courcy estimés à ceux mesurés, pour les stations de Germaine et de Vert-Toulon, lors des nuits de ciel clair et de vent calme

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; CIVC, Météo France

La spatialisation des écarts en températures minimales à Reims-Courcy réalisée et cartographiée précédemment sur l'ensemble de la zone d'étude ne se justifie, toutefois, que pour les zones viticoles, compte tenu de la localisation des stations. Notre recherche portant sur le vignoble marnais, nous avons donc masqué les secteurs non viticoles (à partir de la BD Carto) et présentons ici un agrandissement autour d'Épernay²⁸² (Carte XV.3). Nous remarquons une dissymétrie assez nette entre les versants orientés sud (chaud) et nord (froid) de la Vallée de la Marne, qui s'étend vers le sud de la Montagne de Reims. Pour le secteur autour de Bouzy, nous estimons des écarts (à Reims-Courcy) très positifs, ce qui est corroboré avec les observations sur le terrain [Langellier, communication privée]. Cela

282. La localisation de cet agrandissement a été retenue pour la densité des stations automatiques et pour la variété des expositions des secteurs viticoles.

étant, des mesures sur le terrain, sur des espaces limités, permettraient de valider et d'affiner notre modélisation.



Carte XV.3 : Spatialisation de la moyenne des écarts des températures minimales à Reims-Courcy, pour les secteurs viticoles autour d'Épernay, lors des nuits de ciel clair et de vent calme

Données : 15/03-31/05 1998-2003 ; Civc, Météo France / BD Alti, BD Carto – IGN
 Les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.
 Pour faciliter la visualisation, les données ont été interpolées (triangulation).
 L'échelle thermique est centrée sur 1°C, Reims-Courcy étant une station plutôt froide.
 Les écarts moyens observés par station ont été ajoutés (même échelle thermique).

XV.4 - Étude de cas sur deux nuits de ciel clair et de vent calme (17 et 20 mars 2003)

Dans cette dernière partie sur la spatialisation des températures minimales dans le vignoble marnais, nous avons souhaité étudier deux nuits en particulier, proches dans le temps : les 17 et 20 mars 2003. Celles-ci ont d'abord été retenues pour leurs conditions atmosphériques similaires et caractérisées par une couverture nuageuse *quasi* absente et un vent faible, liés à la présence d'un anticyclone sur la France (Figure XV.7A). On peut noter, cependant, que la direction du vent général à Reims-Courcy, certes faible, n'est pas la même : est-nord-est pour le 17 mars et nord-ouest pour le 20. Ces deux dates sont de plus marquées par de forts contrastes thermiques et par des températures localement très froides -5.1°C le 17 à Chambrecy et -4.7°C le 20²⁸³.

Nous avons également choisi ces deux dates pour les fortes différences observées dans la répartition des températures minimales estimées sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure XV.7B) : alors que, pour la première date, cette répartition suit grossièrement le relief et se rapproche de l'*image* moyenne (Carte XV.2), pour l'autre, un gradient ouest-est est clairement visible, même si des nuances existent dans les deux cas. Les descripteurs qui ressortent des deux modèles journaliers (*facteurs locaux + tendances spatiales*), ainsi que les qualités respectives, ne sont pas les mêmes. Ainsi, pour le 17 mars 2003, les facteurs retenus dans cette recherche semblent relativement pertinents pour décrire la variation des températures minimales à l'échelle du vignoble marnais (quatre facteurs, bonne qualité).

283. Toutefois, ces températures négatives, se produisant au début du printemps, elles ne peuvent causer de dommages sur les bourgeons de la vigne (étant donné leur stade de développement).

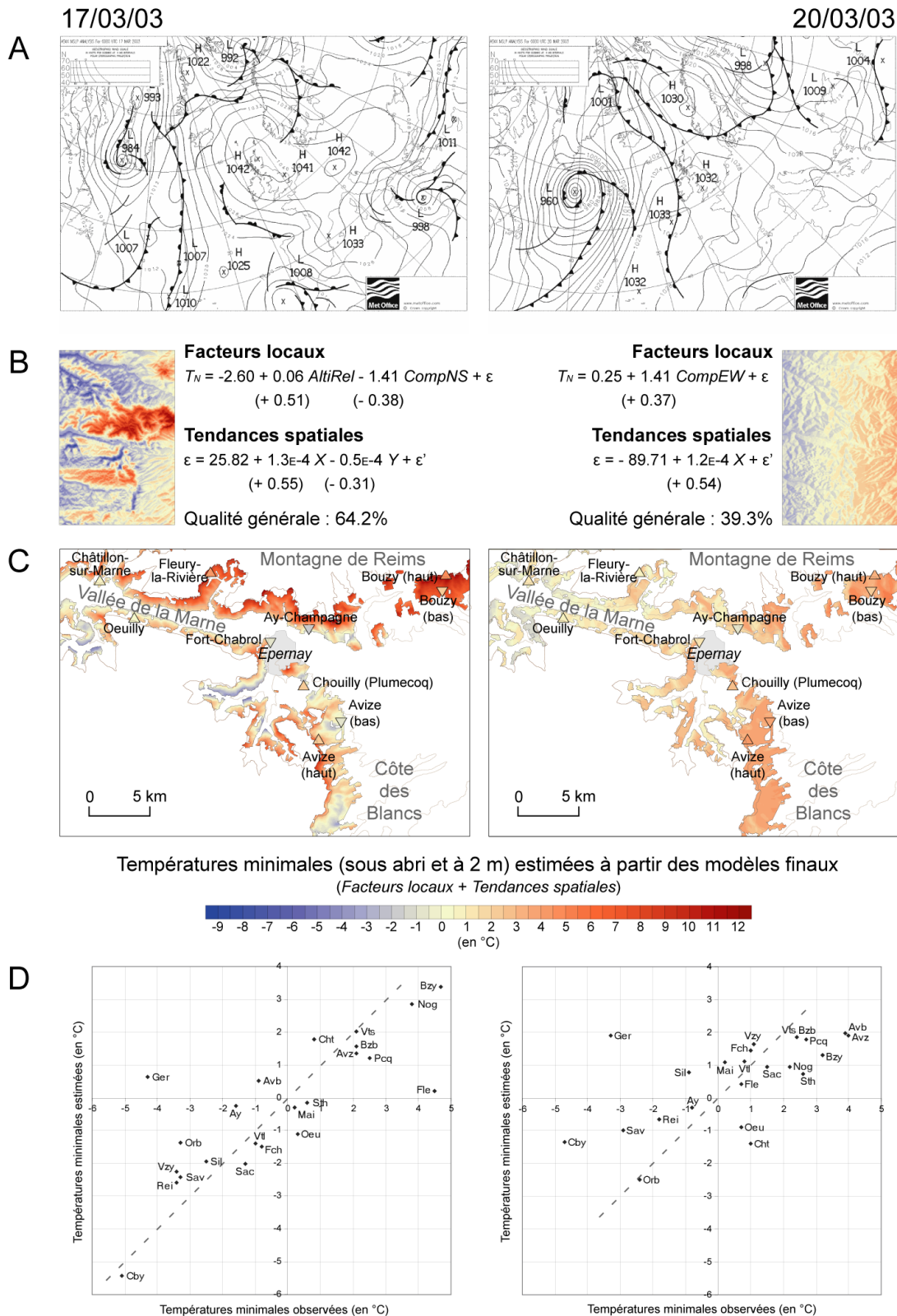


Figure XV.7 : Comparaison des spatialisations pour deux dates de ciel clair et de vent calme, les 17 et 20 mars 2003

Source : [http://infomet.am.ub.es]
 Données : 17-20/03/2003 ; C1vc, Météo France / BD Alti, BD Carto – IGN
 Les abréviations des stations ainsi que les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.
 Pour faciliter la visualisation, les données ont été interpolées (triangulation).
 Les températures minimales moyennes mesurées par station ont été ajoutées (même échelle thermique).
 AltiRel : Altitude relative ; CompNS : Composante nord-sud de l'orientation ;
 CompEW : Composante est-ouest de l'orientation ; X et Y : coordonnées géographiques ; ε et ε' : résidus.
 Sous les équations de régressions, sont indiqués les coefficients de corrélation partielle (entre parenthèses).

La Figure XV.7D compare les estimations et les mesures des températures minimales pour les deux nuits étudiées. Nous retrouvons une estimation assez correcte pour le 17 mars : le nuage de points est proche de la première bissectrice, même si Germaine et Fleury-la-Rivière se démarquent très fortement. Le 20 mars, au contraire, le nuage est aplati horizontalement, ce qui est lié à une faible étendue des estimations, alors que les températures minimales mesurées témoignent de contrastes importants. Par ailleurs, nous remarquons, à nouveau, que les températures minimales sont plutôt surestimées pour les stations froides et sous-estimées pour les stations chaudes.

En observant les agrandissements des cartes de spatialisation restreintes aux zones viticoles autour d'Épernay (Figure XV.7C), nous retrouvons globalement les tendances générales observées sur les cartes d'ensemble (Figure XV.7B), qui peuvent être nuancées, toutefois, à cette échelle plus fine, pour le 17 mars 2003. Ainsi, nous remarquons, pour cette date, que les bas de coteau, certes plus froids que les hauts, le sont d'autant plus lorsqu'ils sont orientés vers le nord ou l'est. À l'inverse, les hauts de coteau du sud de la Montagne de Reims sont particulièrement « chauds ». En revanche, nous retrouvons, pour le 20 mars, le gradient ouest-est mentionné précédemment et aucune nuance sur les coteaux n'est estimée par le modèle.

Précisons que l'échelle thermique des deux cartes témoigne de la très forte étendue des températures minimales estimées pour le 17 mars 2003, qui est vraisemblablement exagérée et limite donc la portée de la spatialisation. À l'inverse, pour le 20 mars 2003, il faut imaginer que les extrêmes nous ont échappé. Le seul facteur significatif est la composante est-ouest de l'orientation, ce qui induit une répartition spatiale suspecte, car trop simpliste, des températures minimales sur l'ensemble de la zone. Cette dernière modélisation semble plus fortement liée à la direction du vent faible général et traduit avant tout une exposition des coteaux abrités ou non.

Conclusion du chapitre XV

Dans ce chapitre, notre objectif était la spatialisation des températures minimales dans le vignoble marnais, à partir de modèles globaux basés sur la prise en compte des facteurs locaux, puis des tendances spatiales (sur les résidus). Nous avons en premier modélisé les moyennes des températures minimales pour les nuits de ciel clair et de vent calme. Ce modèle, relativement robuste (test par validation croisée), a montré l'influence de la pente et de l'orientation nord-sud et a pu être amélioré par la prise en compte des coordonnées géographiques.

Dans un second temps, nous avons modélisé les températures minimales à l'échelle journalière, ce qui a montré une variabilité importante des qualités d'ajustement. Compte tenu du nombre important de dates, nous avons cherché des récurrences dans les modèles construits. Cette étape, assez délicate, a néanmoins révélé l'existence de *structures-types* reliées aux conditions atmosphériques. Cela étant, ces résultats, assez encourageants, mériteraient une étude plus fine des relations entre les champs thermiques modélisés et les conditions atmosphériques.

Enfin, dans une étape finale de spatialisation, nous avons proposé une carte « opérationnelle » des écarts thermiques à Reims-Courcy pour les zones viticoles. La répartition obtenue différencie les secteurs de haut et de bas de coteau et montre également des variations selon leur exposition. Par ailleurs, la station Germaine et l'étude de deux exemples (les 17 et 20 mars 2003) ont permis de souligner les limites de cette spatialisation. Les descripteurs utilisés dans cette recherche sont liés exclusivement à la topographie au voisinage des postes météorologiques (altitude, pente, orientation) et à leur localisation. Or, d'après les travaux évoqués précédemment (Chapitre 2), deux facteurs essentiels, non pris en compte dans nos modélisations, peuvent expliquer fortement la variabilité spatiale des températures minimales à une échelle de temps courte : la nébulosité et le vent. L'utilisation du modèle expérimental Meso NH permettra d'appréhender ce dernier paramètre.

Chapitre XVI - APPORT DES SIMULATIONS DU MODELE MESO NH POUR LA NUIT DU 16 AU 17 MARS 2003

Dans les chapitres précédents, nous avons cherché à modéliser les variations des températures minimales, pour, à terme, spatialiser un aléa gélif dans le vignoble marnais. Après avoir mis en évidence l'influence des facteurs locaux, et dans une moindre mesure celle des coordonnées géographiques, nous avons construit des modèles de répartition des températures minimales. Cependant, ces modèles ne se sont que partiellement révélés satisfaisants, en particulier à l'échelle du temps journalier, ce qui a déjà été souligné par de nombreux auteurs [Vigneau, 1994]. Même si le faible nombre de stations initiales limite la qualité des modèles, d'autres facteurs non pris en compte influencent très certainement la variation spatiale des températures minimales : le vent, la couverture nuageuse, l'humidité des sols, etc. Ainsi, à l'échelle du temps journalier et pour des conditions atmosphériques stables, les interactions entre les écoulements synoptiques et un vent synoptique faible favorisent ou non l'accumulation d'air froid dans les bas de coteau [Beltrando *et al.*, 1992 ; Sarmir, 1995].

Selon les auteurs, en situation de vent synoptique faible ou modéré (sur l'ensemble du vignoble), les masses d'air froid glissant le long des coteaux sont soit bloquées lorsque le versant est *quasi* parallèle au flux, soit, à l'inverse, évacuées s'il est oblique. Ainsi, à une même altitude (et pour des compositions du sol similaires), des points sur des versants d'orientation différente n'auront pas les mêmes températures. Par conséquent, la connaissance des champs de vent lors d'une nuit de ciel clair et de vent calme s'avère importante dans l'appréciation de la variabilité spatiale des températures minimales. Là réside tout l'intérêt de l'utilisation du modèle expérimental Meso NH (Encadré XVI.1).

Afin d'affiner la spatialisation de l'aléa gélif sur le vignoble marnais, dans le cadre d'un accord tripartite (CIVC, Météo France Nord, Université PARIS 7), nous avons utilisé le modèle Meso NH pour simuler les champs de plusieurs paramètres météorologiques, tels le vent et les températures. La mise en œuvre de ce modèle étant assez lourde, logistiquement et financièrement, cette simulation n'a été réalisée que pour la nuit du 16 au 17 mars 2003²⁸⁴, qui a fait l'objet d'une étude de cas dans le chapitre précédent et qui est bien représentative des situations dites *radiatives*.

Dans ce chapitre, après une brève description des caractéristiques météorologiques de la nuit sélectionnée, nous présentons et discutons les sorties du modèle, très souvent dans une approche diachronique : champs de vent, de températures, d'humidité relative, etc. Par exemple, nous nous attachons en particulier à mettre en évidence l'influence de la topographie sur les écoulements de l'air simulés et les répercussions sur la répartition des

284. À l'origine de l'accord, l'objectif était de simuler plusieurs dates, notamment avec des configurations légèrement différentes. La sélection des dates proposées pour la simulation est présentée dans l'Annexe I.

températures. Enfin, dans une perspective de validation de la simulation réalisée, nous comparons les sorties du modèle aux données mesurées par les stations automatiques.

Encadré XVI.1 : Le modèle Meso NH

Le modèle Meso NH est un modèle atmosphérique à méso-échelle non hydrostatique*, développé conjointement par Météo France et le laboratoire d'Aérodynamique du CNRS à Toulouse [Lafore *et al.*, 1998]. Il permet de simuler les mouvements de l'atmosphère sur une large gamme d'échelles s'étendant de l'échelle synoptique jusqu'à l'échelle micro-climatique. Sa résolution spatiale (1 m à 100 km), beaucoup plus fine que celle des modèles météorologiques classiques, tels les modèles ARPEGE/ALADIN (résolution de 10 km à 300 km) utilisés pour les prévisions à court terme, permet de mieux appréhender les interactions entre la surface terrestre (notamment sa topographie) et l'atmosphère. En outre, une autre caractéristique très appréciée du modèle Meso NH est la possibilité de simuler des domaines emboîtés possédant des résolutions spatiales différentes (*grid nesting*), qui permet ainsi d'affiner la simulation sur une zone donnée à l'intérieur d'un domaine plus vaste.

Du point de vue de la modélisation, les paramétrisations physiques des phénomènes influençant le comportement de l'atmosphère sont intégrées dans le modèle Meso NH sous la forme de schémas**. Ces schémas sont en quelque sorte des sous-modèles contenant les variables et équations décrivant différents phénomènes comme la turbulence, la convection, etc. Par exemple, afin de reproduire au mieux le comportement de l'atmosphère près de la surface terrestre, les caractéristiques de cette surface (topographie, occupation du sol, ...) sont prises en compte par un schéma de surface. Celui-ci utilise les sorties de différents modèles dont le modèle ISBA (*Interactions Soil-Biosphere-Atmosphere*) de J. Noilhan et S. Planton [1989] permettant de calculer les échanges entre le sol et l'atmosphère.

Du point de vue pratique, une simulation Meso NH de l'évolution temporelle des processus atmosphériques, sur un domaine donné, nécessite plusieurs étapes. Dans une première phase de préparation ou d'initialisation, l'utilisateur définit les paramètres de la simulation et génère des fichiers Meso NH initiaux qui seront utilisés dans les étapes ultérieures (conditions au temps 0 de la simulation). Il peut alors choisir de réaliser une étude de cas idéal, en partant d'un état idéalisé de l'atmosphère, ou une étude de cas réel, en utilisant les sorties d'un modèle à plus petite échelle, interpolées à l'échelle de la simulation Meso NH. Pour les simulations d'un domaine emboîté, les conditions initiales et aux limites sont les sorties de MesoNH du domaine plus vaste. La deuxième phase est la phase de simulation proprement dite (le *run*), au cours de laquelle les équations physiques décrivant l'évolution temporelle de l'atmosphère sont intégrées numériquement. Enfin, les troisième et quatrième phases permettent d'obtenir des diagnostics sur le déroulement de la simulation réalisée et de visualiser les fichiers de sortie du modèle demandés par l'utilisateur.

Le lecteur plus intéressé pourra s'orienter vers le site du modèle Meso NH (www.aero.obs-mip.fr), qui contient la documentation scientifique et le manuel de l'utilisateur, ainsi que des exemples de simulation. Enfin signalons que le modèle Meso NH connaît des améliorations constantes.

* Le qualificatif *non hydrostatique* s'oppose à l'hypothèse hydrostatique selon laquelle le volume et la masse d'une particule d'air n'évoluent pas au cours du temps. Dans le modèle Meso NH, seule la masse des particules d'air est rigoureusement constante. L'abandon de l'hypothèse hydrostatique permet de mieux appréhender l'influence du relief.

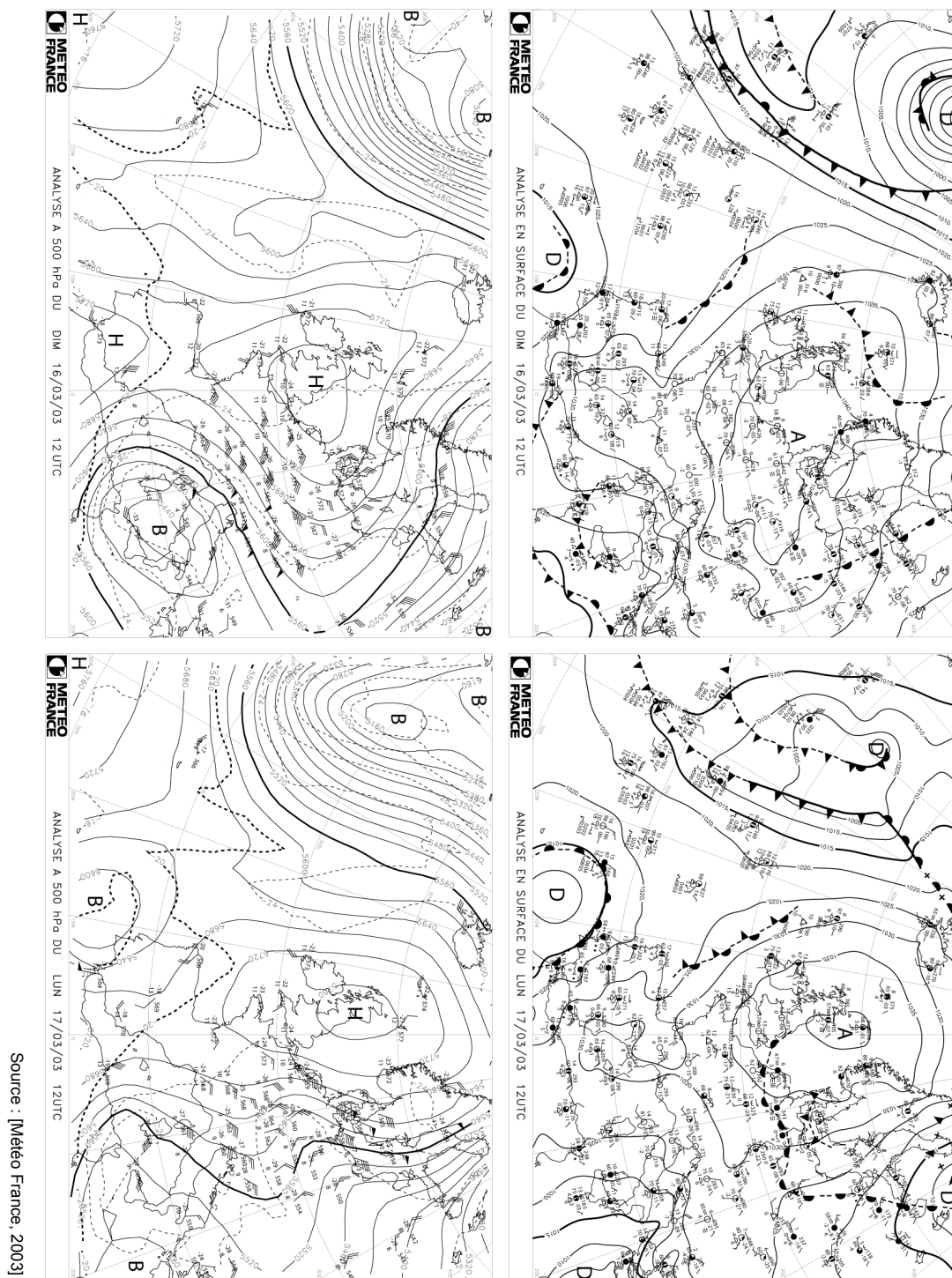
XVI.1 - La situation observée les 16 et 17 mars 2003 dans le vignoble marnais

Avant de présenter les résultats des simulations Meso NH réalisées, nous décrivons ici la situation observée le 17 mars 2003, à partir du contexte synoptique et des données mesurées dans le vignoble marnais.

XVI.1.1 - Le contexte synoptique des 16 et 17 mars 2003

Le dimanche 16 mars, la France est sous l'influence d'un vaste anticyclone centré sur le nord de l'Europe (Carte XVI.1). Il dirige sur le nord du pays un flux de nord-est, très sec. Cette zone de hautes pressions se retrouve en altitude avec la présence d'un haut géopotentiel sur les îles Britanniques. Pendant la journée, après dissipation des brumes et

brouillards localement, le temps est très ensoleillé, les températures supérieures aux normales saisonnières sur la *quasi*-totalité du pays (excepté dans le quart sud-est où elles sont conformes).

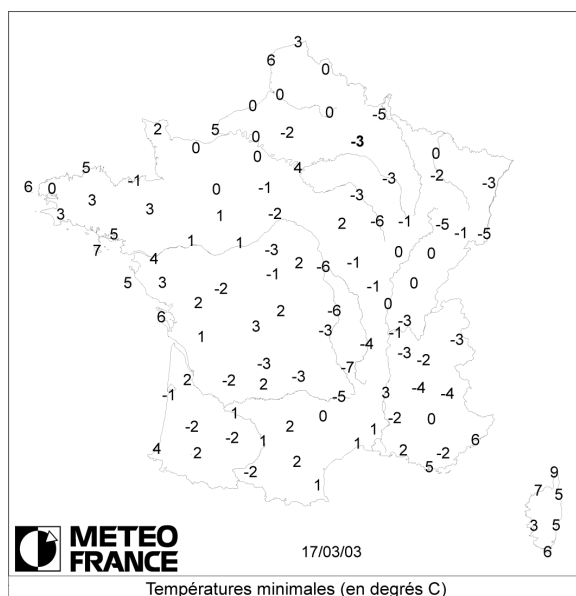


Carte XVII.1 : Les situations synoptiques en surface et en altitude, les 16 et 17 mars 2003

Dans la nuit du 16 au 17 mars²⁸⁵, la France est toujours protégée par les hautes pressions. Le ciel dégagé conduit à un fort refroidissement nocturne. Plusieurs stations synoptiques de l'est du pays relèvent des températures négatives (Carte XVI.2). Malgré quelques nuages

285. La carte des pressions en surface à 0h (UTC) a été présentée précédemment (Carte IX.3, p. 178).

élevés sur le nord-est apparaissant dans la matinée, la journée du lundi 17 mars est similaire à la veille : beau temps ensoleillé pour la majeure partie du pays.



Carte XVI.2 : Les températures minimales observées en France, le 17 mars 2003

Source : [Météo France, 2003]

Pour la station synoptique Reims-Courcy, la température minimale mesurée est de -3°C (Carte XVI.2). Comme pour la *quasi*-totalité de la France, les conditions de la nuit y sont plutôt *radiatives*, caractérisées par un vent nocturne faible et un ciel clair. À partir de 18h (UTC) le 16 mars, la vitesse du vent tombe à 2 m/s (coucher du soleil) et reste faible tout au long de la nuit (Tableau VII.1). Ce vent calme vient de l'est puis du nord (le 17/03, à 3 et 12h). Quant aux données de nébulosité, elles indiquent un ciel clair jusqu'à 6h du matin, le 17 mars. Alors le versant occidental d'un talweg s'étendant de la Scandinavie à l'Italie crée un front en altitude (Carte XVI.1).

Tableau XVI.1 : Nébulosité observée et vent mesuré à la station de Reims-Courcy, du 16 mars 2003 à 12h au 17 mars 2003 à 12h (données trihoraires)

Date	Heure (UTC)	Nébulosité (en octats)	Direction du vent (en °)	Vitesse du vent (en m/s)*
16/03/2003	12	0	90	6
	15	0	70	7
	18	0	80	2
	21	0	110	2
17/03/2003	0	0	90	2
	3	0	340	1
	6	4	0	0
	9	6	0	0
	12	4	30	2

Données : 16-17/03/2003 ; Météo France

* Les vitesses du vent mentionnées, mesurées à 10 m du sol, n'ont pas été corrigées à 2 m ici.

XVI.1.2 - À partir des stations du vignoble marnais

La plupart des stations du vignoble marnais enregistrent, comme Reims-Courcy, des vents calmes voire nuls, en particulier dans la seconde partie de la nuit (après 0h UTC). La Figure XVI.1, illustrant ce propos, montre l'évolution des directions et des vitesses du vent du 16 mars 2003 à 12h jusqu'au lendemain (à 12h). Les vents nocturnes sont très majoritairement nuls. Toutefois, la girouette et l'anémomètre du poste de Vertus mesurent des vents supérieurs à 2 m/s et d'orientation assez variable, mais globalement du nord-est pendant la nuit. Nous pouvons également remarquer, jusqu'au milieu de la nuit, des vents de secteur est pour Vert-Toulon, Plumecoq, Orbais-l'Abbaye et Aÿ-Champagne (et sud-est pour Œuilly).

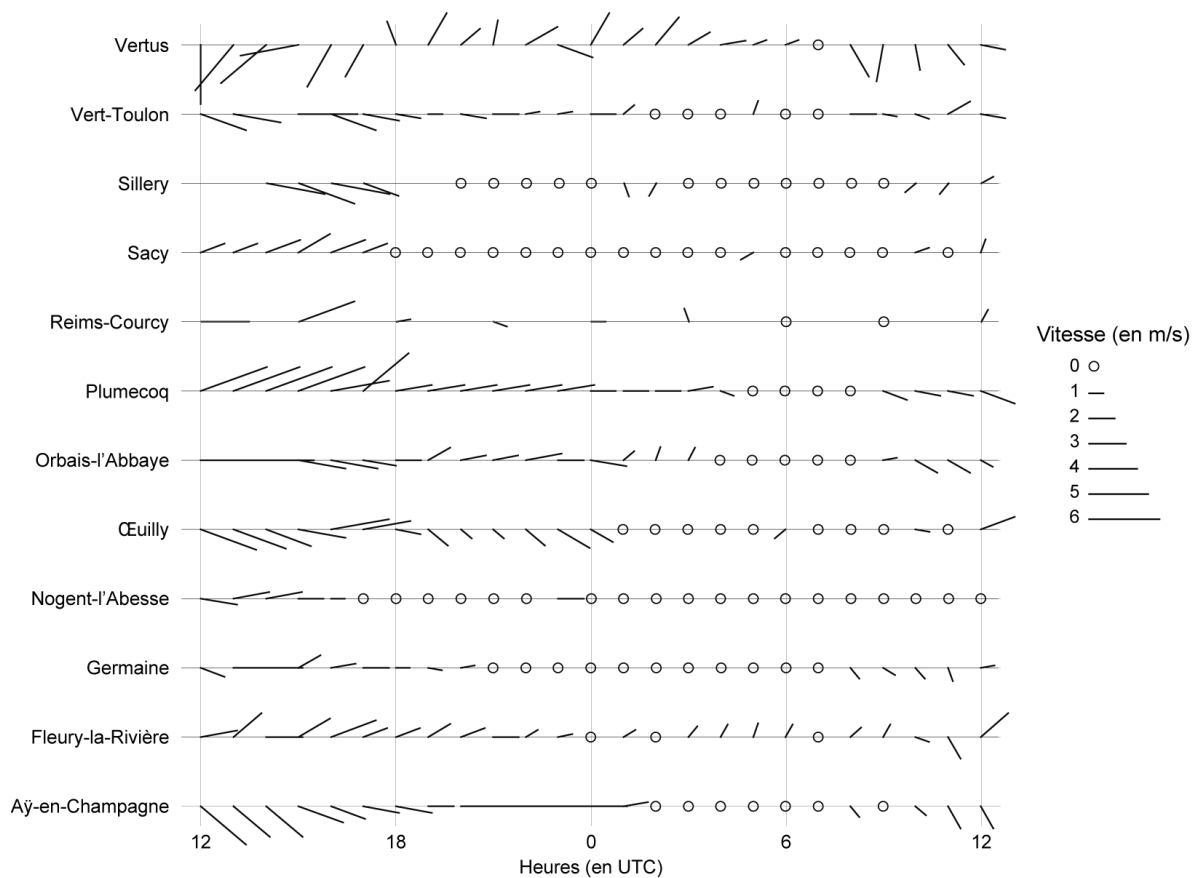


Figure XVI.1 : Évolution horaire du vent pour quelques stations du 16 mars 2003 à 12h au 17 mars 2003 à 12h (UTC)

Données : 16-17/03/2003 ; CVC, Météo France
Valeurs manquantes : 1 pour Vert-Toulon ; 4 pour Sillery

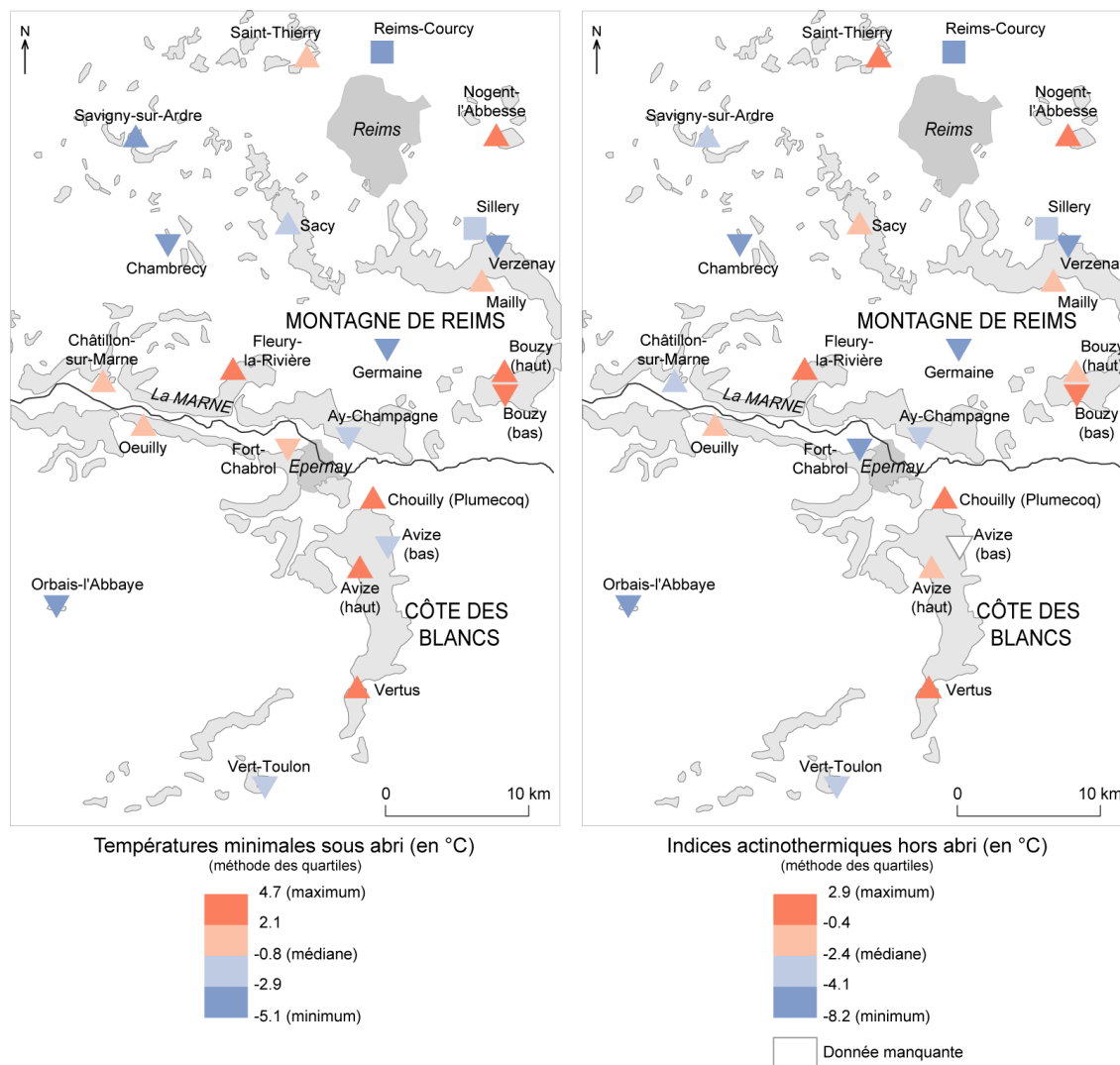
Quant aux températures minimales sous abri (à 2 m), elles peuvent être qualifiées de froides pour l'ensemble du vignoble marnais : la moitié des postes enregistre des températures négatives, le minimum étant de -5.1°C à Chambrecy²⁸⁶. Toutefois, la variabilité interstationnelle apparaît importante puisque l'étendue des températures avoisine 10°C ²⁸⁷. Sur la Carte XVI.3, nous pouvons remarquer que les stations de bas de coteau sont généralement plus froides que celles situées à mi-coteau, aussi bien pour les températures

286. La moyenne des températures minimales sous abri est de -0.3°C , la médiane de -0.8°C . Pour les indices actinothermiques : respectivement -2.3°C et -2.4°C .

287. Bouzy (haut) enregistre la température minimale sous abri la plus élevée : 4.7°C .

minimales et que pour les indices actinothermiques (excepté pour Bouzy bas²⁸⁸). Les effets locaux semblent donc jouer un rôle primordial.

Cette répartition des températures minimales, le 17 mars 2003 (Carte XVI.3) ne correspond pas exactement à l'*image* moyenne, sur l'ensemble des printemps 1998 à 2003, vue précédemment (Carte VII.2, p. 143). Ainsi, pour les températures minimales sous abri, le nord de la zone d'étude apparaît plus froid le 17 mars 2003. Cette observation peut s'expliquer par l'origine nord-est du vent synoptique : les stations orientées face au flux sont plus froides et, à l'inverse, les températures sont plus douces pour les stations *abritées*.



Carte XVI.3 : Répartition des températures minimales sous abri (à 2 m) et en indices actinothermiques (hors abri, 10-50 cm) dans le vignoble marnais, le 17 mars 2003

Données : 17/03/2003 ; C1vC, Météo France
Les symboles relatifs à la position sur le coteau sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

Avant ce minimum (vers 5-6h UTC selon les stations), l'évolution horaire des températures sous abri est variable selon les stations. La Figure VII.3 donne l'exemple de quelques stations²⁸⁹, ainsi que la moyenne calculée sur les 23 stations de l'étude. Les heures de la

288. Les indices actinothermiques mesurés pour les deux stations de Bouzy (haut et bas) sont suspects.

289. Sélectionnées intentionnellement, les cinq stations retenues donnent une idée assez générale de la variabilité des températures sous abri horaires, entre Chambrecy la plus froide dans la nuit et Bouzy haut, la plus chaude. Les stations non représentées ici ont un profil assez proche de l'une de ces stations.

journee sont caracterisees par une homogeneite des temperatures sous abri entre toutes les stations. Par contre, des que le soleil se couche (17h51 UTC), la vitesse et l'intensite du refroidissement, qui a debute vers 15h, fluctuent fortement d'une station a l'autre (Figure VII.3). Par exemple, les stations de Germaine, de Chambrecy ou encore de Orbais-l'Abbaye enregistrent une diminution tres marquee des temperatures (sous abri) pendant la nuit, a l'inverse de Bouzy (haut), de Nogent-l'Abesse ou Plumecoq. En moyenne, sur l'ensemble des 23 stations, les temperatures sous abri diminuent de 9.2°C entre 18 et 5h. Nous retrouvons globalement la dichotomie *mi-coteau / bas de coteau (et plaine)*, observee precedemment : les stations situees a des altitudes relatives basses ont un refroidissement plus marque, lie a la stagnation de l'air froid en bas des coteaux (brise thermique). En outre, pour quelques stations, les temperatures ne diminuent pas de maniere progressive comme pour la plupart des postes. Par exemple, pour Orbais-l'Abbaye, le refroidissement est assez faible du coucher du soleil a minuit, puis tres brutal jusqu'a 5h (UTC).

La temperature horaire la plus froide est atteinte, selon les stations, a 5-6h, ce qui correspond a peu pres a l'heure du lever du soleil (5h52). Ensuite, les temperatures augmentent de maniere importante en raison de l'ensoleillement (ciel degage).

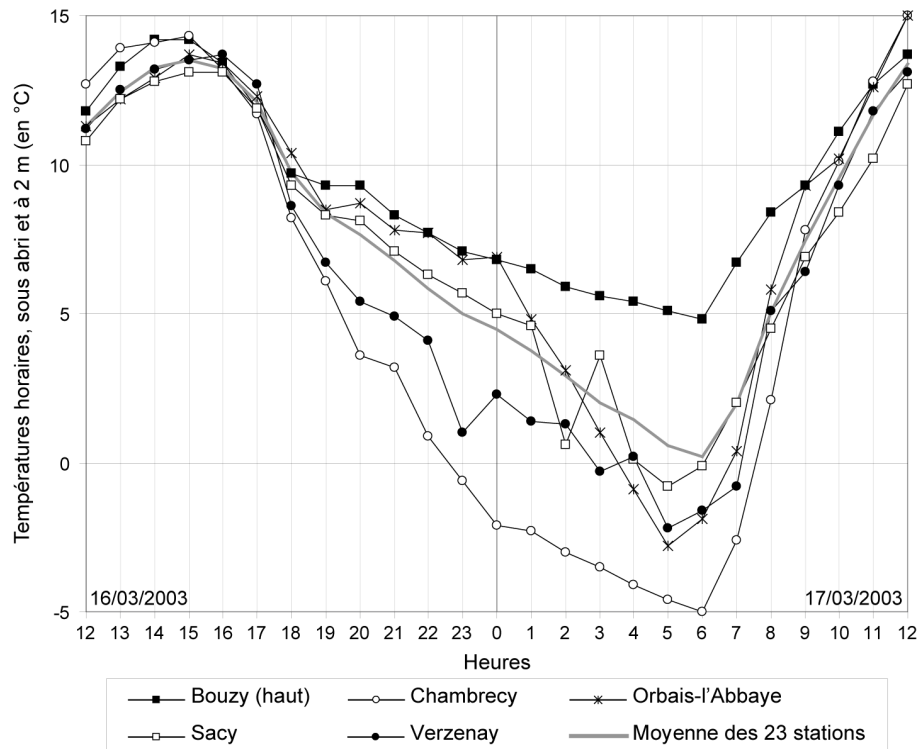


Figure XVI.2 : Évolution horaire des températures sous abri (à 2 m) pour cinq stations représentatives, du 16 mars 2003 à 12h au 17 mars 2003 à 12h (UTC)

Données : 16-17/03/2003 ; CIVC, Météo France

Ce premier aperçu des données mesurées dans le vignoble marnais, les 16 et 17 mars 2003, montre une très forte variabilité spatiale des températures nocturnes, liée à des conditions atmosphériques stables. Bien que les vents mesurés soient globalement calmes, nous pouvons nous attendre à d'importants effets locaux (influence de la topographie, brises thermiques interagissant avec le vent général), ce que les simulations Meso NH vont permettre d'appréhender.

XVI.2 - Les simulations Meso NH pour la nuit du 16 au 17 mars 2003

Les simulations de Meso NH donnent accès à un très grand nombre d'informations sur divers paramètres météorologiques, à différentes hauteurs de la surface terrestre et selon plusieurs résolutions spatiales et temporelles. Nous ne présentons ici qu'une sélection de ces résultats, motivée essentiellement par l'objectif que nous nous sommes fixé, soit l'amélioration de la compréhension des interactions entre les champs de vent et de température, ainsi que la comparaison avec les données d'observation.

XVI.2.1 - Quelques données techniques de la simulation

Les données d'entrées de Meso NH

De nombreuses données d'entrées de Meso NH sont nécessaires pour appréhender les conditions de la surface terrestre (Annexe J) :

- relief (résolutions de 1 km et de 250 m) ;
- type de végétation (selon une typologie d'une centaine de classes) ;
- teneur en eau dans le sol (résolution de 1 km) à partir d'une *chaîne* faisant appel à trois modèles : SAFRAN pour calculer les échanges de surface (avec précipitations), ISBA [Noilhan et Planton, 1989] et MODCOU modèle de nappe ;
- teneur en argile et en sable (résolution de 10 km).

Les sorties du modèle météorologique ALADIN (résolution : 12 km) sont prises comme conditions atmosphériques initiales et latérales²⁹⁰ pour le modèle Meso NH.

La sélection des nuits de simulation

À l'origine, nous avons envisagé la simulation de trois à six dates, afin de permettre de varier les conditions atmosphériques et de comparer les champs obtenus. Une des premières étapes a donc été de classer 10 situations potentiellement intéressantes :

1 : 07-08/04/03 2 : 02-03/04/03 3 : 16-17/03/03 4 : 10-11/03/03 5 : 06-07/03/03
6 : 25-26/03/02 7 : 07-08/04/02 8 : 27-28/03/02 9 : 19-20/03/03 10 : 03-04/04/03

Chacune de ces nuits, ayant connu des températures basses, est représentative de contextes météorologiques variés.

Au début du projet, les données de la teneur en eau dans le sol n'ont pu être extraites que pour l'année 2002. En conséquence, la première date simulée était la nuit du 25 au 26 mars 2002. Cela étant, les résultats ont montré des valeurs de refroidissement en surface aberrantes :

« Ce dernier point a mis en évidence une faiblesse connue du modèle, à savoir sa difficulté à simuler l'épaississement de l'inversion nocturne à partir de la surface. Il en résulte un refroidissement excessif au sol et dans les basses couches. La situation choisie présente également la particularité de voir entrer dans le domaine, une couverture nuageuse non négligeable en cours de nuit. Ce phénomène ajoute un élément de complexification du problème du refroidissement en surface. » [Labbé, communication privée]

Les données initiales et les résultats ont été transmis au CNRM²⁹¹ à Toulouse pour une étude plus approfondie en vue d'une amélioration possible du modèle Meso NH [Labbé,

290. Les conditions aux limites sont prises en compte ici par des couplages effectués toutes les trois heures.

communication privée]. Toutefois, cette première date simulée a permis de mettre au point la chaîne de traitement.

