

CIHEAM

MEMOIRE / DISSERTATION

requis pour l'obtention du diplôme de
submitted for the Degree of

MASTER

Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier

**Les indicateurs écoclimatiques
pour l'analyse de la faisabilité des cultures.
Le cas d'étude de la vigne en Vaucluse**

Meryem El Amraoui

Série « Master » n. 151

2016



Le Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes

Créé en 1962 sous l'égide du Conseil de l'Europe et de l'OCDE, le CIHEAM est une organisation inter-gouvernementale qui réunit aujourd'hui treize Etats membres du bassin méditerranéen : Albanie, Algérie, Egypte, Espagne, France, Grèce, Italie, Liban, Malte, Maroc, Portugal, Tunisie, Turquie.

Le CIHEAM se structure autour de quatre instituts agronomiques méditerranéens (IAM), localisés à Bari (Italie), à Chania (Grèce), à Montpellier (France) et à Saragosse (Espagne), et d'un secrétariat général situé à Paris (France). Les instituts dispensent des enseignements post-universitaires de niveau Master of Science.

Le CIHEAM anime des réseaux de recherche en Méditerranée, favorise l'organisation d'enseignements spécialisés dans les pays membres, tient des séminaires et colloques rassemblant des techniciens et scientifiques spécialistes des questions agricoles de la région.

Au travers de ses activités, le Centre favorise le dialogue Nord/Sud et la coopération internationale pour le développement de l'agriculture dans la région méditerranéenne.

The International Centre for Advanced Mediterranean Agronomic Studies

Founded in 1962 under the auspices of the Council of Europe and the OECD, the CIHEAM is an intergovernmental organization composed of thirteen member states: Albania, Algeria, Egypt, France, Greece, Italy, Lebanon, Malta, Morocco, Portugal, Spain, Tunisia, Turkey.

The CIHEAM is made up of four Mediterranean Agronomic Institutes (MAI) located in Bari (Italy), Chania (Greece), Montpellier (France) and Zaragoza (Spain), and a General Secretariat in Paris (France). The institutes provide post-graduate education at the Master of Science level.

The CIHEAM animates Mediterranean research networks, promotes the organization of specialized education cycles in member countries, holds seminars and workshops bringing together technicians and scientists specialized in Mediterranean agriculture.

Through these activities, the CIHEAM promotes North/South dialogue and international cooperation for agricultural development in the Mediterranean region.

**Les indicateurs écoclimatiques
pour l'analyse de la faisabilité des cultures.
Le cas d'étude de la vigne en Vaucluse**

Meryem El Amraoui

Série « Master » n. 151

2016

Série « Master »

Ce Master est le numéro 151 de la série *Master* de l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier.

Cette collection réunit les Masters du CIHEAM-IAMM ayant obtenu la mention « Publications ».

Le *Master* du Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes :

Les indicateurs écoclimatiques pour l'analyse de la faisabilité des cultures. Le cas d'étude de la vigne en Vaucluse

a été soutenu par **Meryem EL Amraoui** le 24 septembre 2014 devant le jury suivant :

M. Hatem Belhouchette, enseignant-chercheur, CIHEAM-IAMM Membre
Mme Marta Debolini, chercheur, INRA Avignon Membre
Mme Tahani Abdelhakim, enseignante-chercheur, CIHEAM-IAMM Membre

Le travail de recherche a été encadré par **M. Hatem Belhouchette**.

L'Institut Agronomique Méditerranéen n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions n'engagent que leur auteur.

CIHEAM-IAMM

Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier

Directeur : Pascal Bergeret

3191 Route de Mende - 34093 Montpellier cedex 05
Tél. : (33) (0)4 67 04 60 00 – Fax : (33) (0)4 67 54 25 27



Pour citer cet ouvrage :

El Amraoui M. (2016). *Les indicateurs écoclimatiques pour l'analyse de la faisabilité des cultures : cas de la vigne en Vaucluse*. Montpellier (France) : CIHEAM-IAMM. 93 p. (Master, n. 151).

ISBN: 978-2-85352-563-5 ; ISSN : 0989-473X

Résumé

Les conditions climatiques dans la région méditerranéenne jouent un rôle fondamental dans la faisabilité des cultures et surtout pour la vigne. Le climat influence largement sa croissance et son développement, ainsi que sa qualité et son rendement. L'évaluation de la manière dont le climat est favorable pour la culture est très utile pour pouvoir proposer et appliquer des stratégies d'adaptation afin d'améliorer les potentialités de la viticulture. Des indicateurs éco-climatiques ont été largement utilisés à cette fin. Le présent travail a pour objectif de mettre au point la base de données biophysiques existantes, sol et climat en particulier, et de spatialiser des indicateurs de faisabilité et de risque de la culture de la vigne pour le département du Vaucluse. L'étude a été réalisée sur une base de données climatique de 50 ans, soit de 1961 à 2011, dans différentes mailles du département en considérant trois cépages comme études de cas. L'approche utilisée a consisté à appliquer une méthode de faisabilité basée sur des indicateurs éco-climatiques calculés sur des périodes phénologiques. Une fois spatialisés, ces indicateurs vont nous permettre d'évaluer les effets du climat sur les processus particuliers de la plante et du coût, afin de mieux comprendre les déterminants biophysiques de la distribution spatiale des cultures et les mettre en relation avec les changements d'usage des sols viticoles. Ce document permet d'une part, une identification des types de risque pédoclimatique dans les différentes zones du département et d'autre part, une reconnaissance de la distribution spatiale des indicateurs écoclimatiques qui serviront par la suite à une étude de faisabilité de cette culture.

Mots clés auteur

Indicateurs éco-climatiques, Viticulture, SIG, Vaucluse, France

Title : *Ecoclimatic indicators for the analysis of crop feasibility. Case study of vineyards in Vaucluse***Abstract**

The climatic conditions in the Mediterranean region play a key role in the feasibility of crops and especially for growing grapes. The climate largely influences its growth and development as well as its quality and performance. The evaluation of the way the climate is favorable for cultivation is very useful to propose and implement adaptation strategies in order to improve the potential of viticulture. Eco-climatic indicators have been widely used for this purpose. The present work aims to develop the existing biophysical database, in particular soil and climate data and to spatialize indicators of feasibility and risk of growing grapes in Vaucluse. The study was performed on a climate database of 50 years, from 1969 to 2010 in different department grids considering three varieties as case studies. The approach was to apply a method based on eco-climatic indicators for feasibility assessment calculated on phenological periods. Once they were spatialized, these indicators will allow us to assess the effects of climate on individual processes of the plant and cost, to better understand the biophysical determinants of the spatial distribution of crops and put them in relation with the changes in use of vineyard soils (land use, level of intensity of use ...). This document allows on one hand, an identification of the types of soil and climate risk in different areas of the department and on the other hand, the recognition of the spatial distribution of eco-climatic indicators as the result of a feasibility study of this culture.

Author keywords

Eco-climatic indicators, Viticulture, GIS, Vaucluse, France

Table des matières

Liste des figures	3
Liste des tableaux	3
Liste des cartes	4
Liste des annexes.....	5
Liste des acronymes	6
Remerciements	7
Introduction	9
Partie 1 - Revue bibliographique et présentation de la zone d'étude	11
I - L'évolution des systèmes agricoles en Vaucluse.....	13
1. Présentation de la zone d'étude	13
2. Les systèmes agricoles en Vaucluse	16
3. La viticulture dans le département de Vaucluse	18
II - Les méthodes d'étude de faisabilité.....	19
1. Les modèles de culture utilisés en agriculture	19
2. Les indicateurs écoclimatiques de la faisabilité de la production viticole	19
III - Modèles phénologiques.....	20
1. Importance de la phénologie, de la croissance et du rendement des cultures dans la prise de décisions ...	20
2. Importance des modèles phénologiques en agriculture	20
3. Les modèles phénologiques utilisés dans l'étude	20
Partie 2 - Matériels et méthodes.....	23
I - Choix des outils et démarche générale.....	25
1. Outils utilisés	25
2. Approche utilisée	27
II - Méthodologie.....	29
1. Choix des variétés et période d'étude	29
2. Les données utilisées	29
3. Modélisation sous PMP	34
4. Calcul du bilan hydrique.....	35
5. Calcul des indicateurs de faisabilité	36
6. Spatialisation des indicateurs.....	39
Partie 3 - Résultats et discussion	43
I - Simulation des stades phénologiques	45
II - Indicateurs de faisabilité	46
1. Les fonctions de codage	46
2. Bilan hydrique	46
3. Calcul indicateur.....	46
4. Spatialisation des indicateurs.....	48
Conclusion et recommandations	63

Références bibliographiques	65
Webographie	67
Annexes	69

Liste des figures

Figure 1 - Carte de situation du département de Vaucluse à l'échelle nationale	13
Figure 2 - Carte du département de Vaucluse (84)	13
Figure 3 - Place de l'agriculture dans le territoire en 2007.....	16
Figure 4 - Distribution des typologies des systèmes agricoles en Vaucluse entre 2001 et 2006 ..	17
Figure 5 - Taille des exploitations dans le Vaucluse.....	17
Figure 6 - Localisation des aires AOC en Vaucluse	18
Figure 7 - Combinaison des deux modèles (Bidabe et Richardson) dans un seul modèle (BRIN)	20
Figure 8 - Interface du Logiciel R studio	25
Figure 9 - Interface du logiciel PMP 5. 5	26
Figure 10 - Approche méthodologique utilisée dans l'étude	28
Figure 11 - Comparaison de nombre de jours en Floraison et Maturité pour différentes variétés	29
Figure 12 - Grille des mailles SAFRAN	30
Figure 13 - Définition d'un sol fonctionnel	31
Figure 14 - Disponibilité de l'eau d'une couche de sol pour les plantes	31
Figure 15 - Fichiers Paramètres XML utilisés dans la simulation	34
Figure 16 - Interface de simulation des stades phénologiques.....	35
Figure 17 - Stades phénologiques déterminées de la vigne	37

Liste des tableaux

Tableau 1 - Valeurs caractéristiques de KC pour la vigne	36
Tableau 2 - Indicateurs sélectionnés pour étudier la faisabilité de la vigne.....	38
Tableau 3 - Indicateurs sélectionnés pour étudier la faisabilité climatique	38
Tableau 4 - Paramètres et modèles utilisés dans la simulation des stades phénologiques pour chaque variété.....	45
Tableau 5 - Exemple des tableaux de sortie de calcul du bilan hydrique	46
Tableau 6 - Exemple du fichier phénologie du programme de calcul des indicateurs.....	47
Tableau 7 - Exemple du fichier climat du programme de calcul des indicateurs	47
Tableau 8 - Paramètres utilisés dans le calcul des indicateurs écoclimatiques.....	47
Tableau 9 - Indicateurs utilisés et leurs arguments	48

Liste des cartes

Carte 1 - Répartition des 7 classes des RU.....	33
Carte 2 - Croisement maille safran et type de sol	40
Carte 3 - Cartes de l'indicateur de phénologie « PHASE LENGTH » et de MNT.....	49
Carte 4 - Différence variétale d'un indicateur de phénologie par rapport à une phase phénologique.....	51
Carte 5 - Effet du déficit hydrique sur la croissance de la plante.....	53
Carte 6 - Comparaison de l'effet du déficit hydrique sur la qualité de la vigne entre les trois variétés	55
Carte 7 - Effets climatiques du déficit hydrique et de l'excès d'eau sur la qualité de la culture de la vigne.....	58
Carte 8 - Effets climatiques du déficit hydrique et de l'Amplitude de la température sur la qualité de la vigne.....	60
Carte 9 - Occupation du sol en Vaucluse	61

Liste des annexes

Annexe 1 - Carte de l'indicateur RAIN FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation	70
Annexe 2 - Carte de l'indicateur RAIN FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation pour la variété Syrah.....	71
Annexe 3 - Carte de l'indicateur RAIN FREQUENCY entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Syrah.....	72
Annexe 4 - Carte de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Sauvignon	73
Annexe 5 - Carte de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Sauvignon	74
Annexe 6 - Carte de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Syrah	75
Annexe 7 - Carte de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Sauvignon.....	76
Annexe 8 - Carte de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY entre la phase Floraison et Floraison+10 et pour la variété Sauvignon.....	77
Annexe 9 - Carte de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY entre la phase Floraison et Floraison+10 et pour la variété Syrah	78
Annexe 10 - Carte de l'indicateur AVERAGE DAILY RANGE T entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Sauvignon	79
Annexe 11 - Carte de l'indicateur AVERAGE DAILY RANGE T entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Syrah	80
Annexe 12 - Carte de l'indicateur AVERAGE DAILY RANGE T entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Chardonnay	81
Annexe 13 - Carte de l'indicateur T MIN entre la phase Véraison et Maturation-10.....	82
Annexe 14 - Carte de l'indicateur T MIN entre la phase Maturation-10 et Maturation	83
Annexe 15 - Carte de l'indicateur AVERAGE DAILY MEAN T entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Chardonnay	84
Annexe 16 - Carte de l'indicateur AVERAGE DAILY MEAN T entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Chardonnay	85
Annexe 17 - Carte de l'indicateur HEAT FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Chardonnay	86
Annexe 18 - Carte de l'indicateur HEAT FREQUENCY entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Chardonnay	87
Annexe 19 - Carte de l'indicateur HEAT FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Chardonnay	88
Annexe 20 - Carte de l'indicateur HEAT FREQUENCY entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Sauvignon.....	89
Annexe 21 - Carte de l'indicateur HEAT FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Syrah	90
Annexe 22 - Carte de l'indicateur HEAT FREQUENCY entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Syrah	91
Annexe 23 - Carte de l'indicateur T MIN entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Sauvignon.....	92
Annexe 24 - Carte de l'indicateur T MIN entre la phase Maturation-10 et Maturation	93

Liste des acronymes

IAMM	: Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier
INRA	: Institut National de Recherche Agronomique
UMR	: unité mixte de recherches
EMMAH	: Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes
PACA	: Provence-Alpes-Côte d'Azur
UAPV	: Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse
ACCAF	: Adaptation au Changement Climatique de l'Agriculture et de la Forêt
CA	: Chambre d'Agriculture
CCE	: Commission des Communautés Européennes.
CRAAQ	: Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec
CNRS	: Centre National de Recherche Scientifique
PMP	: Plateforme de Modèle Phénologique
RU	: Réserve Utile
UCS	: Unité Cartographique du Sol
Hcc	: Humidité à la Capacité au Champ
Hpf	: Humidité au Point de Flétrissement Permanent
RFU	: Réserve Facilement Utilisable
RDU	: Réserve Difficilement Utilisable
SIG	: Système d'Information Géographique
S-AF	: Somme des Actions Froides
LD	: Levée de Dormance
GDD	: Growing Degree-Days
SAFRAN	: Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie
SCPARP	: Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale
CNRM	: Centre National de Recherches météorologiques
SCP	: Société du Canal de Provence
CNABRL	: Compagnie Nationale d'Aménagement du Bas-Rhône Languedoc

Remerciements

Au terme de ce travail de fin d'études, je tiens à remercier mon encadrant à l'IAMM, **Hatem Belhouchette**, enseignant chercheur à l'IAMM pour avoir accepté d'encadrer ce travail. Veuillez accepter, monsieur, ma vive gratitude.

Je remercie infiniment mes deux encadrantes à l'INRA d'Avignon **Marta Debolini** et **Martine Guerif** pour l'opportunité qu'elles m'ont offerte de pouvoir travailler avec elles, pour leur disponibilité et la confiance qu'elles m'ont accordée tout au long du stage.

C'est avec un grand plaisir que je les remercie pour la patience dont elles ont fait preuve, pour leurs encouragements et les conseils précieux qu'elles m'ont prodigués.

Enfin, je tiens à présenter mes authentiques remerciements à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à venir à bout à ce présent travail dans les meilleures circonstances.

Merci à ma famille qui m'a tout le temps soutenue et qui continue à le faire.

Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance

Introduction

Les paysages agricoles du Sud de la France sont fortement caractérisés par la présence de la vigne, qui est une culture traditionnelle et historique.

En même temps, cette culture est extrêmement sensible au type de sol dans lequel elle s'enracine et elle pourrait être influencée par de possibles variations climatiques. Au cours de l'histoire, elle a été plantée dans des lieux précis pour tirer parti de cette dépendance, qui s'exprime jusque dans la qualité des vins. Cette forte réponse aux infimes modifications de son écosystème fait de la vigne un modèle d'étude privilégié pour les chercheurs (Poulain, 2013).

En effet, les conditions climatiques dans la région méditerranéenne jouent un rôle fondamental dans la faisabilité des cultures. Le climat influence largement la croissance et le développement de la vigne, ainsi que sa qualité et son rendement.

Cependant, les changements climatiques peuvent avoir des répercussions importantes sur le secteur viticole. De ce fait, des scénarios d'évolution future de l'occupation et d'usage du sol sont nécessaires afin d'analyser l'impact de ces changements sur le climat régional et de définir des adaptations des agrosystèmes pour le maintien de la production agricole. Pour ce faire, il faut étudier tout d'abord les déterminants possibles (géographiques, agronomiques, socio-économiques...) des changements observés de l'évolution des systèmes agricoles. Parmi ces déterminants, il y a la potentialité des territoires en termes de climat et sol, d'où l'objet de notre présente étude.

Présentation de l'organisme d'accueil : INRA UMR EMMAH Avignon

Le centre INRA PACA (Institut National de Recherche Agronomique, Provence-Alpes-Côte d'Azur) est un centre de recherche tourné vers l'agro-écologie des systèmes de culture sous serres et en vergers et la modélisation de l'impact régionalisé du changement climatique à l'échelle du paysage.

En 2010, l'INRA se dote d'un centre de recherche Provence-Alpes-Côte d'Azur. Ce nouveau dispositif relevant de la fusion des centres d'Avignon et de Sophia Antipolis, place le centre PACA au 4ème rang national parmi les 18 centres INRA. Il rassemble 1 000 agents, dont 700 agents permanents, répartis dans 26 unités, localisés sur 10 sites : Avignon et Sophia-Antipolis, et huit autres sites : Aix-en-Provence, Gotheron, Grenoble, Le Cap d'Antibes, Nice, Les Vignères, Manduel et Marseille. (INRA, 2014)

Parmi les unités du centre INRA PACA, on trouve EMMAH (Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes). Cette dernière est une unité mixte de recherches (UMR) rassemblant du personnel de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (UAPV) et de l'INRA d'Avignon.

Les recherches au sein de l'UMR EMMAH visent à développer des outils d'analyse et de prévision de la dynamique du fonctionnement biophysique des écosystèmes méditerranéens à l'échelle du territoire. Elles portent principalement sur l'analyse de l'impact des changements globaux sur la ressource hydrique, la production agricole et leur interaction à l'échelle du territoire (du paysage au bassin de production et de l'aquifère). (INRA, 2014)

Contexte général de l'étude

Les évolutions du climat (augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses, des vagues de chaleur, des pluies torrentielles et des inondations...) pourraient accentuer la vulnérabilité des cultures ou changer la faisabilité de certaines cultures dans des endroits à la faveur d'autres emplacements plus favorables. (Caubel *et al.*, 2012).

Les conditions climatiques dans une région donnée jouent un rôle fondamental dans l'aptitude agricole. L'évaluation de la façon dont le climat est favorable pour une culture donnée dans une région donnée est nécessaire. Cela permettrait de proposer et d'appliquer des stratégies d'adaptation pour améliorer les potentialités agricoles. En effet, les indicateurs agroclimatiques ont été largement utilisés à cette fin. (Caubel *et al.*, 2012 ; Holzkämper *et al.*, 2013 ; Brown *et al.*, 2008).

Des études sur l'évolution des systèmes agricoles en Vaucluse sont actuellement en cours et ils semblent montrer une augmentation générale de la surface en vigne avec une intensification de cette culture dans certaines sous-régions (Debolini *et al.*, 2014). Afin d'essayer de comprendre cette évolution spatio-temporelle, il semble nécessaire en premier temps d'opter pour une caractérisation de la faisabilité de cette culture.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre du projet « VIGIMED » financé par le méta-programme « Adaptation au Changement Climatique de l'Agriculture et de la Forêt (ACCAF) ». Le projet vise à analyser l'impact du changement climatique sur les territoires méditerranéen et les possibles stratégies d'adaptation, à travers la distribution spatiale des systèmes de production agricoles et les ressources en eau. Pour ce faire, une modélisation de l'évolution des usages des sols est nécessaire pour conduire à cette analyse, et c'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail qui sera mené dans le Vaucluse, l'objet de notre étude.

En effet, pour analyser les changements d'usage des sols agricoles (occupation du sol, niveau d'intensité de l'usage et Impacts sur les ressources...), notre approche consiste à analyser des indicateurs de faisabilité spatialisés de la production agricole dans la zone ainsi que les dynamiques spatio-temporelles observées de ces systèmes agricoles et leurs déterminants (pratiques agricoles, structure des exploitations, performances agronomiques et économiques...). De ce fait, le présent stage sera en particulier focalisé sur l'étude des indicateurs de faisabilité et risque de la culture de la vigne en Vaucluse.

L'objectif principal du projet de recherche dans lequel ce travail est encadré, consiste à développer une modélisation de l'évolution d'usage des sols agricoles. Pour ce faire, une intégration des déterminants biophysiques (sol, climat, ressources en eau...) et socio-économiques des changements, s'avère nécessaire. Dans ce contexte, le présent travail a pour objectif spécifique de reprendre les bases de données biophysique existantes (sol et climat en particulier), et de les mettre au point pour proposer une couverture spatialisée d'indicateurs de faisabilité et de risque de la culture de la vigne pour le département de Vaucluse.

Partie 1

Revue bibliographique et présentation de la zone d'étude

I - L'évolution des systèmes agricoles en Vaucluse

1. Présentation de la zone d'étude

A. Situation géographique

Le département de Vaucluse (84) fait partie de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), région située au Sud-Est de la France comme le montre la carte suivante (Figure 1).

Figure 1 - Carte de situation du département de Vaucluse à l'échelle nationale



Source : (1France, 2014)

Le département a été constitué sur les anciens territoires des basses Alpes rebaptisés Alpes-de-Haute-Provence, ce sont des zones fertiles grâce aux fleuves du Rhône et de la Durance qui délimitent de part et d'autres le département (Figure2).

Figure 2 - Carte du département de Vaucluse (84)



Source : (1France, 2014)

B. Climat

Le patrimoine climatique de Vaucluse est riche par sa diversité. Ce département doit cette situation privilégiée à sa position géographique proche du bassin méditerranéen.

Le département subit les influences de trois des quatre climats majeurs de France : le climat méditerranéen pour sa partie Sud, le climat montagnard pour sa partie Nord-Est (Monts de Vaucluse et massif des Baronnies) et l'influence toute relative du climat semi-continental pour sa partie Nord-Ouest. Ces influences sont toutefois atténuées par une nette prédominance du climat méditerranéen, avec l'assurance d'une bonne fécondation de la vigne. Les caractéristiques de ce climat sont les suivantes (CA, 2014a) :

- une forte luminosité du ciel ;
- un fort ensoleillement avec 2 800 heures par an, juillet comptant à lui seul plus de 350 heures ;
- une pluviométrie très irrégulière comprise entre 650 et 700 mm en plaine (900 à 1 100 mm en montagne), répartie sur 80 à 100 jours de pluie, principalement en avril-mai et septembre-octobre. Les pluies tombent sous forme d'averses brutales au printemps et surtout à l'automne par rapport au reste de la France ;
- des températures moyennes comprises entre 5 °C en janvier et 25 °C en juillet. Les étés sont très chauds avec des pointes atteignant souvent 35 °C en juillet et août alors que les hivers sont relativement froids jusqu'en plaine, avec 35 à 70 jours de gelées, le plus souvent de novembre à avril ;
- une végétation principalement constituée de garrigues, des forêts clairsemées ;
- des vents violents, surtout le mistral (vents de Nord) avec des vitesses régulièrement proches de 100 km/h en rafales. Ce vent permet notamment la concentration des baies au moment de la maturation et offre tout au long du cycle végétatif des conditions optimales de lutte contre les maladies cryptogamiques.

C. Pédologie

Les aptitudes agronomiques des sols sont intéressantes avec environ 45 % de terres d'aptitude intéressante à excellente, 25 % d'aptitude moyenne et 30 % d'aptitude médiocre à très faible (SCPARP, 2009).

Il est utile de préciser que les parcelles qualifiées d'intéressantes à excellentes conviennent particulièrement aux vergers, au maraîchage et aux grandes cultures ; en revanche la vigne de cuve de qualité se développe sur des sols moins riches et moins fertiles dont l'aptitude agronomique est qualifiée de moyenne.

Les types de sol en Vaucluse peuvent être identifiés en trois grandes catégories :

▪ Sols d'aptitude excellente à intéressante (environ 45 % des terres agricoles) :

Ces différents types de sol sont de grande qualité du fait de leur pente nulle à faible, de leur profondeur importante et de leur texture favorable leur conférant une réserve utile conséquente et de leur bonne fertilité potentielle.

Ces classes de sol concernent les sols formés sur des alluvions et colluvions récents ainsi que les sols bruns calcaires issus d'alluvions würmiennes dépourvus de cailloux (principalement localisés sur Camaret et Violès).

Les sols les plus favorables s'avèrent être les sols peu évolués d'apport alluvial ou colluvial de texture grossière à fine de limon argileux. Viennent ensuite les sols bruns calcaires et les sols peu évolués à caractère d'hydromorphie ou purement hydromorphes (aptitude intéressante).

Ils se répartissent principalement :

- sur la rive droite du canal de dérivation du Rhône (Lamotte et Lapalud) ;
- entre le Rhône et l'autoroute A7 sur la rive gauche (Bollène, Mondragon, Mornas et Piolenc) ;
- sur les hauteurs de Piolenc et Uchaux ;
- le long des vallées alluviales de l'Aygues, de l'Ouveze, de la Meyne...

Ces sols conviennent bien en règle générale aux grandes cultures, aux prairies, aux cultures fruitières ainsi qu'aux cultures maraîchères notamment lorsqu'elles sont irriguées (SCPARP, 2009).

▪ **Sols d'aptitude moyenne (environ 25 % des terres agricoles)**

Ces types de sol sont de qualité moyenne sur le plan agronomique en raison de leur pente faible à moyenne, de leur profondeur moyenne et de leur teneur en cailloux plus importante leur conférant une réserve en eau plus limitée et une fertilité potentielle plus réduite.

Il s'agit ici principalement des sols développés sur les terrasses alluvionnaires à cailloux du quaternaire ancien.

Ces caractéristiques pédologiques et agronomiques impliquent qu'ils ne peuvent être affectés qu'à des cultures rustiques ou à enracinement superficiel : ils s'avèrent ainsi très favorables la viticulture de qualité.

Néanmoins, lorsque l'irrigation est possible, leur vocation change complètement puisqu'ils constituent de bons terroirs fruitiers et maraîchers.

Ils se répartissent principalement sur la partie orientale du territoire (Sérignan, Camaret, Travaillan, Violes, Lagarde Paréol, Sainte Cécile et Saint Roman) (SCPARP, 2009).

▪ **Sols d'aptitude médiocre à très faible (environ 30 % des terres agricoles)**

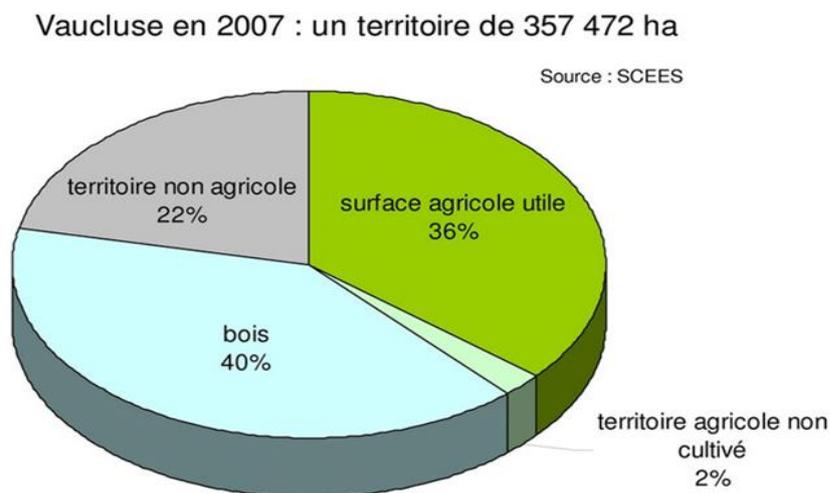
Cette classe de sol concerne les zones montagneuses ou collinaires. Les possibilités d'exploitation de ces sols sont beaucoup plus limitées de par la pente et la profondeur de sol notamment (rendzines, lithosols par exemple). Ces contraintes rendent l'intensification de la mise en valeur difficilement envisageable. C'est pourquoi la vocation des sols qui y figure reste essentiellement naturelle (bois, garrigue...).

Ces types de sols se retrouvent au cœur du territoire d'étude en rive gauche du Rhône sur les communes de Bollène, Mondragon, Mornas, Uchaux, Piolenc, Sérignan, Lagarde Paréol et Saint Roman (SCPARP, 2009).

2. Les systèmes agricoles du Vaucluse

Le département du Vaucluse est à vocation agricole. La Surface Agricole Utilisée par les exploitations vauclusiennes est d'environ 120 000 ha. L'agriculture occupe plus du tiers du territoire, soit 35 % du territoire du département (Figure 3) (C.A., 2007).

Figure 3 - Place de l'agriculture dans le territoire en 2007



Source : (C.A., 2007)

L'activité agricole du Vaucluse s'articule essentiellement autour de trois productions majeures : vins, fruits et légumes qui assurent 90 % de la potentialité agricole du département. Les filières viticole (40 %) et fruitière (30 %) en sont les deux piliers avant les légumes (12 % du chiffre d'affaire agricole). La production de plants de pépinières (9 %) qui regroupe notamment les pépinières viticoles et les vignes mères de porte greffe, arrive en quatrième position.

Le Vaucluse est le premier producteur national de cerises (qu'elles soient destinées à la consommation directe ou à la transformation), de pommes golden et de raisin de table et de la truffe. Il prend la deuxième place pour le melon, la poire, la courge, les tomates, la courgette et la lavande. Il est en troisième position pour les vins d'appellation, la figue, la fraise, le lavandin et deux légumes phares de la ratatouille : le poivron et l'aubergine. Parmi les autres productions de fruits et légumes, on peut noter l'olive, la fraise avec diverses variétés et spécialités locales ou encore les poires (C.A., 2007).

L'élevage, qui a longtemps été le socle d'une économie montagnarde de subsistance sur les versants des reliefs, est une activité marginale.

Les cultures spécialisées (lavande sur les plateaux des Monts de Vaucluse, herbes aromatiques...) se développent grâce à un marché en expansion.

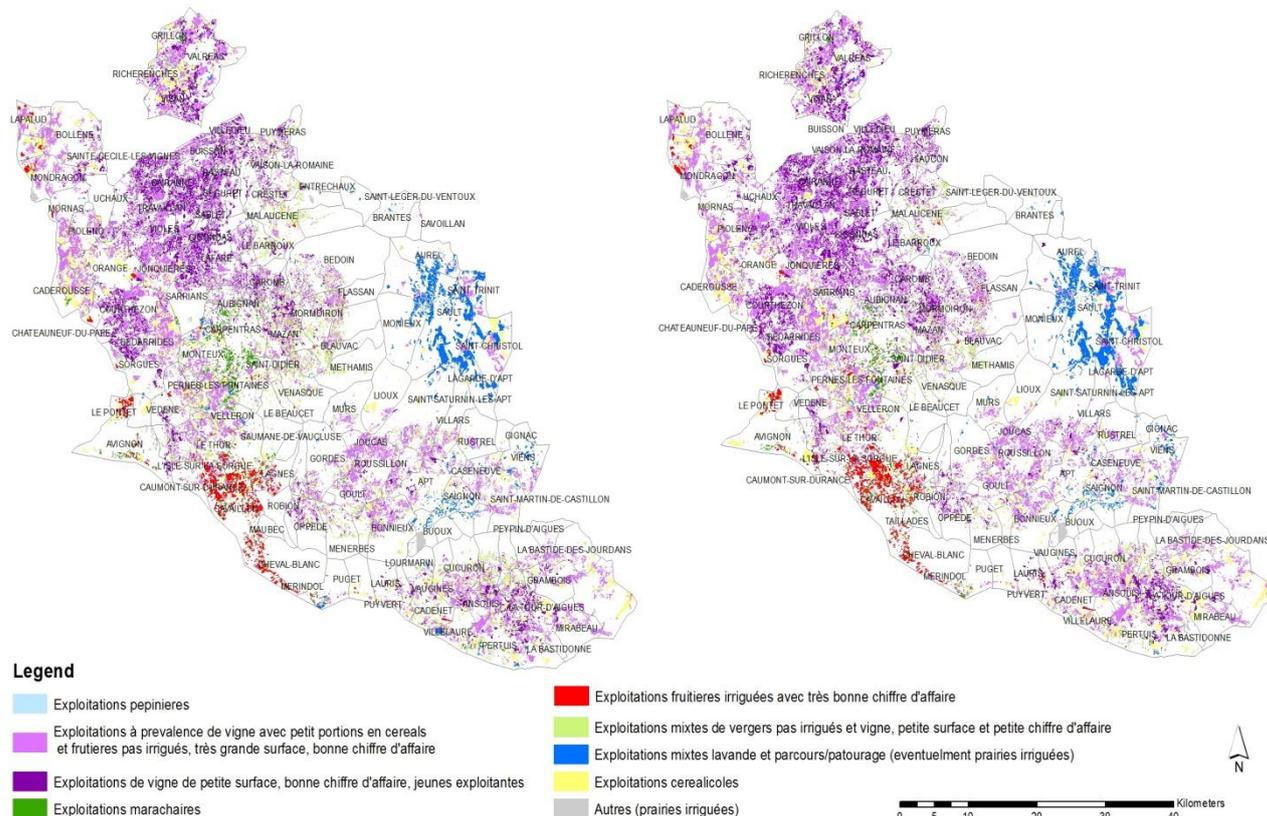
Le secteur viticole jouit d'une bonne réputation grâce aux Côtes du Rhône produits principalement sur les coteaux de Château neuf-du-Pape, Gigondas ou Vacqueyras... Les vins du Luberon et du Ventoux tendent à se développer sur une gamme de produits élargie (rosés), davantage associée aux vins provençaux.

En général, l'agriculteur vauclusien a su optimiser ces atouts climatiques en mettant en place des canaux d'irrigation pour s'assurer la maîtrise de l'eau et des brise-vent pour atténuer les effets négatifs des vents de secteur Nord. Il a ainsi développé principalement 2 types de cultures :

- les "primeurs" le plus souvent protégés pour éviter les risques de gelées au printemps ;
- les vignobles sur 48 000 ha, dont 75 % en zone AOC.

Enfin, le climat vauclusien est particulièrement favorable à la réduction du nombre de traitements fongiques et à la mise en œuvre des pratiques culturales adaptées à l'Agriculture Raisonnée (C.A., 2007).

Figure 4 - Distribution des typologies des systèmes agricoles en Vaucluse entre 2001 et 2006

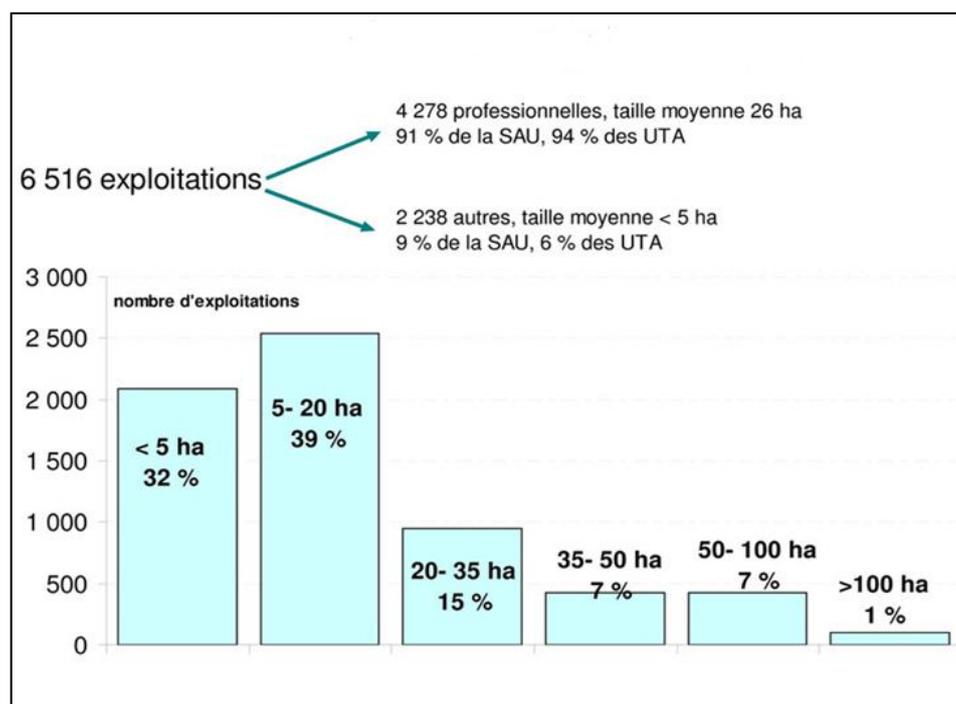


Source : (Debolini *et al.*, 2014)

Une étude de typologie spatiale des systèmes d'exploitation existants a permis de distinguer neuf classes de systèmes d'exploitation. Deux d'entre eux sont basés sur la culture de la vigne, qui est prédominante dans la zone d'étude (vignobles couvrent 60 % des surfaces agricoles) (Debolini *et al.*, 2014).

En termes de dynamique, il y'a une forte diminution des exploitations mixtes avec des fruits non irriguées et des vignes dans la région montagneuse centrale du département de Vaucluse et aussi une augmentation en surfaces viticoles sur les grandes fermes (Debolini *et al.*, 2014).

Figure 5 - Taille des exploitations dans le Vaucluse



Source : (SCEES, 2005)

3. La viticulture dans le département du Vaucluse

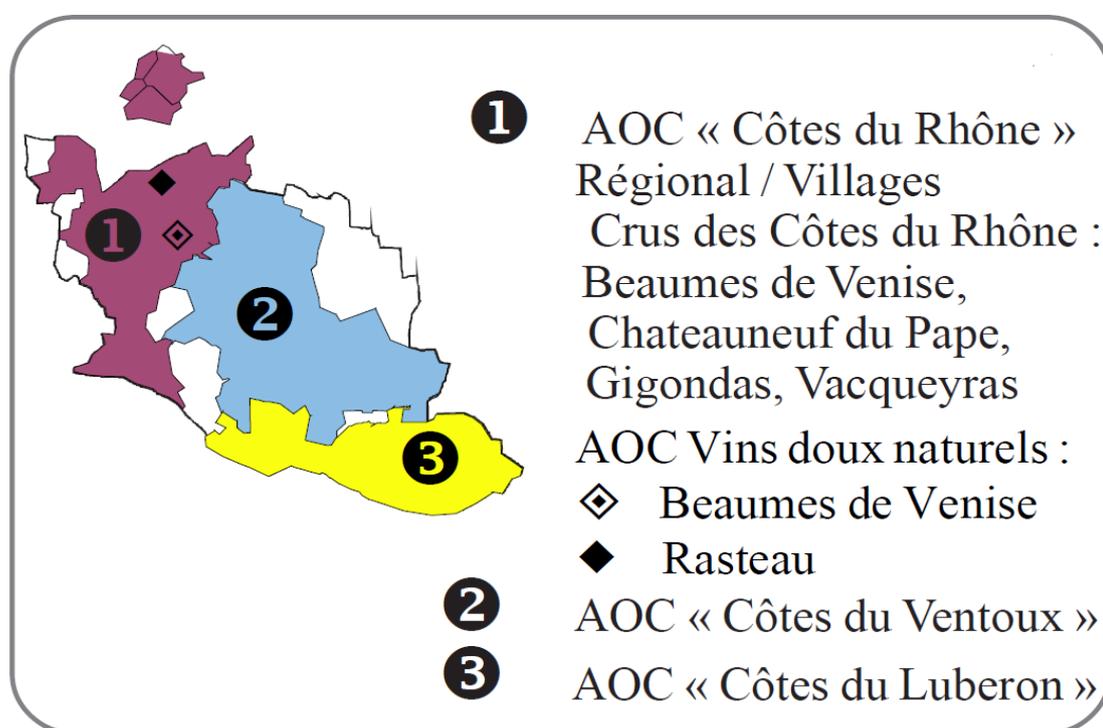
Le Vaucluse est l'un des plus grands départements viticoles français : plus de 15 % de son territoire est planté de vignes et il peut s'enorgueillir de produire à lui tout seul près de la moitié des Côtes du Rhône. Il offre une très large palette d'Appellations d'Origine Contrôlée et de Vins de Pays. De la production des plants de vigne jusqu'à la commercialisation aux quatre coins du monde, la viticulture est la première force économique du Vaucluse avec plus de 6 000 emplois directs dans le département.