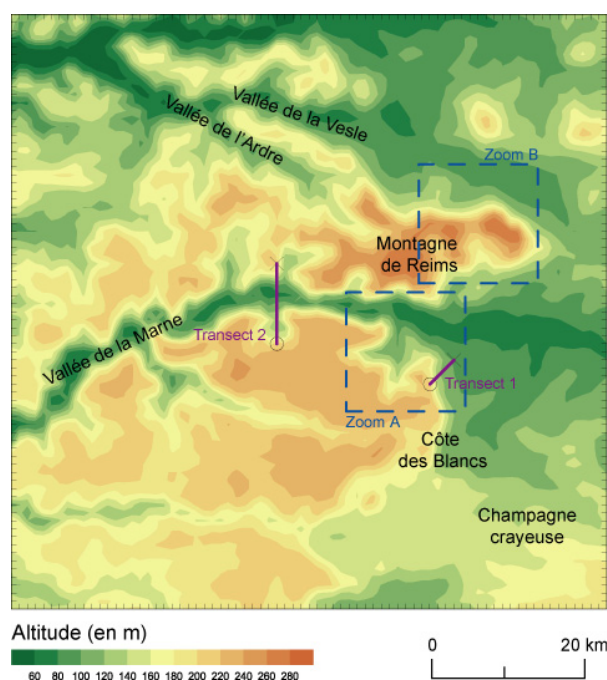
La date suivante retenue pour la simulation et commentée ici est la nuit du 16 au 17 mars 2003, qui est, comme nous l'avons mentionné, représentative de conditions de ciel clair, avec un flux général faible de nord-est. Compte tenu de la mise en œuvre lourde du modèle, seule cette date a été, pour l'instant, simulée. Les conditions initiales de la simulation Meso NH sont l'analyse ALADIN de 12h UTC le 16 mars 2003. Le pas de temps retenu est de 3h, excepté au cœur de la nuit, période qui nous intéresse, avec une résolution temporelle horaire. La fin de la simulation se situe le 17 mars à 9h.

Les résolutions horizontales et verticales

Trois échelons de simulation ont été ici définis :

- le premier de 300 km x 300 km avec une résolution de 5 km ;
- le second 70 km x 70 km (1 km) ;
- l'échelon le plus fin comprenant deux zooms de 15 km x 15 km avec une résolution de 250 m.

La simulation est mise en œuvre simultanément pour les deux premières échelles. La première zone (300 km x 300 km) représente une étape intermédiaire pour la simulation Meso NH à une échelle plus fine. Cette étape est nécessaire avant de descendre à l'échelle kilométrique souhaitée, afin de minimiser l'influence des conditions aux limites. Les deux sous-domaines à 250 m sont indiqués sur la Carte XVI.4 représentant l'échelon 70 km x 70 km.



Carte XVI.4 : Altitude de la zone simulée à l'échelon 70 km x 70 km et localisation des deux zooms (15 km x 15 km) et des transects

Données : MESO NH - Météo France, résolution 1 km

Nous avons discuté de leur localisation avec le CIVC (F. Langellier) et Météo France (C. Jacquart, L. Labbé) ; elle a été motivée par la présence de stations météorologiques

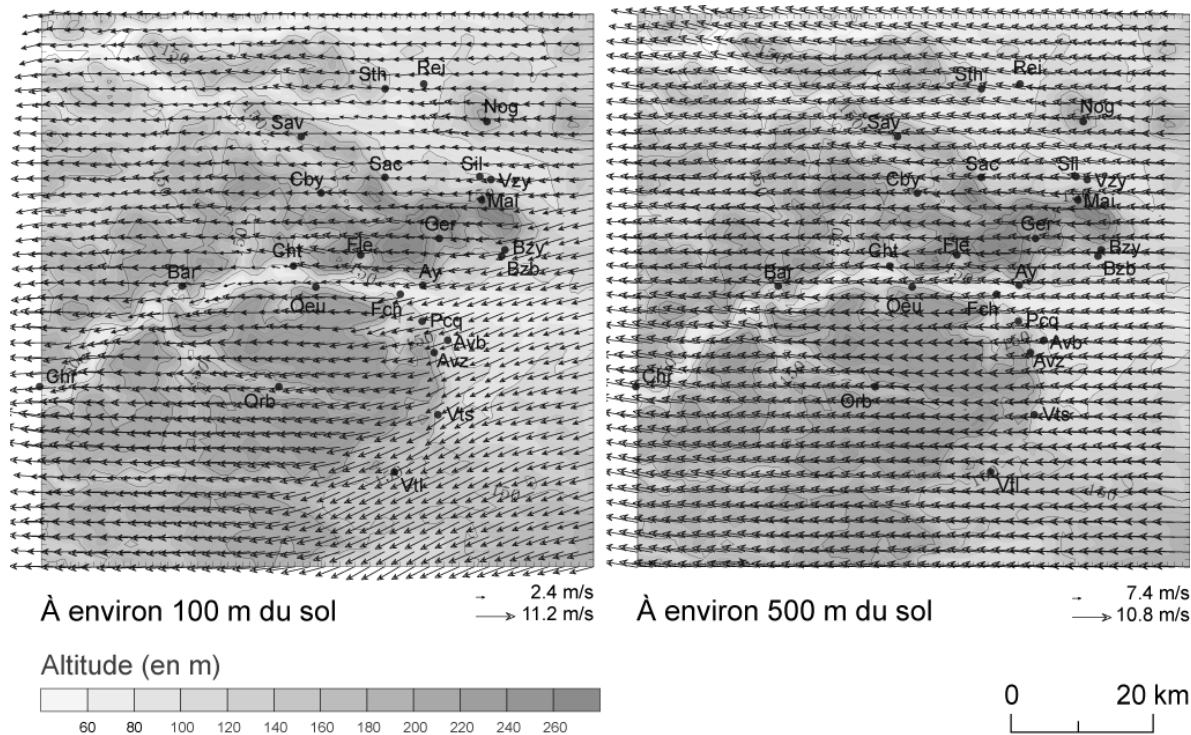
permettant la validation, par une connaissance empirique du secteur à partir de nombreuses mesures sur le terrain²⁹² et enfin par la gélivité réputée de ces zones (en particulier pour le second zoom, avec les trois vallons au sud d'Épernay).

La dimension verticale est appréhendée selon 60 niveaux, de plus en plus fins vers la surface. Les basses couches atmosphériques, entre la surface et une altitude de 1 000 m, où se produisent les phénomènes qui nous intéressent, sont ainsi subdivisées en 16 niveaux dans la simulation. Cette décomposition verticale a été décidée par Météo France.

XVI.2.2 - Les champs de vent

Vent en altitude (à 100 et 500 m)

La Carte XVI.5 représentant les sorties des simulations de vent aux altitudes de 100 et de 500 m (à 3h UTC) montre essentiellement un flux d'est, relativement faible, lié aux conditions anticycloniques (Carte XVI.1, p. 275). Les champs horaires de vents simulés présentent une stabilité importante dans les directions au cours de la nuit²⁹³, même si une diminution de la vitesse des vents s'observe. Alors qu'à 500 m, le relief ne semble plus modifier la direction du vent, nous pouvons remarquer qu'à 100 m, la cuesta d'Île-de-France perturbe le flux d'est en le déviant vers le sud. L'influence de la Vallée de la Marne, moins nette, se traduit par une légère déviation de la direction dans le sens de la vallée et par une diminution de la vitesse.



Carte XVI.5 : Simulation du champ de vent en altitude (100 et 500 m), le 17 mars 2003 à 3h UTC

Données : MESO NH - Météo France, résolution 1 km
Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

292. Le secteur nord de la Montagne de Reims [Beltrando *et al.*, 1992].

293. C'est pourquoi nous avons choisi, ici, de ne montrer que les simulations à 3h (UTC).

Vent à 2 m

La Carte XVI.6 illustre l'évolution du champ de vent simulé (à 2 m) au cours de la nuit (de 18 à 9h UTC). Nous constatons des différences importantes dans le temps et dans l'espace.

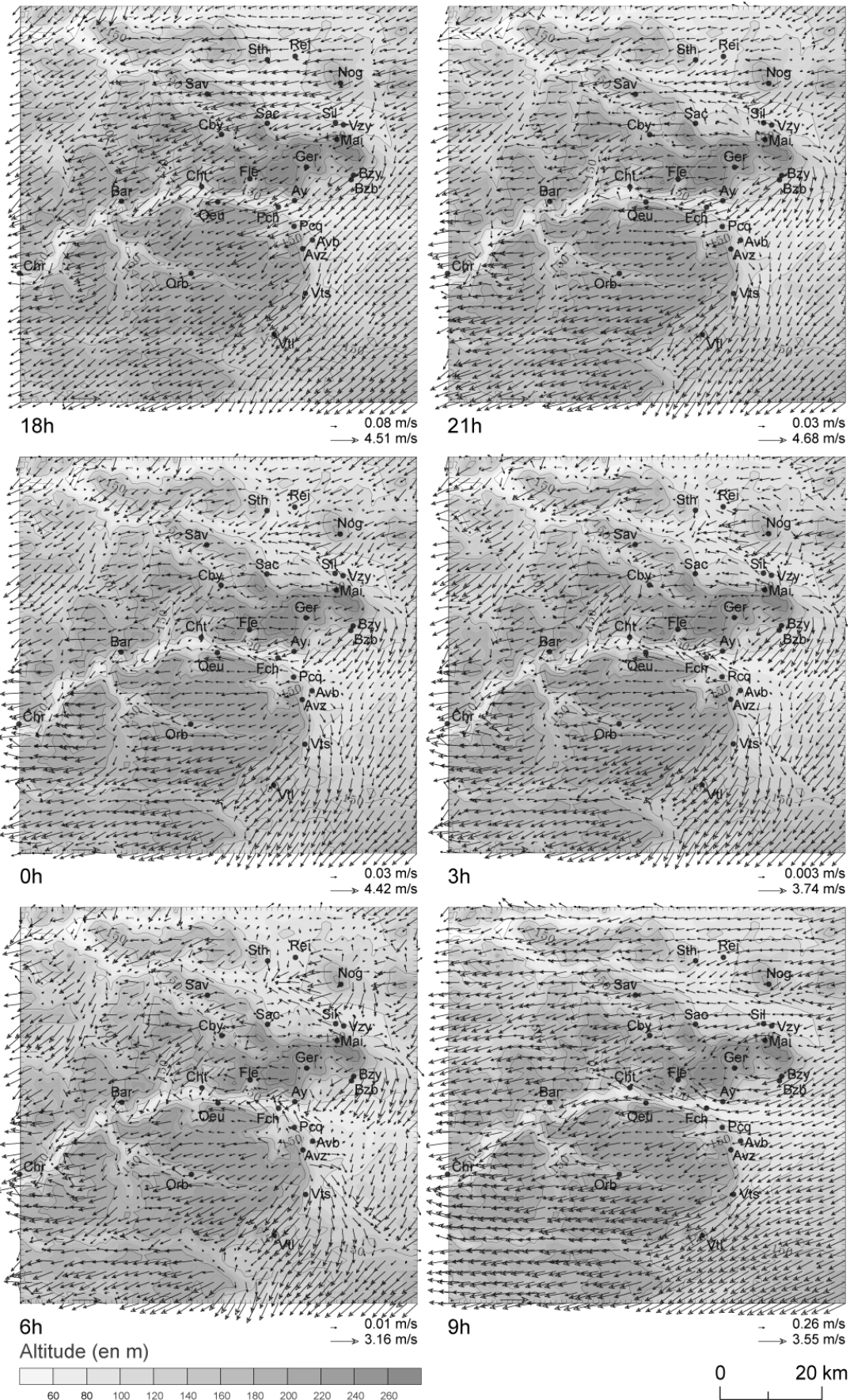
Dans le temps, il apparaît que le champ de vent se complexifie au cours de la nuit. Ainsi, même si la vitesse du vent maximal décroît jusqu'à 6h, cette diminution est plus ou moins accentuée pour certains secteurs, avec une nette opposition entre les plaines et les zones abritées du vent (vallons). Par ailleurs, la variabilité spatiale des directions du vent en fin de nuit (6h), pour chaque point de la grille représenté, est bien plus grande qu'en début (18h) et surtout qu'après le lever du soleil (9h).

Dans l'espace, le champ de vent est clairement perturbé par la topographie. Le vent tend ainsi à contourner les obstacles, telle la Montagne de Reims, et à être canalisé en partie par les vallées. Lorsqu'il arrive sur un relief, il a tendance à le contourner et de ce fait s'accélère : ce point est particulièrement remarquable le long de la Côte des Blancs, ainsi qu'à 9h au nord-est de la Montagne de Reims et pour la butte de Nogent-l'Abesse (Nog). À l'inverse, les zones sous le vent, en particulier les vallées secondaires perpendiculaires à la Vallée de la Marne et à la direction du vent général, sont caractérisées par des vents très faibles et, *a priori*, par des accumulations d'air froid ou une turbulence plus marquée.

Enfin, nous remarquons très nettement le développement de brises de pente au cours de la nuit, qui viennent perturber le flux d'est. Pour simplifier, nous distinguons trois comportements-types selon l'orientation de la pente et du vent général :

- directions différentes : les brises de pente perturbent légèrement le flux général (vallée de la Marne) ;
- même direction, même sens : ces brises s'ajoutent au vent général (par exemple, à 6h, au nord-ouest de Châtillon-sur-Marne Cht) ;
- même direction, sens opposé : les deux écoulements convergent vers le bas du coteau où la vitesse simulée apparaît *quasi* nulle (par exemple, au nord-est de la Montagne de Reims et au nord de la Côte des Blancs).

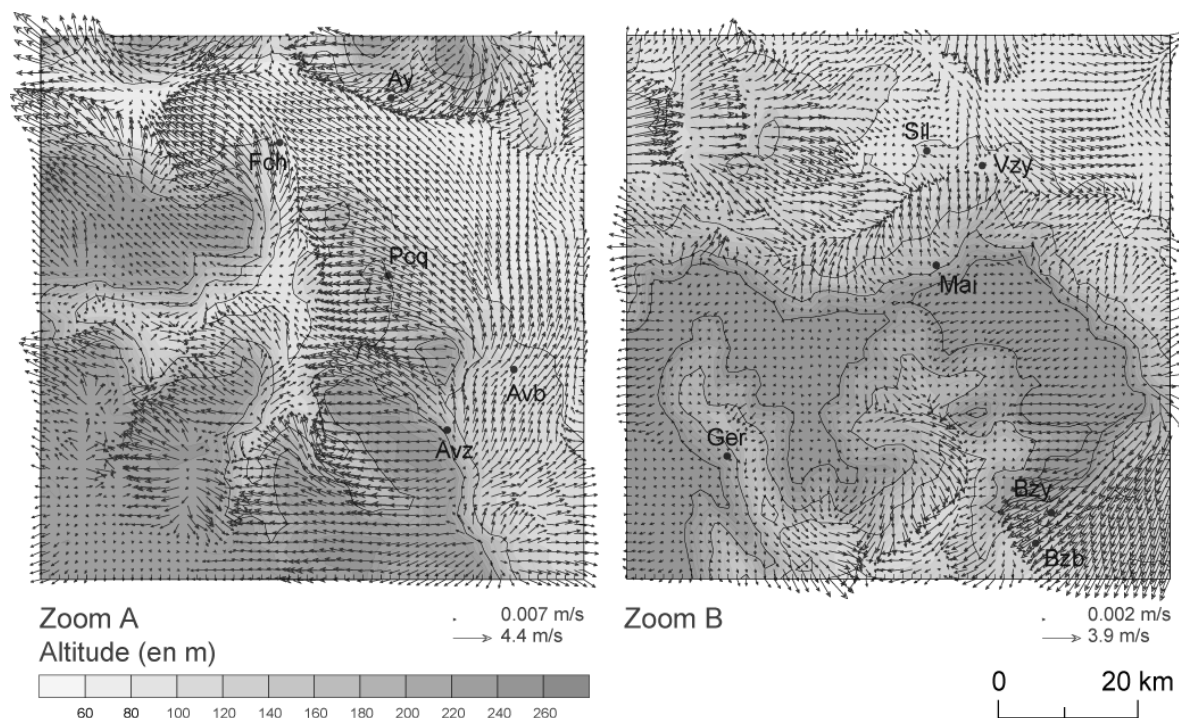
Ce dernier cas d'interaction entre topographie et vent est particulièrement intéressant puisqu'il peut favoriser le blocage de l'air froid accumulé en bas de coteau.



Carte XVI.6 : Simulation du champ de vent à 2 m de la surface, au cours de la nuit du 16 au 17 mars 2003 (18, 21, 0, 3, 6 et 9h UTC)

Données : MESO NH - Météo France, résolution 1 km
Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

Ces observations sont confirmées par les cartes des simulations du champ de vent à 2 m avec une résolution plus fine de 250 m (Carte XVI.7). La lecture de ces cartes n'est pas toujours facile, notamment lorsqu'elles montrent des répétitions sur de larges plages. Toutefois, l'importance primordiale des brises de pente à 5h apparaît très nettement alors que le vent simulé est très faible sur les reliefs, en particulier sur la Montagne de Reims. Par ailleurs, le flux général s'accélère après le contournement de la Montagne de Reims, au sud-est du zoom B, ou est canalisé en grande partie par la Vallée de la Marne (A), même si nous pouvons noter l'influence des brises de pente. Par contre, ce flux ne pénètre pas dans les vallées secondaires et perpendiculaires.



Carte XVI.7 : Simulation du champ de vent à 2 m de la surface, le 17 mars 2003 à 5h UTC

Données : Meso NH - Météo France, résolution 250 m
La localisation des zooms est précisée sur la Carte XVI.4.
Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

En somme, les simulations du modèle Meso NH montrent une influence très nette de la topographie sur le vent dans les très basses couches. La mise en place des brises de pente nocturnes est ainsi bien décrite par la simulation. Ces brises thermiques sont générées par le refroidissement de l'air à proximité de la surface terrestre, l'air plus dense s'écoule alors par gravité vers les zones plus basses, vers les bas de coteau. L'accumulation de cet air froid étant potentiellement dangereux pour la vigne, il est intéressant d'étudier plus en détail le lien entre ces brises et les températures, grâce aux coupes verticales (Carte XVI.4).

XVI.2.3 - Les transects d'Avize et de la Vallée de la Marne

Les simulations du modèle Meso NH nous ont permis de réaliser deux transects (Carte XVI.4) : l'un décrivant le coteau d'Avize (transect 1), l'autre la Vallée de la Marne (transect 2). Nous avons superposé les sorties graphiques de vent et de température pour les deux coupes verticales.

La coupe verticale à Avize

La coupe verticale à Avize (Figure XVI.3) nous montre une inversion thermique qui apparaît dès 21h UTC. La stratification s'intensifie au cours de la nuit (de quelques degrés sur les premières centaines de mètres), phénomène classiquement repérable [André et Mahrt, 1982]. En effet, la différence thermique entre 500 m et la surface est inférieure 2.5°C, alors qu'en fin de nuit, elle dépasse 6°C. Les simulations montrent très nettement un refroidissement près du sol, alors qu'en altitude, les températures sont assez stables au cours de la nuit. L'inversion thermique persiste jusqu'à 7h. À 8h, le réchauffement de la surface commence à se manifester sur ce coteau exposé à l'est.

Vers les couches supérieures, au-dessus de 300 m d'altitude, le flux, d'environ 4-6 m/s, venant de l'est, est perpendiculaire au coteau. Ses caractéristiques, comme par exemple la température, varient très peu aux échéances ultérieures de simulation. Par contre, dans la première couche au-dessus de la surface terrestre (environ 50 m), le flux est déjà beaucoup plus faible à 21h. Au cours de la nuit, le profil logarithmique va s'accroître par une diminution de plus en plus marquée dans les basses couches et une légère augmentation au-dessus. À 4 et 6h, la Figure XVI.3 montre une inversion de la direction du vent près de la surface : il s'agit de la brise de pente. L'air froid va donc s'accumuler vers le bas du coteau et c'est pourquoi à 8h, même si les basses couches se réchauffent sous l'influence du rayonnement solaire, la zone la plus froide reste le bas du coteau. Le profil vertical de vent devient alors linéaire.

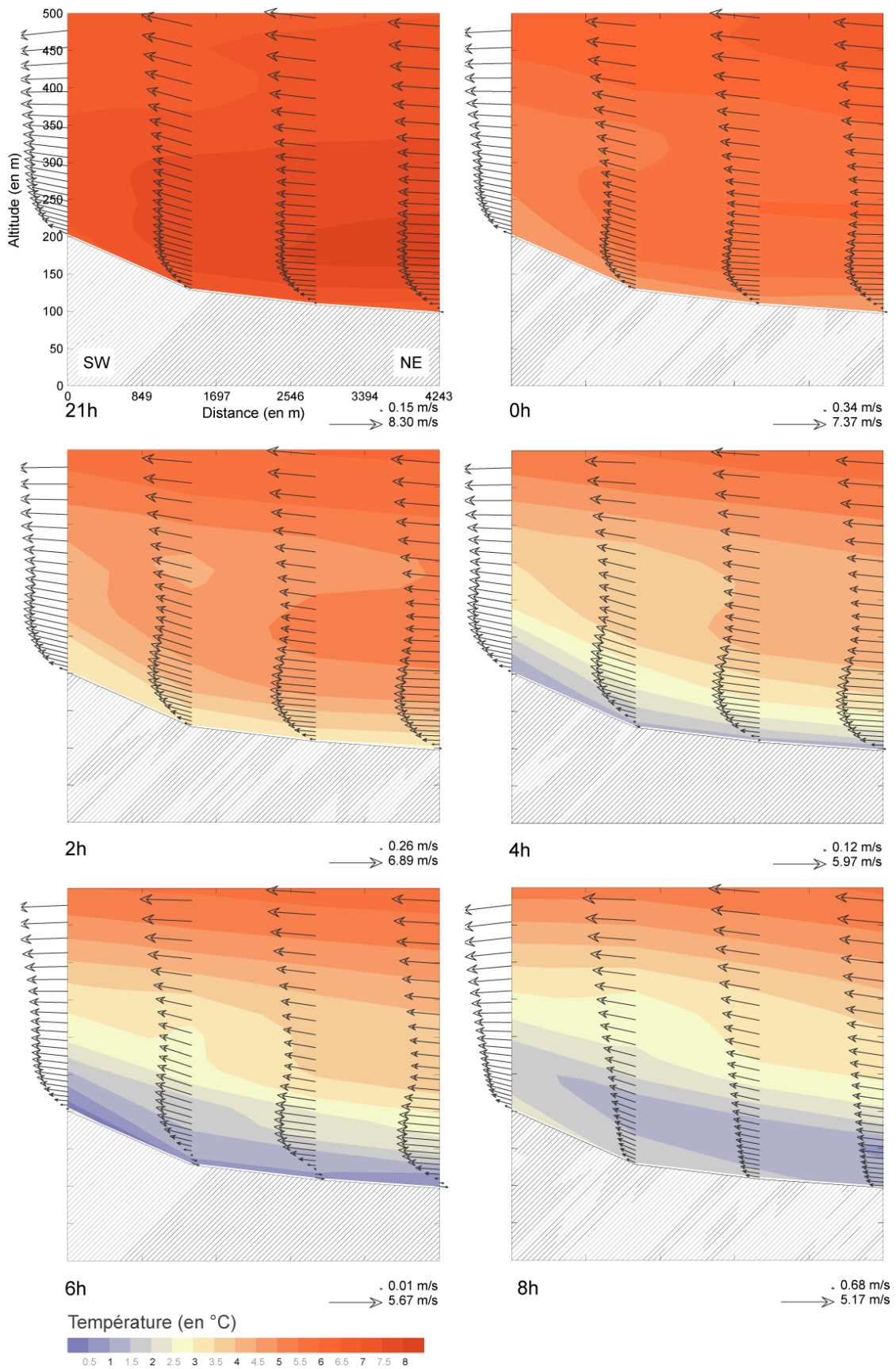


Figure XVI.3 : Simulation du vent et des températures sur le transect d'Avize au cours de la nuit du 16 au 17 mars 2003 (21, 0, 2, 4, 6 et 8h UTC)

Données : MESO NH - Météo France, résolution 1 km
L'échelle thermique a été modifiée pour mieux distinguer les plus basses températures.

La coupe verticale de la Vallée de la Marne

Alors que la coupe verticale du coteau exposé au vent d'Avize présentait des mécanismes assez simples, celle de la Vallée de la Marne (Figure XVI.4) révèle des écoulements de l'air plus complexes.

À 18h, la simulation Meso NH décrit le fond de la vallée chaud et une orientation des flux du nord au sud, au niveau de ce transect, que ce soit près de la surface ou à 500 m, même si apparaissent des mouvements d'ascendance et de subsidence. Notons qu'ils ont, en toute logique, une vitesse plus faible dans les basses couches, liée aux frottements avec le substrat, frottements accentués par l'effet de gravité (la vitesse est plus faible lorsque l'écoulement remonte une pente).

Pendant la nuit, les vents à 500 m proviennent du sud. Par contre, près de la surface terrestre, les vents descendent très nettement le long du coteau orienté sud et la brise de pente semble s'ajouter au vent général. Par contre, sur l'ubac, à 3h, nous pouvons remarquer une légère brise de pente. Les deux brises sont associées à des inversions thermiques. Toutefois, le refroidissement semble plus accentué sur l'ubac que l'adret, ce qui s'observe très nettement à 6h. Les résultats pour la fin de nuit montrent, en effet, une dichotomie entre les deux versants. Les zones de convergence et d'accumulation d'air froid se situent sur le coteau orienté nord, et notamment au niveau du petit replat à environ 2 km (le profil en altitude montre alors une ascendance des flux). À l'inverse, le coteau sud est surtout caractérisé par un flux assez puissant semblant bloquer l'air descendant de l'autre côté.

À 9h, le modèle simule les brises de pente ascendantes liées à l'échauffement de la surface terrestre. Dans les couches atmosphériques à 500, nous retrouvons l'écoulement nord-sud de la veille.

Les coupes proposées par le modèle Meso NH sont très pédagogiques et illustrent bien les schémas théoriques (convergence, ascendance, etc.). Nous avons pu observer le phénomène d'inversion thermique, ainsi que les brises de pente entraînant l'air froid vers les zones basses (bas du coteau ou replat). Le transect de la Vallée de la Marne a permis également de mettre en évidence une autre interaction entre les écoulements d'air et la topographie, liée à l'orientation des coteaux. Des secteurs apparaissent ainsi plus ou moins froids, notamment suivant que leur situation est sous le vent ou non. Cela souligne le rôle de la topographie dans la variation spatiale des températures nocturnes.

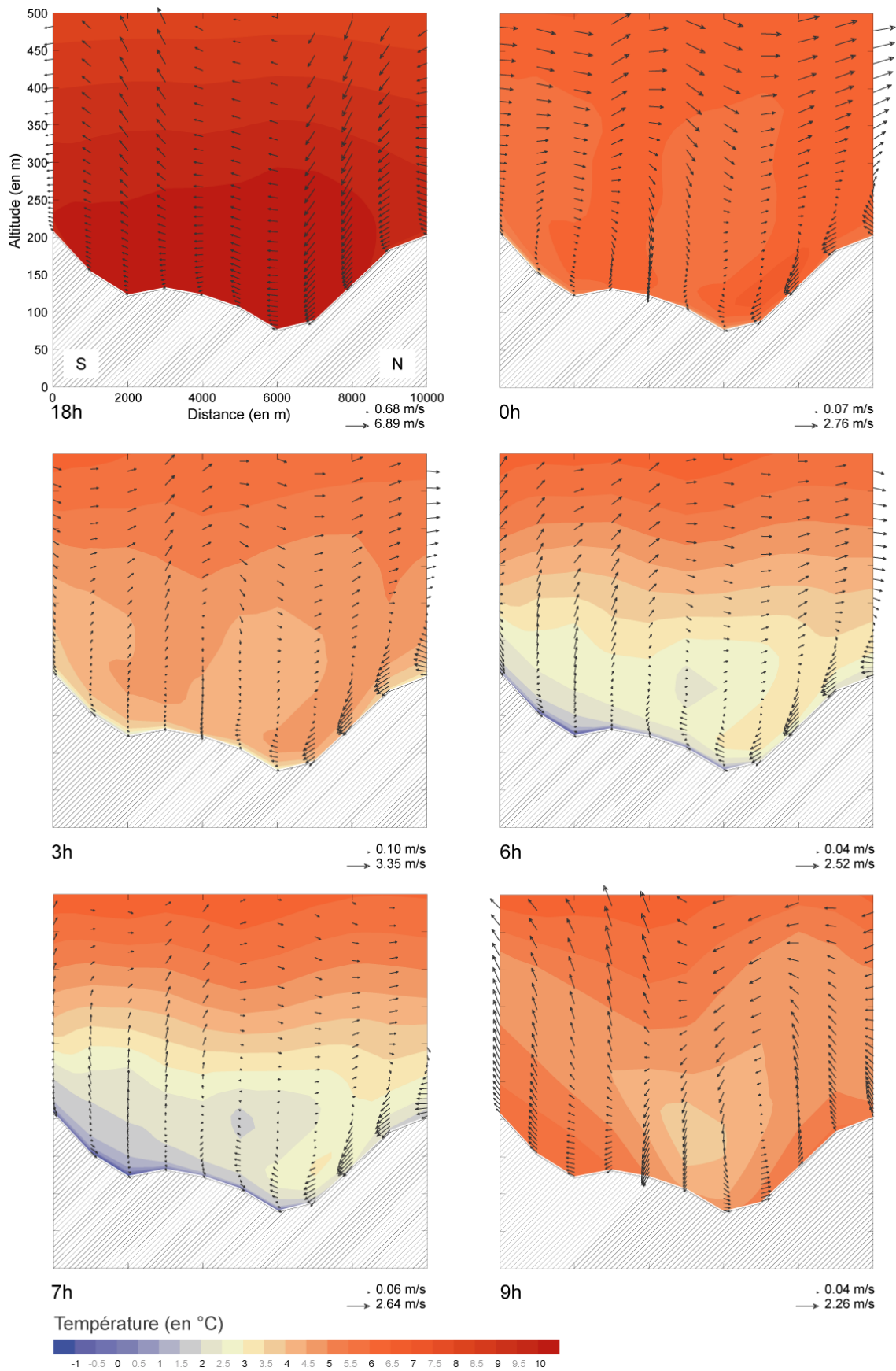


Figure XVI.4 : Simulation du vent et des températures sur le transect d'Avize au cours de la nuit du 16 au 17 mars 2003 (18, 0, 3, 6, 7 et 9h UTC)

Données : MESO NH - Météo France, résolution 1 km
L'échelle thermique a été modifiée pour mieux distinguer les plus basses températures.

XVI.2.4 - Les températures

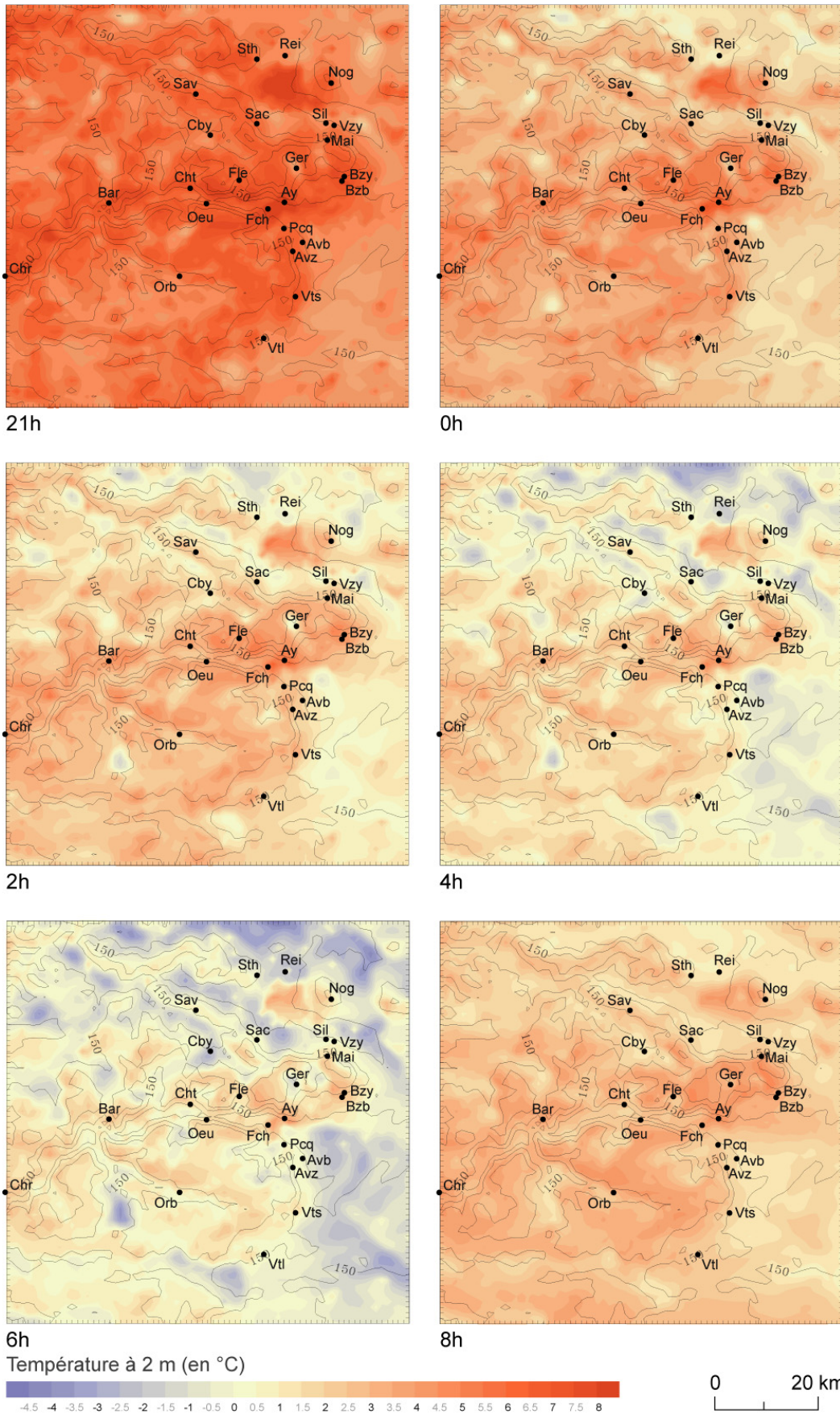
Nous présentons et discutons à présent des champs thermiques sur l'ensemble de la zone d'étude 70 km x 70 km.

Carte des températures à 2 m :

À 18h (UTC), le 16 mars 2003, l'ensemble de la zone d'étude connaît des températures supérieures à 8°C, excepté pour quelques points isolés. À mesure que l'atmosphère se refroidit au cours de la nuit, une différenciation spatiale plus nette commence à apparaître. Sur la Carte XVI.8, nous avons retenu la deuxième partie de la nuit, pour laquelle des forts contrastes thermiques peuvent être observés. À 2h, le 17 mars, pour la *quasi*-totalité de l'espace étudié, les températures sont estimées positives, à l'exception de l'extrémité nord et de quelques « poches » froides (à l'ouest d'Orbais-l'Abbaye, près de Chambrecy et de Germaine). Nous pouvons observer quelques similitudes entre la répartition des températures et celles des altitudes (Carte XVI.4), et cela apparaît de plus en plus marqué à 4 et 6h. Schématiquement, les zones froides sont localisées dans les vallées, notamment les vallées de la Vesle et de l'Ardre au nord-ouest (mais pas celle de la Marne), au fond des vallons (par exemple, près de Germaine) et dans la plaine (au nord de Reims et à l'est de la Côte des Blancs). À l'inverse, les résultats des simulations donnent des plateaux beaucoup plus chauds. De plus, nous pouvons distinguer très nettement une « poche » chaude au sud de la station de Reims-Courcy, correspondant à l'agglomération de Reims. Le modèle Meso NH décrit ici l'influence des zones urbaines sur les températures. Ceci se retrouve pour la ville d'Épernay, même si la poche chaude s'étend, de manière suspecte, vers Aÿ-Champagne²⁹⁴.

La topographie et la présence de zones urbaines jouent donc un rôle important dans la variabilité spatiale des températures (étendue supérieure à 9°C à 6h). Des écarts importants apparaissent alors pour des distances de quelques kilomètres et s'intensifient au cours de la nuit (par exemple, 4°C sur 8 km du coteau de Sillery à 6h). De plus, nous pouvons remarquer également l'influence de l'orientation des coteaux sur leurs températures. Ainsi, les secteurs nord ou nord-est sont systématiquement plus froids, pour une altitude donnée, que les adrets. Ceci est particulièrement visible pour la Montagne de Reims. Compte tenu de la direction du flux général (Carte XVI.6), les coteaux au vent sont plus froids que ceux abrités, ce qui corrobore les mesures sur le terrain de I. Sarmir [1995]. Après le lever du soleil, le champ thermique redevient assez homogène.

294. L'observation des deux cartes des classes *urbaines* d'occupation du sol, exposées dans l'Annexe K (information utilisée comme entrée du modèle et différente de la BD Carto présentée dans la deuxième partie) nous a montré une zone urbaine à l'est d'Aÿ-Champagne, particulièrement dense et ne correspondant pas à la réalité sur le terrain. Une mauvaise définition de la nature du substrat a pu, dans ce cas, conduire à ce résultat suspect.



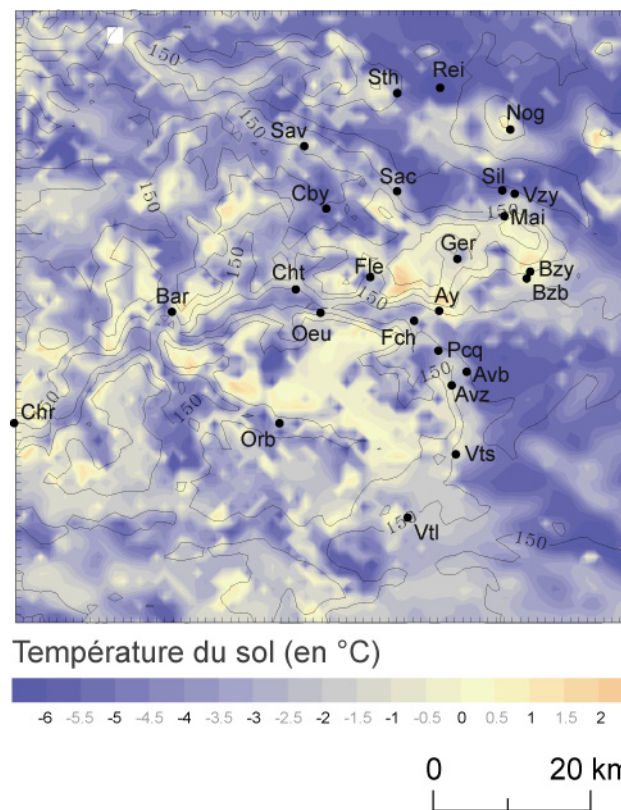
Carte XVI.8 : Simulation du champ de température à 2 m de la surface, au cours de la nuit du 16 au 17 mars 2003 (2, 4, 6 et 8h UTC)

Données : MESO NH - Météo France, résolution 1 km
 Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

Température du sol

La Carte XVI.9 présente le résultat, le 17 mars 2003 à 6h (UTC), de la simulation de la température du sol. La répartition obtenue suit, à nouveau, celle du relief. Les plateaux, telle la Montagne de Reims, se détachent très nettement et les vallées se dessinent bien. Il existe une correspondance, en toute logique, entre la Carte XVI.9 et celle des températures à 2 m (Carte XVI.8). Cependant, nous pouvons remarquer que les zones urbaines sont moins prises en compte dans la simulation, puisque les *îlots de chaleur urbains* ne se distinguent plus aussi nettement ici.

En outre, nous pouvons observer que l'orientation des coteaux par rapport au flux général influe encore considérablement sur les températures ; cela est très net pour la butte de Nogent-l'Abesse. Cependant, le schéma exposé ci-dessus n'est pas aussi simple. Par exemple, alors que les températures à 2 m sur le sud-est de la Montagne de Reims étaient plus chaudes qu'au nord-est, à une altitude donnée (Carte XVI.8), le secteur à l'ouest de Bouzy apparaît ici particulièrement froid. La BD Carto (Carte XVI.4, p. 281) indique un changement de la nature du substrat à cet endroit ; ce ne sont plus des formations boisées mais des zones de cultures, ce qui pourrait expliquer ce résultat.



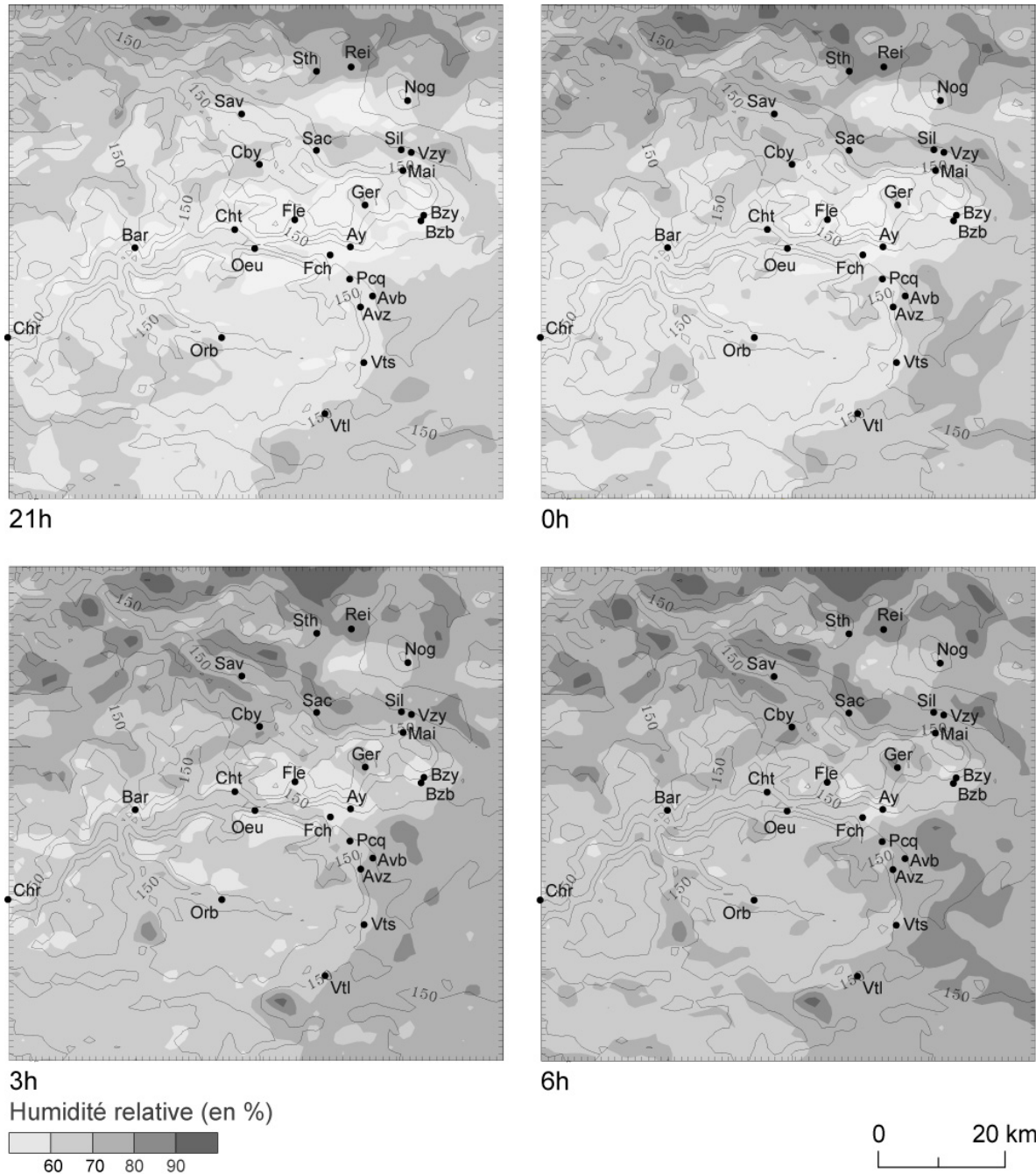
Carte XVI.9 : Simulation du champ de température du sol, le 17 mars 2003 à 6 UTC

Données : MESO NH - Météo France, résolution 1 km
 Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

XVI.2.5 - Humidité

Parmi les autres résultats possibles des simulations du modèle Meso NH, nous avons souhaité étudier la répartition et l'évolution du champ d'humidité relative, en raison de sa relation avec le refroidissement nocturne. Par exemple, lorsque que l'air est humide, les

pertes énergétiques nocturnes du sol peuvent être compensées par le rayonnement atmosphérique vers la terre. En outre, l'humidité augmente assez vite dès la tombée de la nuit, particulièrement dans les parties basses du nord et de l'est (plus froides), et atteint ses valeurs maximales vers 6h UTC (globalement entre 60 et 80%). La Carte XVI.10 de cette humidité relative à 2 m (à 6h) est approximativement l'image inverse de la répartition des températures (à la même hauteur, Carte XVI.8). Elle traduit en fait la relation entre la température de l'air et sa capacité hygrométrique. Une étude plus détaillée pourrait permettre d'améliorer les résultats de ce champ météorologique, ici redondant avec le champ des températures.



Carte XVI.10 : Simulation du champ d'humidité relative à 2 m, le 17 mars 2003 à 6 UTC

Données : MESO NH - Météo France, résolution 1 km
Les abréviations des stations sont rappelées sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.

XVI.2.6 - Superposition des champs de vent et de température

Afin de mieux distinguer les relations entre les écoulements et les températures, nous avons superposé les résultats des simulations des deux paramètres, vent et température, à 6h, heure vers laquelle se produisent les minima thermiques (Carte XVI.11).

Très schématiquement, les zones où l'intensité du vent est faible sont caractérisées par des températures froides, l'air froid s'accumulant par gravité. Ainsi, les secteurs froids simulés sont localisés dans les fonds de vallon et les vallées, excepté la Vallée de la Marne, et dans les plaines du nord et de l'est de la zone d'étude : les températures sont estimées négatives.

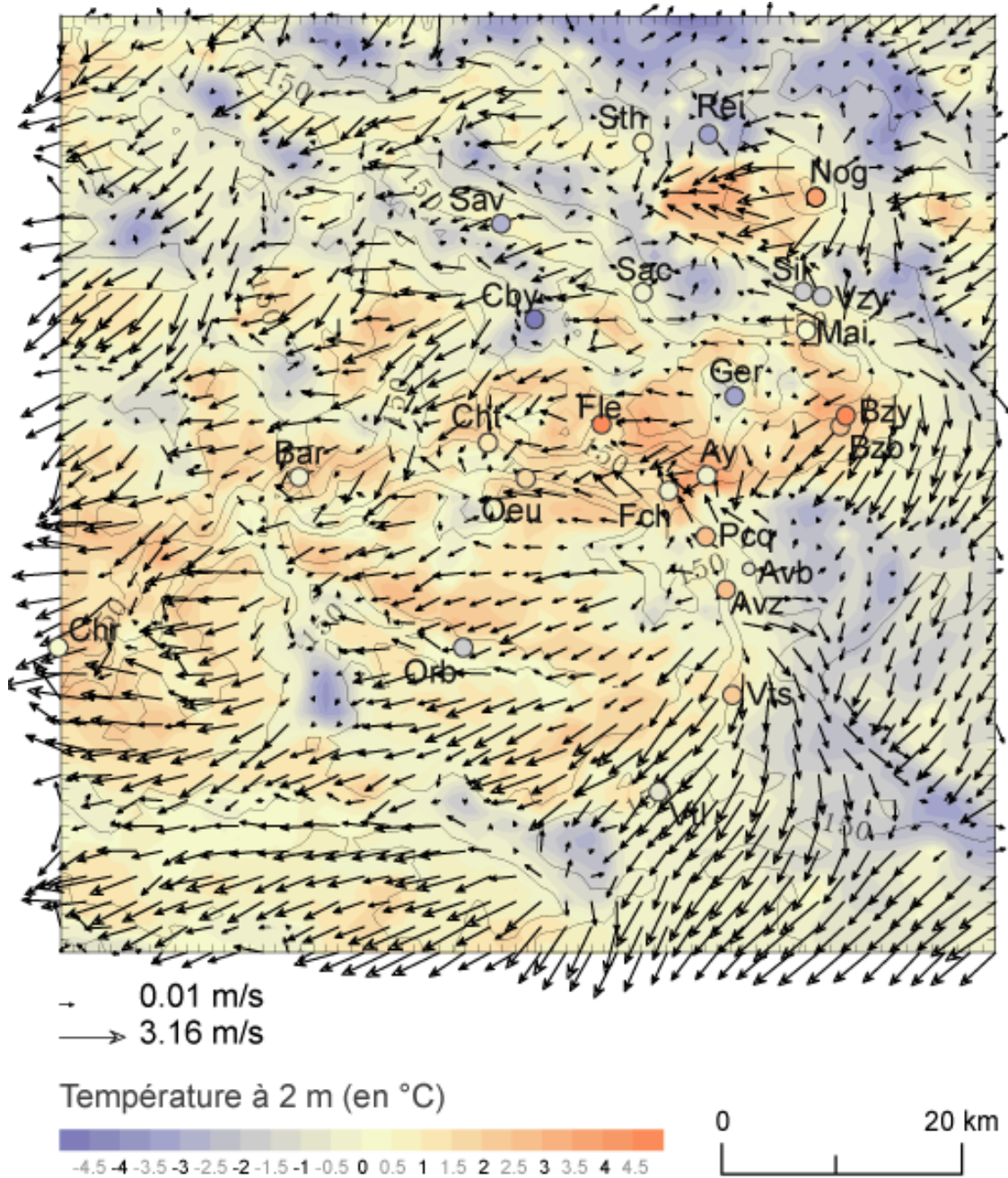
Les résultats des simulations corroborent les mesures sur le terrain faites par G. Beltrando *et al.* [1992] et I. Sarmir [1995], révélant une interaction entre les brises de pente et le flux général influant sur l'accumulation d'air froid. L'exemple de l'est de la Montagne de Reims est particulièrement illustratif :

- au nord, les brises de pente rencontrent le flux général en bas de coteau, ce qui bloque l'écoulement de l'air froid ;
- par contre, à l'est, le champ de vent simulé ne montre qu'un vent de nord assez fort, qui semble gommer l'accumulation à cet endroit ;
- au sud, nous pouvons remarquer un secteur très froid lié, semble-t-il, aux écoulements d'air froid du coteau d'Avize bloqués par ce flux de nord.

D'une manière générale, il apparaît, assez clairement au nord et à l'est de la zone d'étude, que les coteaux exposés au vent sont beaucoup plus froids que ceux sous le vent. Plus à l'ouest, la topographie de la cuesta d'Île-de-France, pourtant assez peu accentuée, complexifie ce comportement.

Sur la Carte XVI.11, nous avons également ajouté les températures mesurées aux stations. La comparaison montre que, dans l'ensemble, la simulation des températures par Meso NH est cohérente. Toutefois, nous pouvons remarquer que les températures simulées sont plutôt sous-estimées pour les stations relevant des températures relativement élevées (-3.0°C entre la mesure et la simulation pour Fleury-la-Rivière, -2.2°C pour Bouzy haut) et surestimées pour les stations froides (par exemple, 2.7°C pour Chambrecy et 2.2°C Germaine)²⁹⁵. Cette première comparaison entre simulation et observation mérite un développement plus important.

295. Signalons que les écarts les plus importants entre les températures mesurées et simulées (à 6h UTC) sont de 3.9°C pour Savigny-sur-Ardre et de 3.6°C pour Aÿ-Champagne.



Carte XVI.11 : Simulation des champs de vent et de température à 2 m, le 17 mars 2003 à 6 UTC

Données : MESO NH - Météo France, résolution 1 km
 Les abréviations des stations sont rappelés sur le rabat de la 3^{ème} de couverture.
 Pour chaque station, nous avons indiqué la température mesurée à 2 m, sous abri (selon la même échelle thermique).

XVI.3 - Validation des sorties du modèle à partir des données mesurées

La validation des simulations de Meso NH a été réalisée à partir de la comparaison avec les mesures des stations automatiques. Cette étape n'a été possible que pour les paramètres pour lesquels nous disposons d'une information, soit la température, la direction et la vitesse du vent. La validation peut être qualitative (reproduction des phénomènes) et quantitative (intensité des phénomènes).

XVI.3.1 - Validation des simulations des températures

La lecture de la Carte XVI.11 nous a donné un premier aperçu de la qualité des températures simulées, mais la comparaison, plutôt qualitative, ne concernait que l'échéance 6h UTC. Nous avons alors confronté les évolutions horaires des températures simulées et mesurées. La Figure XVI.5 rassemble ces comparaisons pour six stations, trois situées plutôt vers le mi-coteau (Châtillon-sur-Marne, Bouzy haut et Sacy) et trois de bas de coteau (Fort-Chabrol, Orbais-l'Abbaye et Chambrecy), qui représentent les différents cas de l'ensemble des situations rencontrées.

Pour Châtillon-sur-Marne²⁹⁶, le profil horaire des températures simulées correspond bien aux observations. La diminution des températures (9°C entre 18 et 6h UTC) est régulière. À l'inverse, pour Sacy²⁹⁷, nous observons des irrégularités dans la décroissance des températures, qui pourraient être liées à des facteurs locaux, comme peut-être des épisodes brumeux passagers²⁹⁸.

L'évolution horaire des températures simulées et mesurées pour la station de Bouzy (haut), montrant une sous-estimation du modèle Meso NH, se retrouve pour plusieurs stations situées vers mi-coteau : Plumecoq (Chouilly), Nogent-l'Abesse, Saint-Thierry, Avize haut, Vertus, Fleury-la-Rivière.

En revanche, les minima horaires des stations de bas du coteau sont souvent surestimés par le modèle. Nous avons distingué trois profils-types :

- une diminution brusque des températures à 2 m en fin de nuit non appréhendée par le modèle (Fort-Chabrol²⁹⁹), ce qui est le plus fréquent ;
- cette même diminution mais précédée d'une sous-estimation (Orbais-l'Abbaye) ;
- une surestimation tout au long de la nuit (Chambrecy).

Cette validation *qualitative* peut être associée à une estimation quantitative des écarts entre les températures simulées et mesurées, que nous avons choisis ici de calculer pour les données à 6h, heure proche du minimum. En moyenne, la différence en valeur absolue entre la simulation et l'observation est de 1.88°C (médiane : 1.87°). Pour Bouzy bas, Châtillon-sur-Marne et Œuilly, l'estimation par le modèle Meso NH est très bonne, avec des écarts respectifs de 0.01, 0.24 et 0.29°C (en valeur absolue). En revanche, les températures relevées à 6h à Savigny-sur-Ardre et à Ay-Champagne sont inférieures de plus de 3°C à celles estimées, -3.90 et -3.58°C. Pour Fleury-la-Rivière, à l'inverse, la sous-estimation est de 3.02°C.

296. Comme pour Mailly, Œuilly, Vert-Toulon, etc.

297. Et Avize bas.

298. La station de Sacy est située en périphérie d'un secteur de cultures de plein champs en plaine.

299. Mais aussi Sillery, Savigny-sur-Ardre et Verzenay.

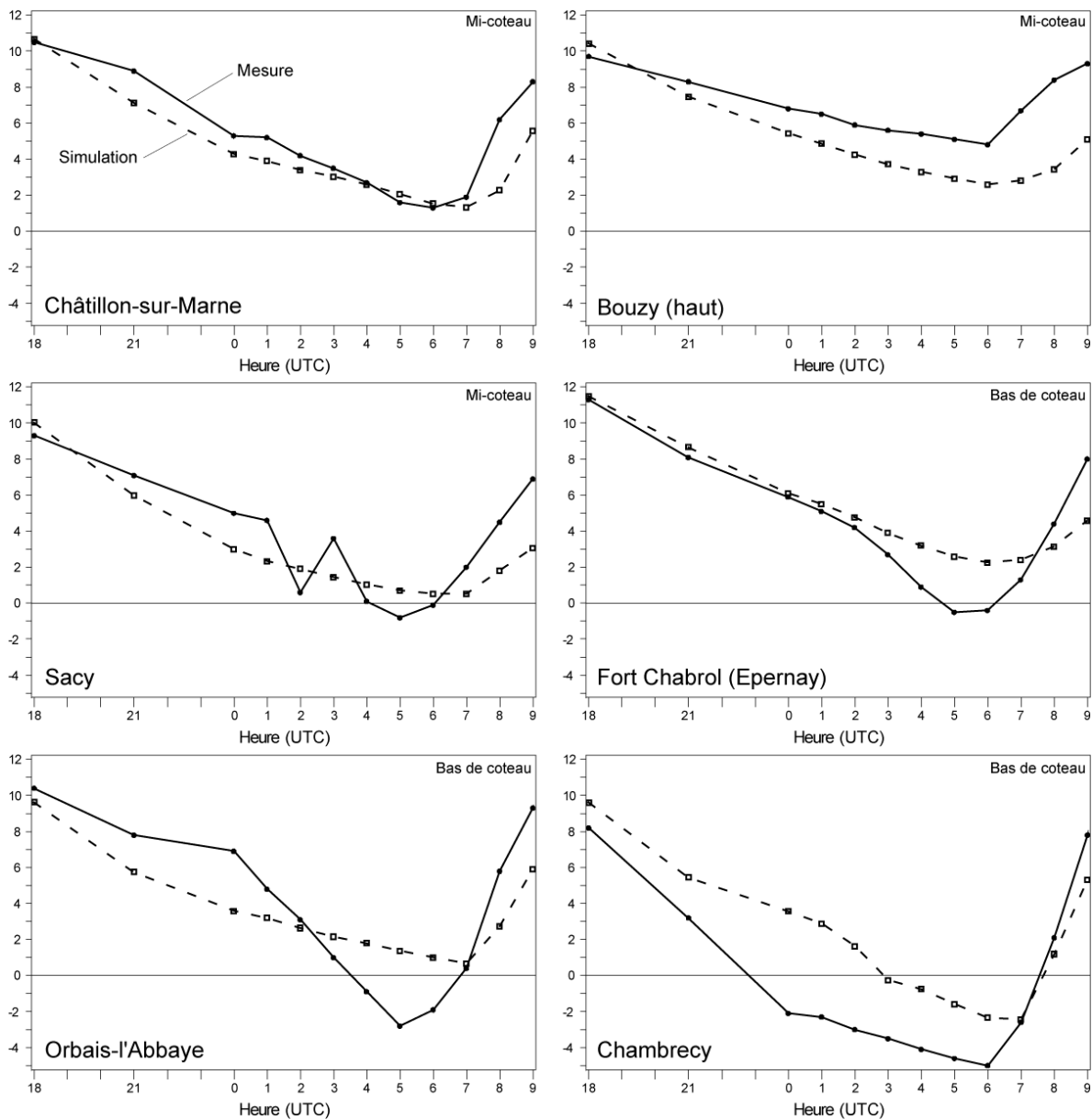


Figure XVI.5 : Profils horaires des températures mesurées et simulées (à 2 m), dans la nuit du 16 au 17 mars 2003, pour six stations représentatives

Données : MESO NH - Météo France, résolution 1 km
16-17/03/2003, CiviC, Météo France

XVI.3.2 - Validation des simulations des vents

Dans une démarche similaire, nous avons comparé les sorties relatives au vent du modèle Meso NH aux données mesurées par les stations météorologiques. La Figure XVI.6 représente ainsi les profils des vecteurs vent mesurés et simulés. Même si les directions de vent sont souvent assez similaires, les vitesses simulées sont, à de rares exceptions près, plus fortes que les vitesses mesurées. Rappelons que les mesures de vitesse sont arrondies à l'unité, ce qui peut renforcer les différences. La comparaison des vecteurs n'est alors pas très facile. En somme, la validation du modèle est qualitative et non quantitative pour les données de vent.

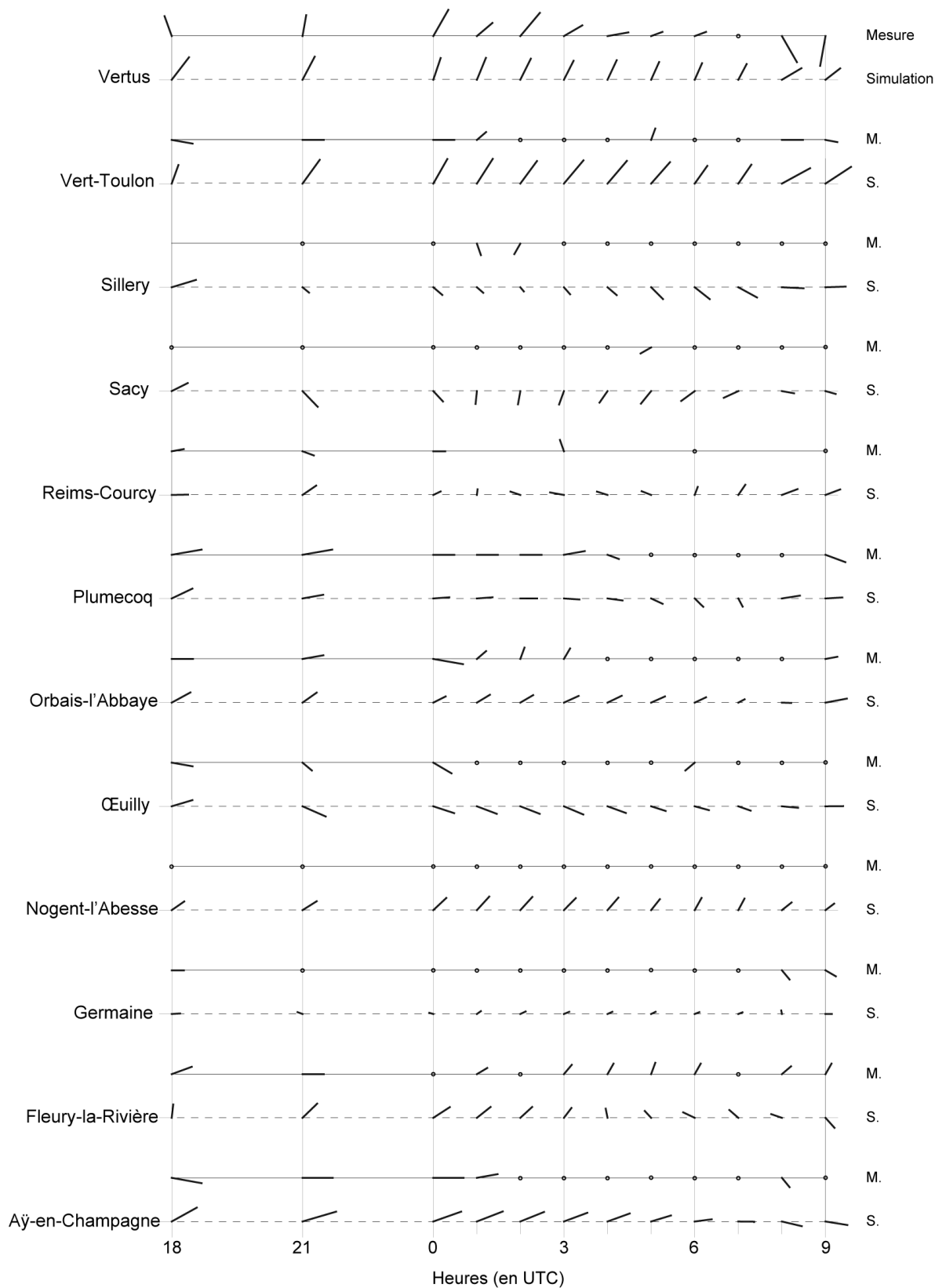


Figure XVI.6 : Profils horaires des vecteurs vent mesurés et simulés (à 2 m) dans la nuit du 16 au 17 mars 2003

Données : MESO NH - Météo France, résolution 1 km
16-17/03/2003, CVC, Météo France

Conclusion du chapitre XVI

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté et discuté les résultats d'une simulation de l'atmosphère réalisée en utilisant un modèle numérique puissant, Meso NH, bien adapté à l'échelle du vignoble marnais. L'objectif initial de cette simulation était de mieux appréhender l'influence des écoulements de l'air sur le champ des températures, liée fortement à la topographie, à travers l'étude de différentes dates représentatives des situations météorologiques potentiellement gélives rencontrées au printemps dans le vignoble marnais. La mise en œuvre du modèle Meso NH étant toutefois assez lourde, la simulation n'a été réalisée que pour la nuit du 16 au 17 mars 2003 (avec des conditions radiatives), sur un espace de dimension 70 km x 70 km comprenant l'ensemble du vignoble marnais (incluant deux zooms sur le nord de la Montagne de Reims et le sud d'Épernay).

Les résultats apparaissent, dans l'ensemble, assez satisfaisants, dans la mesure où plusieurs phénomènes locaux bien connus (par exemple, l'inversion thermique ou encore la brise de pente) sont reproduits par le modèle. De plus, celui-ci semble bien appréhender l'évolution des processus dans le temps. Par exemple, l'analyse des sorties de champs de vent et de température au cours de la nuit montre que les zones les plus froides apparaissent dans le fond des vallées et vallons perpendiculaires au flux général, ainsi qu'en bas des coteaux exposés au vent. Pour ces coteaux, le modèle simule une opposition entre les brises de pente et le flux général, ce qui provoque une accumulation d'air froid. Ces résultats confirment donc ce qui a déjà été observé sur le terrain par G. Beltrando *et al.* [1992] et I. Sarmir [1995].

Même si les images obtenues semblent cohérentes, les simulations doivent ensuite être confrontées aux mesures des stations météorologiques pour être validées. Cette étape est difficile pour les données de vent, du moins quantitativement (notamment en raison du format des données observées arrondies à l'unité). Pour les températures (à 2 m), les résultats diffèrent selon les stations. Pour celles situées vers le bas des coteaux, les températures simulées sont ainsi, très souvent, surestimées de plusieurs degrés, à l'inverse des stations de mi-coteau.

En somme, ces premiers résultats sont encourageants et surtout cohérents. Toutes les sorties pour cette nuit du 16 au 17 mars 2003 n'ont pas été encore entièrement exploitées. Nous pouvons envisager une approche plus quantitative, par exemple par l'analyse de corrélations vectorielles sur les champs de vent (dans le temps, dans l'espace). Il sera également intéressant de calculer des écarts thermiques entre les bas de coteaux au vent et sous le vent. Ces écarts permettront de *corriger* et d'affiner les spatialisations des températures minimales précédemment exposées³⁰⁰. Enfin, des simulations réalisées sur d'autres dates, avec des conditions atmosphériques différentes, permettront de dégager ou non des récurrences sur la localisation des zones froides, donc potentiellement gélives.

300. Ceci suppose une jointure spatiale entre les sorties du modèle Meso NH et les précédentes spatialisations, en raison de la non correspondance des projections, ce qui n'a pas encore été réalisé.

Conclusion

Bilan et perspectives

L'objectif de cette thèse était d'améliorer l'estimation de l'aléa gélif au printemps dans le vignoble marnais, à travers l'étude et la modélisation des variabilités spatiale et temporelle des températures minimales et des écoulements de l'air. Aux échelles fines, pertinentes pour décrire le vignoble marnais, il est bien connu que le climat est fortement affecté par les interactions entre l'atmosphère et la surface terrestre. Ainsi, l'influence des facteurs locaux, comme la topographie ou encore l'occupation du sol, est particulièrement prononcée lors des nuits de ciel clair et de vent calme, propices à de forts refroidissements et à une variabilité spatiale importante des températures minimales. La modélisation de telles variations constitue alors un enjeu important pour les acteurs du vignoble et un défi pour le géographe-climatologue. C'est ce défi que nous avons essayé de relever ici.

Nous avons pu disposer pour cela d'un nombre important de données climatiques (température, nébulosité et vent pour six printemps, 1998-2003) issues d'un réseau dense et relativement homogène de 23 stations météorologiques implantées dans ou à proximité du vignoble marnais et gérées par le CIVC et par Météo France. Nous avons également eu recours, pour appréhender l'effet des facteurs locaux, à des bases de données d'occupation du sol et d'altitude (IGN).

L'approche méthodologique adoptée revêt une forte composante statistique, indispensable pour répondre aux objectifs de modélisation de la répartition des températures minimales dans le vignoble marnais. La palette d'outils envisageables étant large, nous avons dû déterminer, à de nombreuses reprises, ceux qui étaient les plus appropriés pour répondre à nos diverses questions. En outre, une attention particulière a été consacrée à la restitution graphique et cartographique de nos résultats, qui nous sont apparus des vecteurs privilégiés pour rendre compte des dimensions spatiale et temporelle au cœur de ce travail.

Les principales conclusions auxquelles nous avons abouti à l'issue de cette étude peuvent être résumées de la manière suivante :

VARIABILITES SPATIALE ET TEMPORELLE DES TEMPERATURES MINIMALES ET DES ECOULEMENTS DE L'AIR

L'étude des variabilités spatiale et temporelle des températures minimales et des écoulements de l'air dans le vignoble marnais nous a permis de mettre en évidence des phénomènes nocturnes locaux, tels les brises de pente et l'accumulation d'air froid en bas de coteau. Si ces observations sont souvent rapportées dans la littérature topoclimatologique, notre étude systématique et statistique des nombreuses données climatiques, issues d'un réseau relativement dense et récent, a permis d'approfondir la connaissance du topoclimat du vignoble marnais pour les nuits printanières.

- L'étude de la variabilité spatiale des températures minimales printanières s'est révélée très instructive dans la mesure où elle nous a donné un premier aperçu du comportement thermique des différentes stations météorologiques implantées dans le vignoble marnais. Nous avons ainsi pu identifier les stations plutôt *froides* ou plutôt *chaudes*, notamment à partir d'une typologie des stations faites sur les nuits de ciel clair et de vent calme. Dans ces diverses analyses, l'influence de la topographie, qui s'exprime essentiellement à travers la position des stations sur le coteau, a été très souvent mise en évidence : les stations situées vers le bas du coteau ont tendance à être plus froides. Notre apport a été ici de préciser les ordres de grandeur de la variabilité au cours de la nuit, au cours du printemps ou encore entre les stations.
- L'étude des écoulements de l'air a été plus délicate étant donnée la nature vectorielle des données de vent (vitesse et direction). Nos analyses ont toutefois fait clairement ressortir que, dans le vignoble marnais, le vent nocturne printanier était un vent faible et relativement stable au cours de la nuit. La juxtaposition des roses des vents des stations avec la carte du relief a montré une influence certaine de ce dernier, pourtant assez peu contrasté : vents plus forts pour des sites dégagés ; écoulements canalisés par les vallées ; mise en évidence de brises de *pente* s'écoulant vers le bas des coteaux pendant la nuit. Plus généralement, nous avons identifié, pour plusieurs stations, un système diurne de brises thermiques (vents faibles). La nuit, ces brises thermiques peuvent influencer la variation spatiale des températures minimales.
- L'étude de l'influence des conditions atmosphériques nous a montré que les nuits de ciel clair étaient plutôt caractérisées par de forts refroidissements nocturnes, par une grande variabilité spatiale des températures minimales et par des inversions thermiques importantes. En revanche, il a été difficile de mettre en évidence clairement l'influence du vent.
- Enfin, une étude plus spécifique des nuits de gel, pour les six printemps considérés dans cette thèse, nous a permis de montrer leur très forte variabilité temporelle interannuelle. L'influence du relief est, encore une fois, déterminante sur la variabilité spatiale, les bas de coteau étant particulièrement gélif. Si les conditions de ciel clair et de vent calme favorisent l'apparition de températures négatives, l'intensité des gelées est plutôt associée à des refroidissements advectifs accompagnés d'une faible couverture nuageuse.

MODÉLISATIONS SPATIALES DES TEMPÉRATURES MINIMALES

Au-delà de cet aperçu du topoclimat nocturne printanier du vignoble marnais, nous avons proposé plusieurs modélisations de la répartition spatiale des températures minimales, dans une optique de spatialisation de l'aléa gélif sur l'ensemble du vignoble.

- En reprenant le principe de l'adaptation statistique de Météo France et en l'appliquant à un plus grand nombre de stations (19), nous avons pu améliorer l'estimation des températures minimales en indices actinothermiques jusqu'alors faite pour seulement quatre points du vignoble marnais. À l'exception des dates où l'évaluation par Météo France de la température minimale et du type de masse d'air à la station de référence Reims-Courcy est peu précise, le modèle a permis de prévoir correctement l'aléa gélif.
- Pour affiner l'estimation des températures minimales, encore ponctuelle dans l'adaptation statistique, nous avons mis en œuvre plusieurs méthodes d'interpolation des données relevant de la géostatistique et de l'approche multi-critères. Ainsi, nous avons pu mettre en évidence la prépondérance des facteurs locaux, en particulier la pente et l'altitude relative, sur la variation spatiale des températures minimales. En revanche, il a été plus difficile d'identifier des structures spatiales nettes, des gradients par exemple, sans doute en raison de l'échelle topoclimatique.
- À partir des descripteurs locaux retenus (altitude, altitude relative, pente, composante nord-sud et est-ouest de l'orientation) et des coordonnées géographiques des stations, nous avons réalisé une spatialisation des écarts thermiques à Reims-Courcy lors des nuits de ciel clair et de vent calme. Celle-ci a été réalisée à partir des moyennes des modèles journaliers pour ces nuits. Dans une approche opérationnelle, ce résultat pourrait permettre d'estimer un aléa gélif pour l'ensemble du vignoble marnais lors de conditions atmosphériques stables, à partir de la seule température minimale à Reims-Courcy.
- Les modèles journaliers ont montré des résultats contrastés, tant sur les qualités que sur les descripteurs significatifs. Si nous avons pu relever certaines récurrences liées aux conditions atmosphériques, reconstruire le champ thermique s'avère complexe et nécessite, très certainement, la prise en compte d'autres facteurs, notamment le vent, la nébulosité ou encore l'état hydrique des sols, ce qui est possible avec un modèle numérique puissant de la dynamique de l'atmosphère, tel que Meso NH.
- Des simulations de ce modèle réalisées pour une date représentative des conditions radiatives, ont donné des résultats encourageants et, qualitativement, proches des mesures des stations. Réalisées au cours des derniers mois de thèse, les premières analyses ont ainsi montré la mise en place des brises de pente et leurs interactions avec le vent général. L'influence de la topographie de la Champagne, pourtant peu contrastée, s'est révélée à nouveau prépondérante dans les variations spatiales des champs de vent et de températures.

Cette thèse, qui s'inscrit dans un contexte plus large, est loin de clore cette thématique de recherche sur ce vignoble. Ainsi, pour terminer cette conclusion générale, nous avons choisi d'évoquer les quelques pistes de recherche qui nous tiennent particulièrement à cœur et qui mériteraient d'être examinées plus en détail :

- En premier, il faudrait continuer à exploiter les sorties du modèle Meso NH, dont nous avons montré ici les premiers résultats. Il s'agira, par exemple, de *quantifier* l'effet des interactions vent général – brise de pente. Nous pouvons imaginer de définir des coefficients correcteurs selon l'exposition des secteurs viticoles et d'affiner ainsi la spatialisation réalisée précédemment. En outre, la simulation pour une seule date ne donne pas d'*épaisseur temporelle*. Il serait intéressant, comme envisagé initialement, de simuler d'autres dates définies par d'autres conditions atmosphériques.
- La validation des spatialisations et des simulations de Meso NH, qui n'a été réalisée qu'à partir des données des stations, mériterait d'être complétée par des campagnes de mesures sur le terrain et éventuellement, à une échelle plus fine, sur quelques secteurs viticoles choisis au vu des résultats de cette thèse.
- Les résultats de la troisième partie ont souligné l'influence des conditions atmosphériques sur les températures minimales. Cependant, la classification des nuits de ciel clair et de vent calme, certes commode, a montré cependant ses limites. Les conditions devront donc être définies plus précisément pour permettre une étude systématique et plus approfondie des relations entre le champ thermique à une échelle fine et les configurations isobariques à l'échelle régionale.
- Enfin, une dernière piste intéressante et amorcée (en collaboration avec H. Quenol) est l'utilisation des images satellitaires en infrarouge, qui fournissent une mesure de la répartition spatiale des températures de surface. Nous pouvons alors confronter cette image, d'une part, aux données des stations et, d'autre part, à la spatialisation des températures minimales obtenue par régression multiple, voire les intégrer à ces dernières modélisations (pour amélioration). Toutefois, cette comparaison peut s'avérer délicate en raison de l'échelle *grossière* des images infrarouges pour l'instant à notre disposition et en raison d'un décalage entre les températures de surface et celles de l'air (à 2 m, sous abri).

Pour conclure, nous voudrions signaler que cette étude réalisée sur le vignoble champenois est transposable à d'autres espaces et à d'autres problématiques pour lesquelles des phénomènes complexes et multi-échelles interviennent, en particulier dans ses aspects méthodologiques.

L'angoisse du temps qui passe nous fait parler du temps qu'il fait.

J.-P. Jeunet

Bibliographie

- ABBOTT P.F., 1986. *Guidelines on the quality control of surface climatological data*, Genève, Technical Note n°111, WMO, 71 p.
- AIGRAIN P., 2002. 'Note de conjoncture mondiale', *Bulletin de l'OIV*, vol. 75, no. 855-856, pp. 323-355.
- ANDRÉ J.-C. et MAHRT L., 1982. 'The nocturnal surface inversion and influence of clear-air radiative cooling', *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 39, pp. 864-878.
- ANTONIOLETTI R., 1988. 'Délimitation des zones à risques de gel à l'aide de thermographies infrarouges satellitaires', *Publications de l'Association internationale de climatologie*, vol. 1, p. 41-46.
- ARLERY R., 1958. 'Contribution à l'appréciation du risque dans la lutte contre les gelées de printemps', *La Météorologie*, vol. 4, no. 50, pp. 139-148.
- ARNAUD M. et EMERY X., 2000. *Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatiques*, Hermès, Paris, 221 p.
- ASTRUC J., HÉRITIER J. et JACQUINET J.-C., 1980. 'Zonage des potentialités viticoles du département de l'Aude', *Le Progrès agricole et viticole*, vol. 15-16, pp. 296-320.
- AURIAC F. et REY V., 1998. *Atlas de France. Volume 8 : L'espace rural*, RECLUS, la Documentation française, Montpellier, Paris, 128 p.
- AVC (Association Viticole Champenoise), 1991. 'Les gelées de printemps', *Le vigneron Champenois, Hors Série*, p. 63.
- AVISSAR R. et MAHRER Y., 1988. 'Mapping frost-sensitive areas with a three-dimensional local scale numerical model. Part I: Physical and numerical observations ; Part II: Comparison with observations', *Journal of Applied Meteorology*, vol. 27, pp. 400-426.
- BABUSIAUX C., 2002. *L'assurance récolte et la protection contre les risques en agriculture*, Ministère de l'agriculture et de la pêche, Paris, 164 p.
- BAGDONAS A., GEORG J.C. et GERBER J.F., 1978. *Techniques of frost prediction and methods of frost and cold protection*, Organisation Météorologique Mondiale, Genève, Technical Note n°157, WMO n°487, 160 p.
- BAGGIOLINI M., 1952. 'Les stades repères dans le développement de la vigne et leur utilisation pratique', *Revue romande d'agriculture, de viticulture et d'arboriculture*, vol. 8, no. 1, pp. 4-6.
- BAILLY A., 2000. 'Le temps des cépages. Du terroir au système-monde', *Annales de géographie*, vol. 109, no. 614-615, pp. 516-524.
- BALLIF J.-L. P., 1999. 'La plaine et le vignoble de Champagne', in *Ruissellement et érosion en Champagne sur sols de vignes et de cultures : observations, mesures, prévisions et remèdes*, Editions Johanet, Paris, pp. 15-27.
- BÉLAIR S., LACARRÈRE P., NOILHAN J., MASSON V. et STEIN J., 1998. 'High-resolution simulation of surface and turbulent fluxes during HAPEX-MOBILHY', *Monthly Weather Review*, vol. 126, pp. 2234-2253.

- BELTRANDO G. et CHÉMERY L., 1995. *Dictionnaire du climat*, Larousse, Paris, 344 p.
- 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 Denis Diderot (Paris 7), 193 p.
- BELTRANDO G., 1998. 'Températures minimales du printemps en Champagne viticole : quelques résultats à partir d'un nouveau réseau de stations automatiques', *La Météorologie*, vol. 8, no. 21, pp. 30-44.
- BELTRANDO G., BRIDIER S., MADELIN M. et QUENOL H., 2002. 'Evaluation de l'impact d'un futur remblai de la ligne à Grande Vitesse Est Européenne sur le risque de gel dans le vignoble de Champagne', *Hommes et Terres du Nord*, vol. 1, pp. 40-52.
- BELTRANDO G., LECOMPTE M. et 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*, vol. 5, pp. 335-342.
- BELTRANDO G., QUENOL H. et BRIDIER S., 1995. *Estimation des modifications thermiques générées par le remblai de la futur ligne TGV Est européen dans le vignoble champenois*, Rapport d'expertise réalisé pour le Syndicat Général des Vignerons de la Champagne, 56 p.
- BÉNICHOU P. et LE BRETON O., 1987. 'Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques', *La Météorologie*, vol. 7, no. 19, pp. 23-35.
- BÉNICHOU P., 1985. *Classification automatique de configurations météorologiques sur l'Europe occidentale*, Météo-France, Toulouse, 18, 156 p.
- BENKO G.B. et TESSON T., 1991. 'Une géographie des boissons (2ème partie). Le champagne : géographie d'un succès', *Acta Geographica*, vol. 85, pp. 24-45.
- BESLEAGA N., 1991. *Vagues de froid sur la France et les pays voisins : conditions synoptiques, contrôle des prévisions*, Direction de la météorologie nationale, Boulogne-Billancourt, 41 p.
- BESSELAT B., 1987. 'Les prévisions de récolte en viticulture', *Connaiss. Vigne Vin*, vol. 21, no. 1, pp. 1-12.
- BIGOT S., CHARABI Y. et BELTRANDO G., 2002. 'Evolution des températures de la métropole lilloise entre 1950 et 2000', *Hommes et Terres du Nord*, vol. 1, pp. 3-14.
- BLONDEAU P. et GRAVIER J., 1995. 'Risques climatiques et arboriculture fruitière dans la Sarthe', *Norois*, vol. 42, no. 166, pp. 363-379.
- BOIS P., MAILLOUX H., OBLED C. et DE SAINTIGNON M.-F., 1995. *Atlas expérimental des risques de pluies intenses – Cévennes-Vivarais*, Pôle grenoblois d'études et de recherche pour la prévention des risques naturels, Grenoble, 22 cartes et une notice sous pochette, format A3 p.
- BONHOMME M. et RAGEAU R., 1993. 'Seuils de sensibilité au froid du matériel végétal en arboriculture fruitière', in *Actes de séminaires de la Com. d'agrométéo. de l'INRA "Le gel en agriculture"*, INRA, Paris, pp. 53-66.

- BONNARDOT V., 1992. 'Recherche sur les climats viticoles en Bourgogne orientale', *Publications de l'Association internationale de climatologie*, vol. 5, pp. 393-401.
- BONNARDOT V., 1997. 'Indices climatiques et estimation de la date des vendanges en Côte de Beaune (période 1975-1996)', *Revue des Œnologues*, vol. 83, pp. 35-36.
- BOOTSMA A., 1976. 'Estimating minimum temperature and climatological freeze risk in hilly terrain', *Agricultural Meteorology*, no. 16, pp. 425-443.
- BORDIN P., 2002. *SIG : concepts, outils et données*, Hermès, Paris, 259 p.
- BOTTON S., DUQUENNE F., EGELS Y., EVEN M. et WILLIS P., 1997. *GPS : localisation et navigation*, Hermès, Paris, 159 p.
- BOUCHET R.J., 1966. 'Le risque de gelées', *Phytoma*, pp. 27-31.
- BOUGEAULT P. et MASCART P., 2001. *The meso-NH Atmospheric Simulation System: Scientific Documentation*
[http://www.aero.obs-mip.fr/mesonh/dir_doc/book1]
- BOYER J.F., 1998. *Logiciel Khronostat d'analyse statistique de séries chronologiques*, IRD UR2 Programme 21 FRIEND AOC, Equipe Hydrologie UMRGBE, Université de Montpellier II, Ecole des Mines de Paris.
- BRANAS J., 1974. *Viticulture*, Dehan, Montpellier, 990 p.
- BRANAS J., 2002. 'Vignes et vins, 1. Le vignoble', in *Encyclopædia Universalis*, vol. 23, Encyclopædia Universalis, Paris, pp. 572-574.
- BRANAS J., BERNON G. et LEVADOUX L., 1946. *Éléments de viticulture générale*, Impr. Delmas, Ecole Nationale d'Agriculture, Bordeaux, Montpellier, 400 p.
- 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., QUENOL H. et 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*, vol. 8, pp. 233-240.
- BRIDIER S., QUENOL H. et BELTRANDO G., 2004. 'Cartographie du potentiel de refroidissement en situation radiative : application aux terroirs des Fonds de Sillery dans le vignoble de Champagne', *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 14, no. 1, pp. 119-132.
- BROCHOT A., 1999. 'La qualité, nouvelle arme de la "guerre de position" dans le vignoble de Champagne', *Sud-Ouest Européen*, no. 6, pp. 21-29.
- BRUN O. et CELLIER P., 1993. 'Gélivité des bourgeons', *Le Vigneron Champenois*, vol. 3, pp. 49-60.
- BRUN O., 1993. 'Efficacité et coûts des systèmes de lutte contre le gel', in *Actes de séminaires de la Com. d'agrométéo. de l'INRA "Le gel en agriculture"*, INRA, Paris, pp. 239-259.
- BRUNET R., FERRAS R. et THÉRY H., 1993. *Les mots de la géographie : dictionnaire critique*, RECLUS, la Documentation française, Montpellier, Paris, 518 p.

- BRUNT D., 1941. *Physical and dynamical meteorology*, Cambridge University Press, New York, 428 p.
- BRUTSAERT W., 1975. 'On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies', *Water Resources Research*, vol. 11, no. 5, pp. 742-744.
- BÜCHER A. et DESSENS J., 1991. 'Secular trend of surface temperature at an elevated observatory in the Pyrenees', *Journal of Climate*, vol. 4, pp. 859-868.
- BURROUGH P.A. et McDONNELL R., 2000. *Principles of geographical information systems*, Oxford University Press, Oxford, 333 p.
- BUTTROSE M.S. et HALE C.R., 1973. 'Effect of temperature on development of the grapevine inflorescence after bud burst', *American Journal of Enology and Viticulture*, vol. 24, no. 1, pp. 14-16.
- CALAME F., ROCHAIX M. et 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'OIV*, vol. 559, pp. 601-616.
- CARBONNEAU A., 1992. *Météorologie et viticulture*, Organisation Météorologique Mondiale, Météorologie agricole, Genève, Rapport CMAg n°42A, WMO TD n°484, 72 p.
- CARREGA P., 1994. *Topoclimatologie et habitat*, Analyse spatiale et appliquée. Thèse de doctorat de l'Université de Nice-Sophia Antipolis, Rev. Géogr. du Laboratoire d'Analyse Spatiale Raoul Blanchard, 408 p.
- CARREGA P., 1997. 'Les topoclimats dans le domaine méditerranéen', in *Le Climat, l'Eau et les Hommes*, V. Dubreuil et J.-P. Marchand, Presses universitaires de Rennes, Rennes, pp. 281-300.
- CARTER J.R., 1992. 'The effect of data precision on the calculation of slope and aspect using gridded DEMs', *Cartographica*, vol. 29, no. 1, pp. 22-34.
- CELLIER P. et ITIER B., 1984. 'Un modèle de prévision de la température minimale nocturne sous abri et à la surface du sol en conditions de gelées radiatives', *Journal de recherches atmosphériques*, vol. 18, no. 1, pp. 11-22.
- CELLIER P., 1984. 'Une méthode simple de prévision des températures de l'air et de la surface du sol en conditions de gelées radiatives', *Agronomie*, vol. 4, no. 8, pp. 741-747.
- CELLIER P., 1991. 'La prévision des gelées de printemps', *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 77, no. 6, pp. 55-64.
- CELLIER P., 1993. 'Mécanismes du refroidissement nocturne. Application à la prévision des gelées de printemps', in *Actes de séminaires de la Com. d'agrométéo. de l'INRA "Le gel en agriculture"*, INRA, Paris, pp. 145-164.
- CELLIER P., COCHARD H. et BONNEFOND J.-M., 1997. 'Modélisation agrométéorologique : cas de la prévision des gelées de printemps', in *Actes de l'Ecole-Chercheurs INRA en bioclimatologie*, INRA, Paris, pp. 399-409.
- CERTU (Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques), 1997. *Cohérence entre CORINE Land Cover et la BD Carto*, CERTU, Lyon, 60 p.