Principale activité agricole du département, la viticulture occupe plus de 50 000 ha et concerne plus de 5 000 déclarants, 39 caves coopératives et plus de 600 caves particulières assurent la vinification (C.A., 2014b).

L'essentiel de la production se situe au Nord-Ouest du département (Figure 4), délimité par les communes de Bollène, Vaison-la-Romaine, Carpentras et Avignon. La production de vins d'appellation place le Vaucluse en 3^{ème} position des départements après la Gironde et la Marne. Elle contribue pour 7 % du volume national. Le département est aussi le premier producteur national de bois de plants de vigne et le premier département de la région en nombre d'exploitations bio avec 500 exploitations sur 10 500 ha. Avec 9 % de sa surface agricole en bio ou en conversion, PACA est la première région française sur le bio.

La dynamique de conversion dans le Vaucluse est importante : en 3 ans, les surfaces biologiques ont doublé. La filière viticole, reste le principal moteur des conversions dans le département. Le Vaucluse est le premier département viticole bio de France, avec plus de 5 200 ha en bio et en conversion (C.A., 2014b).

Figure 6 - Localisation des aires AOC en Vaucluse



Source : C.A., 2007

La production annuelle est de l'ordre de 2 millions d'hl, les rouges dominent largement la palette des vins vauclusiens. Si le rouge représente effectivement plus de 90 % de l'AOC Côtes du Rhône, notons cependant un développement significatif du rosé sur les appellations Ventoux (rouge = 60 %, rosé = 30 %, blanc = 4 %) et Luberon (rouge = 32 %, rosé = 44 %, blanc = 24 %). Les vins rouges sont élaborés principalement à partir des cépages caractéristiques du terroir : Grenache, Syrah, Carignan, Cinsault et Mourvedre. Les vins blancs proviennent du Grenache, de la Roussane, de la Marsanne, du Viognier, la Clairette, le Bourboulenc (C.A., 2007).

II - Les méthodes d'étude de faisabilité

En ce qui concerne les méthodes d'étude de la faisabilité, on distingue deux approches.

- une approche par modèle (modèles de culture) ;
- une approche par indicateurs (indicateurs éco-climatiques).

1. Les modèles de culture utilisés en agriculture

Le modèle est toujours défini comme une représentation ou une simplification du fonctionnement réel d'un système (Jones et Luyten, 1998).

Apparue dans le champ de l'agronomie dans les années 1950, la modélisation y occupe aujourd'hui une place conséquente. En 1978, De Wit a introduit la notion de modèle en relation avec la simulation du potentiel de croissance selon les différentes phases de croissance de la culture. Peart et Curry (1998) ont défini un modèle comme « un système tel que le système d'équations et de règles qui décrivent quantitativement le fonctionnement du système dans le temps ».

D'autres auteurs fondent leurs modélisation sur les interactions comme le système sol-plante-atmosphère et les pratiques agricoles. Le modèle est défini comme une représentation ou une simplification du fonctionnement réel d'un système (Jones et Luyten, 1998).

Brisson *et al.* (2006) se sont intéressés à un type de modèle, les modèles de culture, définis comme « le fonctionnement dynamique du système sol-plante à comment il interagit avec le climat et les pratiques agricoles ».

En effet, ces modèles de culture offrent un cadre conceptuel pour étudier les interactions dynamiques entre la plante, le sol, le climat et les techniques culturales à l'échelle parcellaire afin de prédire la phénologie, la croissance, les rendements des cultures et parfois la qualité de la récolte. De plus en plus, ils sont utilisés pour estimer l'impact que les changements climatiques auront sur les populations d'insectes et le développement des cultures...(Plouffe, 2012).

On distingue plusieurs modèles de culture et parmi ceux-ci, on trouve :

- Le modèle STICS (Simulateur de multidisciplinaire pour les Cultures Standard), développé à l'INRA depuis 1996, décrit un grand nombre de processus écophysologiques et agronomiques, représentatifs du fonctionnement de la plupart des espèces cultivées, en grande partie annuelles. En adaptant ce modèle à la culture de la vigne, ce type d'outil permettait non seulement d'approfondir une compréhension du fonctionnement de ce système complexe, mais également d'analyser les impacts du changement climatique sur cette culture (Garcia De Cortazar Atauri *et al.*, 2009) ;
- Le modèle GOA est un modèle déterministe qui a été utilisé dans une étude d'évaluation des contraintes sol-climat sur la faisabilité des cultures (Maïs et Tournesol). Le modèle avait pour objectif d'estimer la production maximale de matière sèche pouvant être produite en un lieu donné, soit en conditions hydriques non limitantes (en fonction seulement de la température et du rayonnement disponible), soit en conditions limitantes (INRA *et al.*, 1990).

Il y'a aussi les modèles suivants : CERES-Wheat (Ritchie et Otter, 1985), CERES-Maize (Jones et Kiniry, 1986), ARCWHEAT (Weir *et al.*, 1984), SWHEAT (Van Keulen et Seligman, 1987), CORNGRO (Childs *et al.*, 1977), SIMTAG (Stapper, 1984). Il existe aussi des modèles génériques qui s'appliquent à plusieurs espèces moyennant une modification des paramètres spécifiques de la culture : DAISY (Hansen *et al.*, 1990), SOILN (Eckersten et Jansson, 1991), EPIC (Williams *et al.*, 1984), WOFOST (Van Diepen *et al.*, 1989).

L'inconvénient de cette approche est qu'elle exige beaucoup de données et nécessite plusieurs années d'observation au champ. Pour cette raison, on a opté pour une approche par indicateurs.

2. Les indicateurs éco-climatiques de la faisabilité de la production viticole

La méthode de la faisabilité pédo-climatique utilisée dans l'étude est basée sur des indicateurs agroclimatiques calculés sur des périodes phénologiques (indicateurs éco-climatiques).

Ce sont des indicateurs calculés à l'échelle du cycle de la culture pour des périodes phénologiques pertinentes calculées ou observées. Ces indicateurs sont très pertinents pour évaluer les effets du changement climatique sur le fonctionnement de la culture dans un lieu donné, car ils fournissent des informations précises sur les effets du climat sur les processus particuliers de la plante ou de pratiques culturelles qui ont lieu pendant des périodes phénologiques spécifiques (Caubel *et al.*, 2012).

Ces indicateurs, comme les degrés-jours de chaleur, jours ou la quantité de précipitations calculée pendant les périodes spécifiques, par exemple le gel, fournissent des informations dérivées de variables climatiques sur les effets du changement climatique sur le fonctionnement de la culture. Elles ont été appliquées pour évaluer les effets des changements climatiques dans une région donnée sur la productivité agricole, la gestion des cultures ou de l'environnement et d'étudier les changements dans la répartition des espèces. Ils peuvent aussi être utilisés à l'échelle du territoire (Caubel *et al.*, 2012).

III - Modèles phénologiques

1. Importance de la phénologie, de la croissance et du rendement des cultures dans la prise de décisions

Afin de pratiquer une gestion agricole efficace, les intervenants en agriculture peuvent s'appuyer sur plusieurs notions liées à la physiologie des cultures pour aider les agriculteurs à sélectionner les meilleures opportunités qui s'offrent à eux. Parmi ces notions, la phénologie qui est l'étude des relations entre le développement des plantes et les facteurs du milieu, permet de mieux cibler les interventions au champ en déterminant les stades de développement critiques selon divers paramètres météorologiques.

De plus, étant donné que chaque culture possède des particularités spécifiques en termes de besoins nutritionnels ou de temps de développement, une bonne connaissance des notions de croissance est essentielle afin de comprendre les exigences de la culture au champ et de planifier les périodes de semis et de récolte.

Finalement, l'évaluation et la prédiction du rendement, c'est-à-dire la quantité récoltée par surface exploitée, ainsi que la qualité de la récolte permettent d'orienter les producteurs dans leurs décisions concernant, par exemple, le choix des cultivars, les pratiques culturales et les dates de récolte (Lepage et Bourgeois, 2012).

2. Importance des modèles phénologiques en agriculture

Afin de faciliter la prise de décision au champ, les intervenants agricoles bénéficient de plusieurs outils, dont les modèles phénologiques permettant la prédiction de la phénologie, de la croissance, du rendement et, dans certains cas, de la qualité de la récolte.

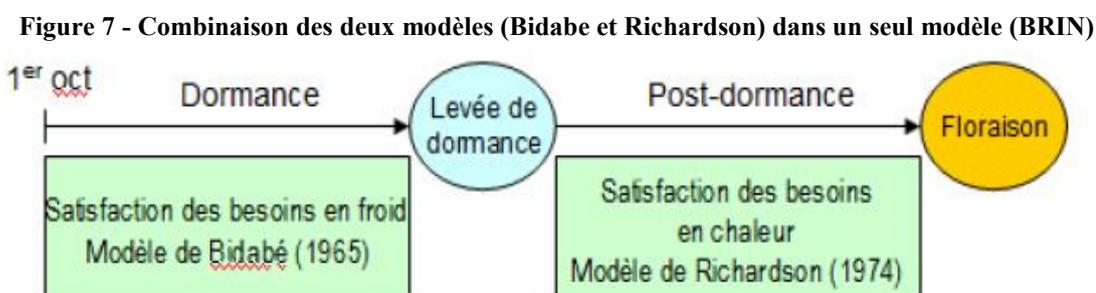
Ces modèles établissent des liens entre les conditions météorologiques et les processus biologiques à l'aide de relations mathématiques. Ils sont habituellement fondés sur plusieurs années d'observations au champ et en milieux contrôlés (cabinets de croissance, serres) afin de bien comprendre les particularités de certains processus physiologiques. Ils sont surtout utilisés en recherche scientifique, notamment dans les études sur les impacts de la variabilité et des changements climatiques et les études sur les interactions entre les plantes, le sol et l'atmosphère. Les modèles peuvent également aider les chercheurs à mieux comprendre les processus physiologiques ou encore leur permettre de prédire les rendements de cultures sélectionnées à l'échelle d'une parcelle ou d'une région.

Au fil des années, l'ensemble de ces études scientifiques ont permis d'améliorer des modèles existants et d'en développer de nouveaux plus performants, souvent plus complexes, qui reflètent encore mieux la réalité observée. Aujourd'hui, ils sont utilisés par les conseillers et intervenants agricoles comme outils d'aide à la décision dans le cadre de programmes de gestion intégrée des cultures (Lepage et Bourgeois, 2012).

3. Les modèles phénologiques utilisés dans l'étude

A. Modèle Brin (Modèle de floraison)

Le modèle BRIN utilisé correspond à l'association de deux modèles (Bidabe et Richardson) simulant la floraison de la culture de la vigne (Garcia de Cortazar Atauri *et al.*, 2009) :



Source : Garcia De Cortazar Atauri *et al.*, 2009

a) *Modèle de Bidabe*

Dans le modèle Bidabe, retenu pour la simulation de la satisfaction des besoins en froid aboutissant à la levée de dormance (LD), deux paramètres doivent être renseignés :

- **Q10** : correspond à une réponse exponentielle aux basses températures de l'air (simulation de l'effet des basses températures par une fonction exponentielle) ;
- **S-AF** : correspond à la somme des actions froides journalières (AF) entre l'entrée en dormance et la levée de dormance, c'est-à-dire la valeur de la somme des réponses journalières du calcul de l'action des basses températures à atteindre.

$$s_AF_v = \sum_{n=1/10}^{levée\ dormance} Q_{10_v} \frac{-T_{\min}(n)}{10} + Q_{10_v} \frac{-T_{\max}(n)}{10}$$

b) *Modèle de Richardson*

Pour le modèle de Richardson, simulant la satisfaction des besoins en chaleur à partir de la levée de dormance et aboutissant au déclenchement de la floraison, trois paramètres doivent être renseignés :

- **Tbase** : la température minimale en dessous de laquelle la température n'a pas d'action pour satisfaire les besoins en chaleur ;
- **Tseuil-max** : sert à écrêter les températures élevées pour limiter leur effet sur la satisfaction des besoins en chaleur ;
- **S-GDH** : somme des actions chaudes pour « *growing degrees hours* » et correspond à la somme des actions chaudes journalières (GDH) entre la levée de dormance et la floraison.

$$s_GDH_v = \sum_{n=levée\ dormance}^{floraison} \sum_{h=1}^{24} \min(T(h, n) - T_{base_v}, T_{max_v} - T_{base_v})$$

B. *Modèle GDD (Growing Degree-Days)*

Le modèle GDD est utilisé pour modéliser la croissance et le développement des plantes durant la saison de croissance. Le concept de base est que le développement se produit lorsque la température extérieure dépasse un niveau minimum, ou de la température de base (Tbase). Les Températures de base sont déterminées expérimentalement.

Pour calculer GDD, il faut prendre d'abord la température moyenne journalière $(T_{max}T_{min})/2$:

- Si la température moyenne est égale ou inférieure à Tbase, GDD égale zéro ;
- Si la température moyenne est au-dessus de Tbase, GDD est égale à la valeur moyenne de température moins Tbase. Par exemple, si la température moyenne est de 65 degrés et Tbase est 60, alors la valeur GDD est 5.

$$GDD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}$$

Partie 2

Matériels et méthodes

I - Choix des outils et démarche générale

1. Outils utilisés

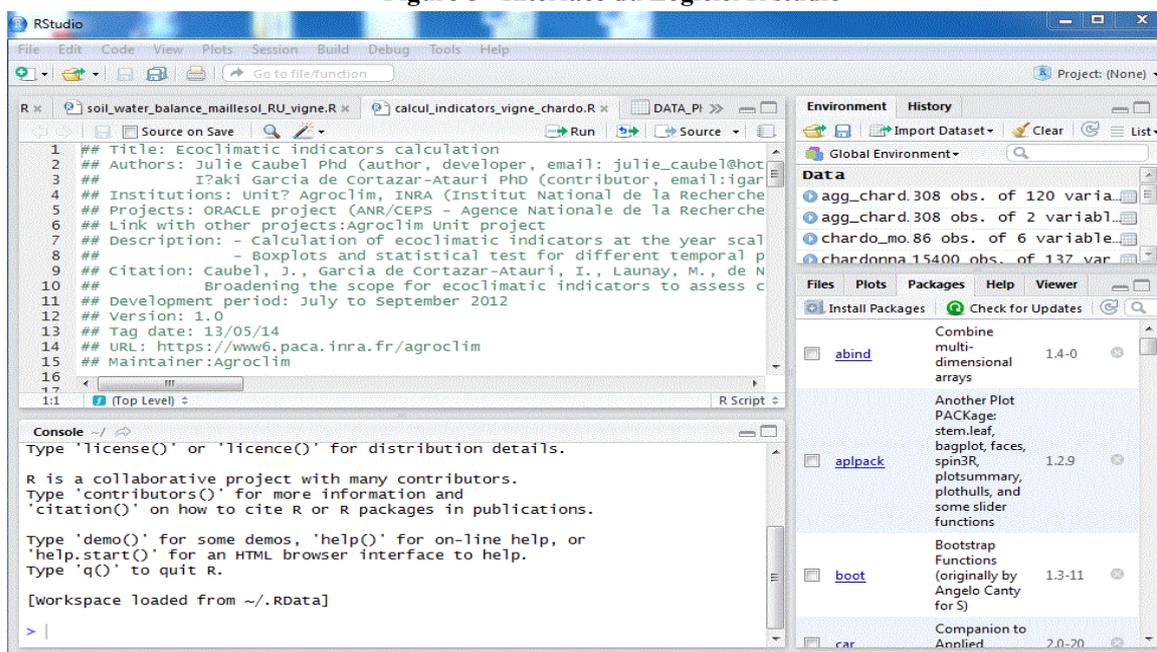
Trois logiciels ont été utilisés dans cette étude. Il s'agit du logiciel R, la plateforme des Modèles Phénologiques (PMP) et le logiciel Arc Gis.

A. Le logiciel R

Le logiciel R est un logiciel créé en 1993 par Robert Gentleman et Ross Ihaka, de l'Université d'Auckland. C'est un logiciel libre, gratuit et multiplateforme (Linux, Windows, MacOS). Il s'agit d'un système d'analyse statistique et graphique. Il est à la fois un logiciel de statistique et un langage de programmation.

Le champ extensible de R fait qu'il est possible de manipuler tous types d'objets. Ceci permet d'intégrer dans un même flux de travail des analyses de données statistiques, spatiales et temporelles, de produire des tableaux, des graphiques et des cartes. Ce flux de travail intégré est plus efficace et plus sûr, car il supprime les continuelles importations et exportations pour passer d'un logiciel à l'autre (d'un logiciel de SIG à un logiciel de statistiques par exemple).

Figure 8 - Interface du Logiciel R studio



B. PMP

La Plateforme de Modèle Phénologique est un logiciel convivial pour les environnements Windows.

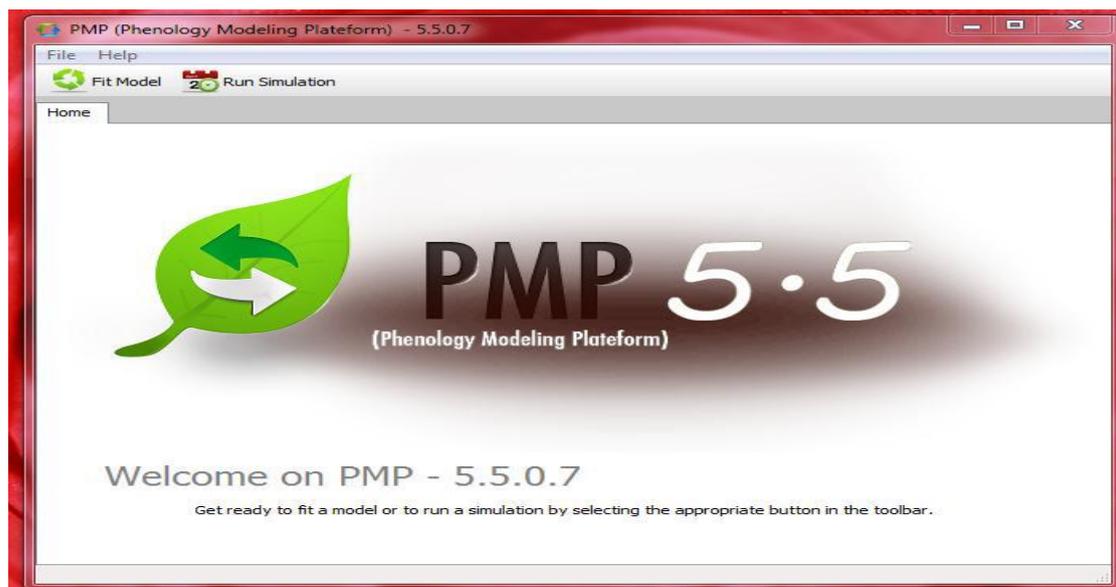
Ce logiciel a été conçu par Chuine *et al.* en 2013 (CNRS) à l'aide d'Iñaki Garcia de Cortazar Aauri (INRA) et codé par Jérôme Audoux et Gauthier Boaglio. Cet outil fournit un environnement simple à utiliser pour la gestion des entrées-sorties au fin de :

- construire un modèle phénologique ;
- estimer les paramètres d'un modèle phénologique de données ;
- faire des simulations en utilisant un modèle phénologique et les paramètres associés.

Le PMP est conçu de telle sorte que l'utilisateur peut sélectionner un modèle phénologique dans une bibliothèque et ajuster le modèle à ses propres données, ou de définir un nouveau modèle utilisant les fonctions prévues dans le logiciel. De cette manière, PMP permet de créer une infinité de modèles.

Chaque modèle est défini par un certain nombre de phases qui y sont décrites, des variables d'environnement qui déclenchent chaque phase, des fonctions de réponse du développement de la plante à ces variables et de la manière dont les phases sont reliées (Chuine *et al.*, 2013).

Figure 9 - Interface du logiciel PMP 5.5



Il existe deux façons d'utiliser PMP, on peut ajuster un modèle, comme on peut faire une simulation avec :

- *Fit model* ;
- *Simulation model*.

Le PMP nécessite au moins des données météorologiques quotidiennes, soit pour faire une simulation ou ajuster un modèle.

Le montage d'un modèle nécessite également des données phénologiques, tout en faisant une simulation nécessite un fichier de paramètres. Ce fichier doit être un fichier ~ txt avec les trois premières colonnes impérativement dans cet ordre :

1. Code de la station (entier) ;
2. Population / variété / famille / code individuel (entier) ;
3. Année (entier).

Il y a aussi un fichier d'informations nécessaire pour s'adapter à un modèle. Ce doit être un fichier ~ txt avec seulement 3 colonnes impérativement dans cet ordre:

1. Code o Station (entier) ;
2. Provenance / famille / code individuel (entier) ;
3. Année (entier).

Ce fichier contient la liste des données, parmi ceux énumérés dans le fichier de données phénologiques, qui seront utilisés pour ajuster le modèle. Il s'agit donc d'un sous-ensemble du fichier de données Phénologique. Il peut contenir toutes les données, dans ce cas, il contient les trois premières colonnes du fichier de données phénologiques ou tout simplement un sous-ensemble.

Le fichier de paramètres est nécessaire pour faire une simulation avec un modèle. Il contient toutes les informations nécessaires à l'exécution d'un modèle paramétré particulier avec PMP. Il s'agit d'un fichier XML généré à la fin de la procédure d'ajustement d'un modèle

Tous les fichiers de données d'entrée sont dans le format txt ~ à l'exception du fichier de paramètres qui est dans le format de ~ xml.

C. ArcGis

Arc Gis est un logiciel permettant d'exploiter un Système d'Information Géographique (SIG). Il permet l'acquisition, le stockage, la mise à jour, la manipulation et le traitement de données géographiques. De plus, il permet de faire de la cartographie et de l'analyse spatiale de façon précise en fonction de l'échelle désirée.

D. Lien entre les trois logiciels

Le logiciel R est utilisé pour effectuer le traitement des tableaux des profils pédologiques, constituer la base de données climat et phénologique, et enfin, pour utiliser le programme de calcul des indicateurs de faisabilité développé par Agroclim, qui a été modifié pour l'appliquer au cas d'étude.

Le logiciel PMP nous a permis de faire des simulations des phases phénologiques pour les trois variétés à partir des fichiers de paramètres et les modèles phénologiques fournis par Garcia De Cortazar Aauri *et al.* (2009) et des données climatiques Safran.

Le logiciel Arc Gis est utilisé pour la représentation spatialisée de la base de données sol et climat, pour la définition des unités de simulation et aussi pour la représentation spatialisée des différents indicateurs écoclimatiques.

2. Approche utilisée

Dans notre étude, on peut diviser la méthodologie de travail en quatre grandes parties distinctes dont le but principal est de calculer des indicateurs éco-climatiques pour la culture de la vigne de à l'échelle du territoire d'étude (Vaucluse). La première partie est réalisée sur le logiciel *Phenological Modeling Platform* (PMP), les deux autres parties sont effectuées sur le logiciel R à l'aide des scripts et la dernière partie est réalisée sur le logiciel ArcGis.

La première partie correspond à la simulation des stades phénologiques pour les trois variétés de la vigne sur le logiciel PMP. Le but de cette première partie est de préparer les données phénologiques comme fichier d'entrée pour le programme de calcul et du bilan hydrique et du calcul des indicateurs. Les résultats de ces simulations sont sous forme de tableaux des stades phénologiques en fonction des mailles SAFRAN.

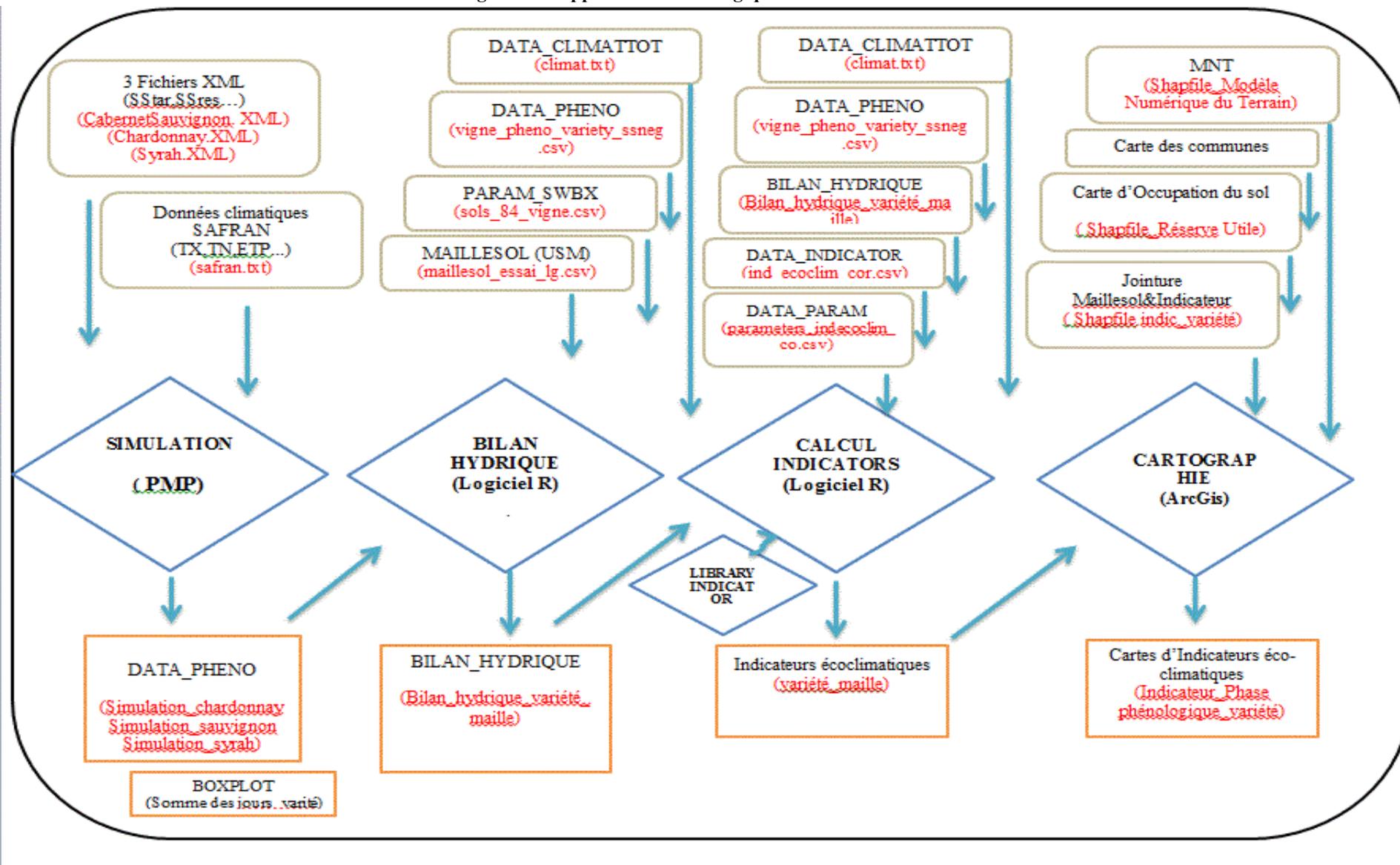
La deuxième partie est destinée au calcul du bilan hydrique. Le calcul est effectué à l'aide d'un script sur le logiciel R où les codes utilisés à cette fin sont déjà élaborés par Caubel *et al.* (2012). Pour adapter le calcul à notre cas, nous avons apporté des modifications dans les codes du programme. En effet, le calcul du bilan hydrique est fait à partir d'une simplification du modèle de « Allen *et al.* » (1998), basé sur la méthode de la FAO. Le but de ce calcul, c'est de simuler l'état de la réserve en eau du sol (R) et aussi le coefficient de stress hydrique (Ks) qui est nécessaire pour le calcul des indicateurs de stress hydrique.

La troisième partie correspond au calcul proprement dit des indicateurs éco-climatiques. Le calcul est fait sur le logiciel R aussi, en s'appuyant sur un programme déjà élaboré. Les indicateurs choisis correspondent en base à des indicateurs cités dans les études utilisant des indicateurs agro-climatiques pour évaluer les conditions agro-climatiques dans une région donnée.

Enfin, la quatrième partie est consacrée à la spatialisation de ces indicateurs éco-climatiques sous le logiciel ArcGis. L'objectif de cette partie est de créer des cartes thématiques représentant chaque.

La figure 10 représente l'approche méthodologique utilisée dans notre l'étude.

Figure 10 - Approche méthodologique utilisée dans l'étude



II - Méthodologie

1. Choix des variétés et période d'étude

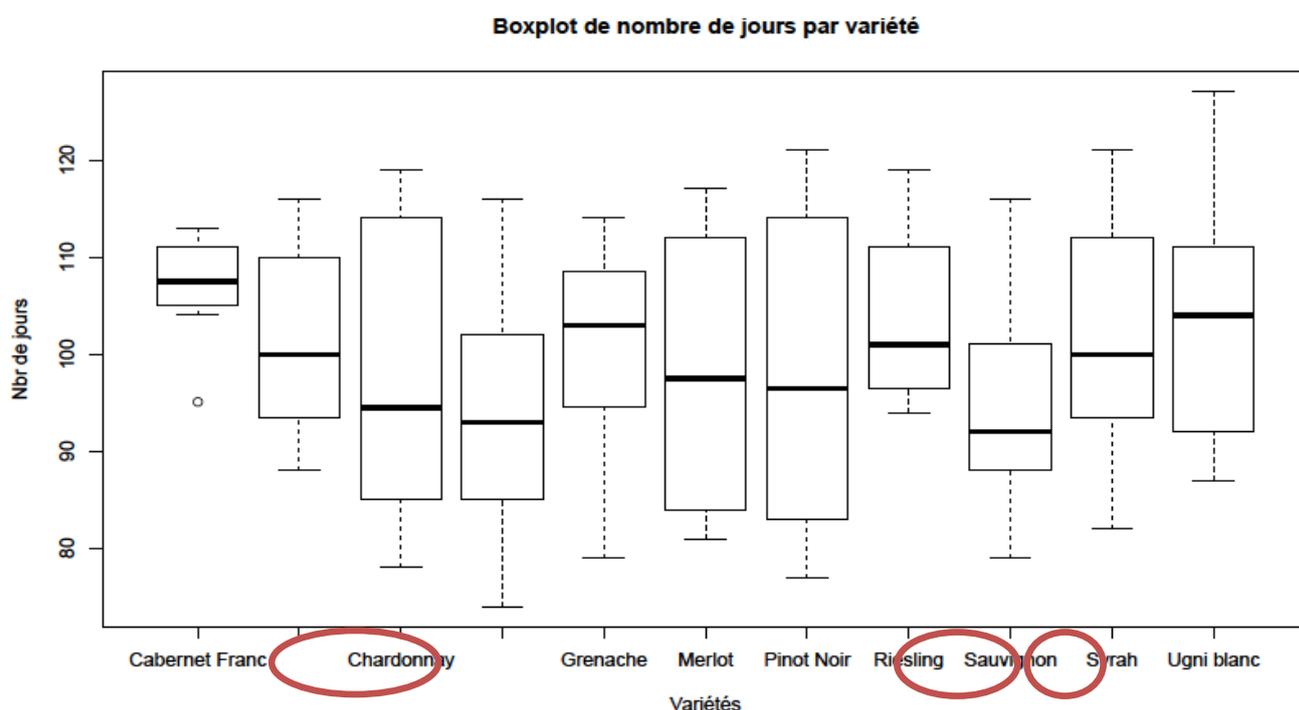
Afin de caractériser les indicateurs écoclimatiques, nous avons considéré une période de 50 ans allant de 1960 à 2010.

En ce qui concerne les cépages, nous avons choisi 3 cépages représentatifs des cépages cultivés dans le département. Il s'agit des cépages : **Cabernet Sauvignon, Chardonnay et Syrah**.

Le choix est justifié d'une part, par le fait qu'il s'agit des cépages qui caractérisent le mieux le territoire, et d'autres part, parce qu'ils représentent une gamme de précocité assez large.

La figure suivante représente le nombre de jours de plusieurs variétés entre deux stades phénologiques (Floraison et Maturité) calculés sur le logiciel R à partir des données phénologiques observées du département.

Figure 11 - Comparaison de nombre de jours en Floraison et Maturité pour différentes variétés



2. Les données utilisées

Les données utilisées peuvent être distinguées en 3 types : climatiques, phénologiques et pédologiques.

A. Climat

La base de données climatique utilisée dans ce travail est constituée de :

- Données SAFRAN élaborées par MétéoFrance (CNRM)

Ce sont des données horaires couvrant toute la France à une résolution (8*8 km) sur une projection Lambert-II étendue et permettant de produire des données climatiques de hautes-résolution.

Les données stockées en base sont des données journalières de 1960 à 2010 (50 ans) et comportent les champs suivants :

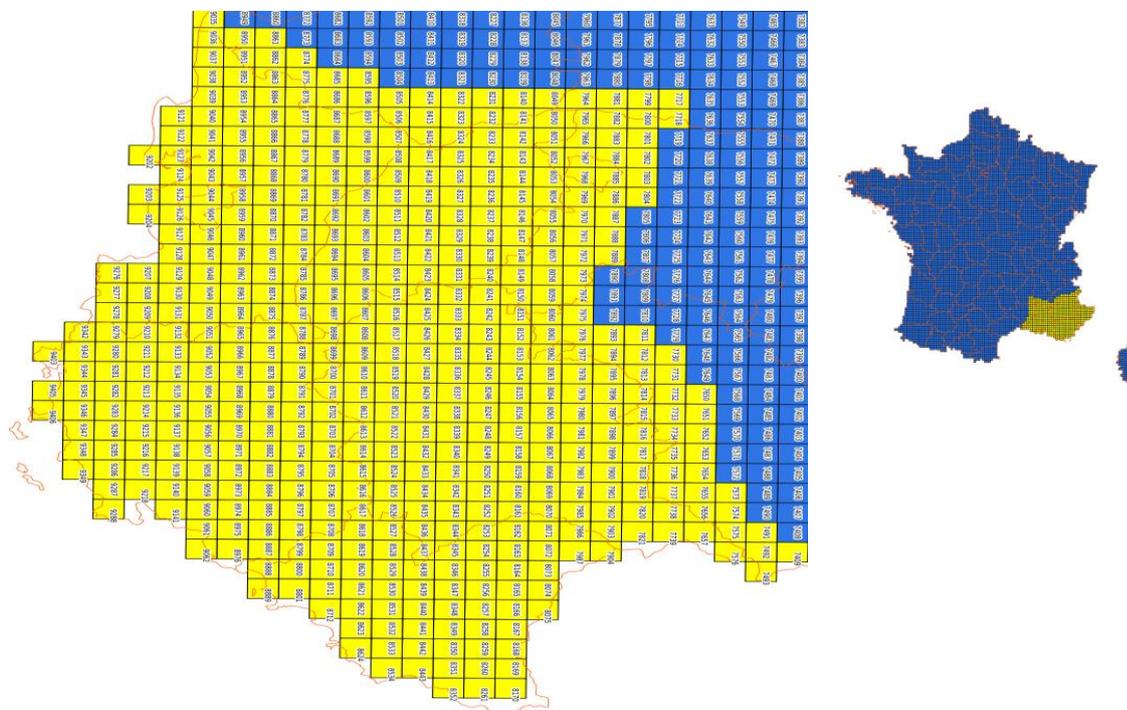
- TN : Température minimale [°C] ;
- TX : Température maximale [°C] ;
- RR : Précipitation (solides et liquides) [mm] ;
- HR : Humidité relative [%] ;
- RG : Rayonnement global [joules/cm²/jour] ;

- V2 : Vitesse moyenne du vent ramenée à 2 mètres au-dessus du sol [m/s] ;
- ETP : Evapotranspiration de référence calculée selon la méthode FAO 56 [mm].

Les données SAFRAN ont été utilisées dans le logiciel PMP pour la simulation des stades phénologiques et aussi comme fichier d'entrée dans le programme de calcul du bilan hydrique et des indicateurs.

- **Carte maille SAFRAN**

Figure 12 - Grille des mailles SAFRAN



Nous avons travaillé avec 86 mailles couvrant tout le département de Vaucluse.

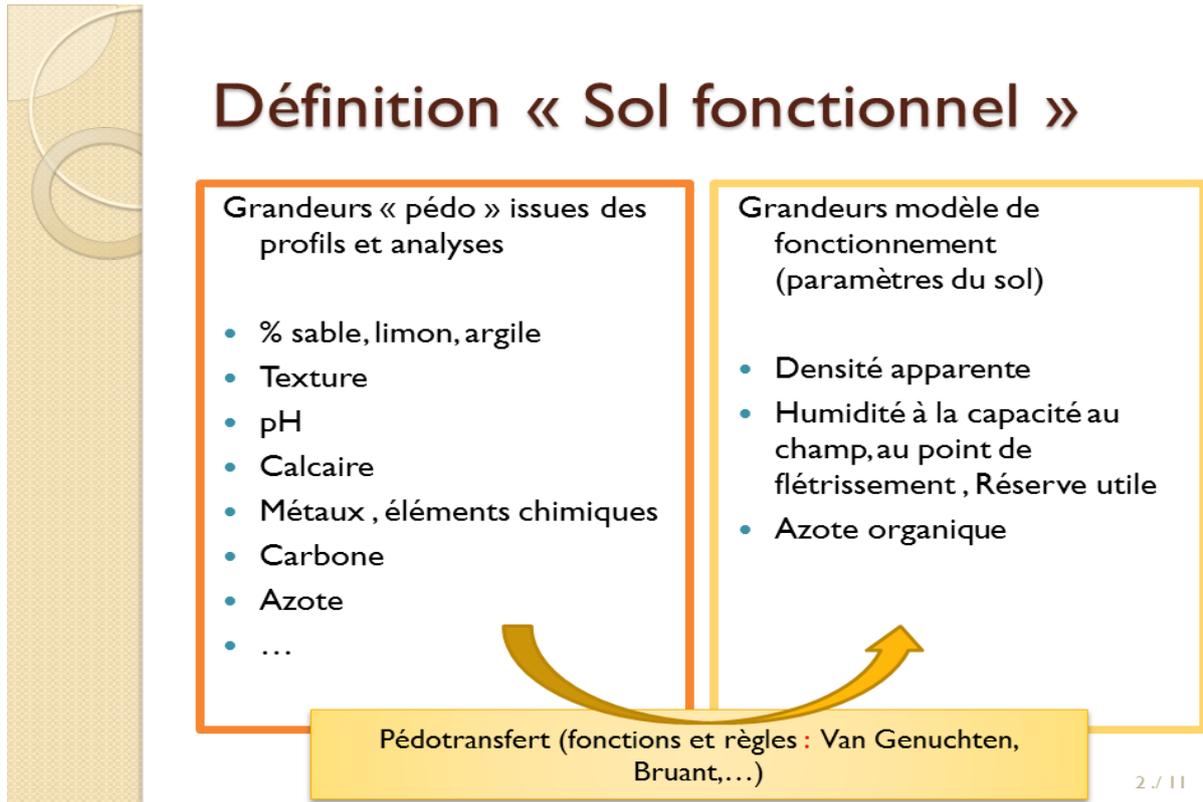
La carte des mailles SAFRAN a été introduit dans l'ArcGis et nous a permis de faire le croisement maille*sol afin obtenir des unités de simulation (USM).