- CERTU (Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques) et IGN (Institut Géographique National), 1998. *BD Carto, structure utilisateur METL v98 : spécifications et descriptif de contenu*, METL, CERTU, IGN, Lyon, 106 p.
- CHADULE (Groupe), 1997. *Initiation aux pratiques statistiques en géographie*, Armand Colin, Paris, 203 p.
- CHAMPEAUX J.-L., BESSEMOULIN P. et PAYEN M., 1994. 'Les réseaux de mesure météorologique à méso-échelle', *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 7, pp. 24-34.
- CHAMPEAUX J.-L., FAVOT F., LACARRÈRE P., LEMOIGNE P., PAULAIS D. et STOLL M., 1997. 'Climatologie spatiale du vent sur la France en maille 1 km par simulation numérique de journées-étalons', *Publications de l'Association internationale de climatologie*, vol. 10, pp. 135-142.
- CHANG K.-T. et TSAI B.-W., 1991. 'The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping', *Cartography and Geographic Information Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 69-77.
- CHAPMAN L., THORNES J.E. et BRADLEY A.V., 2001. 'Modelling of road surface temperature from a geographical parameter database', *Meteorological Applications*, vol. 8, no. 4, pp. 409-436.
- CHAPUIS R. et MILLE P., 2001. *Systèmes et espaces agricoles dans le monde*, Armand Colin, Paris, 320 p.
- CHARABI Y., 2001. *L'îlot de chaleur urbain de la métropole lilloise : mesures et spatialisation*, Thèse de doctorat de Géographie, Université des Science et Techniques de Lille (Lille 1), 247 p.
- CHARLEUX-DEMARGNE J., 2001. *Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie. Application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants*, Université de Marne-la-Vallée, 350 p.
[<http://www.montpellier.cemagref.fr/doc/publications/theses/ft/julie-charleux-demargne.pdf>]
- CHARRE J. et DE SAINTIGNON M.-F., 1997. 'Les représentations cartographiques du climat', in *Le Climat, l'Eau et les Hommes*, V. Dubreuil et J.-P. Marchand, Presses universitaires de Rennes, Rennes, pp. 65-85.
- CHARRE J., 1992. 'La modélisation statistique en géographie', *Géopoint*, vol. 92, pp. 63-65.
- CHARRE J., DE SAINTIGNON M.-F., DOUGUEDROIT A. et MARTIN S., 1986. 'Modélisation de la variabilité climatique', *Revue de Géographie Alpine*, vol. 74, no. 1-2, pp. 31-42.
- CHAUVET P., PAILLEUX J. et CHILES J.P., 1976. 'Analyse objective des champs météorologiques par cokrigeage', *La Météorologie*, vol. 6, no. 4, pp. 37-54.
- CHOISNEL E., 1977. 'Le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol', *La Météorologie*, vol. 6, no. 11, pp. 103-133.
- CHOISNEL E., 1996. 'Les échelles d'espace et de temps en climatologie', *La Météorologie*, vol. 8, no. 13, pp. 29-38.
- CHOISNEL E., 2002a. 'Agrométéorologie', in *Encyclopædia Universalis*, vol. 1, Encyclopædia Universalis, Paris, pp. 601-605.

- CHOISNEL E., 2002b. 'Climatologie agroécologique', in *Encyclopædia Universalis*, vol. 5, Encyclopædia Universalis, Paris, pp. 981-985.
- CHOISNEL E., JOURDAIN S., CAMBLAN M., KLIS-LILIENTHAL I. et McVEIGH J.-P., 1993. 'Un système de prévision des gelées de printemps à une échelle fine dans le vignoble champenois', *La Météorologie*, vol. 8, no. 2, pp. 8-18.
- CHRISMAN N.R., 1984. 'The role of quality information in the long-term functioning of a geographical information system', *Cartographica*, vol. 21, pp. 79-87.
- CICÉRI M.-F., MARCHAND B. et RIMBERT S., 1977. *Introduction à l'analyse de l'espace*, Masson, Paris, 173 p.
- CLARKE O., 1995. *Atlas Hachette des vins du monde*, Hachette, Paris, 320 p.
- CLÉMENT J.-M., 1981. *Larousse agricole*, Larousse, Paris, 1207 p.
- CLEMENTS W.E., ARCHULETA J.A. et GUDIKSEN P.H., 1989. 'Experimental design of the 1984 ASCOT Field Study', *Journal of Applied Meteorology*, vol. 28, pp. 405-413.
- COIFFIER J., 2000. 'Un demi-siècle de prévision numérique du temps', *La Météorologie*, vol. 8, no. 30, pp. 11-31.
- COLIN G., 1973. *Vignoble et vin de Champagne*, Faculté des lettres et sciences humaines (Travaux de l'Institut de géographie de Reims, n°15), Reims, 92 p.
- CONSTANTINESCU G., 1967. 'Méthodes et principes de détermination des aptitudes viticoles d'une région et du choix des cépages appropriés', *Bulletin de l'OIV*, no. 441, pp. 1179-1205.
- COURAULT D., ARMAND C., DELABROSSE S. et MONESTIEZ P., 1997. 'Contribution à l'étude de l'influence des circulations atmosphériques sur les variations spatiales de la température de l'air dans le sud-est de la France', *Publications de l'Association internationale de climatologie*, vol. 10, pp. 230-239.
- COURAULT D., ROUX C., CLASTRE P. et PROSPER-LAGET V., 1996. 'Influence de l'environnement sur la température de l'air dans le sud-est de la France', *Publications de l'Association internationale de climatologie*, vol. 9, pp. 185-194.
- CRESPY A., 1987. *Viticulture d'aujourd'hui*, Tec & Doc (Collection Agriculture d'aujourd'hui), Paris, 176 p.
- CRESSMAN G.P., 1959. 'An operational objective analysis system', *Monthly Weather Review*, no. 87, pp. 367-374.
- CREUTIN D., OBLED C. et TOURASSE P., 1980. 'Analyses spatiale et temporelle des épisodes pluvieux cévenols', *La Météorologie*, vol. 6, no. 20-21, pp. 233-242.
- CTIFL (Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes), 1998. *Gel de printemps : protection des vergers*, Ctifl, Paris, 151 p.
- DAUPHINÉ A. et OTTAVI J.-Y., 1985. *Atlas structurel des climats de la France*, GIP RECLUS, Montpellier, 52 p.
- DAUPHINÉ A. et VOIRON-CANICIO C., 1988. *Variogrammes et structures spatiales*, GIP RECLUS (Collection modes d'emploi), Montpellier, 56 p.
- DE SAINTIGNON M.-F., 1998-1999. *Probabilité de gel thermique dans le vignoble champenois*, Laboratoire de la Montagne Alpine (Université Joseph Fourier), Grenoble, 3 volumes.

- DE VILLELE O., RIPOCHE D. et CHADOEUF J., 1993. 'Approche agrométéorologique du risque gélif. Application aux gelées de printemps en arboriculture fruitière', in *Actes de séminaires de la Com. d'agrométéo. de l'INRA "Le gel en agriculture"*, INRA, Paris, pp. 187-199.
- DELMAS J., 1971. 'Les sols de vignobles', in *Sciences et techniques de la vigne : traité d'ampélogie. Tome 1 : Biologie de la vigne ; sols de vignobles*, J. Ribéreau-Gayon et E. Peynaud, Dunod, Paris.
- DESHAIES L. et DUBOIS J.-M., 1996. 'La viti-viniculture québécoise : entre froidure et vente au vignoble', *Annales de géographie*, vol. 592, pp. 603-619.
- DICKENSON J.P. et SALT J., 1982. 'In vino veritas: an introduction to the geography of wine', *Progress in Human Geography*, vol. 6, pp. 159-189.
- DION R., 1990. *Le paysage et la vigne : essais de géographie historique*, Payot, Paris, 294 p.
- DOBESCH H., TVEITO O.E. et BESSEMOULIN P., 2001. *Geographic Information Systems in Climatological Applications*, ECSN - European Climate Support Network, 49 p.
- DOERFLINGER E., 2001. 'Les applications météorologiques du système de positionnement satellitaire GPS', *La Météorologie*, no. 34, pp. 21-37.
- 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 de traitements statistiques de données spatialisées. Application au vignoble champenois.*, Thèse de doctorat de l'INA-PG, 218 p.
- DOLEDEC A.-F., 1999. 'Le zonage : caractérisation des terroirs du vignoble champenois', in *Actes et colloque de Reims : Vins, vignobles et terroirs de l'Antiquité à nos jours (octobre 1997)*. CRDP de Lorraine. Nancy.
- DORAN J.C. et HORST T.W., 1981. 'Velocity and temperature oscillations in drainage winds', *Journal of Applied Meteorology*, vol. 20, no. 4, pp. 361-364.
- DOUGUEDROIT A., 1986. 'Cartes et espace : le cas des cartes climatiques et météorologiques', *Géopoint*, vol. 86, pp. 47-49.
- DUBOS J., 1984. 'Importance du terroir comme facteur de différenciation qualitative des vins', *Bulletin de l'OIV*, vol. 57, no. 639, pp. 420-434.
- DUPONT G., 2002. 'La viticulture poursuit son évolution vers la qualité', *Le Monde* (14 Novembre 2002).
- DURAND R., 1964. 'La détermination des seuils de résistance aux gelées printanières', *Phytoma*, no. 155, pp. 15-18.
- DURAND-DASTÈS F., 1992. 'Questions sur les modèles', *Géopoint*, vol. 92, pp. 9-17.
- DURAND-DASTÈS F., 1995. 'Climats et sociétés', *La documentation Française*, no. 7031, 44 p. (dont 18 fiches).
- DURAND-DASTÈS F., 2002. 'Climatologie', in *Encyclopædia Universalis*, vol. 5, Encyclopædia Universalis, Paris, pp. 975-981.
- DURAND-DASTÈS F., 2003. 'Climatologie', in *Dictionnaire de la géographie*, J. Lévy et M. Lussault, Belin, Paris, pp. 168-169.

- DUTRUC-ROSSET G., 2001. 'Situation et statistiques du secteur vitivinicole mondial en 1999', *Bulletin de l'OIV*, vol. 74 (Suppl.), 94 p.
- ELDIN M., 1989. 'Du risque de sécheresse au risque de mauvaise récolte : un effet de clarification des concepts', in *Le risque en agriculture*, M. Eldin et P. Milleville, Éd. de l'ORSTOM, Paris, pp. 19-23.
- ENDLICHER W., 1979. 'Thermal imagery as a tool to delimit vineyard sites liable to cold-air damage', *Tellus - newsletter* 7; Commission of the European Communities; Joint Research Centre Ispra (Italy): 11 S, 12 p.
- ENDLICHER W., 1980. 'L'utilisation de mesures itinérantes et de thermographies comme moyens d'étude du mésoclimat', *Recherches Géographiques à Strasbourg*, no. 13-14, pp. 127-133.
- ERPICUM M. et ALEXANDRE J., 1988. 'Caractérisation des types de temps ou ambiances climatiques à l'échelle locale ou régionale : proposition d'une méthode de travail', *Publications de l'Association internationale de climatologie*, vol. 1, pp. 67-71.
- ESCOFIER B. et PAGÈS J., 1997. *Initiation aux traitements statistiques : méthodes, méthodologie*, Presses universitaires de Rennes, Rennes, 263 p.
- ESCOURROU G., 1982. *Le Climat de la France*, Presses universitaires de France (Que sais-je ? n°1967), Paris, 127 p.
- FALLOT J.-M., 1990. 'Modélisation des vents de vallée dans une topographie préalpine complexe (vallée de la Sarine en Gruyère)', *Publications de l'Association internationale de climatologie*, vol. 3, pp. 325-334.
- 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.
- FEYT G., MAILLOUX H. et DE SAINTIGNON M.-F., 1995. 'SIG et information climatique', *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 5, no. 3-4, pp. 361-376.
- FITZHARRIS B.B. et ENDLICHER W., 1996. 'Climatic conditions for wine grape growing. Central Europe and New Zealand', *New Zealand Geographer*, vol. 52, no. 1, pp. 1-11.
- FLOHN H., 1969. 'Local wind systems', in *World survey of climatology, Vol. 2, General climatology 2*, Elsevier, Amsterdam, pp. 139-171.
- FOUCART T., 1997. *L'analyse des données : mode d'emploi : méthodes et études de cas*, Presses universitaires de Rennes, Rennes, 188 p.
- FRANÇOIS C., BOSSENO R., VACHER J.J. et SEGUIN B., 1999. 'Frost risk mapping derived from satellite and surface data over the Bolivian Altiplano', *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 95, pp. 113-137.
- FURY R. et JOLY D., 1995. 'Interpolation spatiale à maille fine des températures journalières', *La Météorologie*, vol. 8, no. 11, pp. 36-43.
- GADDAS F., 2001. *Proposition d'une méthode de cartographie des pédopaysages. Application à "la moyenne vallée du Rhône"*, Thèse de doctorat de l'INA-PG, 212 p.
- GADILLE R., 1967. *Le vignoble de la Côte bourguignonne : fondements physiques et humains d'une viticulture de haute qualité*, Les Belles Lettres, Paris, 686 p.

- GALET P., 2000. *Précis de viticulture : à l'usage des ingénieurs agronomes, des étudiants en agronomie et en oenologie, des techniciens des lycées agricoles, et des professionnels de la viticulture*, Dehan, Montpellier, 602 p.
- GAMBIER G., 1972. *Notions sur les représentations planes de la Terre*, IGN - ENSG, Paris, 102 p.
- GANDIN L.S., 1965. *Objective Analysis of Meteorological fields*, Israël Program for Scientific Translations, 242 p.
- GARCIA A., 1997. *Les vins de Champagne*, Presses universitaires de France (Que sais-je ? n°2259), Paris, 128 p.
- GAUTIER J.-F., 1996. *Histoire du vin*, Presses universitaires de France (Que sais-je ? n°2676), Paris, 127 p.
- GAYTE O., LIBOUREL T., CHEYLAN J.-P. et LARDON S., 1997. *Conception des systèmes d'information sur l'environnement*, Hermès, Paris, 153 p.
- GEIGER M., 1980. 'Recherches topoclimatiques au Palatinat', *Recherches Géographiques à Strasbourg*, no. 13-14, pp. 95-102.
- GEIGER R., 1965. *The climate near the ground*, Harvard University Press, Cambridge, 611 p.
- GEIGER R., 1969. 'Topoclimates', in *World Survey of Climatology, Vol. 2, General Climatology*, ed. H. Flohn, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, London, New York, pp. 105-138.
- GEIGER R., ARON R.H. et TODHUNTER P., 1995. *The Climate near the ground*, Vieweg, Wiesbaden, 528 p.
- GERBIER N. et PÉDEAU R., 1974. *Contribution à l'étude des gelées*, Météorologie nationale, Paris, 25 p.
- GERBIER N. et RÉMOIS P., 1977. *Influence du climat sur la qualité et la production du vin de Champagne*, Météorologie nationale, Paris, 45 p.
- GESLIN H., 1956. 'Les variations microclimatiques de température et le problème des gelées de printemps', *Annales de la Société d'horticulture et de botanique de l'Hérault*, no. 6, pp. 1-11.
- GILBANK G., 1974. *Introduction à la géographie générale de l'agriculture*, Masson, Paris, 255 p.
- GIRBAS J., 2002. 'Vins du monde', *Geo*, no. 286, pp. 81-155.
- GIVONE C., 1997. 'Circulation et contrôle des données climatologiques à Météo-France', *La Météorologie*, vol. 8, no. 20, pp. 31-40.
- GRIMEAU J.-P., 1983. *Méthodes cartographiques et quantitatives d'analyse des répartitions et des structures spatiales*, Presses Universitaires de Bruxelles, Bruxelles, 190 p.
- GUYOT G., 1997. *Climatologie de l'environnement : de la plante aux écosystèmes*, Masson, Paris, 505 p.
- HAGGETT P., 1973. *L'analyse spatiale en géographie humaine*, Armand Colin, Paris, 390 p.

- HALLAIRE M. et ITIER B., 1984. 'Examen et discussion des besoins en télédétection dans le domaine agronomique', in *Les Colloques de l'INRA : Applications de la Télédétection à l'Agriculture*, INRA, Paris, pp. 237-246.
- HALLEY V., ERIKSSON M. et NUNEZ M., 2003. 'Frost prevention and prediction of temperature variations and cooling rates using GIS', *Australian Geographical Studies*, vol. 41, no. 3, pp. 287-303.
- HANSON B., KLINK K., MATSUURA K., ROBESON S.M. et WILLMOTT C.J., 1992. 'Vector correlation: review, exposition, and geographic application', *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 82, no. 1, pp. 103-116.
- HARRISON S.J. et KELLY I., 1996. 'A field-based index of topographic shelter and its application to topoclimatic variation', *Applied Geography*, vol. 16, no. 1, pp. 53-63.
- HILLY J. et HAGUENAUER B., 1979. *Lorraine, Champagne*, Masson, Paris, 216 p.
- HIROZ F., 1996. 'Caractérisation d'une inversion thermique à la confluence de trois vallées alpines : l'exemple des Drances en amont du Défilé des Trappistes (Valais)', *Publications de l'Association internationale de climatologie*, vol. 9, pp. 318-325.
- HOLLOWAY J.L., 1958. 'Smoothing and filtering in time series and space fields', *Advances in Geophysics*, vol. 4, pp. 351-389.
- HUARD F., 1993. *Approches théoriques de la spatialisation de variables climatiques à partir de la discrétisation du relief français. Applications méthodologiques et cartographiques : les potentialités agroclimatiques en Basse-Normandie*, Thèse de doctorat de Géographie de l'Université de Caen.
- HUBSCHMAN J., KAYSER B. et SELLERON G., 1992. *L'Europe vue de l'espace : 100 images du satellite SPOT*, Solar, Paris, 218 p.
- HUDSON G. et WACKERNAGEL H., 1994. 'Mapping temperature using kriging with external drift : theory and an example from Scotland', *International Journal of Climatology*, vol. 14, pp. 77-91.
- HUETZ DE LEMPS A., 1996. 'Conclusion', in *Des vignobles et des vins à travers le monde : hommage à Alain Huetz de Lemps. Colloque tenu à Bordeaux les 1, 2 et 3 octobre 1992*, C. Le Gars et P. Roudié, Presses universitaires de Bordeaux, Talence, pp. 647-651.
- HUETZ DE LEMPS A., PIJASSOU R. et ROUDIÉ P., 1978. 'Géographie historique des vignobles. Tome 1 : vignobles français ; Tome 2 : vignobles étrangers', in *Actes du colloque de Bordeaux, Octobre 1977*, Editions du CNRS, 215 p. et 199 p.
- HUFTY A., 1988. 'Climatologie et géographie, un point de vue', in *Climats et climatologie : volume d'hommage offert au Professeur Pierre Pagny*, J. Pérard, G. Escourrou et M. Dalby, Centre de recherches de climatologie, Dijon, pp. 261-268.
- HUGLIN P. et SCHNEIDER C., 1998. *Biologie et écologie de la vigne*, Tec & Doc-Lavoisier, Paris, 370 p.
- HUTCHINSON M.F. et GALLANT J.C., 1999. 'Representation of terrain', in *Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues (Vol. 1)*, P.A. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire et D.W. Rhind, John Wiley & Sons, New York, pp. 105-124.

- IGN (INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL), 1996. *La BD Cartographique : descriptif de contenu*, IGN, Paris, 106 p.
- ITIER B., 1993. 'Introduction aux techniques de lutte contre le gel : principes physiques et précautions d'emploi', in *Actes de séminaires de la Com. d'agrométéo. de l'INRA "Le gel en agriculture"*, INRA, Paris, pp. 233-238.
- JACQUET A. et MORLAT R., 1997. 'Caractérisation de la variabilité climatique des terroirs viticoles en val de Loire. Influence du paysage et des facteurs physiques du milieu', *Agronomie*, vol. 17, pp. 465-480.
- JOHNSON H., 1979. *L'atlas mondial du vin : un guide complet des vins et alcools du monde entier*, Laffont, Paris, 288 p.
- JOHNSON H., 1990. *Une Histoire mondiale du vin de l'Antiquité à nos jours*, Hachette, Paris, 478 p.
- JOLY D. et FURY R., 1996. 'Modélisations à grande échelle de la variation spatiale des températures', *Publications de l'Association internationale de climatologie*, vol. 9, pp. 219-227.
- JOLY D., BERT H., FURY R., VERMOT-DESROCHES B. et JACQUINOT J.-P., 1994. 'Interpolation des températures à grande échelle', *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 4, no. 1, pp. 55-85.
- JOLY D., NILSEN L., FURY R., ELVEBAKK A. et BROSSARD T., 2003. 'Temperature interpolation at a large scale: test on a small area in Svalbard', *International Journal of Climatology*, vol. 23, no. 13, pp. 1637-1654.
- JONES G.V. et DAVIS R.E., 2000. 'Using a synoptic climatological approach to understand climate-viticulture relationships', *International Journal of Climatology*, vol. 20, pp. 813-837.
- JOURNAL A.G. et HUIJBREGTS C.J., 1978. *Mining Geostatistics*, Academic Press, London, Orlando, 600 p.
- KAIMAL J.C. et FINNIGAN J.J., 1994. *Atmospheric boundary layer flows : their structure and measurement*, Oxford University Press, New York, 289 p.
- KALMA J.D., LAUGHLIN G.P., CAPRIO J.M. et HAMER P.J.C., 1992. *The Bioclimatology of frost : its occurrence, impact and protection*, Springer-Verlag, Berlin, New York, 144 p.
- KASTENDEUCH P., 1999. *Analyse à plusieurs échelles et modélisation des régimes de vent d'été dans le Fossé Rhénan méridional*, Thèse de doctorat de Géographie, Université de Strasbourg 1, 161 p.
- KERDILES H., GRONDONA M., RODRIGUEZ R. et SEGUIN B., 1996. 'Frost mapping using NOAA AVHRR data in the Pampean region, Argentina', *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 79, no. 3, pp. 157-182.
- KESSLER J. et CHAMBRAUD A., 1990. *La Météo de la France : tous les climats, localité par localité*, J. C. Lattès, Paris, 391 p.
- KNOLLHOFF D.S., TAKLE E.S., GALLUS W.A., BURKHEIMER D. et McCAULEY D., 2003. 'Evaluation of a frost accumulation model', *Meteorological Applications*, vol. 10, pp. 337-343.

- KRUMBEIN W.C., 1959. 'Trend surface analysis of contour-type maps with irregular control point spacing', *Journal of Geophysical Research*, vol. 64, no. 7, pp. 823-834.
- LABORDE J.-P., 1982. 'Cartographie automatique des caractéristiques pluviométriques : prise en compte des relations pluviométrie-morphométrie', *La Houille Blanche*, no. 4, pp. 330-338.
- LABORDE J.-P., 1995. 'Les différentes étapes d'une cartographie automatique : exemple de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord', *Publications de l'Association internationale de climatologie*, vol. 8, pp. 37-46.
- LAFORE J.-P., STEIN J., ASENCIO N., BOUGEULT P., DUCROCQ V., DURON J., FISCHER C., HÉREIL P., MASCART P., MASSON V., PINTY J.-P., REDELSPERGER J.-L., RICHARD E. et VILÀ-GUERAU DE ARELLANO J., 1998. 'The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I: adiabatic formulation and control simulations', *Annales geophysicae*, vol. 16, pp. 90-109.
- LAMARQUE P. et JOURDAIN S., 1994. 'Elaboration de longues séries climatologiques homogènes pour l'étude de l'évolution climatique', *La Météorologie*, vol. 8, no. 7, pp. 61-68.
- LAMARRE D., 1997. 'Le concept de risque lié au climat : une tentative de clarification', in *Les risques liés au climat*, Éditions universitaires de Dijon, Dijon, pp. 7-28.
- LANGELLIER F. et JACQUET C., 1991. 'Enquête sur les gelées et le matériel de protection antigél dans le vignoble champenois', *Le Vigneron Champenois*, vol. 4, pp. 17-32.
- LANGELLIER F. et MONCOMBLE D., 1990. 'Les gelées de printemps. Le point sur la lutte.' *Le Vigneron Champenois*, vol. 4, pp. 17-34.
- LANGELLIER F., 2003a. 'Meteo. Mars 2003', *Le Vigneron Champenois*, vol. 4, pp. 15-18.
- LANGELLIER F., 2003b. 'Dans les vignes. Extraordinaires gelées de printemps', *Le Vigneron Champenois*, vol. 5, pp. 2-13.
- LANGELLIER F., DOLEDEC A.-F. et PANIGAÏ L., 2003. 'Météo 2003 : l'année de tous les dangers', *Le Vigneron Champenois*, vol. 9, pp. 20-33.
- LASSERRE F., 2001. 'L'essor du vignoble au Québec. Histoire de climats et de goûts', *Cybergeo*, n°190.
[<http://www.cybergeo.presse.fr>]
- Laurini R. et MILLERET-RAFFORT F., 1993. *Les bases de données en géomatique*, Hermès, Paris, 340 p.
- LAVILLE P. et RAMBAUD D., 1993. *Carte des aléas de glissement de terrain*, CIVC, Epernay, 11 p.
- LE BERRE M. et UVIETTA P., 1989. 'Vigne et contraintes climatiques : un modèle de simulation', *L'Espace Géographique*, vol. 1, pp. 55-68.
- LE GARS C. et HINNEWINKEL J.-C., 2000. 'Le commerce mondial des vins à la fin du XXe siècle', *Annales de géographie*, vol. 109, no. 614-615, pp. 381-394.

- LE GARS C. et ROUDIÉ P., 1996. *Des vignobles et des vins à travers le monde : hommage à Alain Huetz de Lempis. Colloque tenu à Bordeaux les 1, 2 et 3 octobre 1992*, Presses universitaires de Bordeaux, 655 p.
- LEBON E., 1993. *De l'influence des facteurs pédo et méso-climatiques sur le comportement de la vigne et la maturation du raisin. Application à l'établissement de critères de zonage des potentialités qualitatives en vignoble septentrional (Alsace)*, Thèse de doctorat de Géologie, Université de Dijon, 165 p.
- LEDDET C. et DEREUDDRE J., 1993. 'La résistance au gel des bourgeons', in *Actes de séminaires de la Com. d'agrométéo. de l'INRA "Le gel en agriculture"*, INRA, Paris, pp. 113-128.
- LERICHE P., KERGOMARD C., BIGOT S., ALIAS A. et LAC C., 2002. 'Utilisation du modèle Meso-NH pour le suivi de l'épaisseur de la couche de mélange lors d'un épisode de pollution par l'ozone dans l'agglomération lilloise', *Publications de l'Association internationale de climatologie*, vol. 14, pp. 454-461.
- LICHINE A., 1983. *Encyclopédie des vins et des alcools de tous les pays*, Robert Laffont, Paris, 945 p.
- LINDKVIST L. et LINDQVIST S., 1997. 'Spatial and temporal variability of nocturnal summer frost in elevated complex terrain', *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 87, pp. 139-153.
- LINDKVIST L., GUSTAVSSON T. et BOGREN J., 2000. 'A frost assessment method for mountainous areas', *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 102, pp. 51-67.
- LOMBART O., 1998. *Etude des processus et quantification de l'érosion hydrique dans la partie marnaise du vignoble champenois*, Thèse de doctorat de Géographie, Université de Reims, 297 p.
- LONGLEY P.A., GOODCHILD M.F., MAGUIRE D.J. et RHIND D.W., 1999. *Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues (Vol. 1)*, John Wiley & Sons, New York, 580 p.
- LUBÈS-NIEL H., MASSON J.M., PATUREL J.E. et SERVAT E., 1998. 'Variabilité climatique et statistique. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques', *Revue des Sciences de l'Eau*, no. 3, pp. 383-408.
- MABY J., 1997. 'Terroirs agressés', *Revue des Œnologues*, no. 84, pp. 3-5.
- MABY J., 2002. 'Les enjeux paysagers viticoles', in *Actes du symposium international Terroirs et zonage vitivinicole*, OIV, Avignon.
- MADELIN M., 1998. *Prévision du risque de gel à l'échelle locale : méthode de prévision statistique, à court terme, de la température de l'air à la hauteur des bourgeons dans le vignoble marnais*, Mémoire de maîtrise de Géographie, Université Denis Diderot (Paris 7), 150 p.
- MADELIN M., 2002. 'Interpolation spatiale des températures minimales. Application au vignoble marnais', communication orale au *Sixièmes Rencontres de ThéoQuant*, Besançon, Université de Franche-Comté, résumé 1 p.
[<http://thema.univ-fcomte.fr/theoq/pdf/2003/03Madelin.pdf>]

- MADÉLIN M., BELTRANDO G. et LANGELLIER F., 2003. 'Variabilité spatio-temporelle du vent au printemps dans le vignoble marnais', communication orale au XVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Varsovie, Pologne, *Dokumentacja Geograficzna*, no. 29, pp. 203-206.
- MADÉLIN M., BELTRANDO G. et LANGELLIER F., 2004. 'Spatial interpolation based mapping of spring frost hazard in the Champagne vineyard', poster présenté à l'European Geosciences Union, Nice, *Geophysical Research Abstracts*, vol. 6, 00779, 1 p.
- MADÉLIN M., BELTRANDO G., CAMBLAN M. et LANGELLIER F., 2002. 'Amélioration de la prévision des gelées printanières dans le vignoble de la Marne en Champagne', *Hommes et Terres du Nord*, no. 1, pp. 53-62.
- MAHRT L. et LARSEN S., 1982. 'Small scall drainage front', *Tellus*, vol. 34, no. 6, pp. 579-587.
- MAHUL O., 1998. 'Vers une redéfinition du rôle de l'assurance agricole dans la gestion des risques sur récoltes', *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, no. 49, pp. 38-58.
- MARAIS C., 1997. 'Prévision statistique de vent sur les centrales nucléaires', *La Météorologie*, vol. 8, no. 18, pp. 56-63.
- MARCHAND J.-P., 1980. 'Les contraintes physiques et la géographie contemporaine', *L'Espace Géographique*, vol. n°3, pp. 231-240.
- MARRE A. et LAURAIN M., 1996. 'Recherches en vue de la cartographie de l'aléa dû à l'érosion hydrique à l'échelle du 1/25.000 : l'exemple du vignoble champenois', *Travaux de l'Institut de géographie de Reims*, vol. 93-94, pp. 41-58.
- MARRES P., 1950. *La vigne et le vin en France*, Armand Colin, Paris, 224 p.
- MARTIN S., MAINGUY Y. et DE SAINTIGNON M.-F., 1991. 'Neige à Noël et potentialités de production de neige de culture dans les Alpes françaises du Nord', *L'Espace Géographique*, vol. 3, pp. 255-272.
- MATHERON G., 1970. *La théorie des variables régionalisées et ses applications*, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 212 p.
- MEILLAN E., 1997. *L'objet "vignoble" dans la géographie classique française*, Mémoire de maîtrise de Géographie, Université Paris 1, 96 p.
- MERLIER C., 2001. *Interpolation des données spatiales en climatologie, et conception optimale des réseaux climatologiques*, Annexe du rapport de Météo-France concernant ses activités en rapport avec la Commission for Climatology (CCI) de l'OMM, 21 p.
[http://www.wmo.ch/web/wcp/wcasp/cclcc/rapp_full_rpts/bessemoulin_rpt_fr.pdf]
- 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.
- MÉTÉO FRANCE, n.d. 'Aperçu climatique sur la région Champagne-Ardennes', *Plaquette publicitaire*
- MÉTÉO-FRANCE, 2003, *Météo-Hebdo*, vol. 14 et 15.
- MILLER C.L. et LAFLAMME R.A., 1958. 'The Digital Terrain Model - theory and applications', *Photogrammetric Engineering*, vol. 24, no. 3, pp. 433-442.

- MISRAHI P., LECOMPTE M. et RONCHAIL J., 1990. 'Essai d'interprétation aérologique du gel en champagne : utilisation de l'analyse canonique des correspondances', *Publications de l'Association internationale de climatologie*, vol. 3, pp. 353-362.
- MITAS L. et MITASOVA H., 1999. 'Spatial Interpolation', in *Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues (Vol. 1)*, P.A. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire et D.W. Rhind, John Wiley & Sons, New York, pp. 481-492.
- MONCOMBLE D. et DESCOTES A., 1993. 'Mise en évidence des facteurs agronomiques ayant eu une incidence sur la gravité des gelées d'hiver dans le vignoble champenois en 1985', in *Actes de séminaires de la Com. d'agrométéo. de l'INRA "Le gel en agriculture"*, INRA, Paris, pp. 211-231.
- MONCOMBLE D. et PANIGAÏ L., 1990. 'Vers le zonage de la Champagne', *Le Vigneron Champenois*, no. 3, pp. 18-26.
- MOORE I.D., GRAYSON R.B. et LADSON A.R., 1991. 'Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications', *Hydrological Processes*, no. 5, pp. 3-30.
- MUSY A., 2003. *Cours "Hydrologie générale". Chap. 8 : L'organisation et le contrôle des données.*
[<http://hydram.epfl.ch/e-drologie/>]
- NOILHAN J. et PLANTON S., 1989. 'A simple parameterization of land surface processes for meteorological models', *Monthly Weather Review*, vol. 117, pp. 536-549.
- OBLED C., 1987. 'Introduction au krigeage à l'usage des hydrologues', in *Deuxièmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM*, Ed. ORSTOM, Montpellier, pp. 174-222.
- OKE T.R., 1981. 'Canyon geometry and the nocturnal urban heat island : comparaison of scale model and field observations', *Journal of Climatology*, vol. 1, pp. 237-254.
- OKE T.R., 1987. *Boundary layer climates*, Routledge, London, New York, 435 p.
- ORLANSKI I., 1975. 'A rational subdivision of scales for atmospheric processes', *Bulletin American Meteorological Society*, vol. 56, no. 5, pp. 527-530.
- PAILLEUX J., GELEYN J.-F. et LEGRAND E., 2000. 'La prévision numérique du temps avec les modèles Arpège et Aladin', *La Météorologie*, vol. 8, no. 30, pp. 32-60.
- PANIGAÏ L. et DOLEDEC A.-F., 1998. 'L'altitude', *Le Vigneron Champenois*, no. 4, pp. 26-38.
- PANIGAÏ L. et LANGELLIER F., 1992. 'Climatologie du vignoble. Mise en place d'un nouveau réseau de stations automatiques', *Le Vigneron Champenois*, no. 6, pp. 26-41.
- PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAMÉ B., BOYER J.F., LUBÈS-NIEL H. et MASSON J.M., 1996. 'Procédures d'identification de « ruptures » dans des séries chronologiques modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne', *IASH Publ.*, no. 238, pp. 99-110.
- PAUL F., 1994. *Le vent dans la région Nord Pas-de-Calais, variabilité spatio-temporelle et applications à l'énergie éolienne*, Thèse de doctorat de Géographie, Université des Science et Techniques de Lille (Lille 1), 168 p.

- PAUL P., 1994. *Topoclimats et climat régional dans le fossé rhénan méridional et ses bordures montagneuses (Vosges et Forêt-Noire)*, Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Université de Haute Bretagne (Rennes 2), 177 p.
- PAUL P., 1997. 'Topoclimats dans le domaine tempéré semi-océanique', in *Le Climat, l'Eau et les Hommes*, V. Dubreuil et J.-P. Marchand, Presses universitaires de Rennes, Rennes, pp. 197-226.
- PEGUY C., 1970. *Précis de climatologie*, Masson, Paris, 468 p.
- PÉGUY C.-P., 1976. 'Une nouvelle expression graphique de la variabilité interannuelle des climats. Les calendriers de probabilités', *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, no. 431-432, pp. 5-16.
- PÉRARNAUD V. et RAYNAL N., 1991. *Agrométéorologie*, Ecole nationale de la météorologie, Toulouse, 183 p.
- PERRIN DE BRICHAMBAUT C., 2002. 'Thermodynamique de l'atmosphère', in *Encyclopædia Universalis*, vol. 22, Encyclopædia Universalis, Paris, pp. 561-569.
- PERSONNIC P., 1999. *Mesure et modélisation de la variabilité microclimatique induite par le relief dans le vignoble champenois : incidence sur la phénologie de la vigne*, Thèse de doctorat de l'INA-PG, 248 p.
- PEYON J.-P., 1976. 'La coopération viticole en Champagne', *Travaux de l'Institut de géographie de Reims*, vol. 27-28, pp. 29-55.
- PITTE J.-R., 1999. 'À propos du terroir', *Annales de géographie*, vol. 108, no. 605, pp. 86-89.
- PITTE J.-R., 2000. 'La nouvelle planète des vins', *Annales de géographie*, vol. 109, no. 614-615, pp. 340-344.
- POIRIER C., 2000. *Analyse spatio-temporelle des champs de vents et de précipitations en milieu urbain*, Thèse de doctorat de Géographie, Université de Strasbourg 1, 219 p.
- POMEROL C., 1984. *Terroirs et vins de France : itinéraires oenologiques et géologiques*, Total-Édition-presses - Éd. du B.R.G.M, Paris, Orléans, 343 p.
- POTTIER P., 1990. 'Prévisions de température par adaptation statistique du modèle Périodot', *La Météorologie*, vol. 7, no. 32, pp. 22-32.
- PUISAI N., 1987. 'Le sol, le climat, l'homme', *Le Monde*, 17 Octobre 1987.
- QUENEY P., 1974. *Éléments de météorologie*, Masson, Paris, 300 p.
- QUENOL H., 2002. *Modifications climatiques aux échelles fines générées par un ouvrage linéaire en remblai : L'exemple de la ligne à grande vitesse du TGV Méditerranée sur le gel printanier et l'écoulement du mistral dans la basse vallée de la Durance*, Thèse de doctorat de Géographie, Université des Science et Techniques de Lille (Lille 1), 313 p.
- RÉAUMUR R.-A. Ferchault de, 1735. 'Observation du thermomètre, faites à Paris pendant l'année 1735. Comparées avec celles qui ont été faites sous la ligne, à l'Isle de France, à Alger et en quelques-unes de nos isles de l'Amérique', *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, pp. 545-576.

- RÉJALOT M., 2000. 'Bordeaux-Champagne : propriété ou négoce ?' *Annales de géographie*, vol. 109, no. 614-615, pp. 426-443.
- REYNAUD A., 1990. 'La Champagne : le mot et la chose. Un nom à la recherche d'un espace', *Travaux de l'Institut de géographie de Reims*, vol. 77-78, pp. 5-13.
- REYNIER A., 1991. *Manuel de viticulture*, Tec & Doc-Lavoisier, Paris, 414 p.
- RIBÉREAU-GAYON J. et 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., MORLAT R. et ASSELIN C., 1995. 'Une approche intégrée des terroirs viticoles. Discussions sur les critères de caractérisations accessibles', *Bulletin de l'OIV*, vol. 68, no. 767/768, pp. 94-106.
- RIVES M., 1975. 'Les origines de la vigne', *La Recherche*, vol. 53, pp. 120-129.
- ROBESON S.M. et SHEIN K.A., 1997. 'Spatial coherence and decay of wind speed and power in the north-central United States', *Physical Geography*, vol. 18, no. 6, pp. 479-495.
- ROBIN M., 1995. *La télédétection : des satellites aux systèmes d'information géographiques*, Nathan, Paris, 318 p.
- ROTEN M., 1964. *Recherches microclimatiques sur la vallée du Rhône en Valais*, Impr. Gessler, Sion, 195 p.
- ROUCH J., 1948. *L'atmosphère et la prévision du temps*, Armand Colin, Paris, 207 p.
- ROUDIÉ P., 1993. *La France : agriculture, forêt, pêche depuis 1945*, Dalloz-Sirey, Paris, 246 p.
- ROUDIÉ P., 2000. 'Vignobles et vins de France : élitisme et diversité', *Historiens & Géographes*, no. 370, pp. 341-346.
- SALOMON J.-N., 1999. 'Les vignobles et les vins néo-zélandais', *Les Cahiers d'Outre-mer*, vol. 52, no. 206, pp. 115-142.
- SANDERS L. et DURAND-DASTÈS F., 1985. *L'Effet régional : les composantes explicatives dans l'analyse spatiale*, GIP RECLUS, Montpellier, 47 p.
- SANDERS L., 1989. *L'analyse statistique des données en géographie*, GIP RECLUS, Montpellier, 268 p.
- SANDERS L., 1996. 'La modélisation spatio-temporelle : les différents niveaux d'intégration du temps et de l'espace', in *Etude des phénomènes spatiaux en agriculture*, Paris : INRA Editions Les Colloques, La Rochelle, pp. 329-338.
- SANTIBÁÑES F., MORALES L., DE LA FUENTE J., CELLIER P. et HUETE A., 1997. 'Topoclimatic modeling for minimum temperature prediction at a regional scale in the Central Valley of Chile', *Agronomie*, vol. 17, pp. 307-314.
- SARMIR I. et LANGELLIER F., 1994. 'La géographie des gelées de printemps dans le vignoble champenois en 1989 et 1990', *Le Vigneron Champenois*, vol. 5, pp. 38-51.
- SARMIR I. et LECOMPTE M., 2000. 'Influence du vent sur la distribution des gelées radiatives sur les reliefs champenois', *La Météorologie*, vol. 29.

- SARMIR I., 1995. *Variabilité spatio-temporelle des températures minimales et dégâts du gel printanier dans le vignoble champenois*, Thèse de doctorat de Géographie, Université Denis Diderot (Paris 7), 285 p.
- SCEES (Ministère de l'agriculture et de la pêche - Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques), 2000. 'Agreste : Recensement agricole 2000. La viticulture', Ministère de l'agriculture et de la pêche, Paris, Cédérom.
- SCHIRMER R., 2000. 'Le regard des géographes français sur la vigne et le vin (fin du XIXe-XXe siècle)', *Annales de géographie*, vol. 109, no. 614-615, pp. 345-363.
- SERRES M. et FAROUKI N., 1997. 'Le Trésor : Dictionnaire des Sciences', Flammarion, Paris, p. 1092.
- SKIDMORE A.K., 1989. 'A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model', *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 323-334.
- SNEYERS R., 1975. *Sur l'analyse statistique des séries d'observations*, Genève, Technical Note n°143, WMO, 192 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.
- STEWART R.B., MUKAMMAL E.I. et WIEBE J., 1978. 'The use of thermal imagery in defining frost prone areas in the Niagara fruit belt', *Remote Sensing of Environment*, vol. 7, pp. 187-202.
- STRÄSSER M., 1998-1999. *Klimadiagramm-Atlas der Erde*, Dortmunder Vertrieb für Bau- und Planungsliteratur, Dortmund, 222 p. et 254 p.
- SUTHERLAND R.A., 1980. 'A short-range objective nocturnal temperature forecasting model', *Journal of Applied Meteorology*, vol. 19, pp. 247-255.
- THOMPSON E.F. et LEENKNECHT D.A., 1994. 'Wind estimation for coastal modeling applications', *Journal of coastal research*, no. 10, pp. 628-636.
- THYER N., 1966. 'A theoretical explanation of mountain and valley winds by a numerical method', *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie. Serie A, Meteorologie und Geophysik*, vol. 15, pp. 318-348.
- TINLOT R., 2002. 'Indications géographiques. Perspectives d'avenir : développement de la protection', *Bulletin de l'OIV*, vol. 75, no. 855-856, pp. 357-379.
- TRIPLET J.-P. et ROCHE G., 1971. *Météorologie générale*, Météorologie Nationale, Paris, 318 p.
- TURMANIDZE T.I., 1992. *Effect of Agrometeorological Parameters on Viticulture in Countries of Eastern Europe*, Organisation Météorologique Mondiale, Genève, Rapport CMAg n°42B, WMO TD n°500, 48 p.
- TVEITO O.E. et FØRLAND E.J., 1999. 'Mapping temperatures in Norway applying terrain information, géostatistics and GIS', *Norsk geografisk Tidsskrift*, vol. 53, pp. 202-212.
- UNWIN D., 1981. *Introductory spatial analysis*, Methuen, London, 212 p.
- UNWIN T., 1991. *Wine and the vine. An historical geography of viticulture and the wine trade*, Routledge, London, 409 p.

- VAUDOUR E., 2001. 'Diversité des notions de terroir. Pour un concept de terroir opérationnel', *Revue des Œnologues*, no. 101, pp. 39-41.
- VAZART V., 1988. *Les gelées de printemps de 1875 à 1986 dans le vignoble champenois : historique et conséquences, relation avec la production de raisin*, Thèse de Pharmacie, Université de Reims, 213 p.
- VESSELLE G., 1993. 'Incidence économique des gelées en viticulture', in *Actes de séminaires de la Com. d'agrométéo. de l'INRA "Le gel en agriculture"*, INRA, Paris, pp. 45-50.
- VIGNEAU J.-P., 1994. 'La spatialisation des données ponctuelles', *Etudes Méditerranéennes*, no. 16, pp. 31-32.
- VIGNERON E., 1997. *Géographie et statistique*, Presses universitaires de France (Que sais-je ? n°3177), Paris, 127 p.
- WANIEZ P. et LE GAUFFEY Y., 1987. *Les données et le territoire : initiation à l'analyse en surface de tendance*, Ed. de l'Orstom, Paris, 35 p.
- WIEBER J.-C., BRUNET R. et AURIAC F., 1995. *Atlas de France*, RECLUS, la Documentation française, Montpellier, Paris, 144 p.
- WINKLER A.J., COOK J.A., KLIEWER W.M. et LIDER L.A., 1974. *General viticulture*, Univ. of California Press, Berkeley, 710 p.
- WISDORFF D., BEUCHER F., SALVAYRE L., THOUMIEUX F. et DOUERIN J.-P., 1999. 'Climatologie saisonnière de la Charente-Maritime par classes de direction de vent', *La Météorologie*, vol. 8, no. 25, pp. 29-37.
- YAMADA T., 1979. 'Prediction of the nocturnal surface inversion height', *Journal of Applied Meteorology*, vol. 18, pp. 526-531.
- YOSHINO M., 1975. *Climate in small area*, Tokyo University Press, Tokyo, 549 p.

313 références.