B. Sol

La base de données utilisée dans cette étude est constituée de l'inventaire pédologique réalisé sur le département de Vaucluse (1/50 000), effectué à partir de 1970 par la SCP (Société du Canal de Provence) et CNABRL (Compagnie Nationale d'Aménagement du Bas-Rhône Languedoc). Il consiste en :

- une carte des UCS (Unités Cartographiques de Sol) ;
- des profils pédologiques notés sur papier par des pédologues dans les années 70 et les analyses de laboratoire associées à ces profils (granulométrie, analyses chimiques). La saisie informatique de tous ces profils a été faite par EMMAH en 2012 sous l'application web appelée « DONESOLWEB », développée par l'Unité INFOSOL de l'INRA à Orléans. Cette application permet de gérer l'ensemble des entités définissant les études pédologiques. Nous avons pu corriger les erreurs signalées par les opérations de contrôle de l'application web ;
- les informations des profils et analyses ont été ensuite transformées, par application de règles et fonctions de pédotransfert, de façon à obtenir une description fonctionnelle des sols, en particulier vis-à-vis de leur fonctionnement hydrique, avec le calcul de la Réserve Utile (Figure 13).

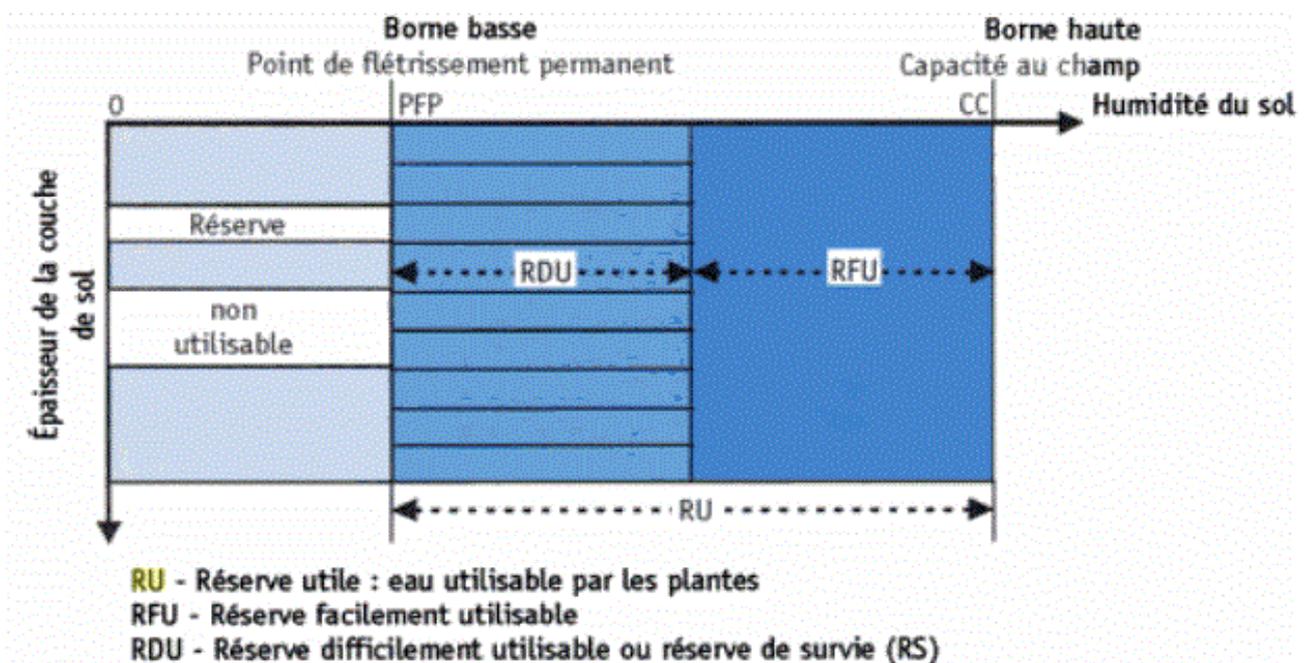
Figure 13 - Définition d'un sol fonctionnel



Extrait de Clastre *et al.*, 2014

Nous rappelons que la réserve utile (RU exprimée mm) est un indice issu du calcul du bilan hydrique des sols qui représente la quantité d'eau disponible pour les plantes pour une période donnée (Thornthwaite et Mather, 1955). Elle est principalement dépendante des apports en précipitations, de la capacité du sol à stocker l'eau, du couvert végétal et de l'évaporation du sol.

Figure 14 - Disponibilité de l'eau d'une couche de sol pour les plantes



Comme la montre la figure ci-dessus, la RU est, autrement dit, la différence entre l'humidité à la capacité au champ (Hcc) et l'humidité au point de flétrissement permanent (Hpf). Elle est composée pour 2/3 de la Réserve Facilement Utilisable (RFU) et pour 1/3 de la Réserve Difficilement Utilisable (RDU) ou réserve de survie (Rieul *et al.*, 2003).

$$RU = (HCC - HPFP) * DA * Z$$

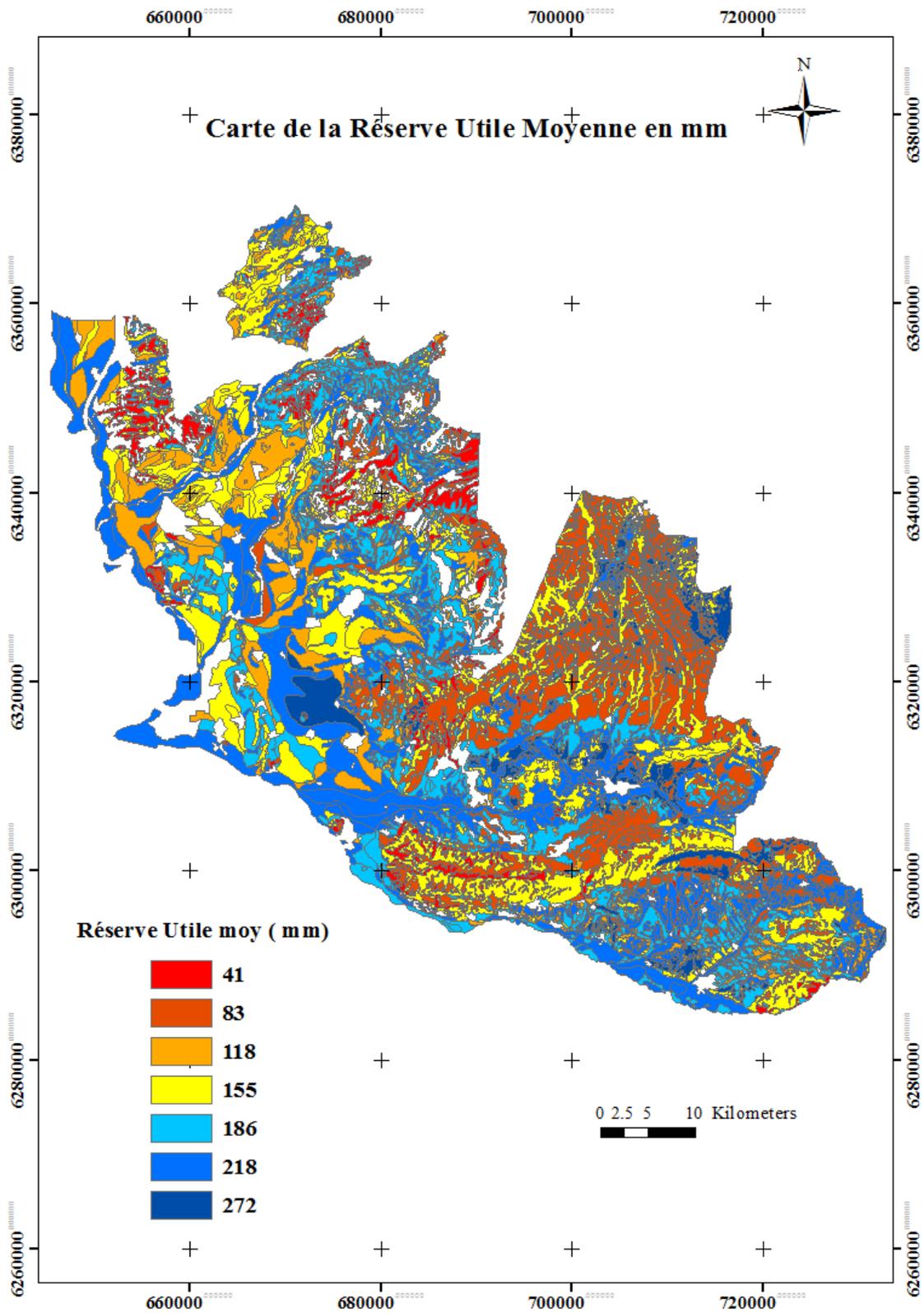
Avec :

- ✓ HCC = Humidité à la Capacité au Champ
- ✓ HPFP = Humidité au Point de Flétrissement Permanent
- ✓ DA = Densité Apparente du sol
- ✓ Z = Profondeur d'enracinement en dm

- On a ensuite calculé la moyenne de ces propriétés (profondeur de sol et Réserve Utile par cm) par UCS, puis regroupé les UCS en 7 classes de RU, et affecté les nouvelles classes de RU aux UCS ;
- A partir des données en format cartographié, on a donc obtenu une carte pédologique numérique où chaque UCS est caractérisée et qu'on a pu utiliser en intersection avec la maille climatique SAFRAN, pour avoir des unités spatiales de simulation (USM) sur lesquelles sont faits les calculs d'indicateurs. On a réduit le nombre d'USM de manière à avoir un nombre raisonnable de simulation, en ne considérant, dans chaque maille Safran, que les USM représentant plus de 5 % de la surface de la maille.

La figure suivante représente le regroupement des UCS en 7 classes de RU moyenne.

Carte 1 - Répartition des 7 classes des RU



3. Modélisation sous PMP

A. Adaptation des données climatiques et phénologique

Ce type de données permet de calibrer des modèles prédictifs de la phénologie, utilisés dans les modèles de fonctionnement de la végétation.

Pour aboutir à cette simulation, cela nécessite la préparation et l'adaptation des fichiers d'entrée au programme de simulation. Il s'agit des données météorologiques quotidiennes de SAFRAN.

Le Fichier txt de données météorologiques devrait être, avec les sept premières colonnes, impérativement dans cet ordre :

1. Code de la station (entier) ;
2. Station latitude en degrés décimaux (double) ;
3. Année (entier) ;
4. Jour de l'année (nombre entier compris entre 1 et 365 ou 366) ;
5. Température moyenne en °C (double) ;
6. Température minimum en °C (double) ;
7. Température maximale en °C (double).

La simulation nécessite également un fichier de paramètres qui est dans le format XML.

Figure 15 - Fichiers Paramètres XML utilisés dans la simulation

```
.....<Function id="0" name="GDD" weatherDataColumn="0">CRF5
.....<UseDayLengthAsVar value="False"/>CRF5
.....<VarLinkMode value="0"/>CRF5
.....<Weight value="1"/>CRF5
.....<Param id="0" fixed="True" name="Tb" value="5.00000"/>CRF5
.....</Function>CRF5
.....</Functions>CRF5
.....</Phase>CRF5
.....<Phase id="2" usedToFit="False" phenoDataColumn="-1">CRF5
.....<TO mode="1" value="0" t0DataColumn="-1" photomode="0"/>CRF5
.....<TempSamplingFunc value=""/>CRF5
.....<SStar fixed="True" value="18.8"/>CRF5
.....<PhaseLinkMode value="0"/>CRF5
.....<OverlapFunction name="Negative Exponential">CRF5
.....<Param id="0" fixed="False" name="z" value="0.00000"/>CRF5
.....<Param id="1" fixed="False" name="w" value="0.00000"/>CRF5
.....</OverlapFunction>CRF5
.....</Functions>CRF5
.....<Function id="0" name="Wang" weatherDataColumn="0">CRF5
.....<UseDayLengthAsVar value="False"/>CRF5
.....<VarLinkMode value="0"/>CRF5
.....<Weight value="1"/>CRF5
.....<Param id="0" fixed="True" name="Topt" value="30.31000"/>CRF5
.....<Param id="1" fixed="True" name="Tmin" value="0.00000"/>CRF5
.....<Param id="2" fixed="True" name="Tmax" value="40.00000"/>CRF5
.....</Function>CRF5
.....</Functions>CRF5
.....</Phase>CRF5
.....<Phase id="3" usedToFit="False" phenoDataColumn="-1">CRF5
.....<TO mode="1" value="0" t0DataColumn="-1" photomode="0"/>CRF5
.....<TempSamplingFunc value=""/>CRF5
.....<SStar fixed="True" value="56.16"/>CRF5
.....<PhaseLinkMode value="0"/>CRF5
.....<OverlapFunction name="Negative Exponential">CRF5
.....<Param id="0" fixed="False" name="z" value="0.00000"/>CRF5
.....<Param id="1" fixed="False" name="w" value="0.00000"/>CRF5
.....</OverlapFunction>CRF5
```

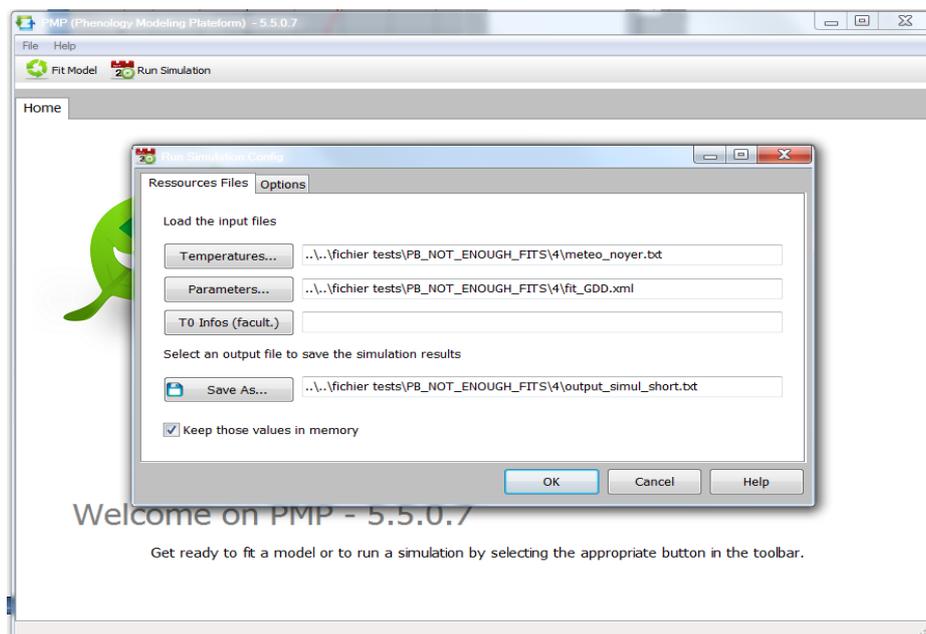
Les paramètres calculés les plus significatifs sont les suivants :

- SStar : somme de l'unité critique à atteindre pour terminer la phase ;
- Tb : température minimale en dessous de laquelle la température n'a pas d'action pour la satisfaction des besoins en chaleur ;
- Q10 : réponse exponentielle aux basses températures de l'air.

B. Simulation des stades phénologiques

Pour exécuter une simulation avec un modèle, vous avez besoin d'un fichier de données météorologiques, les données utilisées sont celles de la base de données SAFRAN et un fichier de paramètres xml déjà créé.

Figure 16 - Interface de simulation des stades phénologiques



4. Calcul du bilan hydrique

Le calcul du bilan hydrique est l'application du principe de conservation de l'eau contenue dans un certain volume de sol. Les observations de l'état hydrique du sol au cours d'une période de végétation ont montré qu'une culture peut puiser une certaine quantité d'eau dans un réservoir dont le contenu en eau varie au cours du temps, essentiellement en fonction des pluies et de l'évapotranspiration réelle (Choisnel, 1992).

En effet, le bilan hydrique permet de suivre, selon une méthode simple, l'état de la réserve en eau du sol (R.F.U. ou Réserve Facilement Utilisable) en tenant compte des besoins en eau de la culture et des apports naturels par les pluies ou par irrigation. Il est également un outil de gestion technique simple, qui permet d'analyser, en fin de saison, l'ensemble des besoins et des apports. Il permet de conserver la trace des périodes déficitaires et des périodes excédentaires tout au long de la campagne. Son analyse, en fin de saison, quand on a connaissance des rendements, peut expliquer le fonctionnement des parcelles et les réactions des cultures aux divers événements climatiques (Milly, 1994).

En général, l'équation du bilan hydrique, se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un espace donnés (Musy, 2005) :

$$P + S = R + E + (S \pm \Delta S)$$

Avec :

- P : précipitations (liquide et solide) [mm] ou [m3] ;
- S : ressources disponibles à la fin de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm] ;
- R : ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm] ;
- E : évaporation (y compris évapotranspiration) ;
- S+DS : ressources accumulées à la fin de la période étudiée [mm].

Dans le présent travail, le calcul du bilan hydrique est fait à partir d'une simplification du modèle de Allen *et al.* (1998), qui définit la méthode de la FAO. Il s'agit d'un modèle de simulation du bilan hydrique qui calcule l'évolution au cours du temps de la réserve en eau du sol et débouche sur le calcul du rapport ETR/ETM utilisé alors en tant qu'indice de satisfaction des besoins en eau d'une culture en conditions naturelles (non irriguée).

ETR= ETM*Ks où Ks est le coefficient de stress hydrique
 = ETO*Kc*Ks où Kc est le coefficient cultural qui exprime le rapport entre l'évapotranspiration maximale de la culture par rapport à l'évapotranspiration potentielle (référence climatique).

Après avoir identifié les coefficients Kc correspondant à chaque stade phénologique, on a construit la courbe de coefficient cultural et calculé après le produit de ETO et Kc. En fait, trois valeurs caractéristiques de Kc sont nécessaires pour décrire et construire la courbe de coefficient de récolte : ceux qui sont au cours de la phase initiale (Kc ini), l'étape de mi-saison (Kc mi) et à la fin de l'étape de fin de saison (fin Kc).

Tableau 1 - Valeurs caractéristiques de KC pour la vigne

Culture	Kc ini	Kc mid	Kc end
Vigne	0,30	0,70	0,45

Source : FAO

Après association des valeurs de Kc aux stades phénologiques, l'évolution de Kc au cours de la période de culture est construite en interpolant linéairement entre les valeurs caractéristiques.

Pour le calcul du bilan hydrique, le programme R nécessite l'intégration des données climatiques, phénologiques et des données sur le sol. En effet, il a été adapté pour la lecture directe de la réserve utile par centimètre (RU_cm) et de la profondeur du sol (prof_sol).

Après avoir simulé l'état de la réserve en eau du sol (R), le coefficient de stress hydrique (Ks) est calculé à partir de la valeur de R/RU en fonction des stades phénologiques considérés (7 dans notre cas).

Les résultats sont sous forme de tableaux où le Ks est calculé pour chaque maille*sol et pour chaque jour.

5. Calcul des indicateurs de faisabilité

A. Indicateurs éco-climatiques

En se basant sur une étude précédente visant l'évaluation de l'aptitude climatique, nous retenons une série d'indicateurs éco-climatiques calculés à l'échelle du cycle de la culture. Ces indicateurs correspondent à des indicateurs cités dans les études utilisant des indicateurs agro-climatiques pour évaluer les conditions agro-climatiques dans une région donnée (Trnka *et al.*, 2011 ; Matthews *et al.*, 2008 ; Confalonieri *et al.*, 2010 ; Holzkämper *et al.*, 2013).

Les indicateurs utilisés dans cette étude sont listés ci-dessous (Caubel *et al.*, 2012).

- Indicateurs phénologie

PHASE_LENGTH = durée de la phase (jours)

- Indicateurs "température"

T_MIN = Tmin moyenne pour chaque phase de développement (°C)

T_MAX = Tmax moyenne pour chaque phase de développement (°C)

T_MEAN = Tmoyenne moyenne pour chaque phase de développement (°C)

T_AMP = amplitude thermique journalière moyenne pour chaque phase de développement (°C)

COLDTMIN_DAYS = Nombre de jours où Tmin < cold_min

COLDTMIN_FREQUENCY = Fréquence (%) de jours où Tmin < cold_min

COLDTMEAN_DAYS = Nombre de jours où Tmoy < cold_mean

COLDTMEAN_FREQUENCY = Fréquence (%) de jours où Tmoy < cold_mean

HEAT_DAYS = Nombre de jours où Tmax > heat (calculé pour chaque phase mais plutôt regardé entre floraison et récolte car échaudage)

HEAT_FREQUENCY = Fréquence (%) de jours où Tmax est > heat (calculé pour chaque phase mais plutôt regardé entre floraison et récolte car échaudage)

- Indicateurs "pluie"

RAIN_DAYS = Nombre de jours de pluie pour chaque phase de développement

RAIN_FREQUENCY = Fréquence (%) de jours de pluie pour chaque phase de développement

- **Indicateurs « stress hydrique**

WATERSTRESS_FREQUENCY = Fréquence (%) de jours avec coefficient de stress (Ks) < Ks_threshold pour chaque phase de développement

WATERSTRESS_DAYS = Nombre de jours avec coefficient de stress(Ks) < Ks_threshold pour chaque phase de développement.

- **Indicateurs « Excès d'eau »**

A ces indicateurs sont associés des valeurs de seuils spécifiques.

B. Choix des indicateurs

Afin de définir les effets climatiques et leurs indicateurs éco-climatiques associés, la méthodologie est organisée en différentes étapes:

La première étape concerne l'identification **des phases phénologiques** entre les stades phénologiques qui peuvent être soumis à des effets climatiques néfastes pendant le cycle cultural de la vigne. Notons bien que l'étude a concerné l'aspect qualité de la vigne. Pour ce faire, nous avons identifié sept phases phénologiques correspondant à :

- la phase hivernale : S1, S2,
- la phase estivale : S3 à S7

Figure 17 - Stades phénologiques déterminées de la vigne

2 janvier	Débourrement	Flo-10	Flo	Flo+10	Véraison	Mat-10	Maturation
S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Hiver		Floraison				Maturation	

La deuxième étape consiste à identifier **les processus écophysologiques** qui ont lieu au cours de ces périodes phénologiques. C'est évident que le climat influe sur le développement, la croissance et les processus de mortalité de la culture, ainsi que les processus impliqués dans la qualité de rendement.

Ensuite, la troisième étape concerne **les effets climatiques** sur eux, c'est-à-dire les différentes contraintes que le climat peut exercer sur la culture. Enfin, la dernière étape concerne les **indicateurs éco-climatiques** qui sont utilisés pour caractériser ces effets climatiques.

En effet, pour chaque effet climatique cité, la façon dont il affecte les processus écophysologiques est décrite par des indicateurs éco-climatiques spécifiques.

Selon la disponibilité des données d'entrée, différents types d'indicateurs peuvent être appliqués. Par exemple, ceux qui sont liés au déficit hydrique ou des effets de l'excès d'eau peut être basé sur des données de précipitations ou peut exiger le calcul de la teneur en eau du sol par jour à partir d'un modèle de bilan hydrique du sol.

Les indicateurs écoclimatiques associés aux effets climatiques qu'ils caractérisent ainsi que les processus écophysologiques qu'ils touchent sont présentés dans les tableaux suivants

Tableau 2 - Indicateurs sélectionnés pour étudier la faisabilité de la vigne

Phase phénologique	Processus éco-physiologique	Effet climatique	Indicateur éco-climatique
S3-S5 Floraison - Véraison	Croissance	Déficit hydrique	Water stress frequency
S5-S7 Véraison - Maturation	Qualité de la récolte	Tmoy optimales	Average daily mean T
		Amplitude	Average daily range T
		Tmin optimales	Average daily min T
		Excès de chaleur	Heat stress days frequency
		Déficit hydrique	Water stress frequency
		Excès d'eau	Rainy frequency
S6-S7 Maturation-10 - Maturation	Qualité de la récolte	Excès d'eau	Rainy frequency

Tableau 3 - Indicateurs sélectionnés pour étudier la faisabilité climatique

Phase phénologique	Processus éco-physiologique	Effet climatique	Indicateur éco-climatique
S1-S2 Débourrement - Floraison-10	Crop growth	Gel Hiver	Average daily min T <-15°C
			Cold day frequency <-2,5°C
			Cold day frequency <-5°C
S2-S4 Floraison-10 - Floraison+10	Crop growth	Gel Printemps	Average daily min T <-6°C
			Average daily min T <-2,5°C
			Average daily min T <-5°C
S3-S5 Floraison - Véraison	Crop growth	Coulure fleurs par pluie	Rainy day frequency
		Coulure fleurs par froid	Average daily Tmean
		Coulure fleurs par froid	Average daily Tmean
S6-S8 Récolte-10 - Récolte+10	Yield quality	Déficit hydrique	Water stress frequency

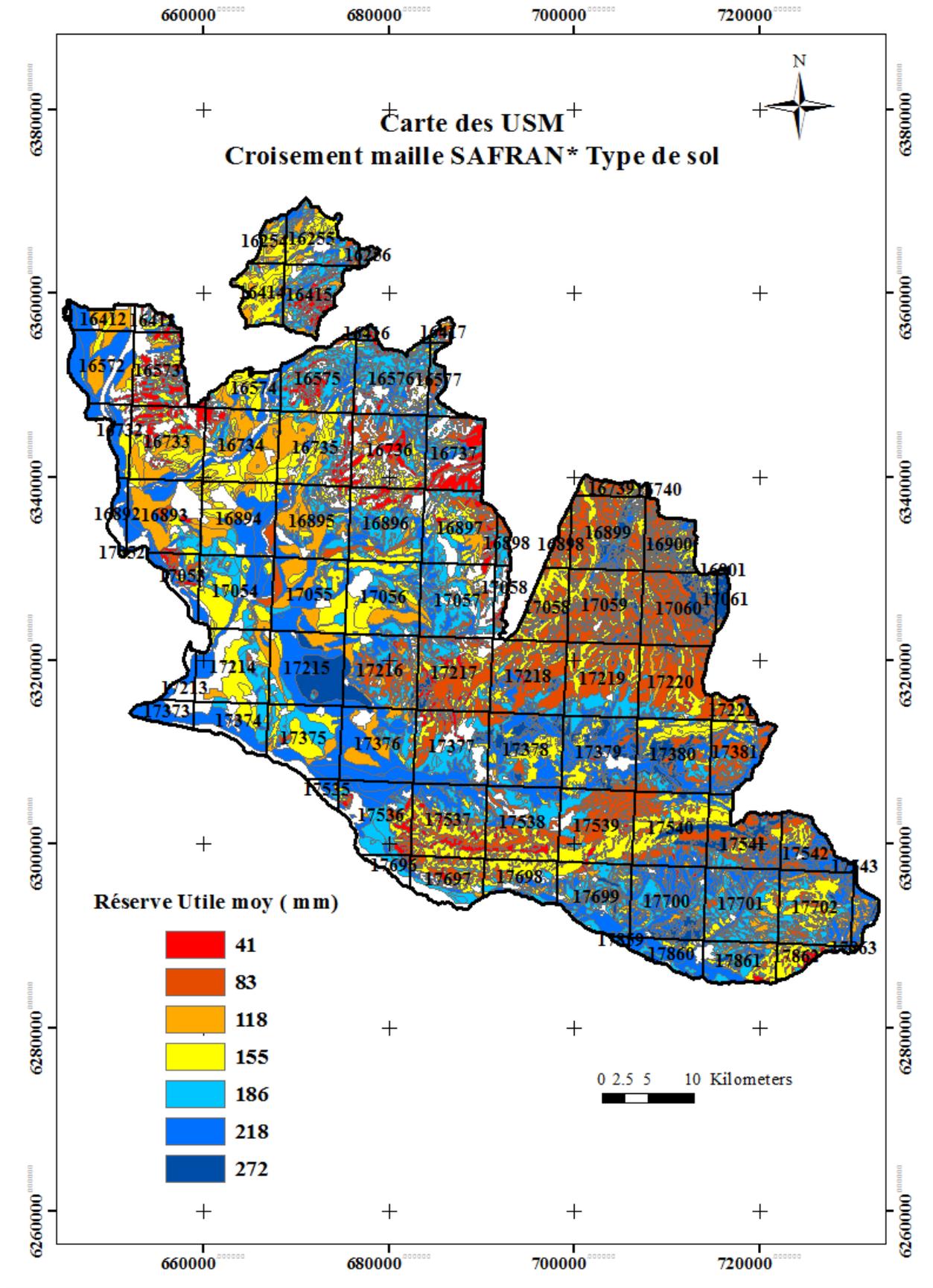
6. Spatialisation des indicateurs

A. Définition des unités de simulation (USM)

Sous le logiciel Arc Gis, on a affecté les nouvelles classes du sol aux différents polygones du sol et fait l'intersection de la couverture obtenue avec les mailles Safran. Ensuite, on a recalculé les valeurs moyennes par classe (RU_cm, prof_sol).

Sous Excel, on a fait les sommes des surfaces par maille et par classe de sol et calculé les proportions de chaque sol dans la maille. Après avoir opté pour une réduction du nombre d'unités de simulation (128), en négligeant les USM dont la proportion est $\leq 5\%$, on a introduit un nouveau fichier d'entrée, appelé Maillesol, qui définit les USM (croisements maille safran * type de sol) considérés pour les calculs d'indicateur.

Carte 2 - Croisement maille safran et type de sol



B. Recombinaison des résultats des USM par maille

Dans cette partie, nous avons ajouté les indicateurs et calculé les valeurs moyennes par maille de ces indicateurs sur le logiciel R.

Ensuite, nous avons fait une jointure de ces indicateurs avec la couche Shape file de l'intersection maille et sol (USM), ce qui va nous permettre de spatialiser les indicateurs éco-climatiques sur ArcGis par la suite.

Partie 3

Résultats et discussion

I - Simulation des stades phénologiques

En se basant sur des données phénologiques d'une étude déjà faite (Garcia De Cortazar Atauri *et al.*, 2009), et sur des données climatiques SAFRAN, nous avons simulé les stades phénologiques pour les trois cépages.

Le tableau ci-dessous représente les paramètres de chaque phase et les modèles phénologiques utilisés pour la simulation des stades phénologiques.

Tableau 4 - Paramètres et modèles utilisés dans la simulation des stades phénologiques pour chaque variété.

Cépage	Stade 0	Stade 1	Stade 2	Stade 3	Stade 4
Cabernet Sauvignon	Modèle : Bidabe	Modèle : GDD	Modèle : Wang	Modèle : Wang	Modèle : Wang
	SStar=120.31	SStar=288.16	SStar=20.34	SStar=62.96	SStar=51.51
	T0= -152	Tb=5	Topt=30.19	Topt=24.25	Topt=24.25
	Q10=2.17		Tmin=0	Tmin=0	Tmin=0
			Tmax=40	Tmax=40	Tmax=40
Chardonnay	Modèle : Bidabe	Modèle : GDD	Modèle : Wang	Modèle : Wang	Modèle : Wang
	SStar=120.4	SStar=211.77	SStar=18.8	SStar=56.16	SStar=45.95
	T0= -152	Tb=5	Topt=30.31	Topt=24.25	Topt=24.25
	Q10=2.17		Tmin=0	Tmin=0	Tmin=0
			Tmax=40	Tmax=40	Tmax=40
Syrah	Modèle : Bidabe	Modèle : GDD	Modèle : Wang	Modèle : Wang	Modèle : Wang
	SStar=95.8	SStar=322.25	SStar=12.53	SStar=52.83	SStar=43.22
	T0= -152	Tb=5	Topt=31.97	Topt=27.02	Topt=27.02
	Q10=2.17		Tmin=0	Tmin=0	Tmin=0
			Tmax=40	Tmax=40	Tmax=40

Source : Garcia De Cortazar Atauri *et al.*, 2009

Avec :

- SStar : somme de l'unité critique à atteindre pour terminer la phase ;
- Tb : température minimale en dessous de laquelle la température n'a pas d'action pour la satisfaction des besoins en chaleur ;
- Q10 : réponse exponentielle aux basses températures de l'air.

Le premier stade phénologique (Stade 0) et le deuxième (Stade 1) correspondent respectivement à la date de la Levée de dormance et du Débourrement. Le modèle utilisé Brin, (Garcia De Cortazar Atauri *et al.*, 2009) sert pour la simulation de la satisfaction des besoins en froid et des besoins de chaleur.

Les Stades 2, 3 et 4 correspondent respectivement à la date de la Floraison, la date de la Véraison et la date de Maturation de la plante. Le modèle utilisé (Wang) sert pour la simulation de la satisfaction des besoins en chauds.

Les fichiers de sortie de cette simulation nous ont permis de comparer la date des stades en nombre de jour calendaire (à partir du 1^{er} janvier) pour chaque stade phénologique entre les trois cépages comme le montrent les figures suivantes.

Les tableaux issus de la simulation, sont utilisés également dans le calcul des indicateurs.

Après la lecture de ce tableau, on constate que :

- le Chardonnay est un cépage relativement précoce. Il craint en fait les gelées tardives ;
- le Cabernet-sauvignon a une maturité assez tardive. Il est très influencé par la chaleur et le climat de la saison de croissance affecte la date de maturation ;
- le Syrah a une maturité rapide, demandant une surveillance pour déterminer le moment optimal de la récolte. Ce cépage mûrit rapidement, ce qui se traduit par une période véraison-maturité relativement courte.

II - Indicateurs de faisabilité

Le calcul des indicateurs de faisabilité, comme cela a déjà été expliqué, est fait à partir d'un code sous le logiciel R. Ce code est composé de différentes parties, et en particulier on peut en identifier trois : le codage des fonctions de calcul des indicateurs, le calcul du bilan hydrique et le calcul des indicateurs éco-climatiques. Dans ce qui suit, nous présentons ces trois étapes en détail.

1. Les fonctions de codage

Pour procéder au calcul des indicateurs de faisabilité, la première étape consiste tout d'abord à lire des fonctions de codage des indicateurs éco-climatiques.

En fait, chaque fonction code donne comme output une fonction qui sera utilisée successivement pour calculer les indicateurs. Les fonctions font appel à plusieurs arguments :

- L'année de début et de fin définissant la période pendant laquelle sont calculés les indicateurs ;
- La série climatique sur laquelle est calculée chaque indicateur ;
- Les données relatives aux stades phénologiques calculées sur la série climatique ;
- Les paramètres propres à l'espèce utilisée et qui sont nécessaires pour le calcul de certains indicateurs (Cold min, Tmin).

2. Bilan hydrique

Après avoir entré les fonctions de codage dans le logiciel R, nous calculons le bilan hydrique en se basant sur le modèle simplifié de Allen *et al.*, 1998. Il correspond au calcul de la teneur et du déficit en eau du sol.

Etant donné que le calcul de la réserve utile a été déjà fait, le coefficient de stress hydrique (Ks) est calculé à partir de la valeur de R/RU en fonction des stades phénologiques considérés pour chaque cépage.

Les tableaux de sortie du bilan hydrique sont présentés sous la forme suivante :

Tableau 5 - Exemple des tableaux de sortie de calcul du bilan hydrique

Maille	Sol	An	Jour	R	Ks
7884	7	1961	1	127.98	1
7884	7	1961	2	127.98	1
7884	7	1961	3	127.98	1
....

La valeur du coefficient du stress hydrique Kc est entre 0 et 1.

Les tableaux sont utilisés par la suite dans le programme de calcul des indicateurs éco-climatiques sous logiciel R.

3. Calcul indicateur

Cette phase utilise les inputs obtenus des étapes précédentes pour arriver au calcul effectif des indicateurs de faisabilité des cultures. Sur le logiciel R, nous lançons le programme qui nous permet de calculer les indicateurs éco-climatiques sur des périodes phénologiques pour plusieurs mailles et pour 3 variétés. Le programme repose sur la lecture des fichiers suivants :

- Le fichier phénologie (DATA_PHENO) contenant les dates de réalisation des stades de développement (en somme de jours) pour plusieurs années (50 ans).

Tableau 6 - Exemple du fichier phénologie du programme de calcul des indicateurs

Phenomodel	Climat	Site	Sol	Strategy	Plant	Variety	Year	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
PMP	safran	7884	1	fix	vigne	chardonnay	1961	2	87	143	153	163	213	252	262
PMP	safran	7884	1	fix	vigne	chardonnay	1962	2	108	157	167	177	225	267	277
PMP	safran	7884	1	fix	vigne	chardonnay	1963	2	108	153	163	173	223	268	278
....

- Le fichier climatique (DATA_CLIMATOT) contenant les données climatiques pour plusieurs années (50 ans) et pour différentes mailles.

Tableau 7 - Exemple du fichier climat du programme de calcul des indicateurs

Site	lat	An	Jour	Tmoy	TN	TX	RR	V	HR	RG	ETP
7884	43.93	1960	1	7.65	5	10.3	0	0.7	76.7	482.9	0.4
7884	43.93	1960	2	4.55	1.3	7.8	2.5	0.4	95.1	185.5	0.6
7884	43.93	1960	3	7.75	3.1	12.4	0	2.4	76.2	488.5	1.3
7884	43.93	1960	4	10.2	7.2	13.2	0	4.3	64.6	618.7	2.1
7884	43.93	1960	5	5.65	1.4	9.9	0	1.5	88	726.8	0.4
....

- Le fichier DATA_PARAM contenant la valeur des paramètres utilisés dans le calcul de certains indicateurs écoclimatiques.

Les paramètres utilisés sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8 - Paramètres utilisés dans le calcul des indicateurs écoclimatiques.

Paramètres	Définition	Plant
Tcoldmin	Temperature below which cold or frost affect the crop (°C) (compared to Tmin)	0
Tcoldmean	Temperature below which cold affect the crop (°C) (compared to Tmean)	5
Theat	Temperature above which heat affects the crop (°C) (compared to Tmax)	30
Heavyrain	Daily pluviometry specifying an heavy rain (mm)	20
Ks_threshold	Ks value below which the crop suffers water stress (0-1)	0.7
p	Proportion of readily available water in the soil (for the soil water balance model)	0.5
Zr	Root depth (dm) (for the soil water balance model)	5.5
Kcini	Crop coefficient during the initial period of crop growth (for the soil water balance model)	0.3
Kcmid	Crop coefficient during the middle period of crop growth (for the soil water balance model)	0.7
Kclate	Crop coefficient during the final period of crop growth (for the soil water balance model)	0.45

Le fichier DATA_INDICATOR indique les indicateurs à faire tourner ainsi que leurs arguments.

Ce fichier est constitué d'une colonne indiquant les indicateurs sélectionnés et une colonne indiquant les fonctions concernées.