ABREVIATIONS

ACP	Analyse en Composantes Principales
AGREMAM	Association de Gestion du REseau Météo Automatisé de la Marne
ALADIN	Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement InterNational
AOC	Appellation d'Origine Contrôlée
ARPEGE	Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
AURELHY	Analyse Utilisant le RELief pour l'Hydrométéorologie
BHER	Bulletin Hebdomadaire d'Études et de Renseignements
C	Celsius
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
CDM	Centre Départemental de la Météorologie
CIVC	Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
GPS	Global Positioning System
ha	hectare
IGN	Institut Géographique National
IML	Interactive Matrix Language
INAO	Institut National des Appellations d'Origine
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
ISBA	Interactions Soil-Biosphere-Atmosphere
K	Kelvin
MNE	Modèle Numérique d'Élévation
MNT	Modèle Numérique de Terrain
OMM	Organisation Mondiale de la Météorologie
PATAC	Prévision Améliorée, Techniques d'Affinement de la Climatologie
SIG	Système d'Information Géographique
SPOT	Satellite Probatoire d'Observation de la Terre
W	Watt

Tables

TABLE DES FIGURES

Figure I.1 : Schéma d'un cep de vigne.....	15
Figure I.2 : Les températures limites et critiques de la vigne.....	18
Figure I.3 : Climogramme de Marseille et de Strasbourg	20
Figure I.4 : Diagrammes ombrothermiques de Dijon, de San Francisco et d'Auckland (moyennes sur 1961-1990).....	25
Figure I.5 : Les cycles végétatif et reproducteur de la vigne.....	30
Figure I.6 : Les stades repères de la vigne	30
Figure I.7 : Les principales contraintes climatiques dans le cycle végétatif de la vigne	32
Figure II.1 : Évolution horaire des composantes du bilan énergétique de surface pour deux nuits différentes quant à leur nébulosité	38
Figure II.2 : Échanges énergétiques à la surface du sol, la nuit, en conditions de gelées de printemps et les paramètres météorologiques ou agronomiques qui les influencent.....	39
Figure II.3 : Le bilan radiatif et énergétique selon la nébulosité de la nuit	39
Figure II.4 : Profils verticaux de température déterminés au moment du minimum lors d'une gelée par advection (A) et par rayonnement (B).....	40
Figure II.5 : Variations des indices actinothermiques le long d'un coteau du vignoble champenois, mesurés au cours d'une nuit de gel.....	42
Figure II.6 : Relation entre la topographie et la répartition des températures au cours d'une nuit claire et calme	42
Figure II.7 : Schéma des interactions entre le vent synoptique et la brise de pente, sur un coteau typique du vignoble champenois.....	43
Figure II.8 : Influence de la couverture du sol sur la remontée de chaleur.....	44
Figure II.9 : Influence de plusieurs paramètres sur les températures minimales et maximales, selon plusieurs échelles spatiales.....	45
Figure II.10 : Effets comparés d'un refroidissement rapide et d'un refroidissement lent.....	47
Figure II.11 : Calendriers de probabilité des températures minimales (sous abri, à 2 m) de Reims-Courcy (1961-1990)	51
Figure II.12 : Relation entre l'humidité relative au coucher du soleil et l'écart entre la température minimale observée (Tn) et le point de rosée (Td) au coucher du soleil.....	53
Figure II.13 : Schéma du principe du modèle de prévision des gelées de printemps développé par l'INRA.....	55
Figure III.1 : Le coteau des « Noires Vaches » (Vertus).....	60
Figure III.2 : Image satellite de la Montagne de Reims (SPOT).....	61
Figure III.3 : Normales de températures et de précipitations pour deux stations synoptiques situées à proximité du vignoble champenois (1971-2000).....	62
Figure III.4 : Rose des vents à Reims-Courcy (1961-1990).....	63
Figure III.5 : Le système opérationnel de prévision des gelées de printemps par le CDM de la Marne	70
Figure III.6 : Secteurs de vent utilisés dans l'adaptation statistique locale	71
Figure III.7 : Tables de vérité Observation / Prévision en 1989 pour un indice actinothermique inférieur ou égal à -2.5°C	73
Figure IV.1 : Un exemple de station électronique Enerco® de Cimel Électronique (d'après [www.cimel.fr])	87
Figure IV.2 : Fréquence des modalités de la donnée Direction à Aÿ	97
Figure IV.3 : Évolution des températures minimales horaires (sous abri) à Nogent-l'Abesse, le 14/05/03	98

Figure IV.4 : Évolution des températures minimales sous abri à Reims-Courcy lors du printemps 2000	100
Figure V.1 : Différents formats d'un modèle numérique d'élévation	102
Figure V.2 : Exemple d'une fenêtre 3 x 3 pour le calcul des dérivées des altitudes au point $Z_{i,j}$	103
Figure V.3 : Représentation de la pente dans un espace à deux dimensions	103
Figure V.4 : Fréquences des modalités altitudinales du Modèle Numérique d'Élévation.....	108
Figure V.5 : Représentation des données altitudinales discrètes sur une zone de 1 km ²	109
Figure V.6 : Comparaison BD Carto (1992) – CORINE Land Cover (1996).....	112
Figure V.7 : Schéma du découpage de la base d'occupation du sol.....	113
Figure V.8 : Schéma de la jointure spatiale	114
Figure VI.1 : La variation des échelles temporelles.....	121
Figure VI.2 : Schéma illustrant la place des logiciels Sig dans notre chaîne méthodologique.....	124
Figure VI.3: Les différentes couches d'information possibles dans notre approche multicouche.....	125
Figure VII.1 : Évolution sur le long terme des moyennes printanières des températures minimales journalières (à 2 m du sol, sous abri) à Reims-Courcy (1974-2003).....	130
Figure VII.2 : Évolution printanière des moyennes journalières des températures minimales sous abri et des minima actinothermiques pour l'ensemble des stations retenues	133
Figure VII.3 : Variabilités interannuelles, journalières et horaires des températures sous abri.....	134
Figure VII.4 : Évolution moyenne horaire des températures sous abri (à 2 m) et en indice actinothermique (pour toutes les stations).....	136
Figure VII.5 : Évolution horaire des indices actinothermiques pour trois stations, la nuit, sur les six printemps et pour la nuit du 13 au 14 avril 2001.....	137
Figure VII.6 : Fréquences des refroidissements nocturnes (19-4h UTC), toutes stations confondues	139
Figure VII.7 : Refroidissements nocturnes moyens (19-4h UTC) par station.....	139
Figure VII.8 : Distribution statistique des moyennes des températures minimales journalières (sous abri et hors abri en indices actinothermiques) pour l'ensemble des stations du vignoble marnais.....	141
Figure VII.9 : Graphique cartésien des rangs hiérarchiques occupés par chaque station selon les températures minimales sous abri (à 2 m) et les minima actinothermiques (hors abri, 10-50 cm).....	144
Figure VII.10 : Graphique cartésien des deux premiers facteurs d'une Analyse en Composantes Principales réalisée sur les températures minimales journalières	147
Figure VII.11 : Histogramme des indices de niveaux de la CAH réalisée sur les températures minimales des stations du vignoble marnais pour les nuits de ciel clair et de vent calme.....	148
Figure VIII.1 : Fréquences des vitesses de vent à Reims-Courcy, avant et après correction (pour toutes les données trihoraires).....	152
Figure VIII.2 : Rose des vents nocturnes printaniers à Reims-Courcy et direction du vent moyen	153
Figure VIII.3 : Schéma de la décomposition de la direction du vent selon la latitude (u) et la longitude (v) (pour un vent de vitesse unité).....	154
Figure VIII.4 : Schéma de la résultante vectorielle.....	154
Figure VIII.5 : Distribution des directions de vent à Vertus (sous la forme d'une rose des vents) et direction du vent moyen.....	154
Figure VIII.6 : Évolution moyenne horaire de la vitesse du vent au cours d'une journée, pour quelques stations	156
Figure VIII.7 : Fréquences des vitesses de vent à 2 m, la nuit, pour toutes les stations retenues.....	157
Figure VIII.8 : Histogramme des indices de niveaux de la CAH réalisée sur les fréquences des directions du vent et des vents nuls pour les stations du vignoble marnais.....	160
Figure VIII.9 : Schéma de la dispersion selon le coefficient STAB [Wisdorff et al., 1999].....	162
Figure VIII.10 : Direction des résultantes vectorielles horaires par station, pour les vents faibles.....	164
Figure VIII.11 : Vecteurs vent pour la nuit du 27 au 28 mars 1999 selon les stations et les heures.....	166

Figure IX.1 : Le refroidissement nocturne journalier (moyenné sur l'ensemble des stations) en fonction de la nébulosité moyenne (à Reims-Courcy).....	170
Figure IX.2 : Le refroidissement nocturne pour les stations du vignoble marnais, en fonction de la vitesse du vent	171
Figure IX.3 : Moyennes du refroidissement nocturne (19-4h UTC) pour toutes les stations, selon les grandes directions de vent (Reims-Courcy ; 0h).....	171
Figure IX.4 : Histogramme des premiers indices de niveaux de la CAH réalisée sur les refroidissements nocturnes journaliers de chaque station du vignoble marnais.....	172
Figure IX.5 : Étendue des refroidissements nocturnes en fonction de leur intensité.....	173
Figure IX.6 : Typologie des nuits printanières à partir d'une CAH réalisée sur les refroidissements nocturnes journaliers de chaque station.....	174
Figure IX.7 : Étendue des températures minimales en fonction de la vitesse moyenne du vent nocturne (pour l'ensemble des stations marnaises).....	179
Figure IX.8 : Étendue des températures minimales en fonction la nébulosité nocturne moyenne à Reims-Courcy.....	180
Figure IX.9 : Écarts moyens journaliers entre températures minimales et minima actinothermiques selon la nébulosité nocturne moyenne à Reims-Courcy	181
Figure IX.10 : Écarts moyens journaliers entre températures minimales et minima actinothermiques selon la vitesse moyenne du vent nocturne (pour l'ensemble des stations marnaises)	182
Figure IX.11 : Écarts moyens journaliers entre températures minimales et minima actinothermiques selon les moyennes journalières des températures minimales.....	182
Figure IX.12 : Écarts moyens des températures horaires (à 2 m, sous abri) pour les couples de stations « bas-haut »	184
Figure IX.13 : Coefficients de corrélation calculés sur les températures horaires (à 2 m, sous abri) pour les couples de stations « bas-haut »	184
Figure X.1 : Calendrier de probabilités d'occurrence de températures inférieures à plusieurs seuils (de -8 à 4°C) à Chambrecy	191
Figure X.2 : Dates printanières, pour chaque année, où le minimum des températures minimales des stations (sous abri, à 2 m) est inférieur à 0°C	192
Figure X.3 : Répartition des grandes directions de vent à Reims-Courcy pour l'ensemble des 468 nuits printanières et pour les 46 nuits gélives.....	196
Figure XI.1 : Températures minimales sous abri prévues (à 17h locale la veille) et relevées à Reims-Courcy (entre 18h la veille et 18h le jour même) pour le printemps 2001	204
Figure XI.2 : Nuage de points croisant les valeurs mesurées et estimées des indices actinothermiques.....	206
Figure XII.1 : Schéma de la spatialisation des données ponctuelles	209
Figure XII.2 : Différentes méthodes d'interpolation géostatistique utilisées pour spatialiser un même ensemble d'observations	213
Figure XII.3 : Les cinq variables géographiques de base pour l'interpolation fonctionnelle	217
Figure XII.4 : Les cinq premiers paysages de base résumant le relief du Massif Central (fenêtre de 5 km x 5 km).....	218
Figure XIII.1 : Températures minimales moyennes des stations en fonction de leurs coordonnées géographiques X	222
Figure XIII.2 : Températures minimales moyennes des stations en fonction de leurs coordonnées géographiques Y	223
Figure XIII.3 : Correspondance entre courbes à deux dimensions et surfaces à trois dimensions	226
Figure XIII.4 : Corrélogramme des températures minimales journalières	231
Figure XIII.5 : Schématisation du variogramme et de ses différents éléments	233
Figure XIII.6 : Quelques modèles d'ajustement possibles des variogrammes	234
Figure XIII.7 : Variogrammes des températures minimales moyennes en supposant une isotropie, puis une anisotropie (selon les directions nord-sud et ouest-est).....	235
Figure XIII.8 : Nuée variographique des températures minimales.....	235
Figure XIV.1 : Schéma de la prise en compte des échelles par l'utilisation des fenêtres spatiales	237

Figure XIV.2 : Graphique cartésien croisant les températures minimales moyennes en fonction de l'altitude des stations	240
Figure XIV.3 : Évolution des coefficients de corrélation, en fonction de l'augmentation de la taille des fenêtres carrées, entre températures minimales et altitude (sans la station Germaine).....	240
Figure XIV.4 : Deux exemples d'évolution des températures minimales en fonction de l'altitude	241
Figure XIV.5 : Altitude et position sur le coteau des stations	242
Figure XIV.6 : Schéma des altitudes relatives de Vertus à 250 m et à 1 km, avec un transect ouest-est	243
Figure XIV.7 : Exemple d'une fenêtre 3 x 3 pour le calcul des dérivées des altitudes	244
Figure XIV.8 : Altitudes (a) ou altitudes lissées (b) pour le calcul de la pente	245
Figure XIV.9 : Coefficients de corrélation journaliers entre les températures minimales et la composante nord-sud de l'orientation (fenêtre de 1 000 m de côté), en fonction du vent nocturne général sur la Marne (résultante sur les données de 21, 0, 3 et 6h UTC)	247
Figure XIV.10 : Sélection des 121 altitudes dans une fenêtre de 3 km.....	249
Figure XIV.11 : Les six premiers paysages de base du relief construits à partir des projections des variables sur les composantes principales.....	250
Figure XIV.12 : Matrice des corrélations entre les descripteurs retenus.....	254
Figure XV.1 : Qualités d'ajustements des modèles calculés, selon les stations enlevées lors de la phase de validation croisée	257
Figure XV.2 : Proportions des dates pour lesquelles les modèles font ressortir les facteurs locaux et/ou les tendances spatiales.....	261
Figure XV.3 : Qualités des modèles journaliers en fonction de la vitesse moyenne du vent nocturne sur l'ensemble du vignoble (A) et de la nébulosité nocturne moyenne à Reims-Courcy (B)	262
Figure XV.4 : Distribution statistique des qualités d'ajustement des modèles journaliers.....	266
Figure XV.5 : Comparaison par station des écarts thermiques moyens à Reims-Courcy estimés à ceux mesurés, lors des nuits de ciel clair et de vent calme.....	268
Figure XV.6 : Comparaison des écarts thermiques à Reims-Courcy estimés à ceux mesurés, pour les stations de Germaine et de Vert-Toulon, lors des nuits de ciel clair et de vent calme	268
Figure XV.7 : Comparaison des spatialisations pour deux dates de ciel clair et de vent calme, les 17 et 20 mars 2003.....	270
Figure XVI.1 : Évolution horaire du vent pour quelques stations du 16 mars 2003 à 12h au 17 mars 2003 à 12h (UTC)...	277
Figure XVI.2 : Évolution horaire des températures sous abri (à 2 m) pour cinq stations représentatives, du 16 mars 2003 à 12h au 17 mars 2003 à 12h (UTC)	279
Figure XVI.3 : Simulation du vent et des températures sur le transect d'Avize au cours de la nuit du 16 au 17 mars 2003 (21, 0, 2, 4, 6 et 8h UTC)	287
Figure XVI.4 : Simulation du vent et des températures sur le transect d'Avize au cours de la nuit du 16 au 17 mars 2003 (18, 0, 3, 6, 7 et 9h UTC)	289
Figure XVI.5 : Profils horaires des températures mesurées et simulées (à 2 m), dans la nuit du 16 au 17 mars 2003, pour six stations représentatives	297
Figure XVI.6 : Profils horaires des vecteurs vent mesurés et simulés (à 2 m) dans la nuit du 16 au 17 mars 2003.....	298

TABLE DES CARTES

Carte I.1 : Limite septentrionale de la culture de la vigne en Europe d'après l'indice de Branas, Bernon et Levadoux (1946).....	22
Carte I.2 : La répartition mondiale des vignobles au début des années 1990.....	23
Carte III.1 : Localisation du vignoble champenois et ses grandes régions viticoles	58
Carte III.2 : Les orientations dans le vignoble champenois	59
Carte III.3 : Les cépages dans le vignoble champenois.....	65
Carte III.4 : Nombre moyen des gelées pour les communes depuis 1951	69
Carte IV.1 : Les 995 stations automatiques du réseau à méso-échelle de Météo France	78
Carte IV.2 : Les stations automatiques du réseau AGREMAM.....	80
Carte IV.3 : Les stations du Zonage vignoble.....	82
Carte IV.4 : Le réseau des 23 stations retenues.....	84
Carte V.1 : Les quatre zones où une information altitudinale est disponible	105
Carte V.2 : Exemple comparatif entre la carte topographique [IGN, 1/25 000, n°2812 O] et la BD Alti® [IGN] : au nord-ouest de Mailly.....	107
Carte V.3 : Exemple comparatif entre la carte topographique [IGN, 1/25 000, n°2812 O] et la BD Alti® [IGN] : au sud de Mailly.....	107
Carte V.4 : Occupation du sol et altitude de notre zone d'étude	115
Carte VII.1 : Répartition de l'évolution des températures minimales sous abri au cours du printemps dans le vignoble marnais.....	135
Carte VII.2 : Répartitions spatiales des températures minimales sous abri (à 2 m) et en indices actinothermiques (hors abri, 10-50 cm) dans le vignoble marnais.....	143
Carte VII.3 : Typologie des stations du vignoble marnais en fonction de leurs températures minimales lors des nuits de ciel clair et de vent calme.....	149
Carte VIII.1 : Fréquences des vents nuls nocturnes par station.....	158
Carte VIII.2 : Distribution des directions des vents nocturnes, sous forme de roses, dans le vignoble marnais	159
Carte VIII.3 : Typologie des stations du vignoble marnais à partir d'une CAH réalisée sur les fréquences des directions du vent et des vents nuls.....	161
Carte VIII.4 : La dispersion des données du vent nocturne printanier pour les stations du vignoble marnais	163
Carte IX.1 : Refroidissement nocturne moyen lors des nuits de la classe 4 (fort refroidissement) d'une CAH réalisée sur les refroidissements nocturnes journaliers de chaque station.....	176
Carte IX.2 : Températures minimales (sous abri, à 2 m) relevées le 19 mars 2003	178
Carte IX.3 : Champ de pression en surface et fronts sur l'Europe de l'Ouest, le 19 mars 2003 à 0h UTC	178
Carte X.1 : Répartition des dégâts par commune lors du printemps 2003	189
Carte X.2 : Répartition des températures minimales sous abri était inférieur à 0°C pour les deux décades.....	194
Carte XIII.1 : Surfaces de tendances du premier ordre des températures minimales sur la France, en janvier et en juillet	224
Carte XIII.2 : Températures minimales moyennes par station et surfaces de tendances, d'ordres 1 et 2, des températures minimales moyennes réalisées automatiquement à l'aide du logiciel Surfer®.....	227
Carte XIV.1 : Projections des points du MNE (individus) sur les trois premières composantes principales	251

Carte XV.1 : Répartition spatiale des résidus du modèle de variation des températures minimales moyennes (sous abri, à 2 m) lors des nuits de ciel clair et de vent calme.....	259
Carte XV.2 : Spatialisation de la moyenne des écarts des températures minimales à Reims-Courcy, lors des nuits de ciel clair et de vent calme.....	267
Carte XV.3 : Spatialisation de la moyenne des écarts des températures minimales à Reims-Courcy, pour les secteurs viticoles autour d'Épernay, lors des nuits de ciel clair et de vent calme.....	269
Carte XVI.1 : Les situations synoptiques en surface et en altitude, les 16 et 17 mars 2003.....	275
Carte XVI.2 : Les températures minimales observées en France, le 17 mars 2003.....	276
Carte XVI.3 : Répartition des températures minimales sous abri (à 2 m) et en indices actinothermiques (hors abri, 10-50 cm) dans le vignoble marnais, le 17 mars 2003	278
Carte XVI.4 : Altitude de la zone simulée à l'échelon 70 km x 70 km et localisation des deux zooms (15 km x 15 km) et des transects	281
Carte XVI.5 : Simulation du champ de vent en altitude (100 et 500 m), le 17 mars 2003 à 3h UTC.....	282
Carte XVI.6 : Simulation du champ de vent à 2 m de la surface, au cours de la nuit du 16 au 17 mars 2003 (18, 21, 0, 3, 6 et 9h UTC)	284
Carte XVI.7 : Simulation du champ de vent à 2 m de la surface, le 17 mars 2003 à 5h UTC.....	285
Carte XVI.8 : Simulation du champ de température à 2 m de la surface, au cours de la nuit du 16 au 17 mars 2003 (2, 4, 6 et 8h UTC)	291
Carte XVI.9 : Simulation du champ de température du sol, le 17 mars 2003 à 6 UTC.....	292
Carte XVI.10 : Simulation du champ d'humidité relative à 2 m, le 17 mars 2003 à 6 UTC	293
Carte XVI.11 : Simulation des champs de vent et de température à 2 m, le 17 mars 2003 à 6 UTC	295

TABLE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Les cinq zones viticoles définies à partir de l'indice de Winkler (1962)	21
Tableau II.1 : Rayonnement net nocturne en fonction de l'état du ciel	41
Tableau III.1: Répartition des surfaces viticoles en champagne selon les départements (dans les années 1990).....	57
Tableau III.2 : Ventes des vins de Champagne en 2002 (en bouteilles de 75 cl)	66
Tableau IV.1 : Les principales caractéristiques des stations du réseau climatique du vignoble champenois	83
Tableau IV.2 : Caractéristiques de l'unité d'acquisition	86
Tableau IV.3 : Principaux résultats horaires et journaliers	86
Tableau IV.4 : Lacunes dans les 468 données thermiques journalières	94
Tableau IV.5 : Lacunes dans les 11 232 données thermiques horaires	95
Tableau IV.6 : Lacunes dans les 11 232 données horaires de vent	96
Tableau V.1 : Libellés des types d'occupation du sol de la BD Carto®	110
Tableau VII.1 : Moyennes par quinzaine des températures minimales journalières (sous abri), à Reims-Courcy, pour chaque printemps de 1998 à 2003 et pour les printemps 1974-2003	131
Tableau VII.2 : Moyenne, par station, des écarts entre les températures minimales journalières sous abri (à 2 m) et hors abri (à 10-50 cm)	145
Tableau VII.3 : Matrice de corrélation entre les stations pour les températures minimales journalières sous abri	146
Tableau VII.4 : Moyenne, minimum et maximum des quatre classes de la CAH réalisée sur les températures minimales des stations du vignoble marnais pour les nuits de ciel clair et de vent calme	149
Tableau VIII.1 : Fréquences (en%) des vents nocturnes printaniers à Reims-Courcy, selon quatre grandes classes de direction (E, W, S, N) et une de vent nul.....	155
Tableau VIII.2 : Matrice de corrélation des données vectorielles de vent pour les stations.....	167
Tableau IX.1 : Caractéristiques générales du refroidissement nocturne, pour chaque classe de la typologie retenue.....	172
Tableau IX.2 : Résultat d'un test du χ^2 effectué entre les typologies des nuits selon le refroidissement et selon la nébulosité	175
Tableau IX.3 : Les vitesses moyennes du vent selon l'intensité du refroidissement	175
Tableau IX.4 : Les températures minimales moyennes (sous abri, à 2 m) pour les trois couples de stations.....	183
Tableau IX.5 : Les écarts moyens des températures minimales (sous abri, à 2 m) pour les trois couples de stations et selon les conditions atmosphériques des nuits.....	185
Tableau X.1 : Tableau des fréquences (en%) des températures minimales négatives par station et pour les quatre premières décades des périodes printanières retenues	193
Tableau X.2 : Proportion des nuits avec ou sans gel, selon les typologies de nébulosité et de vitesse de vent (à Reims-Courcy).....	195
Tableau X.3 : Corrélations entre l'intensité du gel, sa variabilité spatiale et les conditions atmosphériques (nébulosité et vitesse du vent) pour les nuits retenues comme gélives	197
Tableau XI.1 : Répartition des fréquences des valeurs absolues des différences entre l'estimation et l'observation des indices actinothermiques sur l'ensemble des stations et des dates	205
Tableau XI.2 : Coefficients de corrélation entre l'observation et l'estimation des indices actinothermiques pour chaque station.....	207
Tableau XI.3 : Table de vérité Observation / Prédiction de l'aléa gélif (seuil fixé à -2°C).....	207

Tableau XIII.1 : Moyennes de la nébulosité par nuit (21-6h ; à Reims-Courcy) et des vitesses du vent la nuit (pour toutes les stations), selon la possibilité ou non d'un ajustement par régression polynomiale (d'ordre 1).....	229
Tableau XIV.1 : Coefficients de corrélation entre l'altitude relative selon plusieurs voisinages et les moyennes des températures minimales pour l'ensemble des nuits retenues et pour les nuits de vent calme et de ciel clair.....	243
Tableau XIV.2 : Coefficients de corrélation entre la pente selon plusieurs fenêtres spatiales et les moyennes des températures minimales pour l'ensemble des nuits retenues et pour les nuits de vent calme et de ciel clair.....	245
Tableau XV.1 : Résultats (constante, coefficients de corrélation partielle et qualité) des régressions multiples réalisées sur les moyennes des températures minimales (sous abri, à 2 m), en enlevant successivement une station.....	258
Tableau XV.2 : Effectifs des signes des coefficients des différents descripteurs dans les modèles journaliers de spatialisation des températures minimales	263
Tableau XV.3 : Typologie en sept structures-types des modèles – facteurs locaux.....	264
Tableau XV.4 : Les 15 structures observées dans les modèles (facteurs locaux) correspondant aux nuits de ciel clair et de vent calme	265
Tableau XVI.1 : Nébulosité observée et vent mesuré à la station de Reims-Courcy, du 16 mars 2003 à 12h au 17 mars 2003 à 12h (données trihoraires).....	276

TABLE DES ENCADRES

Encadré I.1 : Les géographes français et l'objet vignoble.....	12
Encadré I.2 : Influences des composantes édaphiques et humaines sur la culture de la vigne	13
Encadré I.3 : La notion de terroir	14
Encadré I.4 : Les notions de zéro de végétation, de températures actives et de degrés-jour	17
Encadré IV.1 : Zonage de la Champagne.....	81
Encadré V.1 : Construction et structure des modèles numériques d'élévation.....	102
Encadré V.2 : Pente et azimut, calculs dérivés de l'altitude.....	103
Encadré V.3 : Résolutions planimétrique et altimétrique.....	105
Encadré VII.1 : Typologie des nuits de ciel clair et de vent calme	148
Encadré VIII.1 : Comment résumer le vent ?.....	154
Encadré VIII.2 : Deux méthodes de calcul de la dispersion de la direction du vent	162
Encadré VIII.3 : La corrélation vectorielle	168
Encadré XII.1 : Les méthodes géostatistiques pour l'interpolation spatiale.....	212
Encadré XII.2 : La régression linéaire, simple et multiple.....	216
Encadré XIII.1 : La méthodologie des surfaces de tendances	225
Encadré XIII.2 : Le variogramme	233
Encadré XVI.1 : Le modèle Meso NH.....	274

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
PARTIE I – CADRE DE L’ETUDE	9
Chapitre I - Les relations entre la vigne et le climat	11
<i>I.1 - Les exigences climatiques de la vigne influencent la géographie mondiale des vignobles</i>	12
I.1.1 - Exigences climatiques de la vigne	15
I.1.2 - Potentialités (macro)climatiques d’une région viticole à l’aide d’indices bioclimatiques	20
I.1.3 - Répartition mondiale des vignobles	23
<i>I.2 - Facteurs méso et micro-climatiques de la répartition des vignobles</i>	25
I.2.1 - Les facteurs topographiques	25
I.2.2 - La végétation	27
I.2.3 - La proximité des surfaces en eau	27
I.2.4 - Le sol	27
<i>I.3 - Viticulture et variations temporelles</i>	28
I.3.1 - Phénologie de la vigne	29
I.3.2 - Contraintes climatiques	31
<i>Conclusion du chapitre I</i>	34
Chapitre II - Le phénomène des gelées	35
<i>II.1 - Les gelées radiatives</i>	35
II.1.1 - Les différents types de refroidissement de l’air	36
II.1.2 - Le bilan radiatif	37
II.1.3 - Les facteurs de la variabilité des températures minimales	40
<i>II.2 - La vigne face au gel</i>	46
II.2.1 - Le phénomène du gel à l’échelle de la cellule	46
II.2.2 - Une sensibilité de la vigne variable selon les stades phénologiques	47
II.2.3 - Les moyens de lutte contre le gel	48
<i>II.3 - Les méthodes d’estimation d’un aléa gélif</i>	50
II.3.1 - Calendriers de probabilités de l’aléa gélif	51
II.3.2 - Détermination par thermographie infrarouge des zones d’accumulation d’air froid lors des gelées radiatives	52
II.3.3 - Les différentes méthodes de prévision du refroidissement nocturne	52
II.3.4 - Le modèle numérique de l’INRA	55
<i>Conclusion du chapitre II</i>	56
Chapitre III - Le vignoble champenois : un vignoble prestigieux sensible aux gelées printanières	57
<i>III.1 - Caractéristiques géographiques : à la limite septentrionale de la viticulture</i>	57
<i>III.2 - Un climat océanique de transition</i>	61
<i>III.3 - L’appellation AOC Champagne</i>	63
<i>III.4 - Les gelées en Champagne</i>	68
III.4.1 - Des gelées printanières fréquentes mais très variables d’une année à l’autre	68
III.4.2 - Le système opérationnel de prévision des gelées de printemps par Météo France	70
<i>Conclusion du chapitre III</i>	73

PARTIE II – DONNEES ET APPROCHE METHODOLOGIQUE	75
Chapitre IV - Les données climatiques	77
<i>IV.1 - Les réseaux d'information climatique de la Marne</i>	77
IV.1.1 - Les réseaux de Météo France	77
IV.1.2 - Le réseau AGREMAM	79
IV.1.3 - Le réseau Zonage du vignoble	80
IV.1.4 - Le réseau de stations retenues	82
<i>IV.2 - Acquisition et constitution des bases de données climatiques</i>	85
IV.2.1 - Acquisition des données et traitements initiaux des données par les stations automatiques	85
IV.2.2 - Les paramètres climatiques retenus	88
IV.2.3 - Choix temporels	90
<i>IV.3 - Critique des données climatiques</i>	90
IV.3.1 - Les méthodes de contrôle utilisées	91
IV.3.2 - Principaux résultats	94
<i>Conclusion du chapitre IV</i>	100
Chapitre V - La base de données environnementales : altitude et occupation du sol	101
<i>V.1 - Données altitudinales</i>	101
<i>V.2 - Données d'occupation du sol</i>	109
<i>V.3 - Du choix d'une zone d'étude à la création d'une base de données environnementales</i>	113
<i>Conclusion du chapitre V</i>	116
Chapitre VI - L'approche méthodologique	117
<i>VI.1 - Une approche statistique</i>	117
VI.1.1 - Statistiques univariées	118
VI.1.2 - Statistiques bivariées	118
VI.1.3 - Statistiques multivariées	119
<i>VI.2 - La modélisation au cœur de l'estimation de l'aléa gélif</i>	119
VI.2.1 - L'adaptation statistique	119
VI.2.2 - Le modèle de régression multiple	120
VI.2.3 - Le modèle numérique Meso NH	120
<i>VI.3 - Les dimensions temporelles et spatiales de l'information</i>	121
VI.3.1 - La question du temps	121
VI.3.2 - L'intégration de l'espace	122
VI.4 - L'apport ambigu des Systèmes d'Information Géographique	123
<i>Conclusion du chapitre VI</i>	125
PARTIE III – VARIABILITES SPATIALE ET TEMPORELLE DES TEMPERATURES MINIMALES ET DES ECOULEMENTS DE L'AIR	127
Chapitre VII - Les températures minimales printanières dans le vignoble marnais	129
<i>VII.1 - Les nuits des printemps 1998-2003 par rapport à un temps plus long</i>	129
VII.1.1 - Comparaison des moyennes printanières des températures minimales	130
VII.1.2 - Comparaison des moyennes par quinzaine	131
<i>VII.2 - Variabilité temporelle des températures minimales</i>	132
VII.2.1 - L'évolution des températures minimales au cours du printemps	132
VII.2.2 - Évolution des températures au cours de la nuit	136
VII.2.3 - Le refroidissement nocturne	138
<i>VII.3 - Variabilité spatiale des températures minimales</i>	140
VII.3.1 - Moyennes des températures minimales	140
VII.3.2 - Répartition spatiale des températures minimales moyennes	142
VII.3.3 - Les écarts entre température minimale et minimum actinothermique	143

VII.3.4 - Vers le zonage thermique du vignoble marnais	145
<i>Conclusion du chapitre VII</i>	150
Chapitre VIII - Les écoulements de l'air, les nuits de printemps	151
VIII.1 - <i>Un premier aperçu à partir de la station synoptique de Reims-Courcy</i>	152
VIII.1.1 - La correction de la vitesse du vent à Reims-Courcy	152
VIII.1.2 - À l'échelle synoptique, un vent principalement de secteur sud-ouest	153
VIII.1.3 - Variabilité du vent général au cours du printemps	154
VIII.2 - <i>Le vent nocturne printanier dans le vignoble marnais</i>	156
VIII.2.1 - Le vent nocturne dans le vignoble marnais : un vent faible	156
VIII.2.2 - Le champ de vent dans le vignoble marnais fortement lié au relief	158
VIII.2.3 - La typologie des stations selon leurs fréquences directionnelles de vent	160
VIII.2.4 - La dispersion, par station, de la donnée vent	161
VIII.2.5 - Évolution de la direction du vent au cours de la nuit	163
VIII.3 - <i>Représentativité de la donnée vent à Reims-Courcy</i>	166
VIII.3.1 - Pertinence dans le temps	166
VIII.3.2 - Pertinence dans l'espace	167
<i>Conclusion du chapitre VIII</i>	168
Chapitre IX - L'influence des conditions atmosphériques	169
IX.1 - <i>Le refroidissement nocturne</i>	169
IX.1.1 - Relation entre l'intensité du refroidissement et la nébulosité	169
IX.1.2 - Relation entre l'intensité du refroidissement et la vitesse du vent	170
IX.1.3 - Relation entre l'intensité du refroidissement et la direction du vent	171
IX.1.4 - Typologie des nuits en fonction des refroidissements nocturnes	172
IX.1.5 - Les nuits de très forts refroidissements	175
IX.2 - <i>La variabilité spatiale des températures minimales en fonction des conditions atmosphériques</i>	177
IX.2.1 - Des contrastes thermiques particulièrement forts	177
IX.2.2 - L'influence des conditions atmosphériques sur la variabilité spatiale des températures minimales	179
IX.3 - <i>L'inversion thermique</i>	180
IX.3.1 - Différences thermiques entre les capteurs des températures minimales à 2 m (sous abri) et à 10-50 cm (hors abri)	181
IX.3.2 - Les couples de stations	183
<i>Conclusion du chapitre IX</i>	185
Chapitre X - Les nuits de gel	187
X.1 - <i>Étude dynamique des fortes gelées d'avril 2003</i>	187
X.2 - <i>Les gelées printanières dans le temps</i>	190
X.3 - <i>La variabilité spatiale des gelées</i>	192
X.4 - <i>Relation avec la nébulosité et le vent</i>	195
X.4.1 - Selon l'occurrence du gel	195
X.4.2 - Selon l'intensité du gel	196
<i>Conclusion du chapitre X</i>	197
PARTIE IV – MODELISATIONS SPATIALES DES TEMPERATURES MINIMALES	199
Chapitre XI - Amélioration de l'adaptation statistique de Météo France	201
XI.1 - <i>Quelques améliorations apportées à la méthode originelle de Choissnel et al. [1993]</i>	201
XI.2 - <i>Analyse critique des entrées de l'adaptation statistique</i>	203
XI.2.1 - Qualité de la prévision de la température minimale à Reims-Courcy	203
XI.2.2 - Qualité de la prévision du type de masse d'air	204
XI.3 - <i>Analyse critique des sorties de l'adaptation statistique</i>	205

XI.3.1 - Qualité générale de l'adaptation statistique	205
XI.3.2 - Qualité selon les stations	206
XI.3.3 - Qualité de la prévision de l'aléa gélif	207
<i>Conclusion du chapitre XI</i>	208
Chapitre XII - Quelques références sur la spatialisation des données ponctuelles	209
XII.1 - <i>Interpolation géostatistique</i>	211
XII.2 - <i>Interpolation multicritère</i>	215
<i>Conclusion du chapitre XII</i>	218
Chapitre XIII - Analyse spatiale du champ thermique	221
XIII.1 - <i>Relations linéaires simples entre les températures minimales et les coordonnées géographiques des stations</i>	221
XIII.2 - <i>Les surfaces de tendances ou surfaces d'ajustements</i>	223
XIII.2.1 - Les surfaces de tendances des températures minimales moyennes	226
XIII.2.2 - Les surfaces de tendances des températures minimales journalières sous abri	228
XIII.3 - <i>Autocorrélation spatiale des températures minimales journalières</i>	231
XIII.3.1 - Le corrélogramme des températures minimales journalières	231
XIII.3.2 - Le variogramme des températures minimales moyennes	232
<i>Conclusion du chapitre XIII</i>	236
Chapitre XIV - Prise en compte des facteurs locaux	237
XIV.1 - <i>Quelques éléments caractéristiques du relief</i>	238
XIV.1.1 - L'altitude	239
XIV.1.2 - La pente	244
XIV.1.3 - L'orientation	246
XIV.2 - <i>Une approche plus synthétique : la méthode AURELHY</i>	248
XIV.3 - <i>L'occupation du sol</i>	252
<i>Conclusion du chapitre XIV</i>	253
Chapitre XV - Spatialisations des températures minimales	255
XV.1 - <i>Modélisation des températures minimales moyennes lors des nuits de ciel clair et de vent calme</i>	255
XV.1.1 - Le modèle retenu	256
XV.1.2 - La robustesse du modèle à partir d'une validation croisée	256
XV.1.3 - Analyse en surfaces de tendances des résidus du modèle	258
XV.2 - <i>Modélisation des températures minimales journalières</i>	259
XV.2.1 - Des qualités très variables selon les nuits	260
XV.2.2 - Vers une typologie des nuits basée sur les modèles des températures minimales	262
XV.3 - <i>Spatialisation des écarts thermiques à Reims-Courcy lors des nuits de ciel clair, vent calme</i>	265
XV.4 - <i>Étude de cas sur deux nuits de ciel clair et de vent calme (17 et 20 mars 2003)</i>	269
<i>Conclusion du chapitre XV</i>	271
Chapitre XVI - Apport des simulations du modèle Meso NH pour la nuit du 16 au 17 mars 2003	273
XVI.1 - <i>La situation observée les 16 et 17 mars 2003 dans le vignoble marnais</i>	274
XVI.1.1 - Le contexte synoptique des 16 et 17 mars 2003	274
XVI.1.2 - À partir des stations du vignoble marnais	277
XVI.2 - <i>Les simulations Meso NH pour la nuit du 16 au 17 mars 2003</i>	280
XVI.2.1 - Quelques données techniques de la simulation	280
XVI.2.2 - Les champs de vent	282
XVI.2.3 - Les transects d'Avize et de la Vallée de la Marne	285
XVI.2.4 - Les températures	290

XVI.2.5 - Humidité	292
XVI.2.6 - Superposition des champs de vent et de température	294
XVI.3 - Validation des sorties du modèle à partir des données mesurées	295
XVI.3.1 - Validation des simulations des températures	296
XVI.3.2 - Validation des simulations des vents	297
Conclusion du chapitre XVI	299
CONCLUSION	301
BIBLIOGRAPHIE	307
TABLES	331
Table des figures	333
Table des cartes	337
Table des tableaux	339
Table des encadrés	341
Table des matières	343
ANNEXES	
Annexe A : L'aperçu climatique de la région Champagne-Ardenne	
Annexe B : Le bulletin vignoble de Météo France	
Annexe C : Guide technique d'une station Enerco de Cimel Electronique	
Annexe D : Critique des données climatiques	
Annexe E : Diverses méthodes statistiques utilisées	
Annexe F : Les BHER de début avril 2003	
Annexe G : Présentation des stations et mesures sur le terrain	
Annexe H : Programme des altitudes lissées sous le module IML de SAS®	
Annexe I : Les dates sélectionnées pour des simulations Meso-NH	
Annexe J : La chaîne Meso-NH	
Annexe K : Quelques occupations du sol utilisées dans le modèle Meso NH	

Annexes

Annexe A : L'aperçu climatique de la région Champagne-Ardennes

Annexe B : Le bulletin vignoble de Météo France

Annexe C : Guide technique d'une station *Enerco* de Cimel Electronique

Annexe D : Critique des données climatiques

Annexe E : Diverses méthodes statistiques utilisées

Annexe F : Les BHER de début avril 2003

Annexe G : Présentation des stations et mesures sur le terrain

Annexe H : Programme des altitudes lissées sous le module IML de SAS®

Annexe I : Les dates sélectionnées pour des simulations Meso-NH

Annexe J : La chaîne Meso-NH

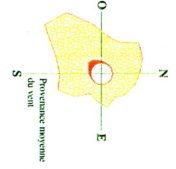
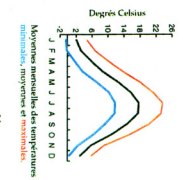
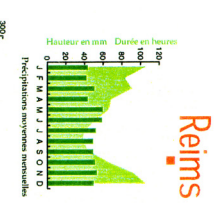
Annexe K : Quelques occupations du sol utilisées dans le modèle Meso NH

ANNEXE A : L'APERÇU CLIMATIQUE DE LA REGION CHAMPAGNE-ARDENNES

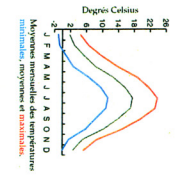
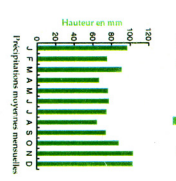
Aperçu climatique sur la région Champagne-Ardenne



Reims



Signy-l'Abbaye



... L'amplitude thermique annuelle* reste modérée, mais s'accroît vers le sud. Elle atteint notamment 15,9 °C à Signy-l'Abbaye (11,8 °C moyen en janvier - 17,6 °C en juillet).

Les vents forts proviennent essentiellement du sud-ouest. L'insolation (durée d'insolation) augmente du nord au sud, de 1600 à 1800 heures.

* amplitude thermique annuelle : écart entre la température moyenne du mois le plus chaud et celle du mois le plus froid.

La région Champagne-Ardenne connaît un climat océanique de transition, avec une tendance continentale sensible sur le sud et l'est.

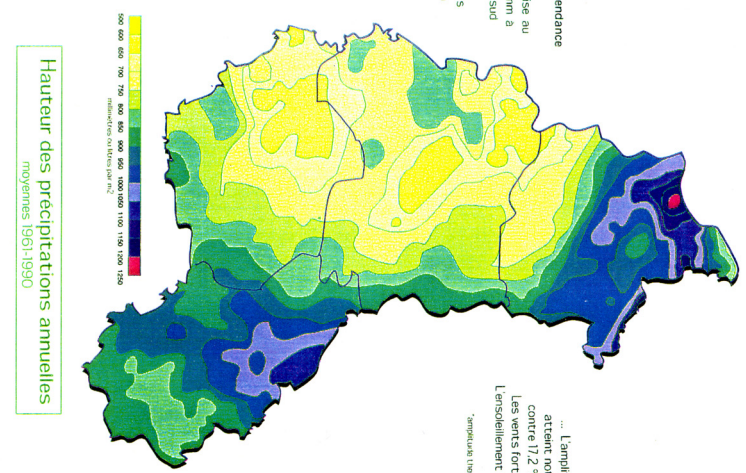
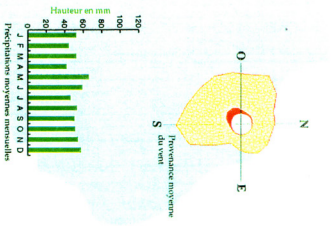
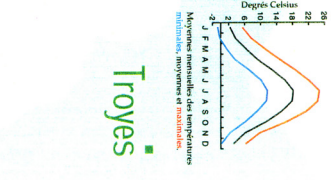
La quantité de pluie moyenne annuelle varie du simple au double entre la plaine champenoise au centre (504 mm à Reims, 633 mm à Troyes) et les reliefs des Ardennes au nord (993 mm à Signy-l'Abbaye, localement jusqu'à 1250 mm), de l'Argonne jusqu'au plateau de Langres au sud (877 mm à Langres, localement jusqu'à 1100 mm).

La répartition moyenne de ces pluies en cours d'année est relativement homogène mais présente néanmoins un maximum automnal (surtout sensible au nord et avec l'altitude) et un autre maximum à la fin du printemps (plus marqué au sud ou la continentalisation du climat est la plus forte).