Tableau 9 - Indicateurs utilisés et leurs arguments

Nom_indicateur	Appel_fonction
PHASE.LENGTH	PHASE_LENGTH(selectPHENO,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year))
T.MIN	T_MIN(DATA_CLIMAT,selectPHENO,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$ year))
T.MAX	T_MAX(DATA_CLIMAT,selectPHENO,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year))
T.MEAN	T_MEAN(DATA_CLIMAT,selectPHENO,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year))
T.AMP	T_AMP(DATA_CLIMAT,selectPHENO,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year))
HEAT.DAYS	HEAT_DAYS(DATA_CLIMAT,selectPHENO,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year), DATA_PARAM\$plant[DATA_PARAM\$param == "Theat"])
HEAT.FREQUENCY	HEAT_FREQUENCY(DATA_CLIMAT,selectPHENO,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year),DATA_PARAM\$plant[DATA_PARAM\$param == "Theat"])
RAIN.DAYS	RAIN_DAYS(DATA_CLIMAT,selectPHENO,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year))
RAIN.FREQUENCY	RAIN_FREQUENCY(DATA_CLIMAT,selectPHENO,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year))
COLDTMIN.DAYS	COLDTMIN_DAYS(DATA_CLIMAT,selectPHENO,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year),DATA_PARAM\$plant[DATA_PARAM\$param == "Tcoldmin"])
COLDTMIN.FREQUENCY	COLDTMIN_FREQUENCY(DATA_CLIMAT,selectPHENO,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year),DATA_PARAM\$plant[DATA_PARAM\$param == "Tcoldmin"])
COLDTMEAN.DAYS	COLDTMEAN_DAYS(DATA_CLIMAT,selectPHENO,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year),DATA_PARAM\$plant[DATA_PARAM\$param== "Tcoldmean"])
COLDTMEAN.FREQUENCY	COLDTMEAN_FREQUENCY(DATA_CLIMAT,selectPHENO,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year),DATA_PARAM\$plant[DATA_PARAM\$param == "Tcoldmean"])
WATERSTRESS.FREQUENCY	WATERSTRESS_FREQUENCY(selectPHENO,BILAN_HYDRIQUE,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year),DATA_PARAM\$plant[DATA_PARAM\$param == "Ks_threshold"])
WATERSTRESS.DAYS	WATERSTRESS_DAYS(selectPHENO,BILAN_HYDRIQUE,min(selectPHENO\$year),max(selectPHENO\$year),DATA_PARAM\$plant[DATA_PARAM\$param == "Ks_threshold"])

- Le fichier BILAN_HYDRIQUE pour le calcul des indicateurs faisant appel à la teneur en eau du sol.

Les indicateurs de faisabilité sont calculés par maille climatique, par type de sol et par année. Ils ont été calculés pour les années de 1960 à 2010. Successivement, une moyenne sur les 50 années a été calculée pour obtenir une valeur unique et synthétique pour chaque maille climatique et type de sol.

4. Spatialisation des indicateurs

Nous présentons dans ce qui suit la spatialisation de certains indicateurs de faisabilité. Nous rappelons bien que nous traitons la culture du point de vue de la qualité.

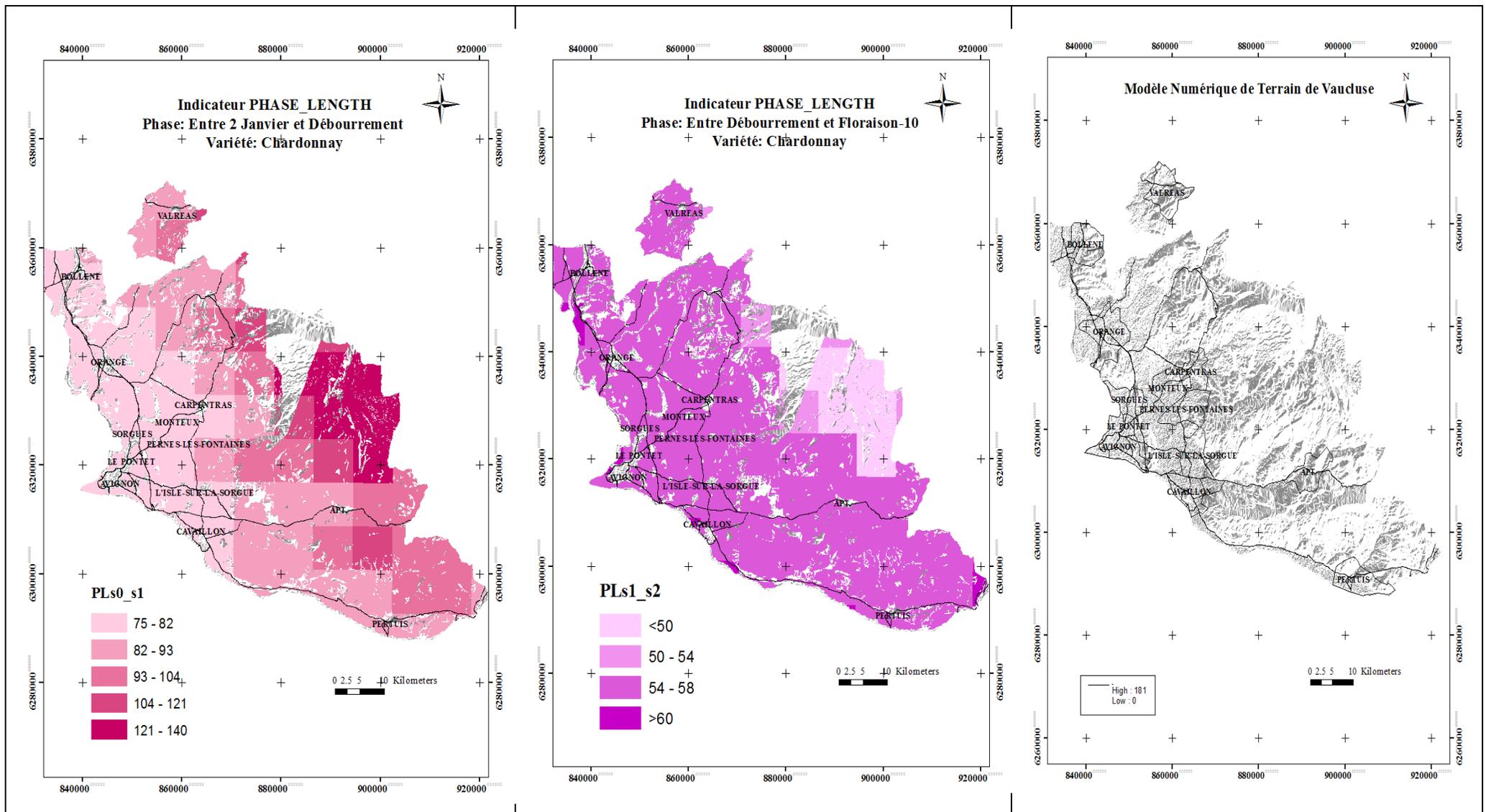
A. Un indicateur de phénologie pour un processus écophysologiques précis.

- **Exemple : La variété Chardonnay**

En prenant la variété Chardonnay comme exemple représentatif des cépages de vigne traités, nous présentons un indicateur phénologique (PHASE_LENGTH) correspondant à la durée d'une phase phénologique.

Les deux phases phénologiques sélectionnées pour cet exemple, sont représentées sous forme de cartes dans ce qui suit.

Il s'agit de la phase entre le 2 janvier et le débourrement (S0-S1) et celle entre le débourrement et la floraison-10 (S1-S2).



Carte 3 - Cartes de l'indicateur de phénologie « PHASE LENGTH » et de MNT

D'après les cartes ci-dessus, nous constatons que la durée de la phase phénologique dépend de la température qui est strictement liée à l'altitude.

La première carte représente la durée de la phase entre le 2 janvier et le débourrement (S0-S1). La plante dans cette phase-là, doit satisfaire ses besoins en froid et en chaleur et c'est donc l'effet de la température qui est en jeu.

Dans les basses altitudes, on a des durées de la phase de débourrement courtes. En fait, les températures froides sont suffisantes dans ces régions là, ce qui explique l'accélération du processus.

En haute altitude, c'est l'effet des températures chaudes qui est le plus limitant. C'est pour cela qu'on a les parties les plus tardives en altitude.

La deuxième carte représente la durée de la phase entre le débourrement et la floraison-10 (S1-S2). En effet, la durée de cette phase est plus courte. Elle s'étale, plus ou moins, sur 60 jours de différence dans la région.

En altitude, c'est toujours l'effet des températures chaudes qui est en jeu et qui représente un facteur limitant.

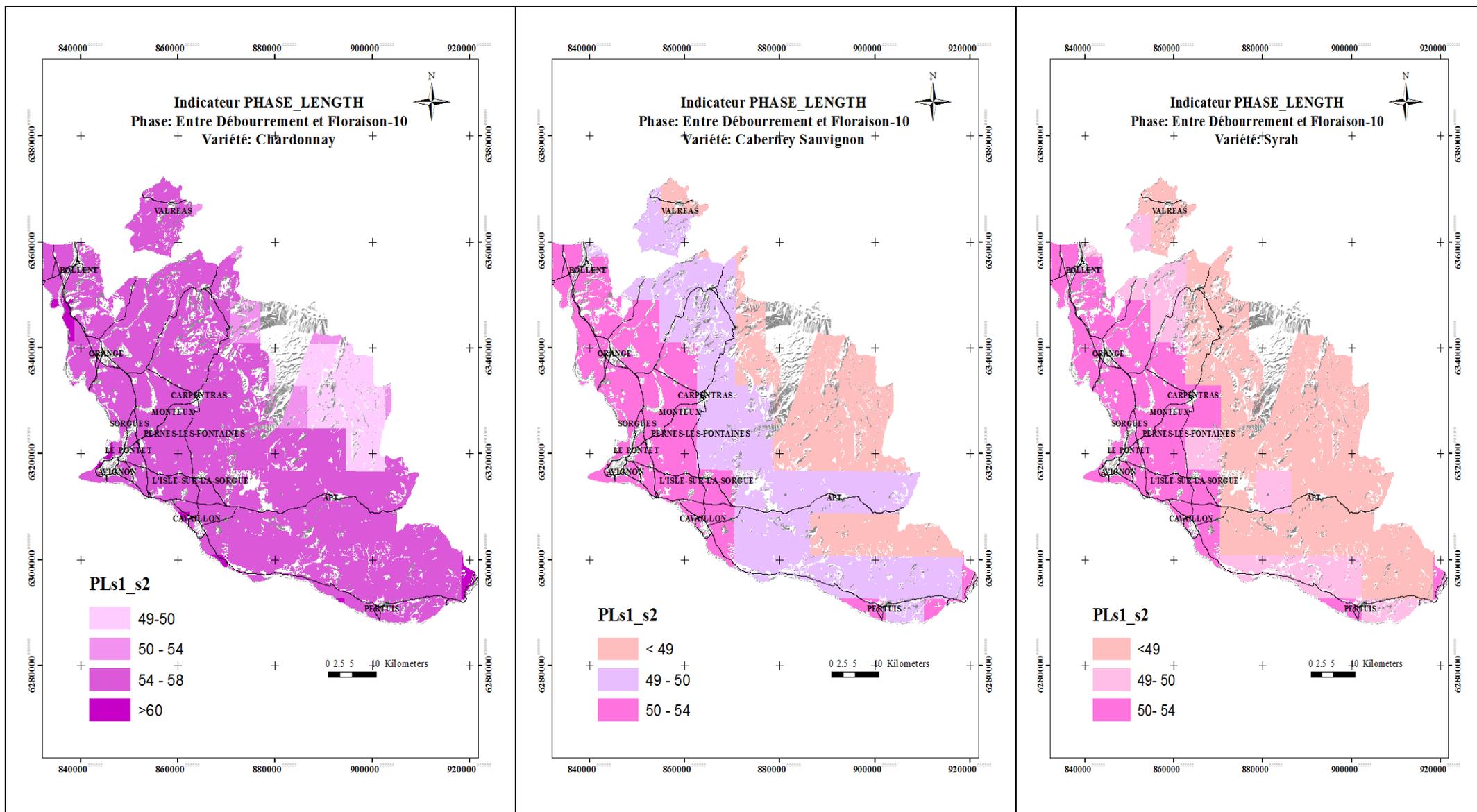
En effet, nous constatons que la durée de chaque phase dans les deux cartes varie d'une région à une autre à cause de la variation de la température (Effet altitude).

Nous remarquons aussi que plus le débourrement est tardif, plus la durée entre celui-ci et la floraison l'est aussi.

- **Comparaison entre les trois variétés**

Nous comparons la variété Chardonnay avec les deux autres variétés : Cabernet Sauvignon et Syrah

Nous avons choisi la phase entre débourrement et floraison-10 (S1-S2) pour expliquer la différence variétale des phases phénologiques par rapport à l'indicateur de phénologie.



Carte 4 - Différence variétale d'un indicateur de phénologie par rapport à une phase phénologique

Nous constatons que la durée de la phase Phénologique varie d'une variété à l'autre surtout par rapport à la première variété (Chardonnay) qui a une durée plus longue.

Notons que la variété Cabernet sauvignon est moins tardive et donc c'est celle qui pourrait être la plus exposée à des risques de gelée de printemps.

La variété Syrah a une maturité rapide sur presque tous les sols à l'exception des basses altitudes. En effet, cette variété est très influencée par la chaleur.

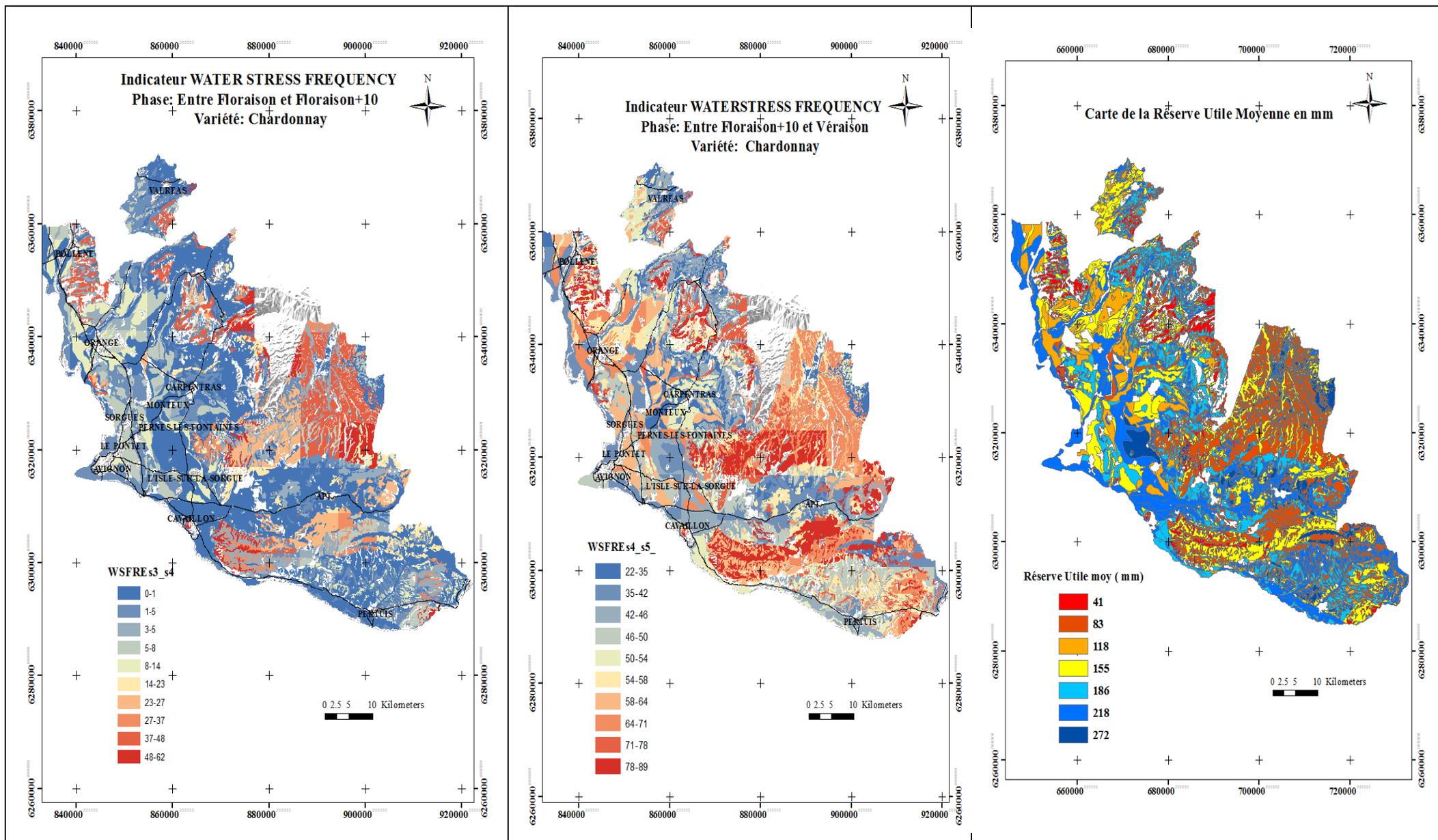
B. Un indicateur simple pour un processus écophysiological simple

- Exemple : la variété Chardonnay

Afin d'expliquer l'effet climatique sur la croissance de la plante, nous avons choisi de représenter l'effet du déficit hydrique sur la durée des deux phases phénologiques : entre floraison et floraison+10 (S3-S4) et entre floraison+10 et véraison (S4-S5).

L'indicateur utilisé pour caractériser cet effet climatique est le WATER STRESS FREQUENCY.

Nous prenons la variété Chardonnay comme exemple pour expliquer cet indicateur simple comme le montre les cartes suivantes.



Carte 5 - Effet du déficit hydrique sur la croissance de la plante

En comparant les deux premières cartes avec celle des sols (carte de la réserve utile), on constate ceci :

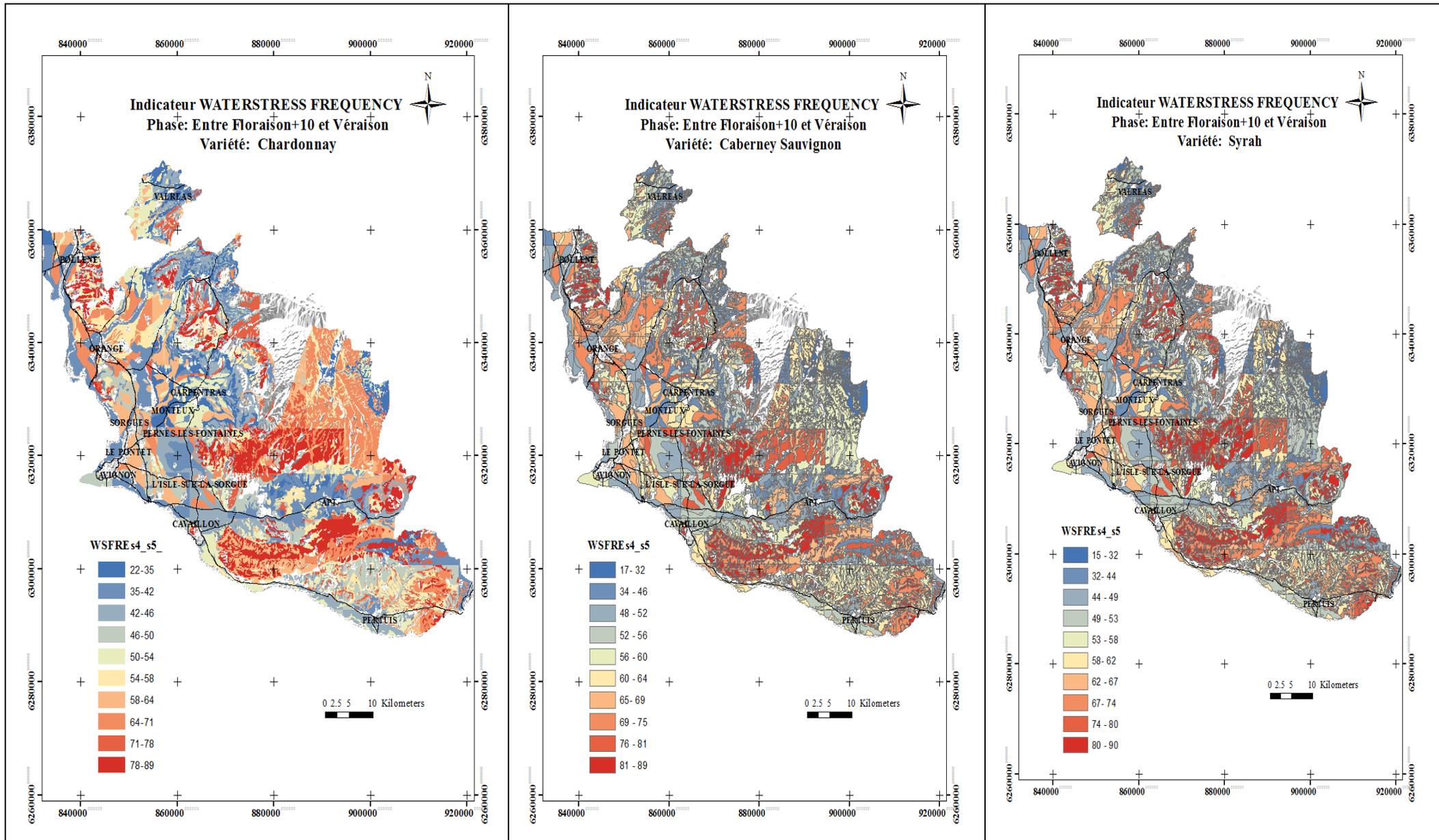
Dans les régions où la réserve utile est faible, il y'a forcément un déficit hydrique et donc une valeur plus élevée de l'indicateur Water Stress Frequency. Du coup, c'est surtout l'effet sol qui est en jeu.