Enfin, le caractère bref et intense des épisodes pluvieux estivaux apparaît nettement si l'on rapporte la hauteur des pluies à leur durée (à Reims : 49 mm en 40 h en moyenne au mois d'août - 44 mm en 108 h au mois de janvier) ...

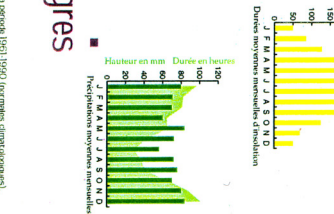
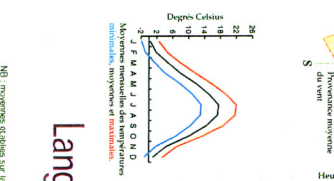
DIR/N/RPC - 07/96

Troyes



Hauteur des précipitations annuelles moyennes 1961-1990


Langres



NB : moyennes climatiques sur la période 1961-1990 (normales climatologiques). Le service Troyes a été complété avec l'état de l'année sur Seine.

Source : [Météo-France, n.d.]

ANNEXE B : LE BULLETIN VIGNOBLE DE METEO FRANCE



METEO FRANCE

Bulletin pour le 18 Avril 1999

BULLETIN VIGNOBLE

page 1

17 Avril 99

Bulletin pour le 18 Avril 1999

BULLETIN VIGNOBLE

TARDENOIS Station Automatique de Référence REIMS-Courcy zone 5101

	14 h	17 h	20 h	23 h	02 h	05 h	08 h	11 h	14 h
Nébulosité									
Temps Sensible				R.A.S.	R.A.S.	R.A.S.	R.A.S.		
T° en °C	12	13	8	4	1	-1	2	7	8
Direction du Vent									
Vitesse km/h	06-13	06-13	06-13	06-13	06-13	06-13	06-13	06-13	06-13
Rafale km/h	<61	<61	<61	<61	<61	<61	<61	<61	<61

VIGNOBLE Station Automatique de Référence AVIZE zone 5102

	14 h	17 h	20 h	23 h	02 h	05 h	08 h	11 h	14 h
Nébulosité									
Temps Sensible				R.A.S.	R.A.S.	R.A.S.	R.A.S.		
T° en °C	11	13	8	4	1	0	2	7	8
Direction du Vent	VAR								
Vitesse km/h	0-4	06-13	06-13	06-13	06-13	06-13	06-13	06-13	06-13
Rafale km/h	<61	<61	<61	<61	<61	<61	<61	<61	<61

LEGENDE

Direction du vent	Peu nuageux	Nuageux avec éclaircies	Ciel de traine	Rares averses de pluie	Averses de pluie	Averses de grêle

Centre Départemental de la Marne
 5, rue des Marmouzets - 51100 REIMS Fax: 03.26.40.16.66



samedi 17 avril 1999

page 2/2

**Bulletin Vignoble
Campagne de gelées de printemps**

Type de situation : Radiative

Prévisions sur Reims :

Précipitations Minimales en mm	0
Précipitations Maximales en mm	3
Température Minimale (en °C)	-2
Température Maximale (en °C)	9

Température minimale à +10 cm au dessus du sol :

AVIZE	MAILLY	BOUZY	CHAMBRECY
-3.7	-1.8	1.8	-5.2

Tendance pour les jours suivants

	J+2	J+3	J+4	J+5	J+6	J+7
Température Minimale	Stationnaire	Hausse	Hausse	Stationnaire	Stationnaire	Stationnaire
Température maximale	Stationnaire	Hausse	Hausse	Stationnaire	Stationnaire	Stationnaire
Temps prévu	Faible risque d'averses	Pluie	Pluie intermittente	Averses de pluie	Pluie intermittente	Pluie intermittente
Direction du vent	Variable	Sud-Ouest	Ouest	Ouest	Ouest	Ouest
Force du vent	Faible	Modere	Modere	Modere	Modere	Modere

Pour la période du MERCREDI 21 au JEUDI 22, l'indice de confiance de la prévision est de 4 sur 5, 5 étant le niveau de confiance le plus élevé.

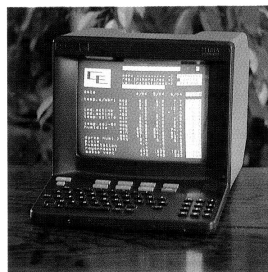
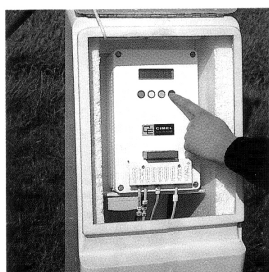
Pour la période du VENDREDI 23 au SAMEDI 24, l'indice de confiance de la prévision est de 3 sur 5, 5 étant le niveau de confiance le plus élevé.

ANNEXE C : GUIDE TECHNIQUE D'UNE STATION *ENERCO* DE CIMEL ELECTRONIQUE

stations météorologiques

ENERCO 407 - 411 - 416

Utilisées par
METEO FRANCE
I.N.R.A.
INSTITUTS TECHNIQUES
PROTECTION DES VEGETAUX



CIMEL ELECTRONIQUE

5, Cité de Phalsbourg - 75011 PARIS - Tél. (1) 43.48.79.33

CIMEL Electronique spécialisée dans la mesure des signaux bas-niveaux réalise dans le domaine de la climatologie des systèmes complets intégrant capteurs, stations d'acquisition et logiciels d'exploitation.

Capteurs : température, humidité relative, humectation, force et direction du vent ainsi qu'une gamme étendue pour les mesures radiatives, pyranomètre, héliographe, radiomètre, photomètre.

Stations météorologiques automatiques : capacité de 2 à 16 voies avec différents modes de communication.

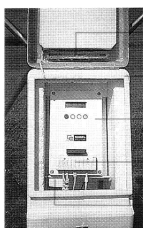
Logiciels d'exploitation à buts climatique et agro-climatique fonctionnant sur micro-ordinateur.

PRESENTATION

L'ensemble cohérent et très simple à installer est livré avec tous ses accessoires.

Il comprend :

- Un abri de protection en polyester armé avec ventilation naturelle et habillage interne pour réduire les effets de condensation. Panneau solaire incorporé au portillon.
- un jeu de mâts intégré à la structure avec dispositif de fixation rapide des capteurs. Les mâts creux s'emboîtent sur la borne abri de manière à protéger intégralement, mécaniquement et électriquement les câbles capteurs.
- le coffret d'électronique.
- les capteurs aux normes Météo.
- les organes de communication (conjoncteur téléphonique). Interface série, RS 232.
- un lot de mise à la terre avec tresse et piquet.



- ventilation
- abri extérieur avec protection thermique
- électronique étanche
- Bornier enfichable avec protection foudre
- raccordement téléphone

CARACTERISTIQUES

PARAMETRE	CADENCE DE MESURE	ETENDUE DE MESURE	RESOLUTION	PRECISION A 25°C
TEMPERATURE	5s	-40 à +60°C	0,1°C	0,02°C
PRECIPITATION	4ms	0-360mm/h	1 basc.	N. A.
HUMIDITE	30s	0-100 %	0,5 %	0,5 %
HUMECTATION	5s	N. A.	6 mm	5s
FORCE VENT	0,5s	0-64 m/s	0,1 m/s	N. A.
DIRECT VENT	0,5s	360°	5°	> 1°
RAYONNEMENT	5s	-5 à +1,5 Wm ⁻²	1 J	0,05%
DUREE INSOL.	4 ms	N. A.	36s	N. A.
HAUTEUR D'EAU	60s	20.000 inc.		0,01%
PRESSION ATM.	60s	900-1050 hPa	0,1 hPa	0,01%

REFERENCES

Plus de 800 stations en service à fin 1990.

Automatisation des principaux réseaux suivants :

- INRA.
- Instituts Techniques.
- Protection des Végétaux.
- Nombreux réseaux collectifs départementaux gérés par METEO FRANCE.

A l'Etranger, présence dans plus de 30 pays pour le compte d'organismes internationaux tels que : Organisation Mondiale de la Météorologie, F. A. O. PNUD, Communauté Européenne, CRDI Ottawa, ORSTOM, IRAT...



TECHNOLOGIE

Matériel étudié pour une utilisation sous toutes conditions climatiques.

Fonctionne dans des environnements extrêmes allant des zones polaires aux régions tropicales et équatoriales.

A titre d'exemple :

- des stations du réseau IRAT à l'île de la Réunion ont enregistré pour la journée du 12.02.1987 une hauteur de précipitation de 1.358mm et un cumul de vent passé supérieur à 500 km.
- Implantation au Népal à plus de 5.000 m d'altitude.

Pour faire face à ces contraintes d'environnement, emploi d'une technologie double enveloppe :

- un **coffret extérieur ventilé** avec protection thermique interne.
- un **coffret d'électronique étanche** et deshydraté de faibles dimensions.
- Bornier de raccordement capteurs enfichables avec prises individuelles.
- **Electronique hautement intégrée**, utilisation de circuits à logique programmée.
- Ceci permet la réduction du nombre des composants et augmente la fiabilité globale.

Cette technologie pour environnement sévère est utilisée pour toutes nos stations afin d'assurer un haut niveau de fiabilité et une facilité d'exploitation.

Protection renforcée de :

- entrées capteurs par limiteurs de tension individuels.
- alimentation par fusible.
- entrée téléphonique par double limiteur de tension.

Consommation réduite : inférieure à 1mA pour une tension de 5V, ce qui conduit à un panneau solaire de faibles dimensions et une batterie d'autonomie 1 mois en l'absence de recharge.

MAINTENANCE

Aisée à réaliser par simple échange. Tous les éléments sont de faible encombrement et reliés par connecteur.

Télesurveillance et téléchargement

Afin de limiter les déplacements, il est possible de réaliser à distance via le réseau téléphonique un certain nombre de diagnostics.

En effet Enerco effectue en permanence des tests sur son fonctionnement, sur celui des capteurs, de l'alimentation et donne des compte-rendus.

Statistiquement très faible coût de maintenance.

Annuellement inférieur à 4% du montant de l'investissement.

TRAITEMENTS

Traitements de base :

Valeurs normalisées selon la nature des capteurs : moyenne, recherche mini et maxi avec heure d'apparition, cumul...

En option :

Traitement évènementiel des grandeurs aléatoires.

RESULTATS STOCKES

Résultats semi-horaires selon la procédure PATAc.

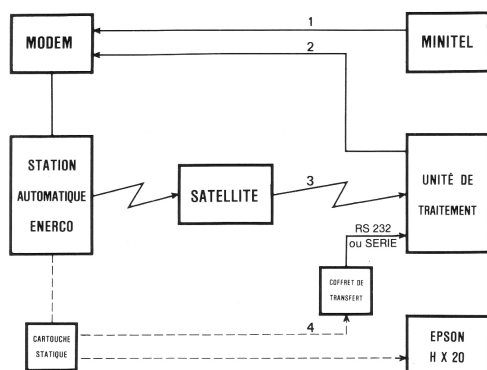
Résultats horaires et journaliers selon tableau ci-contre.

Paramètre	Résultats journaliers	Résultats horaires
Température	- Valeurs minimale, moyenne et maximale, avec instants des extrema	- Valeur relevée à l'heure ronde
Précipitations	- Hauteur des précipitations - Hauteur maximale de pluie sur 6 minutes et instant de ce maxima	- Hauteur des précipitations - Hauteur maximale de pluie sur 6 minutes
Humidité	- Valeurs minimale, moyenne et maximale, avec instant des extrema - 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 l'humectation	- Durée de l'humectation
Rayonnement	- Rayonnement intégré	- Rayonnement intégré
Vent	- Total du vent passé. Vitesse max	- Total du vent passé.

Capacité de stockage en mémoire vive

Station	Jours + heures	Jour + heure + 1/2 heure
404	23 jours	20 jours
407	23 jours	5 jours
411	23 jours	4 jours

EXPLOITATION



Exploitation locale

- Accès en visualisation à toutes les données
- Valeurs instantanées.
- Résultats de traitement de la mémoire interne.
- Résultats stockés dans la cartouche mémoire.
- Paramétrage station :
 - identificateur, date, heure, présence et sensibilité capteur.
- Saisie de paramètres complémentaires :
 - observation, comptage, travaux, irrigation...

1 - Consultation minitel

Accès direct par toute personne connaissant le numéro de téléphone de la station. L'accès peut être protégé par un mot de passe.

Présentation des données climatiques sur 3 pages :

- valeurs instantanées + données de contrôle.
- valeurs journalières : jour en cours + 3 derniers jours.
- valeurs horaires.

Une page de service permet la lecture de messages ou de graphiques téléchargés par un technicien ou en automatique.

2 - Liaison ordinateur

La station équipée d'un modem peut être interrogée via le réseau téléphonique par un micro-ordinateur selon différents protocoles :

- INRA.
- INTER-INSTITUT pour utilisation de METEOPRO et ANETH.
- PATAc de METEO FRANCE.
- MICRO SESAME du S.R.P.V.
- CIRED0 pour Services routiers.

3 - Transmission Radio ou Satellite

Message adapté aux normes de transmission.

4 - Cartouche mémoire

Enregistrée sur mémoire REPR0M.

Entièrement statique sans alimentation interne.

Capacité de stockage : 1 à 4 mois selon station.

Transfert sur micro-ordinateur par carte interface.

TYPES DE STATIONS

ENERCO 407	ENERCO 411	ENERCO 416
Capacité 7 capteurs	Capacité 11 capteurs	Capacité 16 capteurs
1 température air 1 pluviomètre 1 humidité relative 1 durée de mouillage 1 pyranomètre 1 anémomètre 1 girouette ou temp. auxiliaire	1 température air 2 températures sol 2 indices actinothermiques 1 pluviomètre 1 humidité relative 1 durée de mouillage 1 pyranomètre 1 anémomètre 1 girouette	1 température air 2 températures sol 2 indices actino 1 pluviomètre 2 humidités relatives 1 durée de mouillage 2 pyranomètres 1 anémomètre 1 girouette 1 héliographe 1 hauteur d'eau ou pression atmosphérique 1 température suppl.

MODE D'EXPLOITATION

STATION	MODEM	CARTOUCHE MEMOIRE	METEOSAT
ENERCO AR	X	X	
ENERCO AX	X		
ENERCO AK		X	
ENERCO AM		X	X

Indice A : traitement jour + heure
Indice P : traitement jour + heure + 1/2 heure

LOGICIELS

Utilisation à partir d'un micro-ordinateur IBM PC équipé d'une carte MODEM ou d'un interface de lecture de cartouche mémoire.

CIMCOM

- Interrogation des stations ENERCO.
- Configuration de la station :
 - . Paramétrage du site, des capteurs.
 - . Mise à date et heure.
 - . Paramétrage du mot de passe.
- Téléchargement de page message Minitel.
- Téléchargement du nom de site station sur la page de présentation Minitel.
- Visualisation des valeurs instantanées.

CIMMET

- Visualisation des données.
- Affichage des courbes.
- Compatibilité METEOPRO.
- Création de fichiers compatibles : LOTUS, dBASE, PARADOX, MULTIPLAN...

METEOPRO

Logiciel conçu par l'ACTA pour l'utilisation des données météorologiques à des fins agricoles.
Intègre CIMCOM et CIMMET.
Fonctionne sur IBM PC, MS DOS.

PROGRAMMES GENERAUX

- Acquisition des données issues des stations.
- Mise sur fichiers.
- Présentation de bilans : journaliers, décennaires, mensuels.
- Suivi des stades culturaux par sommation de températures.

IRRIGATION

- Calcul journalier de l'ETP PENMAN.
- Bilan decadaire.

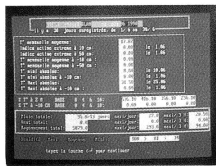
BILAN HYDRIQUE

- Gestion par parcelles.

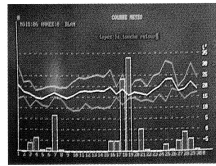
VISUALISATION ET EDITION DE COURBES

RISQUES PHYTO

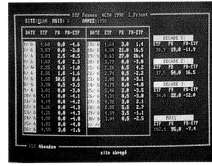
- **Viticulture**
 - Mildiou. Calcul de l'E.P.I.
 - Botrytis, Blackrot, Eudemis.
- **Arboriculture**
 - Tavelure
 - Date de contamination théorique.
 - Carpocapse, Tordeuse orientale...
- **Grandes cultures**
 - Mildiou de la Pomme de terre.
 - Sclerotinia du Tournesol...



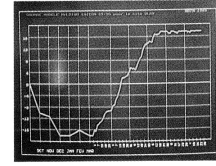
BILANS



COURBES



IRRIGATION



MALADIES

ANNEXE D : CRITIQUE DES DONNEES CLIMATIQUES

D.1 - Reconstitution des valeurs manquantes

Données thermiques journalières

Tab. D - 1 : Régressions utilisées pour la reconstitution des données thermiques journalières manquantes

Stations	Donnée à estimer	Coefficient de corrélation	Equation du modèle	Qualité (coefficient de détermination)
Avize bas	IA	0.98	$IA = -1,291 + 0.996 * T_n$	95.5%
Reims-Courcy	IA	0.96	$IA = -3.154 + 1.097 * T_n$	93.1%
Vert-Toulon	IA	0.99	$IA = -0.598 + 1.011 * T_n$	99.0%
Verzenay	IA	0.98	$IA_{Vzy} = 0.288 + 0.992 * IA_{Sil}$	96.0%
	Tn	0.98	$Tn_{Vzy} = 0.502 + 0.976 * Tn_{Sil}$	96.8%

Données : 15/03-31/05 1998-2003, CIVC, Météo-France

Données thermiques horaires

Tab. D - 2 : Régression utilisée pour la reconstitution des données thermiques horaires manquantes à Avize bas

Stations	Donnée à estimer	Coefficient de corrélation	Equation du modèle	Qualité (coefficient de détermination)
Avize bas	Tn	0.99	$Tn_{Avb} = -0.125 + 0.978 * Tn_{Fch}$	97.0%

Données : 15/03-31/05 1998-2003, CIVC, Météo-France

D.2 - Valeurs aberrantes

Tab. D - 3 : Températures minimales (Tn) et indices actinothermiques (IA) mesurés le 31 mai 2000

Station	Tn	IA	Station	Tn	IA
Avb	10,8	10,5	Oeu	2,1	10,6
Avz	10,6	10,6	Orb	10,6	10,1
Ay	10,9	10,5	Pcq	10,3	10
Bzb	10,6	10,4	Rei	10,4	10
Bzy	10,2	10,2	Sac	10,2	9,9
Cby	10,2	10,5	Sav	10,1	10,3
Cht	10,2	9,9	Sil	10	9,7
Fch	11,1	11,3	Sth	9,9	9,9
Fle	10,2	10,2	Vtl	10,8	10,8
Ger	10,1	9,9	Vts	10,7	10,9
Mai	9,8	10,9	Vzy	10,3	10,2
Nog	9,3	9,3			

Données : 31/05/2000, CIVC, Météo-France

Tab. D - 4 : Proportions, par stations, des directions de vent non nulles avec une vitesse nulle

Station	Organisme	Part des valeurs de direction aberrantes (en % du total de données)
Avb	Météo-France	0
Ay	CIVC	21.5
Fle	CIVC	28.6
Ger	CIVC	34.6
Nog	CIVC	33.6
Oeu	CIVC	29.5
Orb	CIVC	29.0
Pcq	CIVC	11.7
Rei	Météo-France	0
Sac	CIVC	22.6
Sil	CIVC	15.0
Vtl	CIVC	22.3
Vts	CIVC	12.6

Données : 15/03-31/05 1998-2003, CIVC, Météo-France

Tab. D - 5 : Fréquence des températures minimales journalières (sous abri) considérées comme valeurs remarquables

DATE	AVZ	CBY	FLE	GER	OEU	SIL	VTL	VZY
10/04/98							X	
24/05/98*							X	
24/03/99				X				
14/04/99							X	
13/05/99							X	
24/03/00*				X				
27/03/00*				X				
01/04/00				X				
15/04/00								X
19/04/00				X				
21/04/00				X				
02/05/00*		X						
07/05/00				X				
12/05/00*			X					
19/05/00				X				
31/05/00					X			
16/03/01		X						
10/04/01*						X		
11/04/01*						X		
18/04/01				X				
27/04/01				X				
03/05/01	X							
18/03/02				X				
26/05/02				X				
10/04/03		X						
21/04/03				X				
05/05/03				X				
12/05/03				X				
14/05/03				X				
20/05/03				X				
Total	1	3	1	17	1	2	4	1

X : l'écart à la moyenne (de l'ensemble des stations, pour cette date) est supérieur à 3 écart-type (en valeur absolue).

* : pour cette date, la température en indice actinothermique est également considérée comme valeur aberrante pour la même station.

Données : 15/03-31/05 1998-2003, CIVC, Météo-France

Tab. D - 6 : Fréquence des indices actinothermiques journaliers considérées comme valeurs remarquables

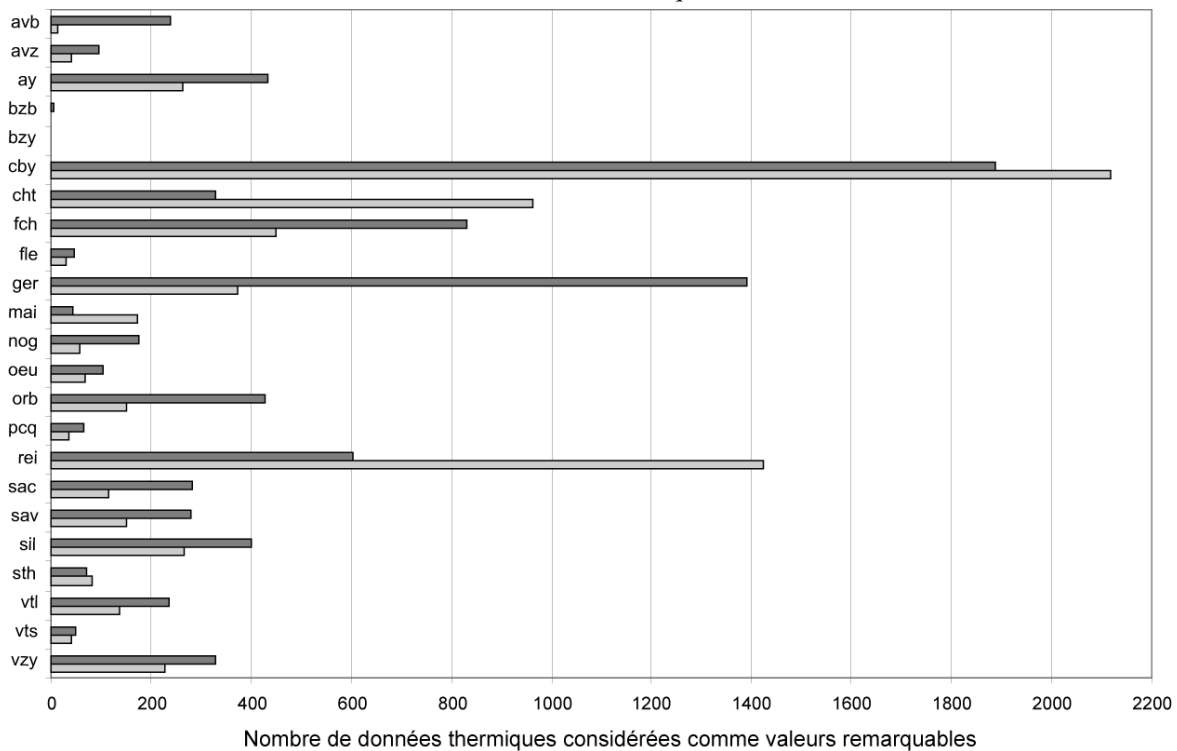
DATE	CBY	CHT	FLE	GER	MAI	ORB	REI	SIL	VTL
21/03/98	X								
05/04/98		X							
06/04/98		X							
15/04/98							X		
16/04/98		X							
24/04/98	X								
24/05/98*									X
25/05/98		X							
11/04/99		X							
14/04/99									X
19/04/99							X		
22/04/99									
29/04/99							X		
06/05/99									X
17/05/99							X		
20/05/99							X		
24/03/00*				X					
27/03/00*				X					
11/04/00	X								
14/04/00							X		
27/04/00							X		
02/05/00*	X								
12/05/00*			X						
26/05/00						X			
22/03/01	X								
28/03/01							X		
30/03/01	X								
10/04/01*								X	
11/04/01*								X	
16/04/01		X							
26/04/01									X
27/04/01							X		
06/05/01	X								
14/05/01					X				
18/05/01	X								
06/04/02	X								
13/04/02	X								
26/04/02	X								
28/04/02	X								
15/03/03							X		
31/03/03	X								
06/04/03	X								
19/04/03							X		
Total	14	6	1	2	1	1	11	2	4

X : l'écart à la moyenne (de l'ensemble des stations, pour cette date) est supérieur à 3 écart-type (en valeur absolue).

* : pour cette date, la température minimale (2 m, sous abri) est également considérée comme valeur aberrante pour la même station.

Données : 15/03-31/05 1998-2003, Civc, Météo-France

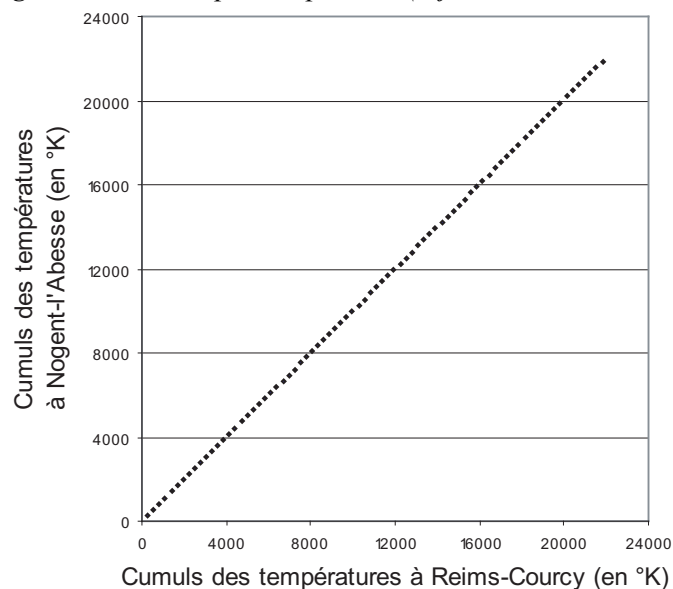
Fig. D - 1 : Fréquence des indices actinothermiques horaires considérées comme valeurs remarquables



Données : 15/03-31/05 1998-2003, Civc, Météo-France

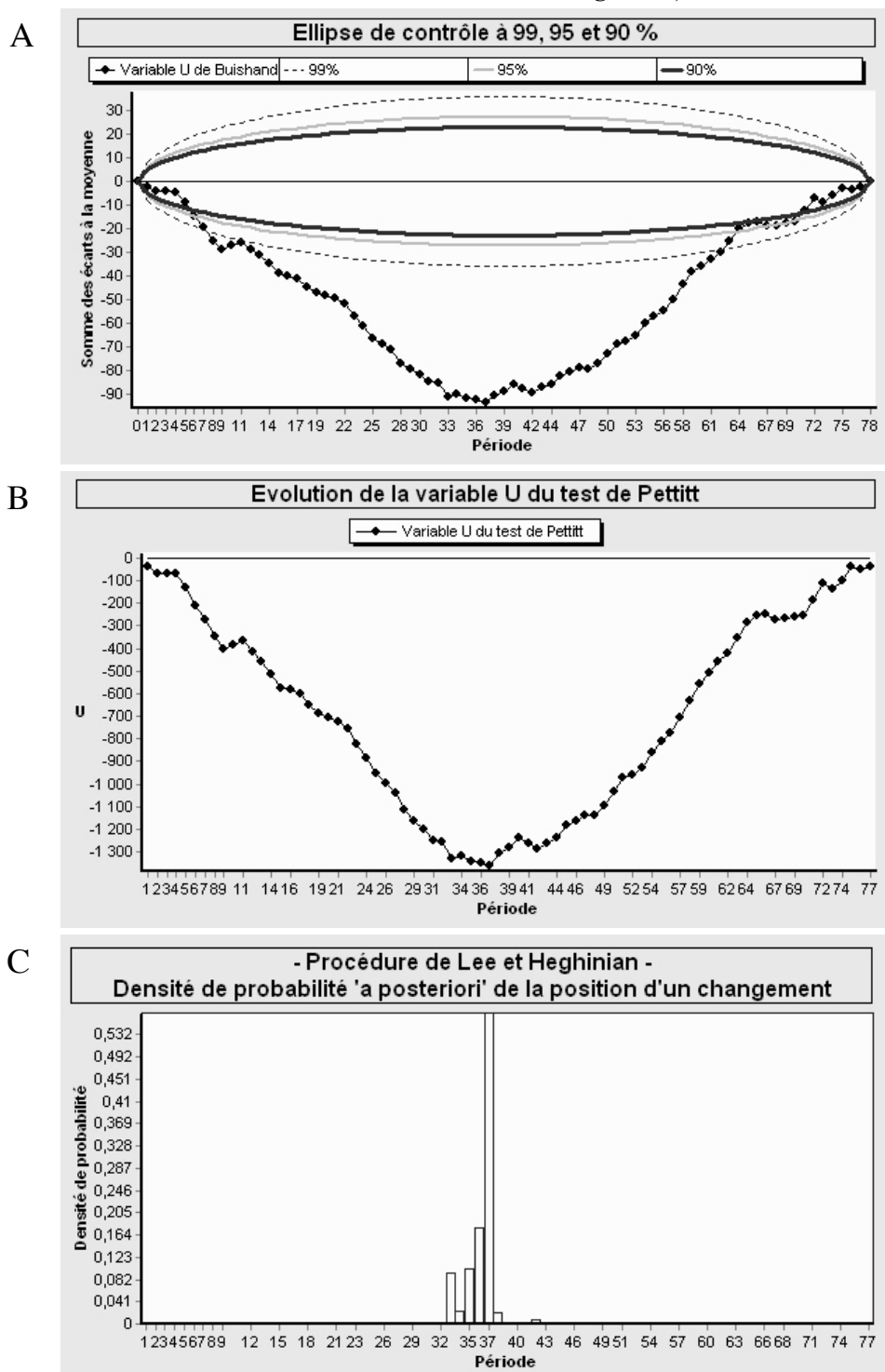
D.3 - Ruptures

Fig. D - 2 : Sortie graphique de la méthode du double cumul – exemple pour la station de Nogent-l'Abesse au printemps 1998 (référence : Reims-Courcy)



Données : 15/03-31/05 1998, Civc, Météo-France

Fig. D - 3 : Sorties graphiques des tests d'homogénéité interne pour les données de températures minimales sous abri à Reims-Courcy, lors du printemps 2003 (A : Test de Buishand ; B : Test de Pettitt ; C : Test de Lee et Heghinian)



ANNEXE E : DIVERSES METHODES STATISTIQUES UTILISEES

E.1 - Le test de comparaison de moyennes de Student

Le test de Student est utilisé pour comparer les moyennes des valeurs prises par une même variable dans deux populations. En d'autres termes, on cherche à savoir s'il existe des différences significatives entre les moyennes de deux d'échantillons.

- Hypothèses

Comme tout test, on pose d'abord les hypothèses :

- Hypothèse nulle : égalité des moyennes
- Hypothèse alternative : inégalité des moyennes, qui représente une différence dans le cas d'un test bilatéral ou une supériorité/infériorité dans un test unilatéral

Comme conditions d'applications, la variable x doit suivre une loi normale pour chacune des deux populations et leurs variances doivent être peu différentes. Ceci étant, ce test est assez robuste.

- Calcul de la valeur T

On distingue deux calculs selon la nature des deux échantillons, indépendants ou appariés.

- Échantillons indépendants :

Il s'agit, par exemple, de deux versants, de deux stations météorologiques.

Sous l'hypothèse nulle,

$$T = \frac{\bar{X}_A - \bar{X}_B}{\sqrt{(n_A.S_A^2 + n_B.S_B^2) \left(\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B} \right)}} \cdot \sqrt{n_A + n_B - 2}$$

suit une loi de Student à $(n_A + n_B - 2)$ degrés de liberté.

Avec A et B les deux échantillons, n leur effectif, \bar{X} leur moyenne respective et s leur écart-type.

- Échantillons appariés :

Par exemple, deux dates différentes, deux périodes différentes.

Sous l'hypothèse nulle,

$$T = \frac{\bar{D}}{\sigma_D} \sqrt{n - 1}$$

suit une loi de Student à $(n_A + n_B - 2)$ degrés de liberté.

Avec D la différence pour chaque observation entre les deux échantillons.

- Lecture de la valeur critique et conclusion

La valeur T calculée est ensuite comparée à une valeur critique théorique t , lue dans la table de Student, en fonction du nombre de degrés de liberté et du risque d'erreur choisi.

En outre, la valeur lue dans la table est différente selon que l'on se place dans un test bilatéral ou unilatéral.

Si la valeur absolue de T est supérieure à t , alors l'hypothèse nulle est rejetée avec le risque d'erreur fixé. On peut alors conclure à une inégalité entre les deux moyennes.

Se reporter à [Escofier et Pagès, 1997 ; Vigneron, 1997].

E.2 - Analyse de la variance

L'analyse de la variance consiste à chercher si une variable quantitative se différencie selon les modalités d'une variable qualitative. Elle est particulièrement utile en géographie pour vérifier l'importance de la variation d'un phénomène selon l'appartenance aux entités d'un découpage spatial (pays, région...).

En fait, il s'agit d'étudier la variance des moyennes des différentes populations par rapport à la moyenne de l'ensemble.

La variance totale se décompose en :

- la *variance interclasse*, qui mesure les variations entre les groupes
- la *variance intraclasse*, appelée également variance résiduelle, qui correspond aux variations à l'intérieur de chaque groupe

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_G)^2 + \sum_{k=1}^G (\bar{y}_G - \bar{y})^2$$

Variation totale = Variation intra + Variation inter

Sous l'hypothèse nulle (indépendance entre les deux variables,

$$F = \frac{\text{Variation Interclasse} / (k-1)}{\text{Variation Intraclasse} / (n-k)}$$

suit une loi de Fisher à $(k-1)$ et $(n-k)$ degrés de liberté

Avec n , le nombre d'individus et k , le nombre de groupes.

Ensuite, comme pour les autres tests, on compare la valeur obtenue à la valeur critique théorique dans la table Fisher-Snedecor, pour un risque d'erreur fixé (en général 5 %). Si la valeur absolue de F est supérieure à la valeur critique, alors l'hypothèse nulle est rejetée avec le risque d'erreur fixé. On peut dans ce cas conclure à une relation entre les deux variables.

Conditions d'application :

- normalité des distributions de la variable y dans chaque groupe
- effectifs et variances de chaque groupe pas trop différents.

Se reporter à [CHADULE, 1997 ; Vigneron, 1997].

E.3 - Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse factorielle *Analyse en Composantes Principales* est utilisée pour résumer et à hiérarchiser l'information initiale par des nouvelles variables synthétiques. Ces dernières, appelées généralement *axes factoriels* ou ici *composantes principales*, sont des combinaisons linéaires des variables initiales. Le premier facteur, qui représente l'axe d'allongement principal du nuage de points (n individus en p dimensions), prend en compte le maximum d'information et différencie le plus les individus. Le deuxième axe, orthogonal au premier, résume le mieux l'information résiduelle du premier et ainsi de suite. L'ACP la plus souvent mise en œuvre, notamment dans cette thèse, est l'*ACP normée* (analyse sur la matrice de corrélation).

La première étape d'interprétation des résultats d'une ACP consiste à étudier les valeurs propres des premiers axes. Chacune représente la variance du nuage projeté sur l'axe porté par le vecteur propre associé. Rapportées à l'inertie totale, elles expriment la part d'information associée à chaque axe, soit la part de la dispersion totale prise en compte.

Ensuite, des sorties sont relatives aux variables et symétriquement aux individus :

- coordonnée de la variable / de l'individu sur chaque axe ;
- contribution à l'inertie totale de chaque axe ;
- qualité de représentation sur chaque axe.

L'étude des coordonnées des individus, qui seront arbitrairement positives et négatives, permet de mettre en évidence les ressemblances ou les oppositions. Pour les variables, ces projections orthogonales sur les axes sont les coefficients de corrélation entre la variable et l'axe (variant de -1 à +1). Cette étape est essentielle à l'interprétation des axes factoriels. Les contributions, qui représentent la part de chaque individu ou variable dans la variance des axes, sont également intéressantes à observer et permettent d'interpréter les axes. En outre, si elles sont très fortes, elles peuvent révéler l'existence d'un individu aberrant.

Se reporter à [Foucart, 1997 ; Sanders, 1989].

E.4 - La Classification Automatique Hiérarchique (CAH)

La Classification Automatique Hiérarchique, méthode d'analyse multivariée, permet de classer des individus en fonction de leurs proximités dans l'espace des variables.

Cette méthode itérative consiste à regrouper progressivement les individus jusqu'à l'obtention d'une unique classe les incluant tous. La première agrégation, qui réunit les deux individus les plus *proches*, se fait en fonction d'une distance, euclidienne pour les tableaux de mesures et du χ^2 pour les tableaux de contingence.

Une fois cette première réunion faite, les classes sont ensuite regroupées selon un critère d'agrégation choisi, mesurant la dissimilarité (distance) entre les groupes d'individus. On distingue les critères de la distance minimale, de la distance maximale, etc. Le critère le plus souvent utilisé, notamment dans ce travail, est le critère du moment centré d'ordre 2, communément appelé la *méthode Ward* : il minimise la variance intraclasse et maximise la

variance interclasse. En d'autres termes, on cherche à constituer des classes est constituée d'individus se ressemblant le plus possible.

Un arbre résume cette suite d'agrégations. À chacune d'entre elles, une part de variabilité interclasse passe en variabilité intraclasse. L'analyse des différences de ces quantités avant et après chaque agrégation, soit l'analyse des indices de niveau, permet de choisir un niveau de troncature, donc un nombre de classes pertinent et la part de l'information restituée par les centres des classes.

Une fois la troncature décidée, il est judicieux de représenter ensuite l'arbre hiérarchique des derniers regroupements, qui illustre la structure des ressemblances entre les classes retenues. Ces dernières sont décrites à partir des profils des centres des classes. Enfin, signalons, comme sorties supplémentaires d'aide à l'interprétation de la classification obtenue, les contributions des variables aux classes et les contributions relatives de chaque classe à la dispersion par rapport à une variable.

Se reporter à [Sanders, 1989].

E.5 - Le test du χ^2

Le test du χ^2 s'utilise pour tester la relation entre deux variables qualitatives. Ce test non paramétrique* se déroule en plusieurs étapes :

Comme tout test, on pose au préalable l'hypothèse nulle : indépendance entre les deux distributions

- **Tableau de contingence**

En premier, il s'agit de construire, à partir des données du tableau initial, un tableau dénombrant les modalités croisées des deux variables (qualitatives). Ce tableau à double entrée est appelé *tableau de contingence*. En d'autres termes / Selon une notation statistique, chaque intersection d'une ligne et d'une colonne (chaque case) contient le nombre d'individus vérifiant la modalité i de la variable x et la modalité j de la variable y : n_{ij} . Les sommes des effectifs en ligne ($n_{.j}$) et en colonne ($n_{i.}$) sont appelées les marges du tableau.

- **Profils en ligne et en colonne**

Compte tenu des poids différents de chaque modalité (colonnes et lignes), il est délicat de dégager des informations pertinentes à partir du seul tableau de contingence. Alors on construit les tableaux des profils en ligne ($n_{ij} / n_{.j}$) et en colonne ($n_{ij} / n_{i.}$). Ils permettent d'appréhender le sens de relation.

- **Écarts à l'indépendance**

Comme toute étude de relation entre deux variables, le test du χ^2 repose sur la confrontation entre une situation observée (tableau de contingence) et une situation théorique, appelée l'*indépendance* [Vigneron, 1997]. L'étape suivante consiste donc à

* Un test non paramétrique ne suppose aucune distribution particulière des variables.

calculer les effectifs théoriques sous l'hypothèse d'indépendance entre les modalités des deux variables :

$$n'_{ij} = \frac{n_{i.} * n_{.j}}{n_{..}}$$

On mesure alors globalement les écarts entre ce qui est observé et les effectifs théoriques ainsi calculés : $n_{ij} - n'_{ij}$.

- Calcul de la valeur du χ^2 observé

La valeur du χ^2 observé est calculée en sommant les différents χ^2 locaux des modalités croisées :

Sous l'hypothèse nulle,

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^p \frac{(n_{ij} - n'_{ij})^2}{n'_{ij}}$$

suit une loi du χ^2 avec $(k-1).(p-1)$ degrés de liberté (k et p étant le nombre de modalités des deux variables).

Cette quantité peut être testée à l'aide d'une table.

- Comparaison de la valeur χ^2 à une théorique dans la table du χ^2 et conclusion

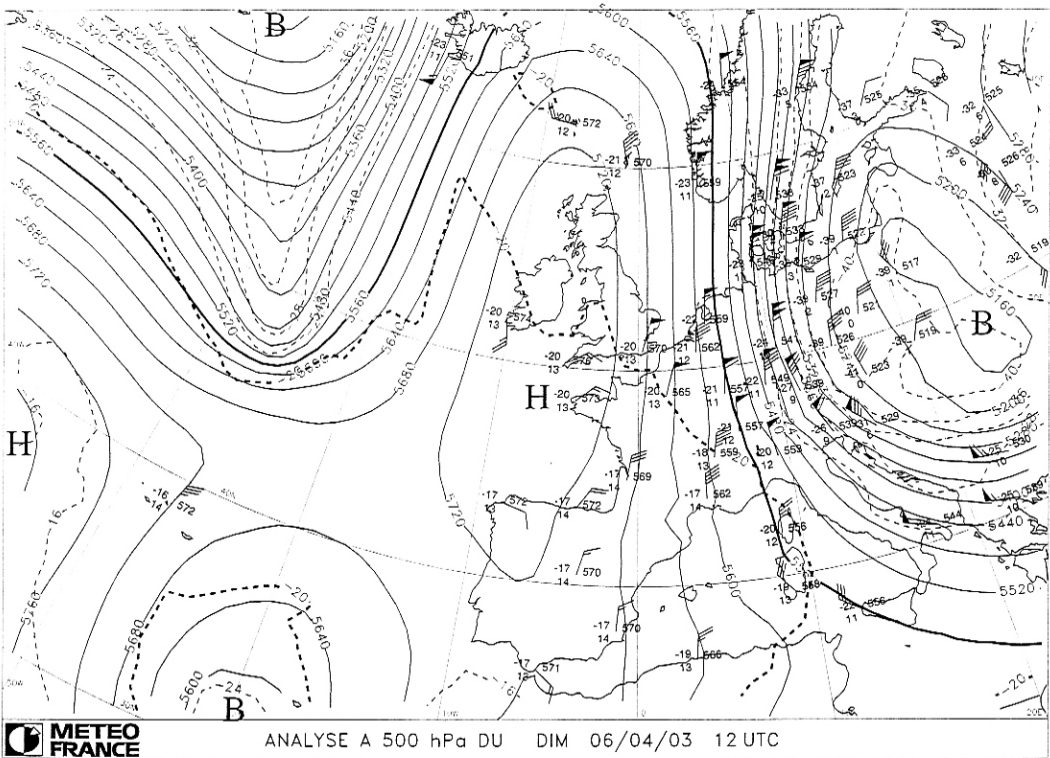
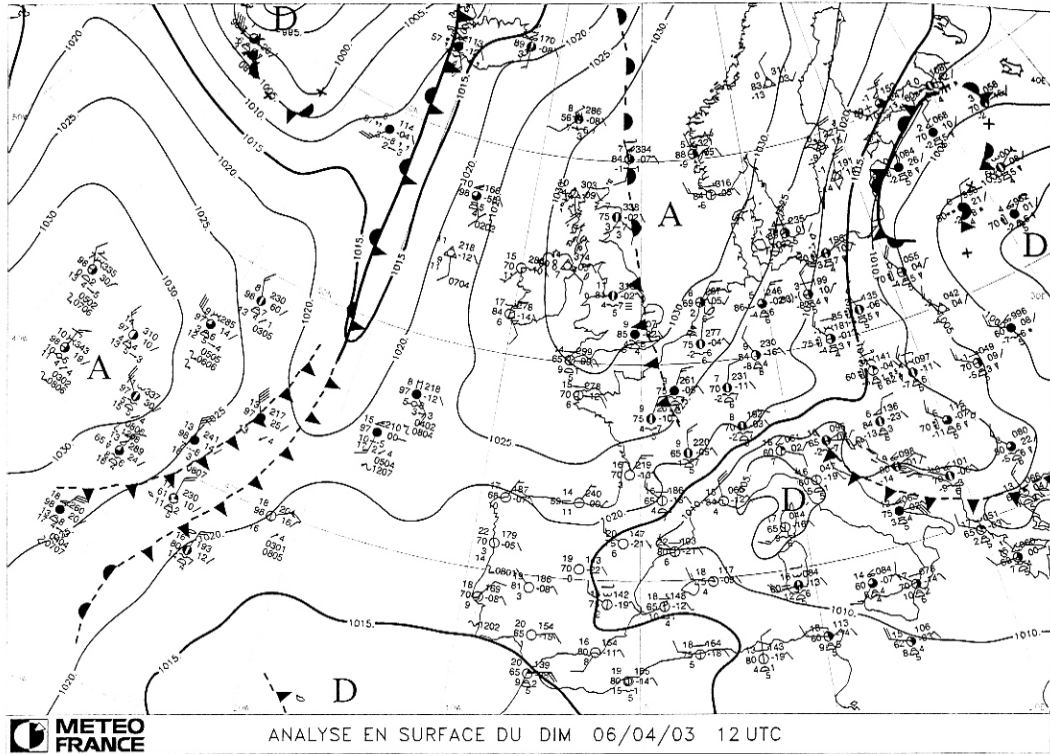
En fixant un risque d'erreur et en fonction des degrés de liberté, si le χ^2 observé est supérieur à la valeur lue dans la table du χ^2 , alors on peut rejeter l'hypothèse nulle et conclure à l'existence d'une relation entre les deux variables (avec le risque d'erreur fixé).

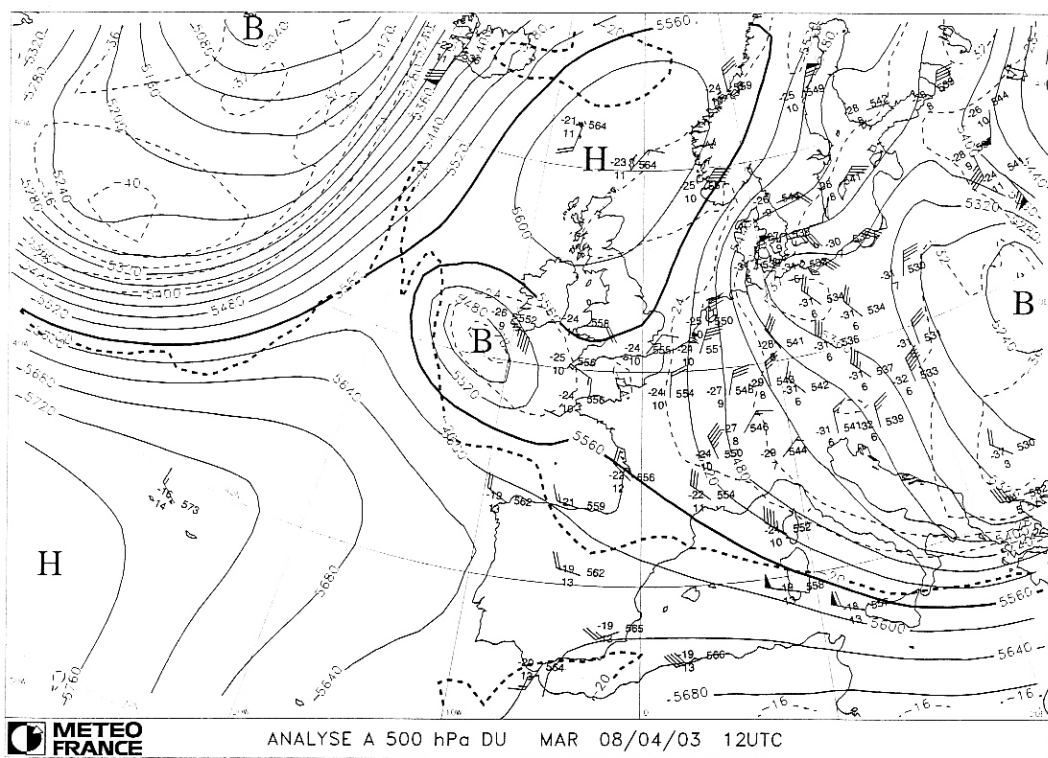
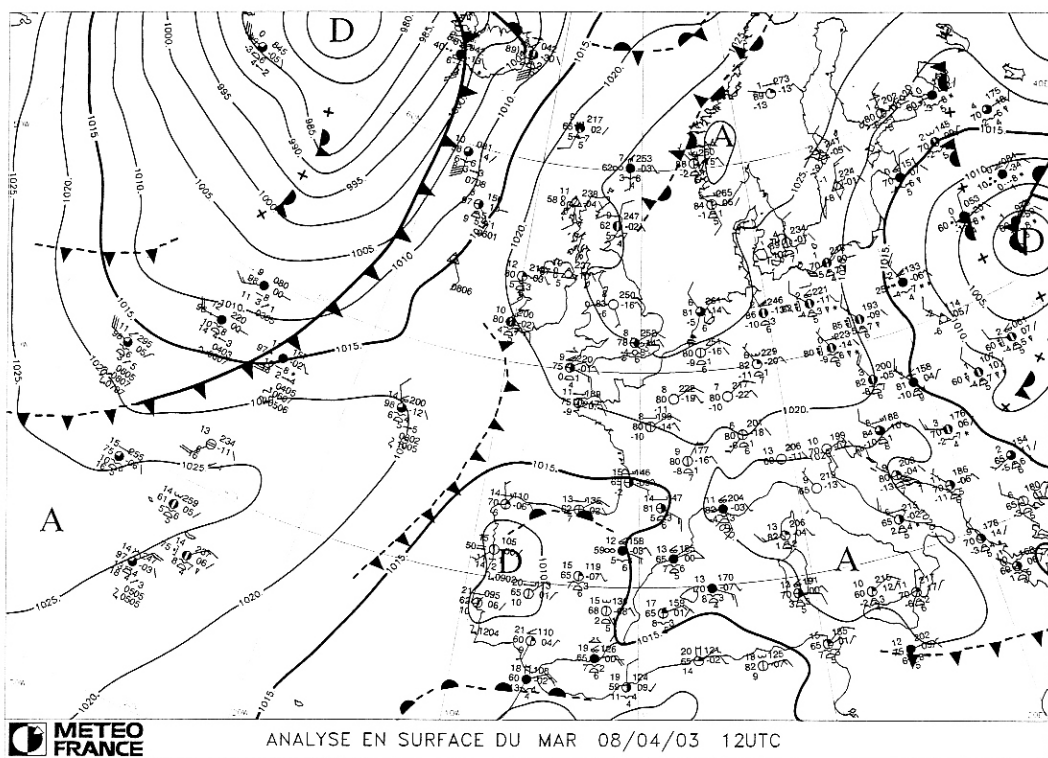
Il existe plusieurs conditions à ce test :

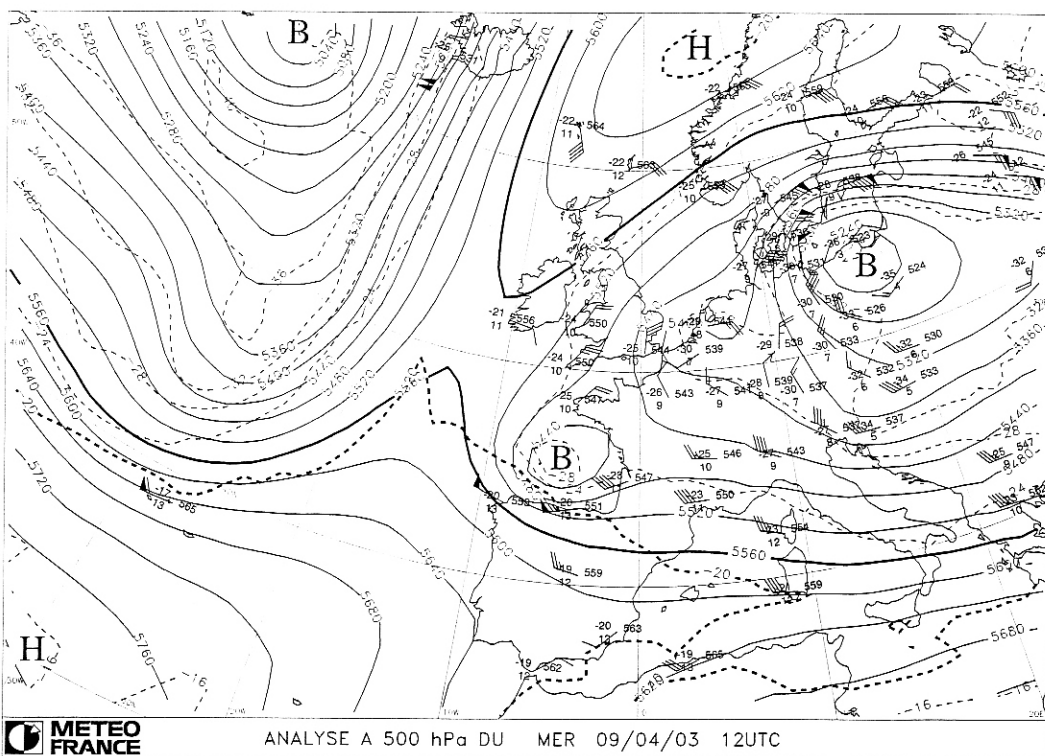
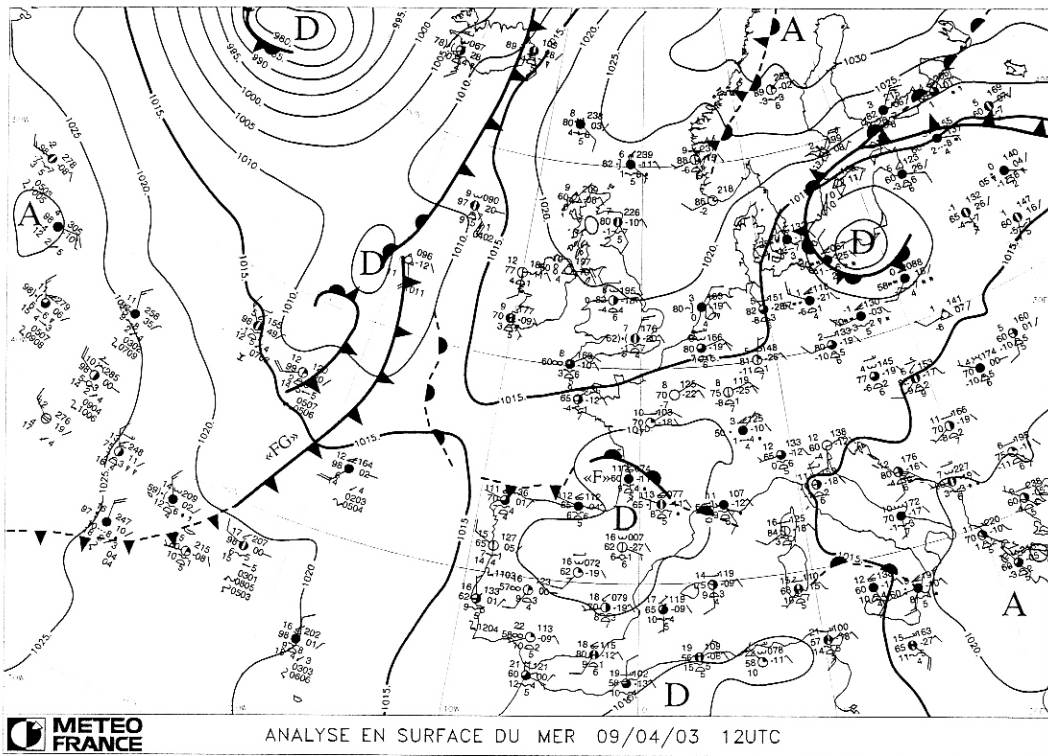
- l'effectif total doit être supérieur ou égal à 20 ;
- chaque total en ligne et en colonne doit être supérieur ou égal à 5 ;
- les effectifs théoriques doivent être supérieurs à 5 pour 80% des cases.

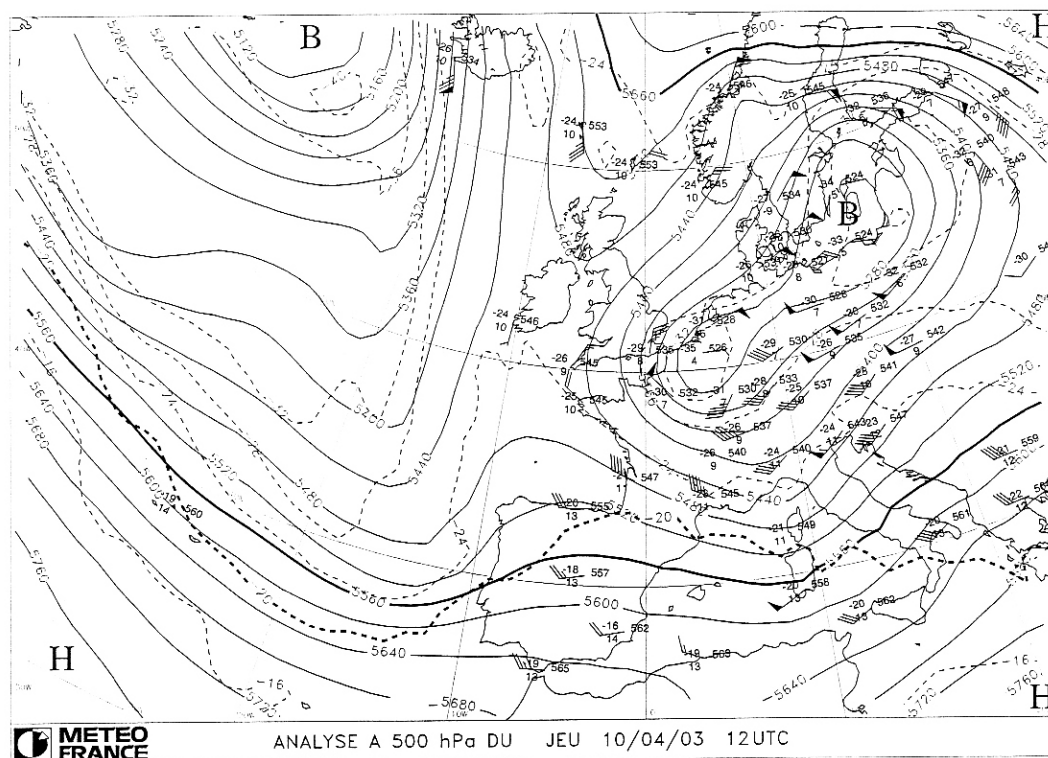
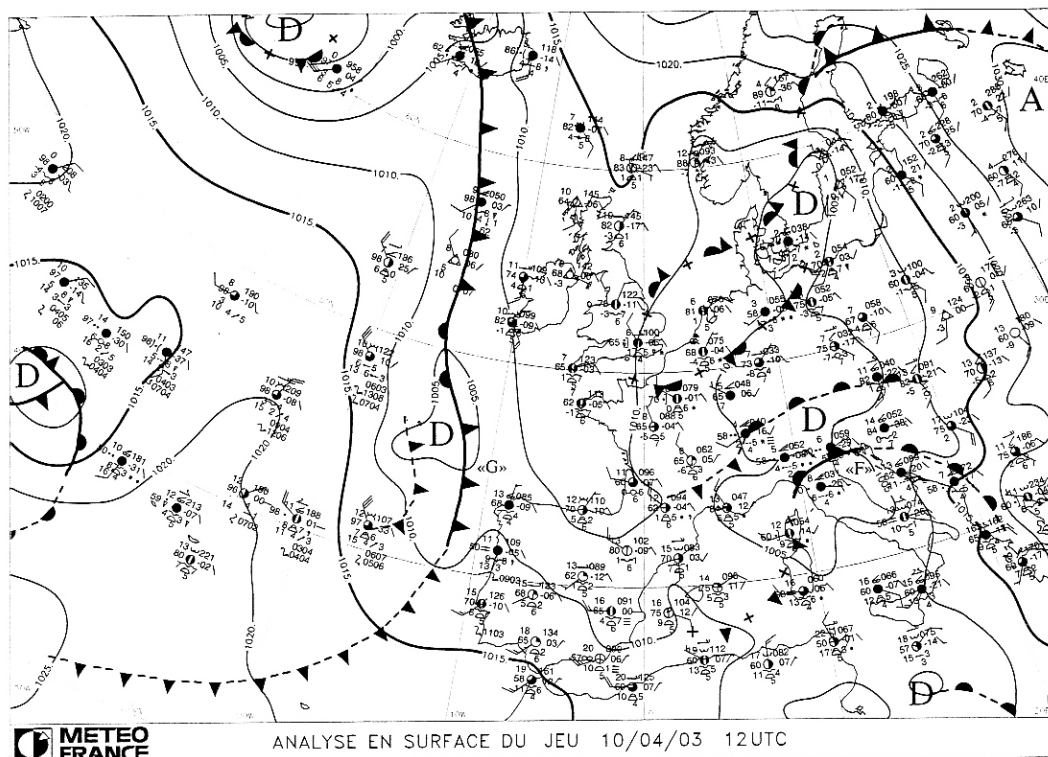
Se reporter à [CHADULE, 1997 ; Vigneron, 1997].

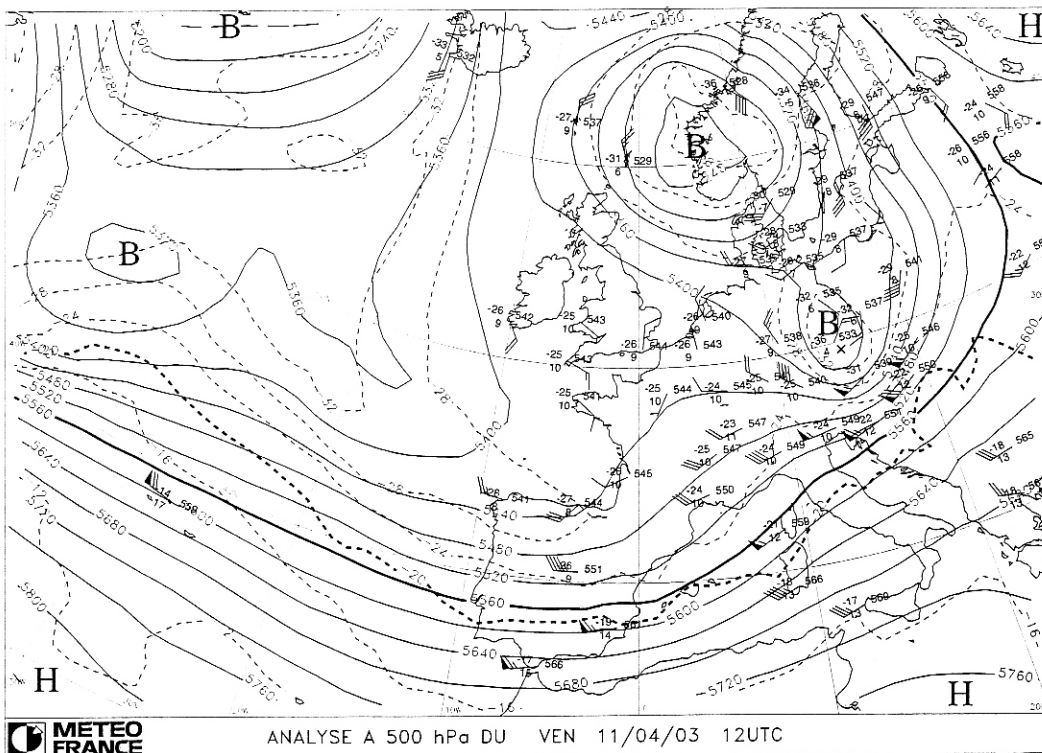
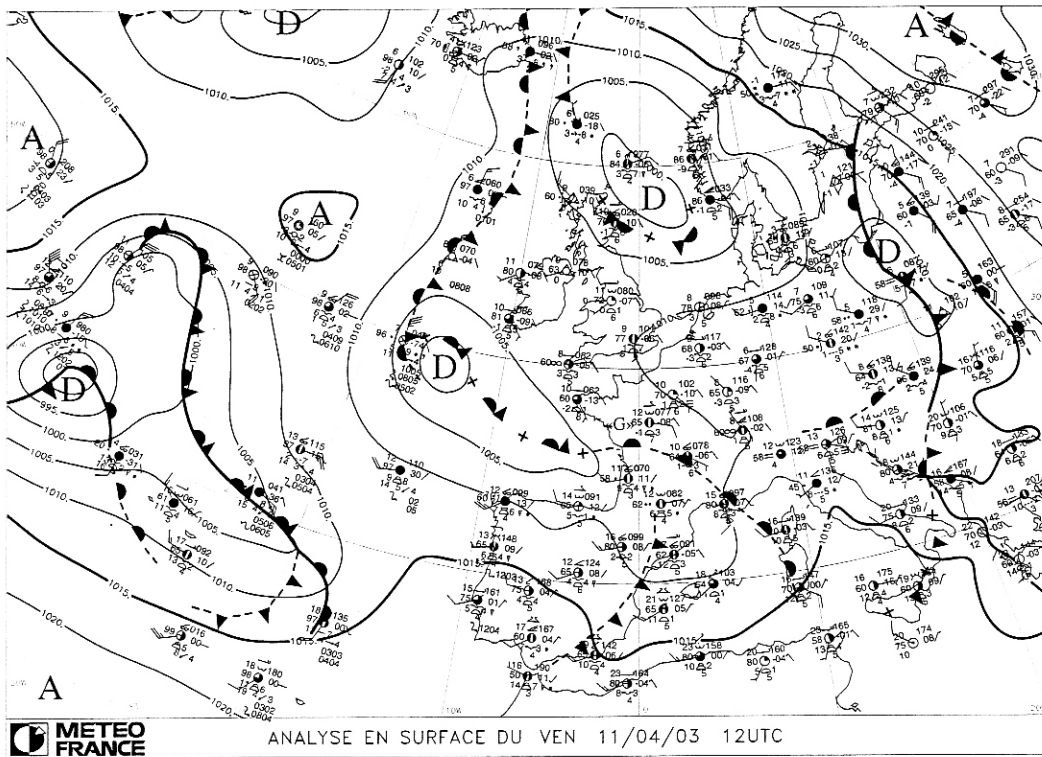
ANNEXE F : LES BHER DE DEBUT AVRIL 2003











ANNEXE G : PRESENTATION DES STATIONS ET MESURES SUR LE TERRAIN

Afin de caractériser l'environnement des stations (altitude, pente, occupation du sol, etc.), il est nécessaire, au préalable, de localiser précisément ces stations. A l'origine, nous avons des coordonnées planes (en Lambert II étendu) pour la plupart des stations (données par le CIVC). Afin de combler les lacunes et de vérifier les coordonnées acquises, nous avons effectué des mesures sur le terrain à partir d'un récepteur GPS (en 2002).

Le *Global Positioning System* (GPS) est un système de positionnement à partir de satellites américains¹ [Botton *et al.*, 1997] : les signaux envoyés par ces derniers déterminent les coordonnées géographiques d'un point avec une grande précision. Ce système de positionnement, qui connaît un développement important, est utilisé pour de multiples applications (navigation routière, maritime et aérienne ; topographie ; géodésie...). En météorologie, il permet, par exemple, le positionnement des mesures fixes ou mobiles (comme c'est le cas ici), le calcul du vent en altitude par radiosondage, etc.²

Les trois mesures effectuées par un GPS sont la longitude, la latitude et l'altitude³. La précision des coordonnées géographiques est différente selon le type de positionnement [Doerflinger, 2001] :

- le positionnement absolu : un seul récepteur, temps de mesure court, précision décamétrique (10-30 m) ;
- le positionnement relatif ou différentiel : précision centimétrique, à partir de deux récepteurs.

Compte tenu de la résolution de la base de données environnementales (50 m), la précision décamétrique a semblé suffisante ici⁴. Ce choix était également motivé par la plus grande facilité/commodité d'une mesure à un seul capteur.

Néanmoins, dans le cas d'un positionnement absolu, la mesure de l'altitude n'est pas fiable, le positionnement différentiel étant alors plus adéquat. Cette variabilité des mesures altitudinales a été observée sur le terrain : sur quelques mètres, l'altitude variait de manière aberrante (dans des proportions trop importantes ou à l'inverse de la réalité). Aussi cette composante verticale n'a pas été retenue ici, ce qui a exclu une analyse critique supplémentaire de la BD Alti®.

1. Pour calculer la position d'un récepteur au sol, quatre satellites sont nécessaires (trois pour la position ; le quatrième pour la synchronisation des horloges du satellite et du récepteur et pour éliminer les points aberrants) [Doerflinger, 2001].

2. Au sujet des applications météorologiques du GPS, le lecteur pourra se référer à l'article de E. Doerflinger [2001].

3. De manière plus rigoureuse, un GPS mesure une hauteur ellipsoïdale définie dans un système de référence géodésique (par exemple, ellipsoïde de Clarke 1880).

4. Lors des mesures sur le terrain, le récepteur GPS indiquait une précision de 3 et 6 m.

Signalons, par ailleurs, que la mesure d'une localisation d'une station peut être gênée par des masques topographiques ou urbains, etc. Ici, les stations sont dans des environnements plutôt dégagés, aussi nous estimons qu'il n'y a pas de biais de cette nature.

Concrètement, nous avons effectué, pour la *quasi*-totalité⁵ des stations, quatre mesures de coordonnées géographiques correspondant aux quatre coins de l'enclos grillagé de la station. Les longitudes et latitudes relevées (en degrés, minutes, secondes) ont été transformées en coordonnées projetées, ici en Lambert II étendu (Fig. G - 1).

Fig. G - 1 : Transformation des coordonnées géographiques en Lambert II étendu

ENTREE : - n, C, X_S, Y_S : constantes de la projection
 - λ₀ : longitude du méridien central
 - e : excentricité de l'ellipsoïde
 - λ, φ : longitude, latitude

SORTIE : - X, Y : coordonnées LAMBERT

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - \frac{e}{2} \ln \frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi}$$

$$R = C \exp(-n \mathcal{E})$$

$$\gamma = n (\lambda - \lambda_0)$$

$$X = X_S + R \sin \gamma$$

$$Y = Y_S - R \cos \gamma$$

CONSTANTES LAMBERT FRANCE

	LAMBERT I	LAMBERT II	LAMBERT III	LAMBERT IV	LAMBERT 93
n	0,7604059656	0,7289686274	0,6959127966	0,6712679322	0,7256077650
C	11603796,98	11745793,39	11947992,52	12136281,99	11754255,426
X _S	600000,000	600000,000	600000,000	234,358	700000,000
Y _S	5657616,674	6199695,768	6791905,085	7239161,542	12655612,050

(Lambert II étendu : Lambert II avec Y_S = 8199695,768 m)

λ₀ = 0 grades Paris (= 2° 20' 14,025" E Greenwich)
 e = 0,08248325676

APPLICATION NUMERIQUE (LAMBERT II)

λ = 0,4721669 gr E Paris X = 632 542,058 m
 φ = 51,8072313 gr N Y = 180 804,145 m

Source : [www.ign.fr/telechargement/Pi/SERVICES/transfo.pdf]

Afin de s'assurer de la qualité des mesures d'un GPS, il est préférable de vérifier les coordonnées pour des points repères où l'information est disponible (à partir des coordonnées indiquées sur des cartes topographiques, par exemple). Cette précaution n'a pas été prise ici (aucun calibrage). Par contre, les stations ont été positionnées, à la main, sur les cartes topographiques au 1/25 000^e, ainsi que sur des impressions de la BD Carto®. *A posteriori*, nous n'avons pas rencontré d'erreurs en « positionnant » informatiquement

⁵. Ces mesures n'ont pas été faites pour les stations de ... F. Langellier nous a aidé à positionner ces stations sur la BD Carto® et donc à attribuer des coordonnées (avec une précision beaucoup plus faible que pour les autres stations).

les coordonnées « finales » sur la BD Carto®. De plus, les localisations des stations par GPS ont été validées graphiquement par F. Langellier (gérant le réseau climatique).

Fig. G - 2 : La station de Sillery



Fig. G - 3 : Autour de la station d'Aÿ-Champagne



ANNEXE H : PROGRAMME DES ALTITUDES LISSEES SOUS LE MODULE IML DE SAS®

[...]

```
/*Exclusion des marges : 500m partout*/
data points;set points;
if xarr<697925 then delete;
if xarr>735475 then delete;
if yarr<2425825 then delete;
if yarr>2482025 then delete;run;

/*pour points, détermination des istat et jstat*/
data points ; set points ;
istat=((2482525-yarr)/50)+1 ;
jstat=((xarr-697425)/50)+1 ;run;

/*tri du tableau xyz, attention x ascending, y descending*/
proc sort data=xyz ;by x descending y ;run ;
/*codage points*/
data points;set points;codestat=_N_;run;

/*création des fichiers entrée -> transformation en matrice de dimension
(,n)*/
proc iml ;
use xyz var {x} ; read all into x ;
use xyz var {y} ; read all into y ;
use xyz var {z} ; read all into z ;
n=nrow(x) ;
use points var {codestat} ; read all into Stat ;
use points var {Istat} ; read all into Istat ;
use points var {Jstat} ; read all into Jstat ;
nstat=nrow(stat) ;
use delta var {distance} ; read all into delta ;
ndelta=nrow(delta) ;

/*création des matrices résultat, initialisation*/
res1=J(nstat,ndelta+4,0) ;
res1[,1]=stat ;

/*création de la matrice d'altitude*/
/*Valeurs exogènes : nc=772 et nl=1145*/
ZZ=J(1145,772,0) ;
do i=1 to 1145 ;
    do j=1 to 772 ;
        ZZ[i,j]=Z[(j-1)*1145+i] ;
    end ;
end ;

XX=J(1145,772,0) ;
do i=1 to 1145 ;
    do j=1 to 772 ;
        XX[i,j]=X[(j-1)*1145+i] ;
```

```
        end ;
end ;

YY=J(1145,772,0) ;
do i=1 to 1145 ;
    do j=1 to 772 ;
        YY[i,j]=Y[(j-1)*1145+i] ;
    end ;
end ;

/*calcul des moyennes d'altitude*/
do j=1 to ndelta;
    do i=1 to nstat ;
        res1[i,2]=XX[istat[i],jstat[i]];
        res1[i,3]=YY[istat[i],jstat[i]];
        res1[i,4]=ZZ[istat[i],jstat[i]];
        a=0;c=0;
        do k=istat[i]-j to istat[i]+j;
            do l=jstat[i]-j to jstat[i]+j;
                a=a+ZZ[k,l];
                c=c+1;
            end;
        end;
        res1[i,4+j]=a/c;
    end;
end;

create temp1 from res1 ;
append from res1 ;
close temp1 ;
run ;
quit ;

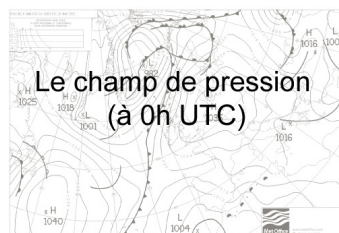
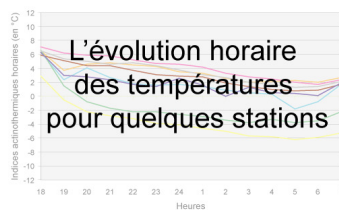
/*mise en forme du tableau de resultat*/
data resultat ;set temp1 ;
rename coll=codestat
col2=X col3=Y col4=Z col5=Z50 col6=Z100 col7=Z150 col8=Z200
col9=Z250 col10=Z300 col11=Z350 col12=Z400 col13=Z450 col14=Z500;
run ;
```

[...]

ANNEXE I : LES DATES SELECTIONNEES POUR DES SIMULATIONS MESO-NH

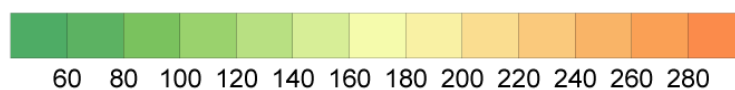
Cette annexe répertorie les fiches descriptives des six nuits retenues pour une simulation avec le modèle de Météo-France Meso-NH. Elles ont été utilisées, comme document de travail, lors d'une réunion préparatoire pour la simulation Meso NH sur le vignoble marnais (08/01/04). L'ordre présenté ici suit le classement par ordre d'intérêt (du plus au moins), établi avec G. Beltrando (Université Denis Diderot), F. Langellier (CIVC), C. Jacquart et L. Labbé (Météo-France).

Elles comprennent plusieurs informations :

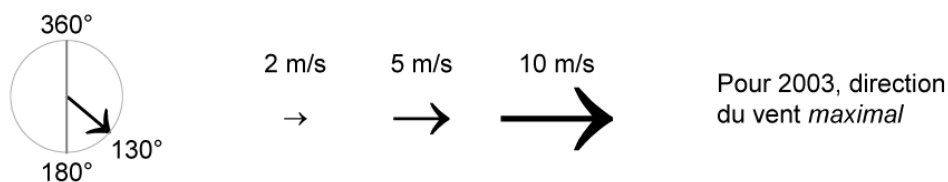


La légende commune aux 10 fiches :

Altitude (en m)



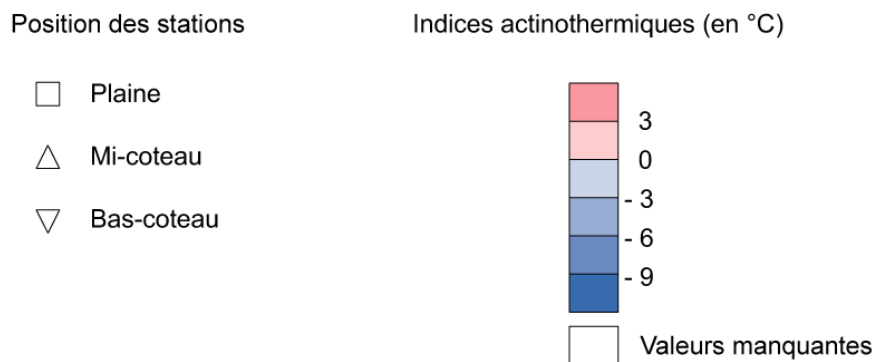
Direction et force du vent moyen (21, 0, 3 et 6 h)



Evolution des indices actinothermiques horaires pour quelques stations



Répartition des indices actinothermiques journaliers (minima)

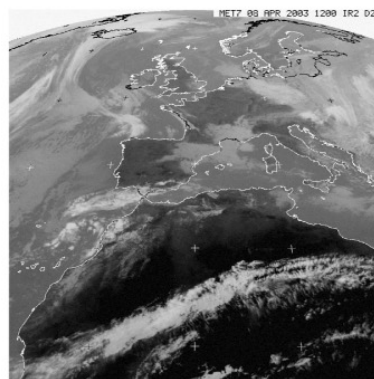
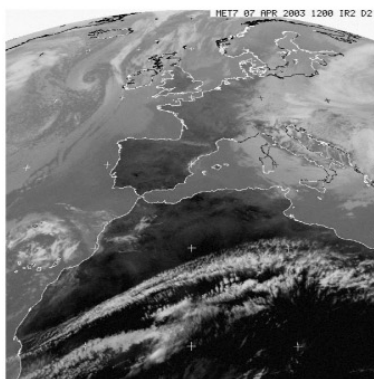
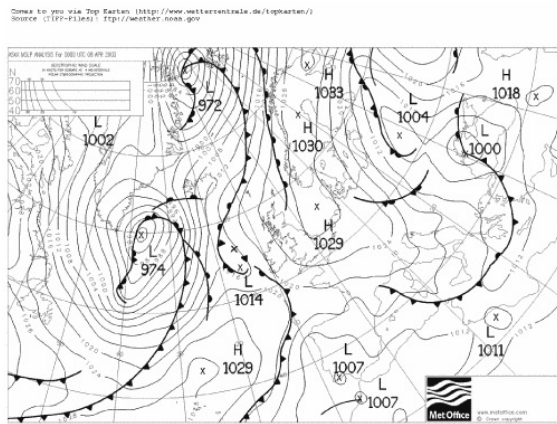
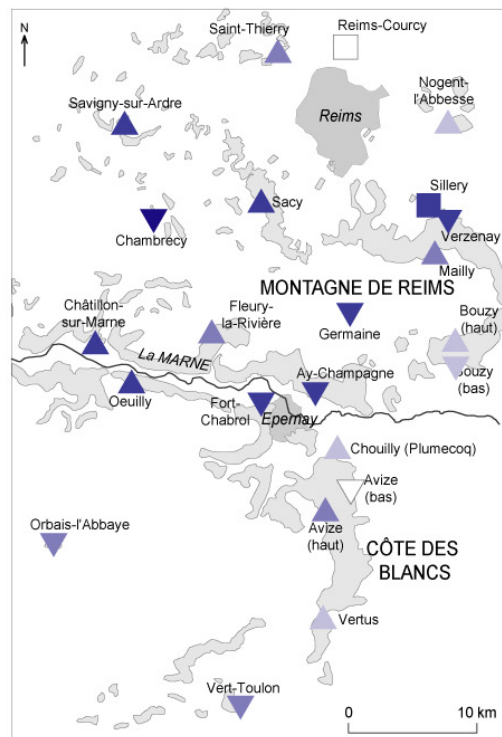
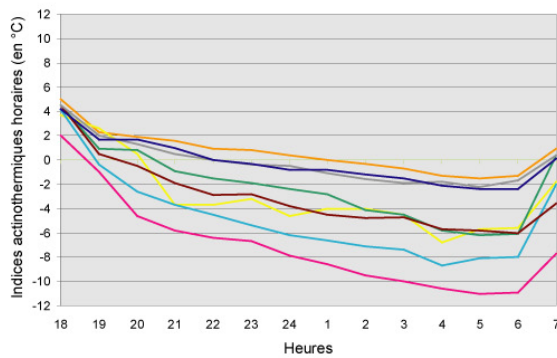
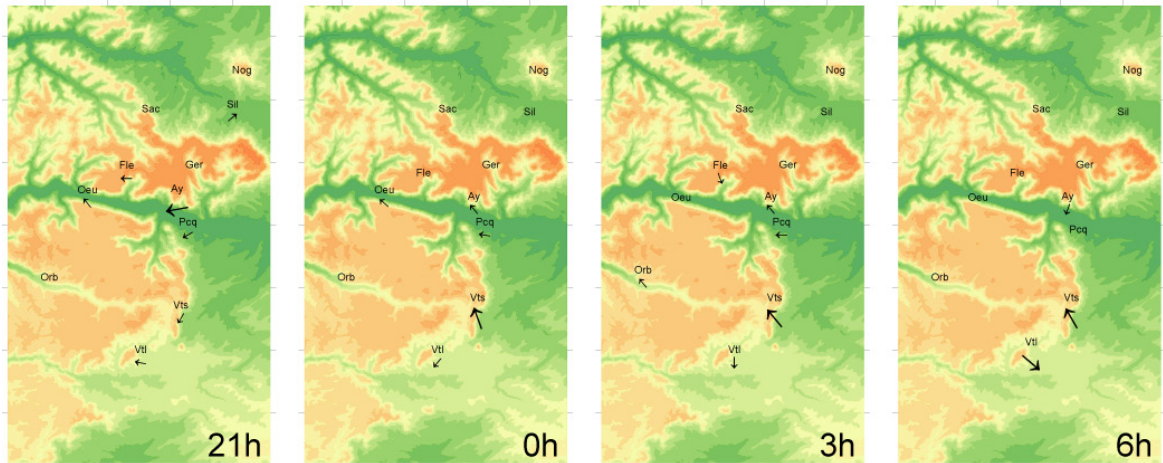


Sources

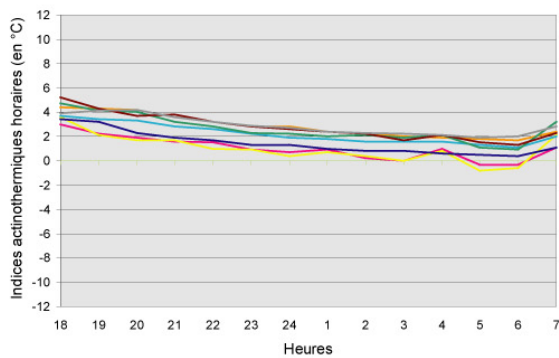
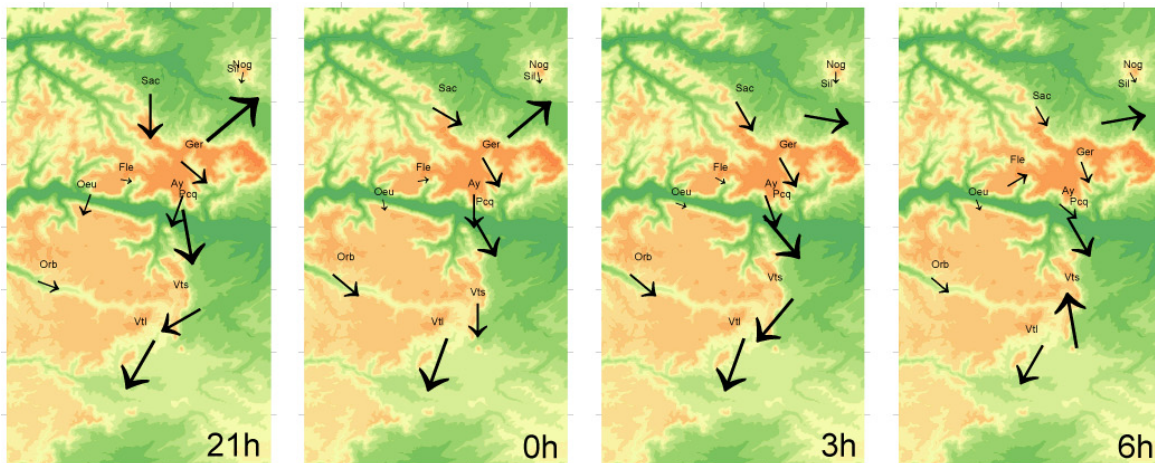
CIVC, Printemps 2002 et 2003

<http://www.infomet.fcr.es/>

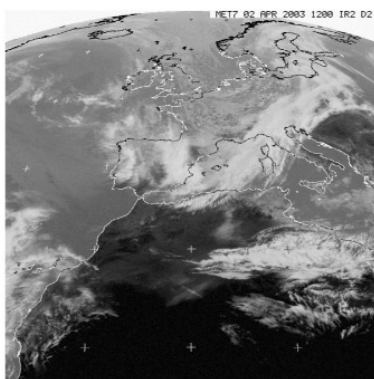
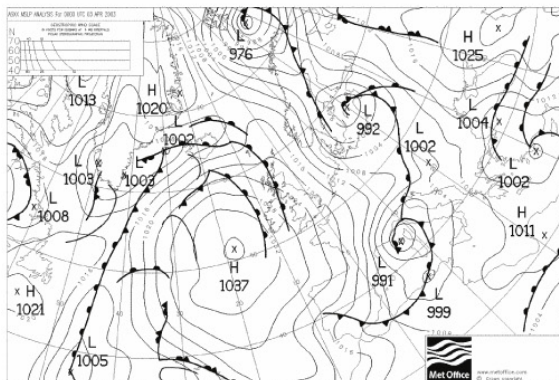
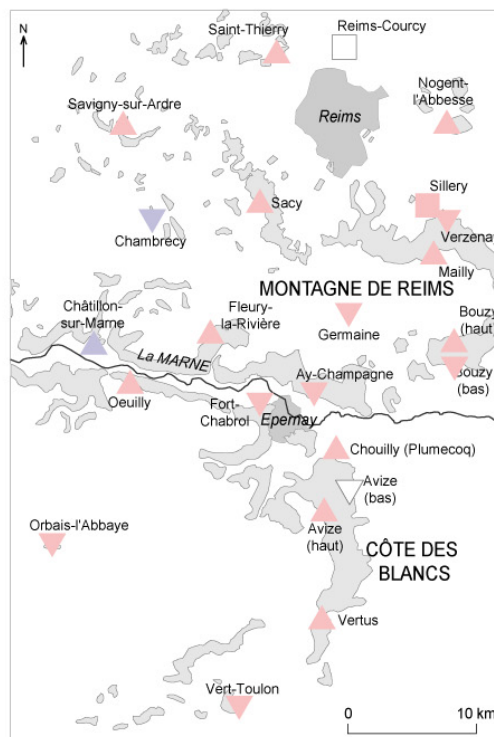
I.2 - La nuit du 7 au 8 avril 2003



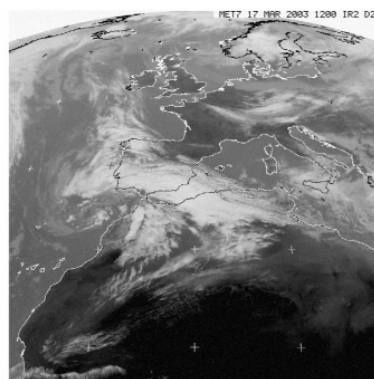
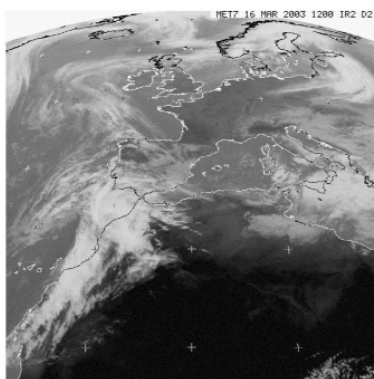
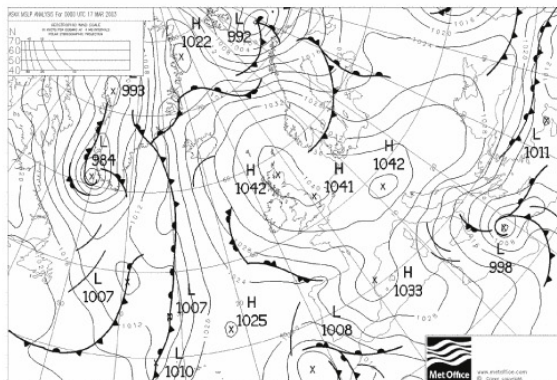
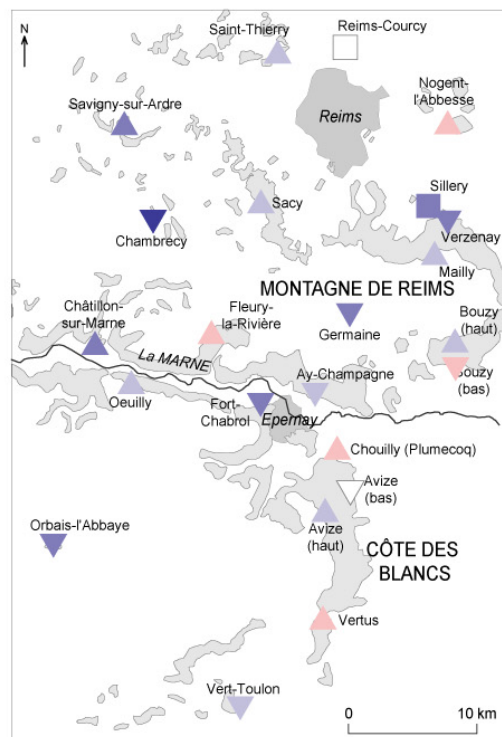
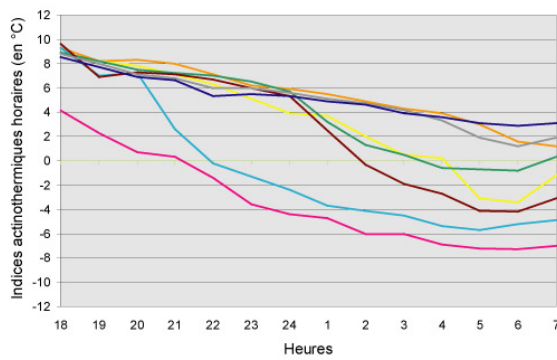
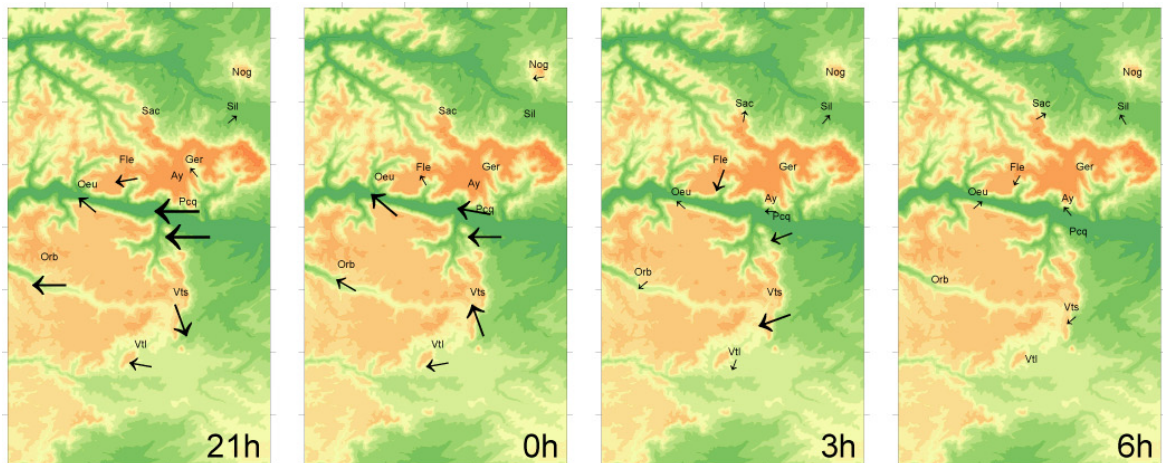
1.3 - La nuit du 2 au 3 avril 2003



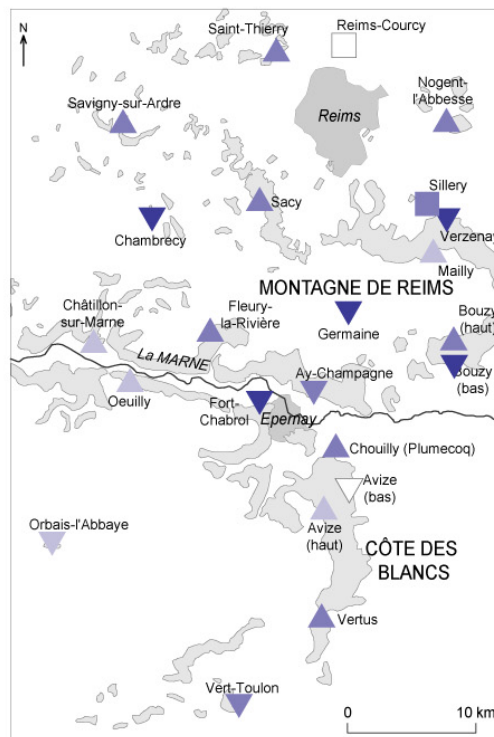
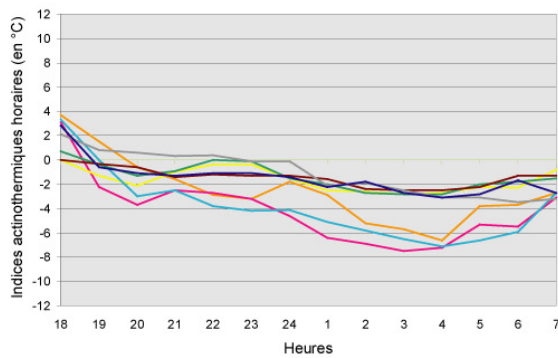
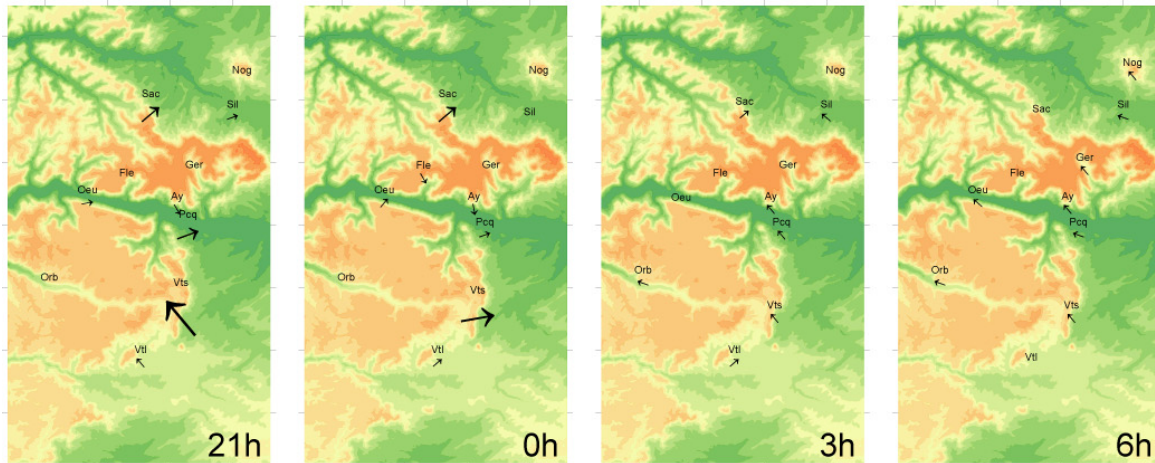
Données en png via Top-Raction (<http://www.met.kontinentale.de/topreaction/>)
 Source: (1)FF-Vision; (2)P://weather.noaa.gov



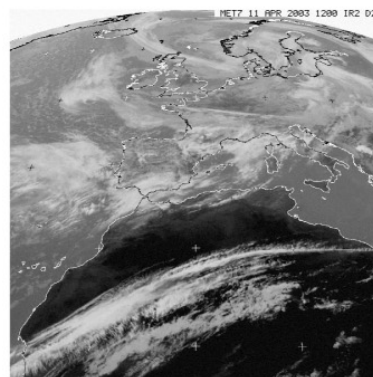
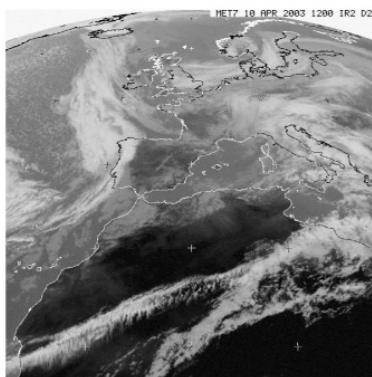
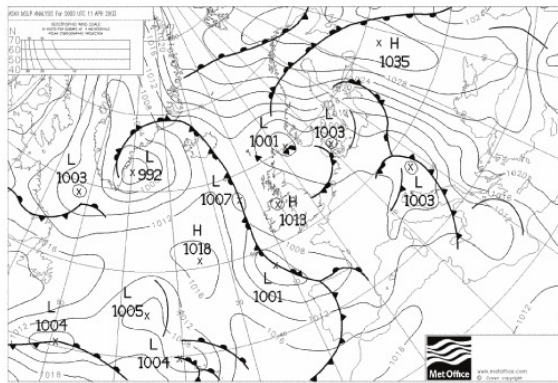
I.4 - La nuit du 16 au 17 mars 2003



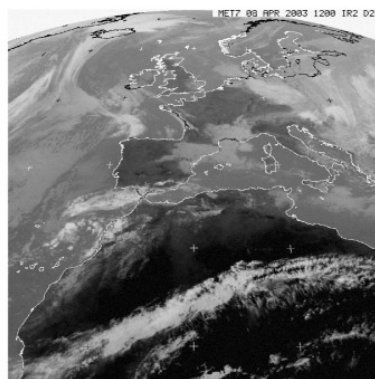
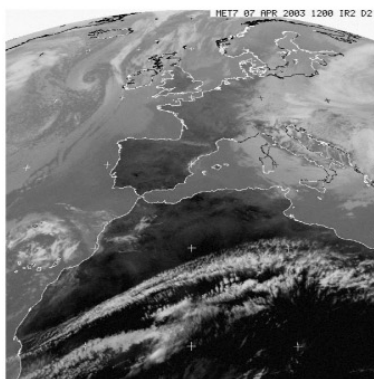
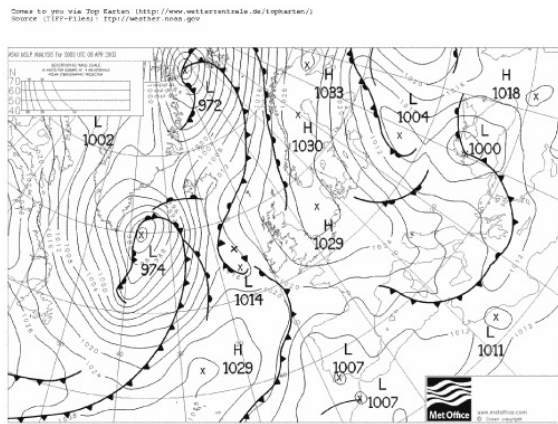
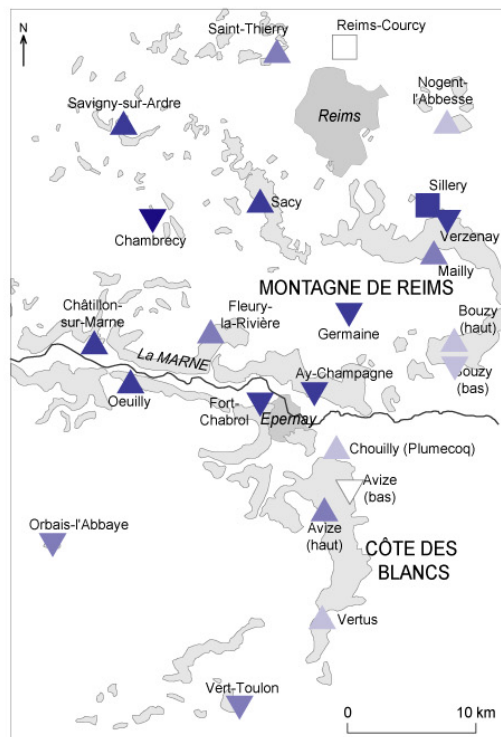
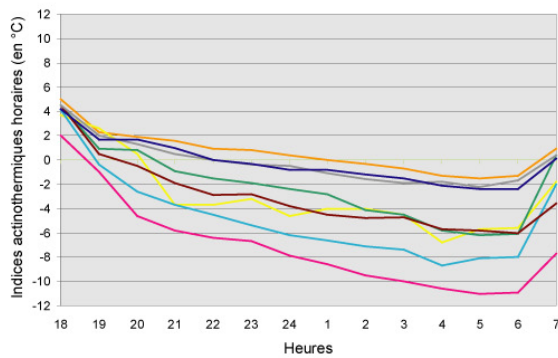
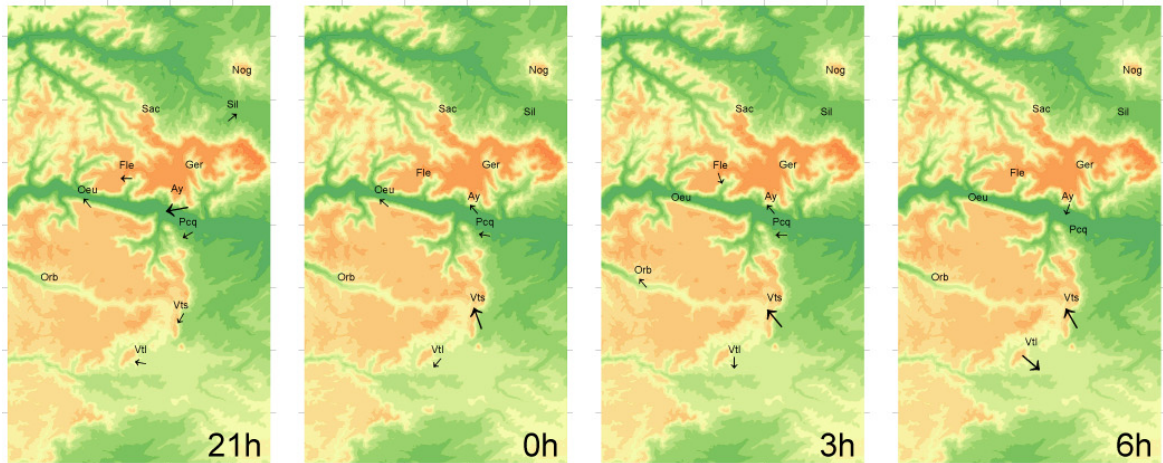
1.5 - La nuit du 10 au 11 avril 2003



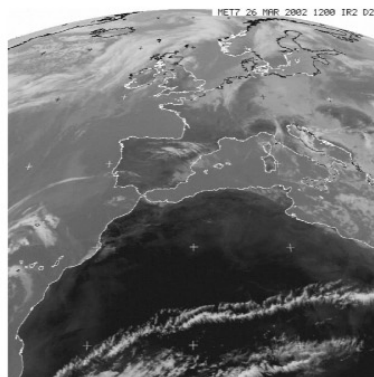
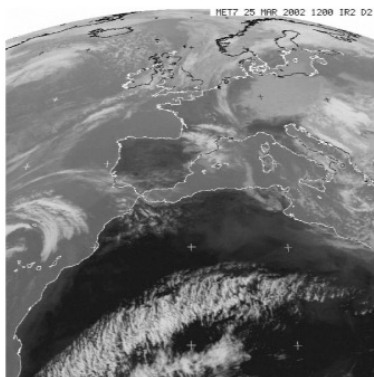
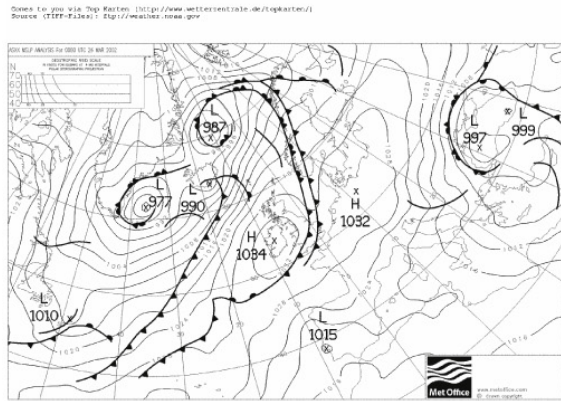
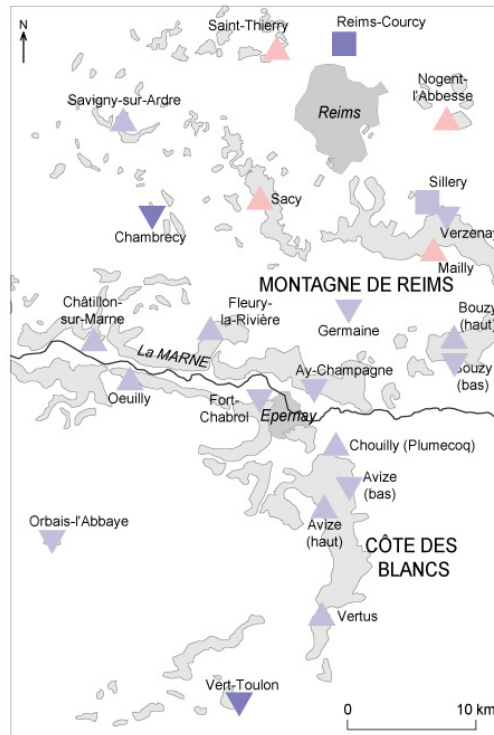
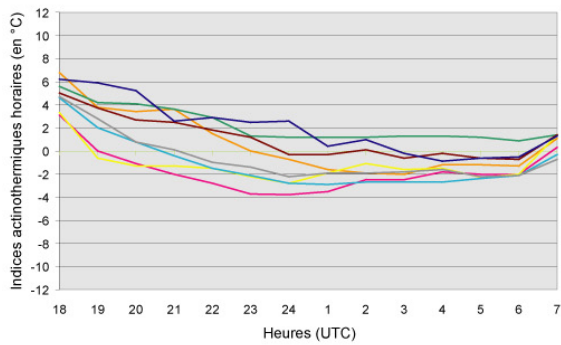
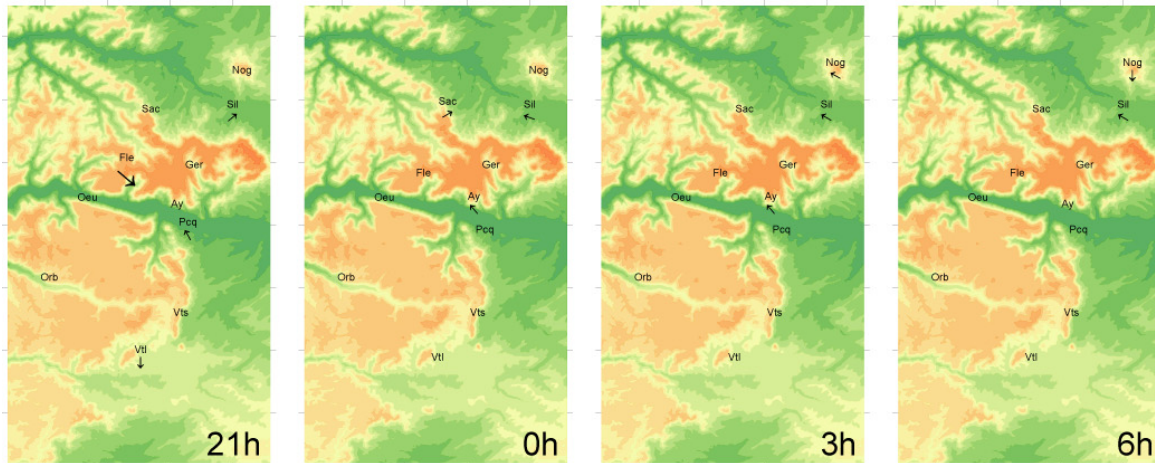
Comec to you via Top Station (<http://www.wetterkontroll.de/topstation/>)
 Source: (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (38) (39) (40) (41) (42) (43) (44) (45) (46) (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54) (55) (56) (57) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (64) (65) (66) (67) (68) (69) (70) (71) (72) (73) (74) (75) (76) (77) (78) (79) (80) (81) (82) (83) (84) (85) (86) (87) (88) (89) (90) (91) (92) (93) (94) (95) (96) (97) (98) (99) (100) (101) (102) (103) (104) (105) (106) (107) (108) (109) (110) (111) (112) (113) (114) (115) (116) (117) (118) (119) (120) (121) (122) (123) (124) (125) (126) (127) (128) (129) (130) (131) (132) (133) (134) (135) (136) (137) (138) (139) (140) (141) (142) (143) (144) (145) (146) (147) (148) (149) (150) (151) (152) (153) (154) (155) (156) (157) (158) (159) (160) (161) (162) (163) (164) (165) (166) (167) (168) (169) (170) (171) (172) (173) (174) (175) (176) (177) (178) (179) (180) (181) (182) (183) (184) (185) (186) (187) (188) (189) (190) (191) (192) (193) (194) (195) (196) (197) (198) (199) (200) (201) (202) (203) (204) (205) (206) (207) (208) (209) (210) (211) (212) (213) (214) (215) (216) (217) (218) (219) (220) (221) (222) (223) (224) (225) (226) (227) (228) (229) (230) (231) (232) (233) (234) (235) (236) (237) (238) (239) (240) (241) (242) (243) (244) (245) (246) (247) (248) (249) (250) (251) (252) (253) (254) (255) (256) (257) (258) (259) (260) (261) (262) (263) (264) (265) (266) (267) (268) (269) (270) (271) (272) (273) (274) (275) (276) (277) (278) (279) (280) (281) (282) (283) (284) (285) (286) (287) (288) (289) (290) (291) (292) (293) (294) (295) (296) (297) (298) (299) (300) (301) (302) (303) (304) (305) (306) (307) (308) (309) (310) (311) (312) (313) (314) (315) (316) (317) (318) (319) (320) (321) (322) (323) (324) (325) (326) (327) (328) (329) (330) (331) (332) (333) (334) (335) (336) (337) (338) (339) (340) (341) (342) (343) (344) (345) (346) (347) (348) (349) (350) (351) (352) (353) (354) (355) (356) (357) (358) (359) (360) (361) (362) (363) (364) (365) (366) (367) (368) (369) (370) (371) (372) (373) (374) (375) (376) (377) (378) (379) (380) (381) (382) (383) (384) (385) (386) (387) (388) (389) (390) (391) (392) (393) (394) (395) (396) (397) (398) (399) (400) (401) (402) (403) (404) (405) (406) (407) (408) (409) (410) (411) (412) (413) (414) (415) (416) (417) (418) (419) (420) (421) (422) (423) (424) (425) (426) (427) (428) (429) (430) (431) (432) (433) (434) (435) (436) (437) (438) (439) (440) (441) (442) (443) (444) (445) (446) (447) (448) (449) (450) (451) (452) (453) (454) (455) (456) (457) (458) (459) (460) (461) (462) (463) (464) (465) (466) (467) (468) (469) (470) (471) (472) (473) (474) (475) (476) (477) (478) (479) (480) (481) (482) (483) (484) (485) (486) (487) (488) (489) (490) (491) (492) (493) (494) (495) (496) (497) (498) (499) (500) (501) (502) (503) (504) (505) (506) (507) (508) (509) (510) (511) (512) (513) (514) (515) (516) (517) (518) (519) (520) (521) (522) (523) (524) (525) (526) (527) (528) (529) (530) (531) (532) (533) (534) (535) (536) (537) (538) (539) (540) (541) (542) (543) (544) (545) (546) (547) (548) (549) (550) (551) (552) (553) (554) (555) (556) (557) (558) (559) (560) (561) (562) (563) (564) (565) (566) (567) (568) (569) (570) (571) (572) (573) (574) (575) (576) (577) (578) (579) (580) (581) (582) (583) (584) (585) (586) (587) (588) (589) (590) (591) (592) (593) (594) (595) (596) (597) (598) (599) (600) (601) (602) (603) (604) (605) (606) (607) (608) (609) (610) (611) (612) (613) (614) (615) (616) (617) (618) (619) (620) (621) (622) (623) (624) (625) (626) (627) (628) (629) (630) (631) (632) (633) (634) (635) (636) (637) (638) (639) (640) (641) (642) (643) (644) (645) (646) (647) (648) (649) (650) (651) (652) (653) (654) (655) (656) (657) (658) (659) (660) (661) (662) (663) (664) (665) (666) (667) (668) (669) (670) (671) (672) (673) (674) (675) (676) (677) (678) (679) (680) (681) (682) (683) (684) (685) (686) (687) (688) (689) (690) (691) (692) (693) (694) (695) (696) (697) (698) (699) (700) (701) (702) (703) (704) (705) (706) (707) (708) (709) (710) (711) (712) (713) (714) (715) (716) (717) (718) (719) (720) (721) (722) (723) (724) (725) (726) (727) (728) (729) (730) (731) (732) (733) (734) (735) (736) (737) (738) (739) (740) (741) (742) (743) (744) (745) (746) (747) (748) (749) (750) (751) (752) (753) (754) (755) (756) (757) (758) (759) (760) (761) (762) (763) (764) (765) (766) (767) (768) (769) (770) (771) (772) (773) (774) (775) (776) (777) (778) (779) (780) (781) (782) (783) (784) (785) (786) (787) (788) (789) (790) (791) (792) (793) (794) (795) (796) (797) (798) (799) (800) (801) (802) (803) (804) (805) (806) (807) (808) (809) (810) (811) (812) (813) (814) (815) (816) (817) (818) (819) (820) (821) (822) (823) (824) (825) (826) (827) (828) (829) (830) (831) (832) (833) (834) (835) (836) (837) (838) (839) (840) (841) (842) (843) (844) (845) (846) (847) (848) (849) (850) (851) (852) (853) (854) (855) (856) (857) (858) (859) (860) (861) (862) (863) (864) (865) (866) (867) (868) (869) (870) (871) (872) (873) (874) (875) (876) (877) (878) (879) (880) (881) (882) (883) (884) (885) (886) (887) (888) (889) (890) (891) (892) (893) (894) (895) (896) (897) (898) (899) (900) (901) (902) (903) (904) (905) (906) (907) (908) (909) (910) (911) (912) (913) (914) (915) (916) (917) (918) (919) (920) (921) (922) (923) (924) (925) (926) (927) (928) (929) (930) (931) (932) (933) (934) (935) (936) (937) (938) (939) (940) (941) (942) (943) (944) (945) (946) (947) (948) (949) (950) (951) (952) (953) (954) (955) (956) (957) (958) (959) (960) (961) (962) (963) (964) (965) (966) (967) (968) (969) (970) (971) (972) (973) (974) (975) (976) (977) (978) (979) (980) (981) (982) (983) (984) (985) (986) (987) (988) (989) (990) (991) (992) (993) (994) (995) (996) (997) (998) (999) (1000)



I.6 - La nuit du 6 au 7 avril 2003



I.7 - La nuit du 25 au 26 mars 2002



ANNEXE J : LA CHAINE MESO-NH

Table des matières

CHAINE MESO-NH

- I. Création des fichiers PGD
- II. Création des fichiers d'initialisation et de couplage
- III. Run du modèle
- IV. Exploitation des sorties

Mise en oeuvre de Meso-NH

Version 0.1

Catherine JACQUART

Ce document présente de manière succincte les différentes étapes correspondant à la mise en oeuvre du modèle MESO-NH sur un cas réel.

2004-05-14

CHAINE MESO-NH

I. Création des fichiers PGD

Les fichiers physiographiques précisent les limites des domaines de simulation, la résolution associée et contiennent tous les champs de surface nécessaires à la modélisation.

I.1. PGD standards

- Utilitaire : PREP_PGD

- Fichiers d'entrée :

- relief : gtopo30 (résolution 1 km) ou france 250 (résolution 250 m)
- type de végétation : ecoclimats_V2 (résolution 1km)
- argile : clay_fao (résolution 10 kms)
- sable : sand_fao (résolution 10 kms)
- namelist : PREP_PGD1.nam caractéristiques de la projection et du domaine (nombre de points, résolution)

- Fichiers de sortie :

- **domaine résolution 5km** : 60 pts x 60 pts - soit 300 kms x 300 kms centré sur Epernay (lat = 49.033, lon = 3.966)
- **domaine résolution 1km** : 75 pts x 75 pts - soit 75 kms x 75 kms défini par rapport au domaine 5km : XOR=21, YOR=24
- **2 domaines résolution 250 m** : 60 pts x 60 pts - soit 12.5 kms x 12.5 kms définis par rapport au domaine 1km :
XOR=52, YOR=42
XOR=43, YOR=26

NB : Le type de végétation, déterminé à partir de la carte climatique et de CORINE land cover, définit la répartition entre 4 types de surface :

- fraction de mer : fsea
- fraction d'eau intérieure : fwater
- fraction de zone artificielle : ftown
- fraction de nature et de zone cultivée : f nature

Un schéma particulier est utilisé, pour chaque type de surface, afin de calculer les flux d'énergie vers l'atmosphère. Les 4 flux sont moyennés en fct de la fraction occupée, pour récupérer le flux global. Les paramètres de surface tels que albédo, émissivité, LAI, hauteur de rugosité, composition du sol,... sont sauvegardés dans les PGD.

I.2. PGD enrichis

Il est possible d'ajouter aux fichiers PGD classiques, d'autres champs 2D pertinents. Des données

en eau dans le sol issues de la chaîne ISBA (résolution 8 kms) sont archivées dans les fichiers PGD; elles se substituent aux données Aladin, lors de l'initialisation du modèle.

Les paramètres ajoutés sont les suivants :

- contenus en eau pour 3 couches du sol
- contenus en glace pour 2 couches du sol
- neige : contenu en eau, albédo et densité
- eau interceptée par la végétation

NB : les fichiers PGD correspondants sont à recréer pour chaque situation étudiée. EXSEG1.nam.1 EXSEG1.nam.1 EXSEG1.nam.1 EXSEG1.nam.1

I.3. Mise en conformité des PGD

- Utilitaire : PREP_NEST_PGD

Les fichiers PGD des 2 domaines 5kms (père) et 1km (fils) doivent être mis en conformité pour respecter la condition d'orographie :

" La moyenne des orographies du fils dans un domaine correspondant à une maille du père doit être égale à l'orographie du père de cette maille "

II. Création des fichiers d'initialisation et de couplage

Le modèle MESO-NH est à aire limitée; les variables pronostiques sont initialisées et couplées aux limites latérales avec les analyses ou prévisions du modèle Aladin.

II.1. Extraction des fichiers Aladin

- Utilitaire : Extractarpege

Les données Aladin (résolution 12kms) sont utilisées à l'initialisation et au couplage toutes les 3h. Pour une simulation de J-1 (12h) à J (9h) , 8 fichiers sont extraits :

aladin.FC.YYYYMMDD.HH.ST

avec ST= step ex 12.03 pour 15 H

Les fichiers, au format GRIB, contiennent des champs de surface et d'altitude, sur une grille gaussienne :

- Champs 3D : - u, v : composantes du vent
 - T : température absolue
 - q : humidité spécifique

- Champs 2D : - T surface du sol
 - T surface eau
 - T dans le sol
 - eau dans le sol
 - neige

NB : Les 2 derniers champs ne sont pas utilisés s'ils ont été renseignés plus finement dans les PGD.

II.2. Mise au format FM "Fine mesh " pour le domaine 5 kms

Les fichiers d'initialisation et de couplage, sont créés **pour le domaine 5km**, au format FM, par interpolations.

- Utilitaire : PREP_REAL-CASE

II.2.1. Interpolation horizontale

L'interpolation est effectuée à partir des 12 pts environnants, avec une première interpolation selon la latitude et une seconde selon la longitude :

```
      +   +
    +   +   +   +
      X
    +   +   +   +
      +   +
```

Les points utilisés doivent être de même nature de surface que le point recherché.

II.2.2. Interpolation verticale

- Fichiers d'entrée :

- PGD 5kms nesté
- fichiers Aladin
- namelist : PREP-REAL1.nam
 - nbre de niveaux = 60
 - épaisseur de la maille basses couches = 40m
 - épaisseur de la maille hautes couches = 1500 m
 - altitude du changement = 2500 m

On obtient, à partir de ces options, 16 niveaux dans la couche 0- 1000m , le dernier niveau se situant à 36.000 m.

Les niveaux sont déplacés pour prendre en compte les différences d'orographie entre Aladin et le PGD.

Des algorithmes, permettent d'ajuster les valeurs correspondantes, avec pour conséquences :

- en cas de vallée : refroidissement, augmentation de l'humidité, diminution du vent
- ↻ en cas de pic : réchauffement , diminution de l'humidité, augmentation du vent

II.3. Fichier d'initialisation pour le domaine 1 km

Un seul fichier d'initialisation est nécessaire pour le domaine 1 km.

II.3.1. Interpolation horizontale

- utilitaire : SPAWNING

- Fichiers d'entrée :

- PGD 1km nesté
- fichier 5kms

NB : l'orographie fine, à ce stade n'est pas prise en compte, les champs 3D sont lissés.

II.3.2. Interpolation verticale

- utilitaire : PREP_REAL_CASE

- Fichiers d'entrée :

- PGD 1km nesté
- fichier 1km interpolé horizontalement

III. Run du modèle

Les variables pronostiques du modèle sont les 3 composantes du vent u,v,w, la température potentielle, les différents rapports de mélange, l'énergie cinétique turbulente.

- Utilitaire : RUN

- Fichiers d'entrée :

- 8 fichiers d'initialisation et de couplage domaine 5 kms
- Un fichier d'initialisation domaine 1 km
- Namelists :
 - EXSEG1.nam options pour la simulation 5 kms
 - EXSEG2.nam options pour la simulation 1 km

- Fichiers de sortie :

fichiers horaires des variables pronostiques au format FM.

Options du modèle 1 :

- pas de temps de calcul **XTSTEP** = 15 s
- pas de temps pour la diffusion **XT4DIFF** = 1500 s
- schéma de turbulence **CTURB** = TKEL (énergie cinétique turbulente pronostique et hauteur de mélange diagnostique)
- schéma radiatif **CRAD** = ECMWF
- schéma de surface **CGROUND** = ISBA
- schéma convectif **CDCONV**= KAFR (approche mixte de Kain-Fritsch)
- turbulence **CTURBDIM**= 1DIM (seuls les flux verticaux sont pris en compte)
- hauteur de mélange **CTURBLEN**= BL89 (formulation de Bougeault et Lacarrere 1989)
- hauteur de la couche tampon **XALZBOT**= 15000 m

Options du modèle 2 :

- pas de temps de calcul **XTSTEP** = 3 s
- pas de temps pour la diffusion **XT4DIFF** = 300 s
- schéma de turbulence **CTURB** = TKEL (énergie cinétique turbulente pronostique et hauteur de mélange diagnostique)
- schéma radiatif **CRAD** = ECMWF
- schéma de surface **CGROUND** = ISBA
- schéma convectif **CDCONV** = None
- turbulence **CTURBDIM** = 3DIM
- hauteur de mélange **CTURBLEN** = DEAR (pour DEARDOFF)

IV. Exploitation des sorties

Les fichiers de sorties doivent être transformés en fichiers diachroniques (par **conv2dia**) afin d'être exploités graphiquement par **diaprog**.

A partir de ces fichiers, il est également possible de créer des variables diagnostics :

- Utilitaire : DIAG

- Fichiers d'entrée :

- fichier de sortie horaire au format FM
- namelist : DIAG1.nam qui précise les variables diagnostics désirées

- N2M = 0 pour champs 2D
Température, Humidité relative et spécifique à 2 m
Composantes du vent u, v à 10 m

- NPROG_SURF = 0 pour champs 2D de surface
Température (TG1) et contenu en eau (WG1)

- LTPZH = T pour champs 3D Température (en °C) et Humidité relative (en %)

- LVAR_TURB = T pour champs 3D Énergie cinétique turbulente (TKEM)

- **Fichiers de sortie** : Fichiers diachroniques

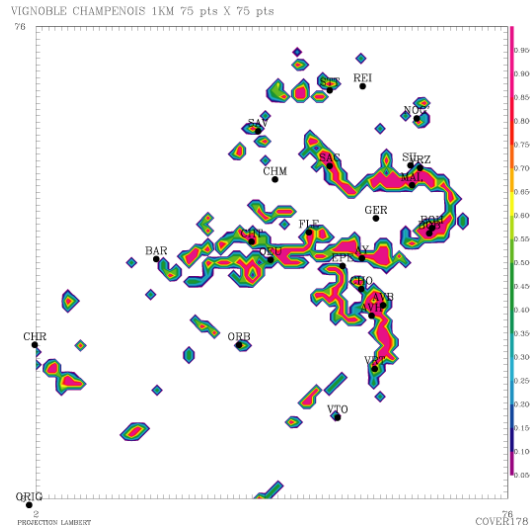
Les variables contenues dans ces fichiers peuvent être visualisées, à l'aide de **DIAPROG**, sous la forme de :

- coupes horizontales pour les 2 domaines (T2M, TG1, WG1, HU2M, vent 10 m)
- coupes verticales selon un axe horizontal choisi (champs 3D)
- profils verticaux en un point donné avec superposition des différentes échéances (T, HU, TKEM)

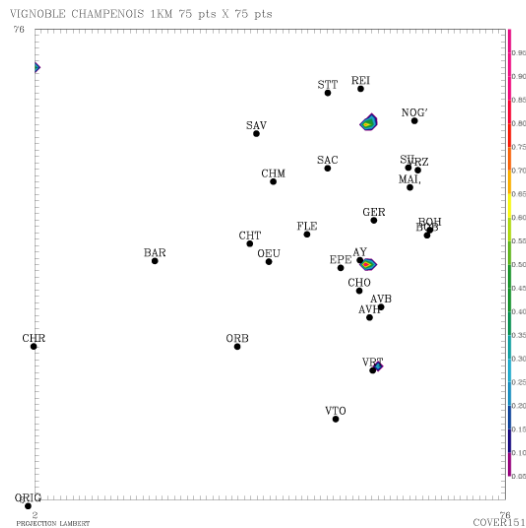
Les données visualisées par **DIAPROG** peuvent être sauvegardées dans un fichier ASCII (LPRINT = T) pour être traitées par d'autres logiciels .

ANNEXE K : QUELQUES OCCUPATIONS DU SOL UTILISEES DANS LE MODELE MESO NH

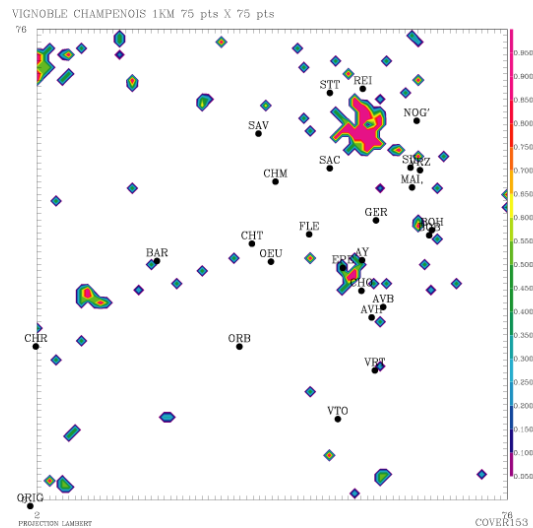
Part de la couverture "Vignoble"



Part de la couverture "Dense urban"



Part de la couverture "Temperate sub_urban"



Rappel des abréviations et symboles relatifs aux stations

Avb	Avize (bas)
Avz	Avize (haut)
Ay	Aÿ-Champagne
Bzb	Bouzy (bas)
Bzy	Bouzy (haut)
Cby	Chambrecy
Cht	Châtillon-sur-Marne.
Pcq	Chouilly (Plumecoq)
Fch	Épernay (Fort-Chabrol)
Fle	Fleury-la-Rivière
Ger	Germaine
Mai	Mailly-Champagne
Nog	Nogent-l'Abbesse
Oeu	Œuilly
Orb	Orbais-l'Abbaye
Rei	Reims
Sac	Sacy
Sth	Saint-Thierry
Sav	Savigny-sur-Ardre
Sil	Sillery
Vtl	Vert-Toulon
Vts	Vertus
Vzy	Verzenay

Pour les sorties Meso NH

Bar	Barzy-sur-Marne
Chr	Charly-sur-Marne

Situation :

▲ Stations situées à mi-coteau

▼ en bas de coteau

■ en plaine

RESUME

Par sa situation septentrionale, le vignoble champenois est particulièrement sensible aux événements gélifs se produisant au printemps juste après le débourrement des bourgeons. Pour se protéger de cette contrainte climatique, dont les répercussions économiques et sociales sont parfois considérables, certains vigneron disposant de moyens de lutte sont intéressés par une estimation de l'aléa gélif à court terme. Pour appréhender ce phénomène climatique aux échelles spatiales topoclimatiques, pertinentes dans le cas d'un vignoble, nous avons utilisé les données climatiques (température, nébulosité et vent) provenant d'un réseau dense de 23 stations implantées dans le vignoble marnais (pour 6 printemps 1998-2003) ainsi que des données d'altitude et d'occupation du sol.

Nous étudions dans un premier temps les variabilités spatiale et temporelle des températures minimales et des écoulements de l'air. En utilisant diverses méthodes statistiques (univariées à multivariées), nous caractérisons le topoclimat nocturne printanier du vignoble marnais. Nous mettons ainsi en évidence l'influence de la topographie, par exemple la position des stations sur les coteaux viticoles, sur la répartition spatiale des températures minimales. De plus, nous montrons l'existence de brises de pente, qui se développent progressivement au cours de la nuit.

Dans un second temps, nous utilisons des méthodes d'interpolation spatiale géostatistique puis multicritère, afin de spatialiser l'aléa gélif. L'approche multicritère se révèle plus performante dans la mesure où elle permet de prendre en compte l'environnement des stations. Les modèles construits expliquent assez bien la répartition spatiale des températures minimales. Enfin, dans le but d'intégrer les écoulements de l'air dans nos modèles, nous réalisons une simulation du modèle numérique Meso NH pour une date représentative des conditions radiatives, favorables à un fort refroidissement et une variabilité spatiale importante. Les sorties, qualitativement en accord avec les observations, illustrent bien les interactions entre les brises de pente et le vent général et permettent de localiser les zones d'accumulation d'air froid.

Mots clés : vignoble de Champagne, risque de gel, températures minimales, modélisation spatiale, système d'information géographique.

ABSTRACT

Due to its northern location, the Champagne vineyard is particularly sensitive to frosts occurring in spring just after the restart of the buds. To protect against this climatic constraint, which can dramatic social and economical consequences, some wine growers who have invested in fighting methods are interested in a short term estimate of the frost risk. In order to understand this climatic phenomenon at the topoclimatic scales, which are relevant for a vineyard, we used climatic data (temperature, cloud cover and wind) coming from a dense network of 23 meteorological stations in the Marne vineyard (for the six springs 1998-2003) as well as altitude and land cover data.

Firstly, we study the spatial and temporal variabilities of minimum temperatures and winds. By the mean of different statistical methods (univariate to multivariate), we characterize the spring night topoclimate of the Marne vineyard. We observe the role of topography, for example the position of the stations on the hillsides, on the spatial distribution of minimum temperatures. Moreover, we show the existence of slope winds which develop gradually during the night.

We apply then several interpolation methods (geostatistic and multicriteria) to our data in order to obtain a frost risk estimate for the whole vineyard. The multicriteria approach is the most efficient due to its ability to take into account the station environment. The built models explain quite well the spatial distribution of minimum temperatures. Finally, with the aim of integrating the wind effects in our models, we simulate the Meso NH numerical model for one day corresponding to radiative conditions which yield a strong cooling and variability. The outputs, in qualitative agreement with the observations, illustrate well the interactions between slope winds and the general wind and allow locating the cold air accumulation zones.

Key words : Champagne vineyard, frost risk, minimum temperatures, spatial modelling, geographical information system

Malika MADELIN

UNIVERSITE PARIS 7

2 place Jussieu 75251 Paris Cedex 05

malika.madelin@wanadoo.fr