En particulier, on observe un stress hydrique plus fort sur les deux cotés (Nord et Sud) du Luberon, qui correspondent à des sols développés sur les terrasses alluvionnaires à cailloux du quaternaire ancien.

- **Comparaison entre les trois variétés**

Nous comparons la variété Chardonnay avec les deux autres variétés : Cabernet Sauvignon et Syrah

Nous avons choisi la phase entre floraison+10 et véraison (S4-S5) pour expliquer la différence variétale des phases phénologiques par rapport à l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY.



Carte 6 - Comparaison de l'effet du déficit hydrique sur la qualité de la vigne entre les trois variétés

Nous constatons que la variété Chardonnay est toujours différente des deux autres, sachant que la variété Syrah est la plus précoce.

Pendant la période entre floraison et véraison, on remarque qu'il y'a plus de stress hydrique sur la variété Chardonnay que sur les deux autres variétés. Du coup, l'intérêt de cet indicateur éco-climatique est de montrer cette coïncidence entre le climat et les phases phénologiques pour chaque variété.

C. Deux indicateurs différents pour un processus écophysologique plus complexe.

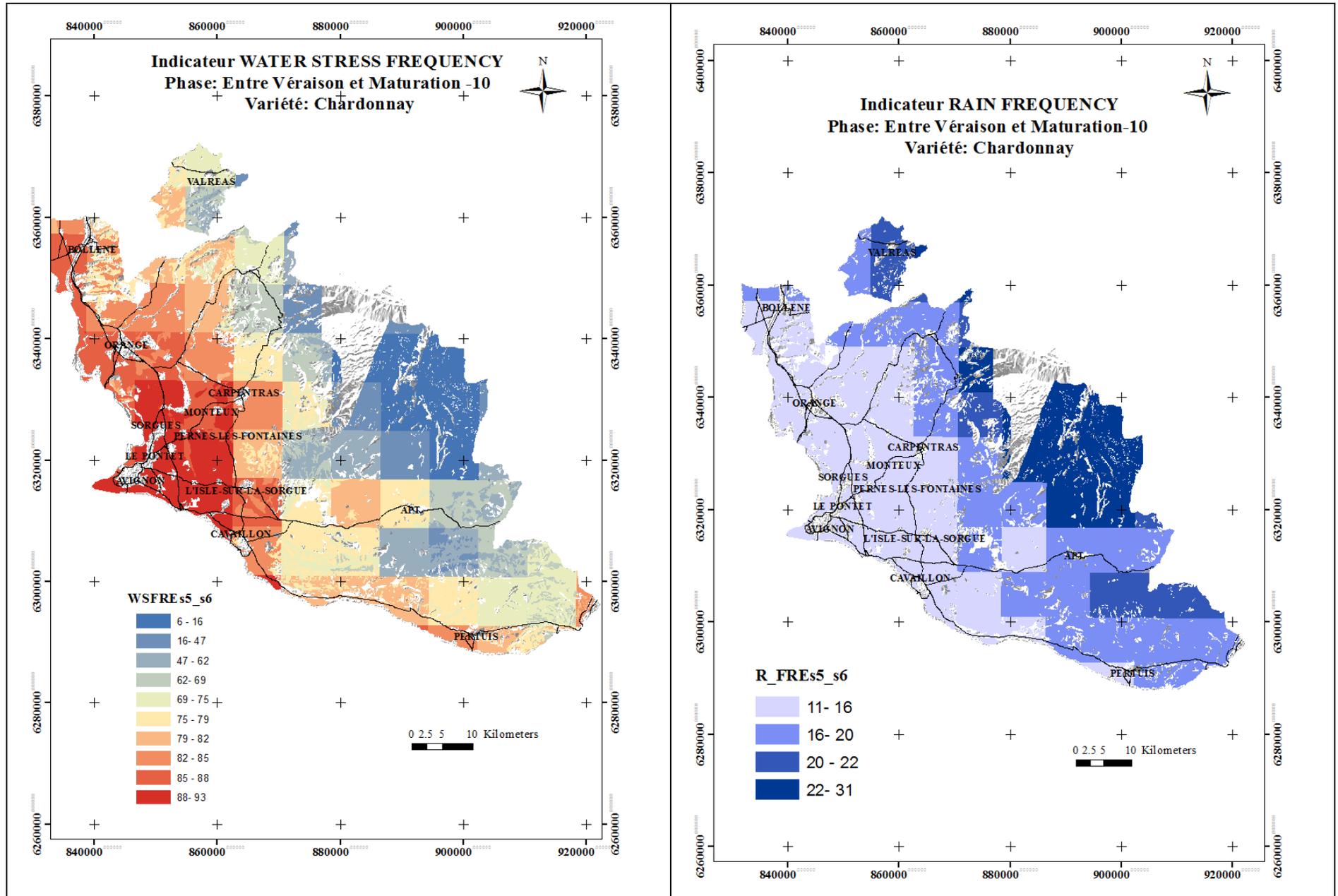
Dans ce qui suit, nous essayons de comparer deux indicateurs différents pour deux phases phénologiques.

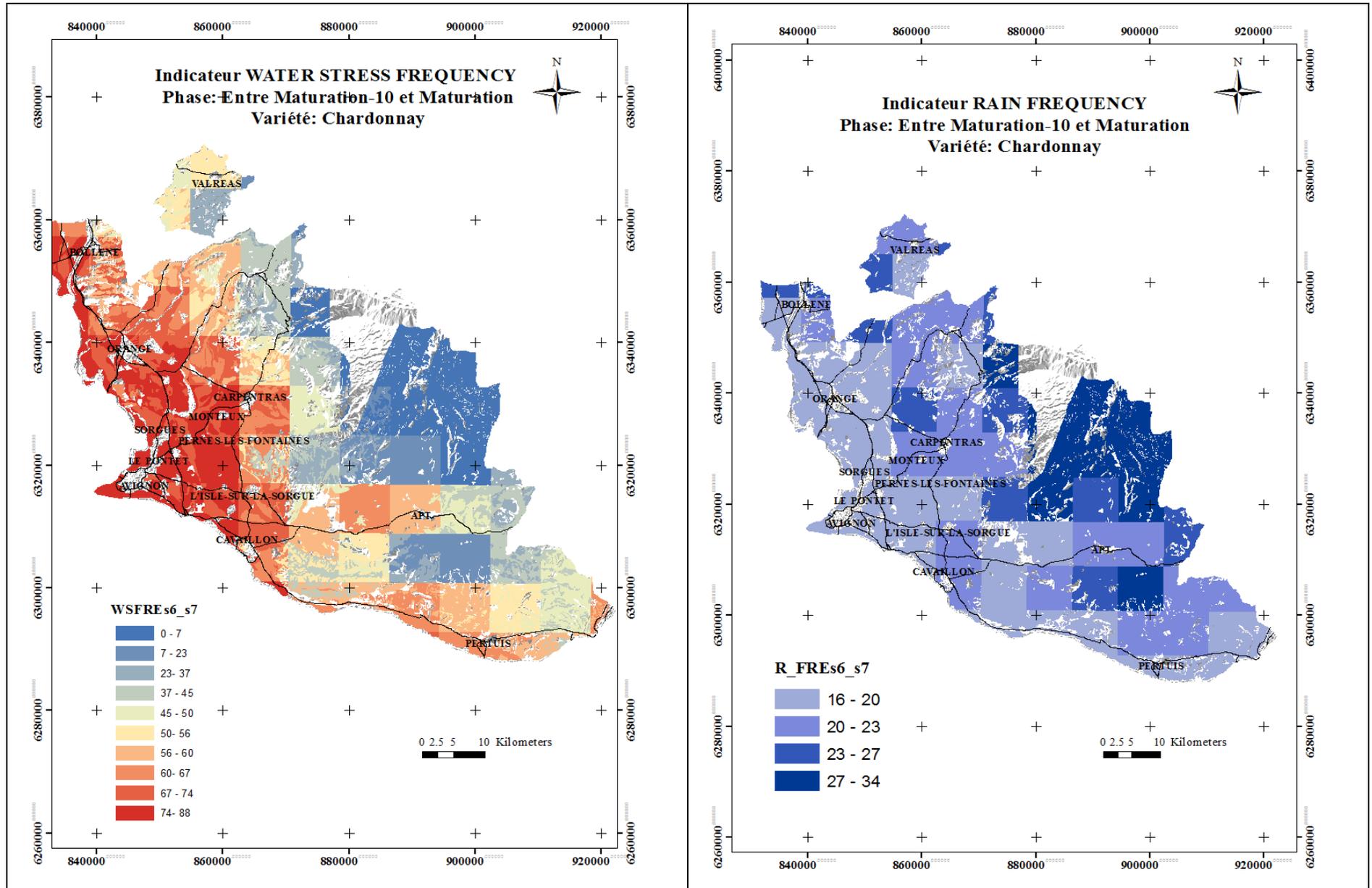
Il s'agit de la phase entre véraison et maturation-10 (S5-S6) et celle entre la maturation-10 et maturation (S6-S7).

- Excès d'eau et déficit hydrique

Afin d'expliquer les effets climatiques du déficit hydrique et de l'excès d'eau sur la qualité de la culture de la vigne, nous représentons ci-dessous deux indicateurs qui permettent de caractériser ces effets.

Il s'agit respectivement de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY et du RAINY FREQUENCY.





Carte 7 - Effets climatiques du déficit hydrique et de l'excès d'eau sur la qualité de la culture de la vigne

Le déficit hydrique a un effet négatif sur la qualité de la récolte de la vigne. Il influence le remplissage des grains. En effet, l'indicateur Water Stress Frequency a des valeurs plus élevées dans des basses altitudes.

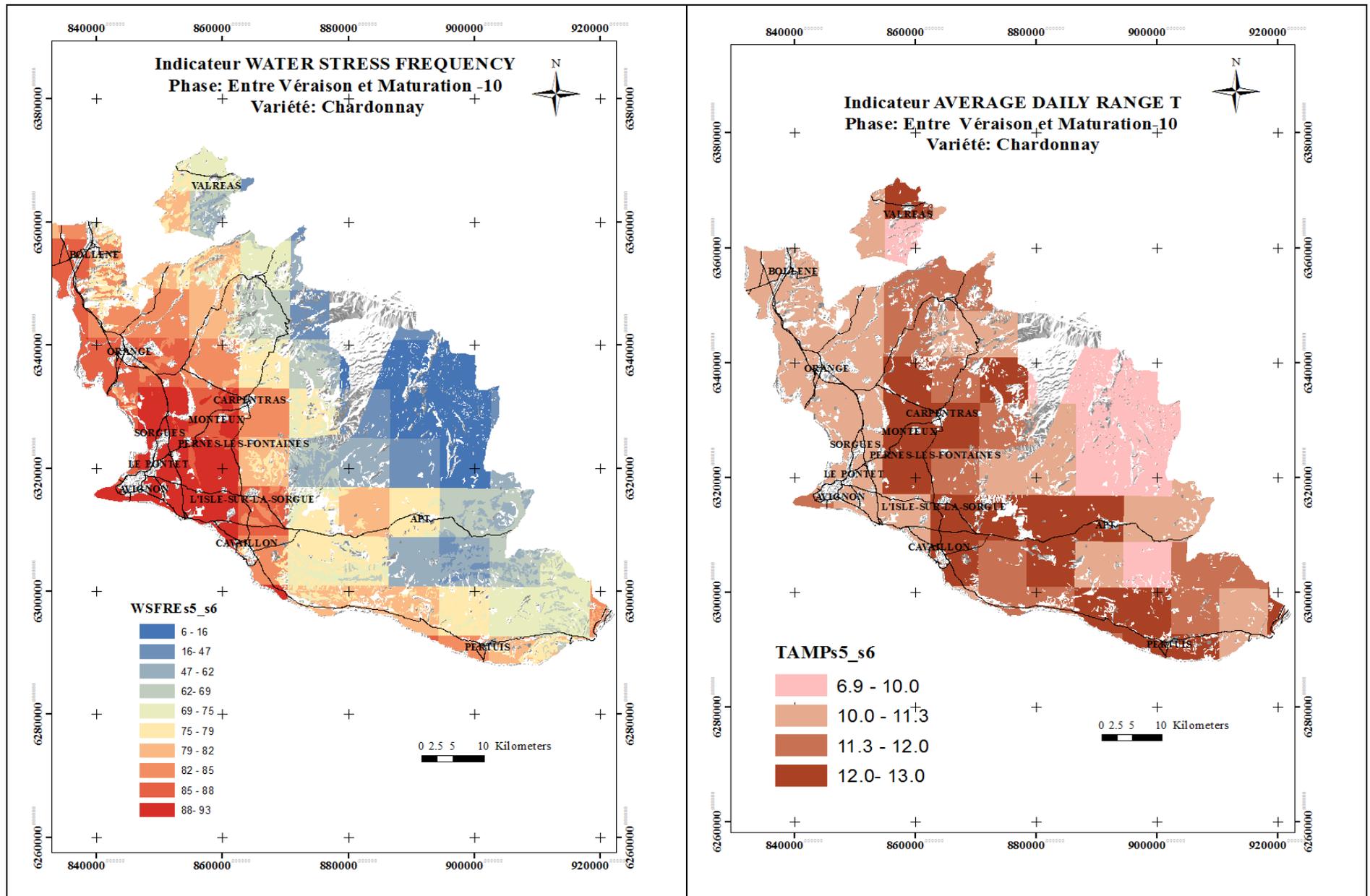
L'excès d'eau a également un effet négatif sur la qualité de la récolte de la vigne. L'indicateur Rain Frequency qui est aussi négatif a plus des valeurs élevées mais en haute altitude.

En général donc, nous pouvons affirmer que dans la zone d'étude le stress hydrique est un facteur plus limitant que l'excès d'eau.

- **déficit hydrique et l'amplitude de la température**

Afin d'expliquer les effets climatiques du déficit hydrique et de l'amplitude de la température (d'amplitude entre la température du jour et de la nuit), qui représente les différences journalières de température, sur la qualité de la culture de la vigne, nous représentons ci-dessous deux indicateurs qui permettent de caractériser ces effets.

Il s'agit respectivement de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY et AVERAGE DAILY RANGE T.

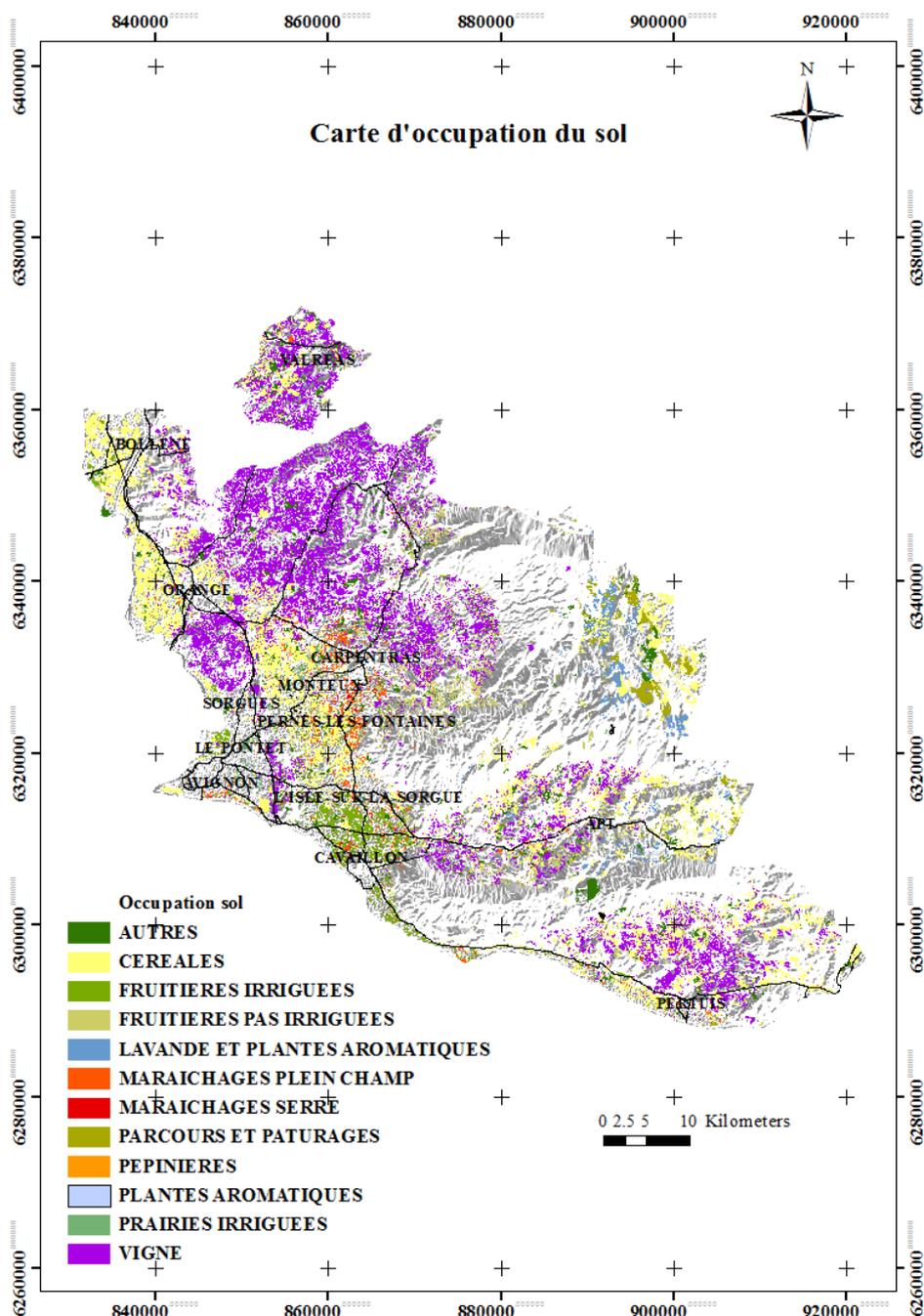


Carte 8 - Effets climatiques du déficit hydrique et de l'Amplitude de la température sur la qualité de la vigne

Ce que nous pouvons remarquer par la comparaison des deux cartes est que la distribution des facteurs de risque dans la zone d'étude n'est pas homogène. En particulier, les zones où il y a plus de fréquence de jours en stress hydrique sont localisées surtout dans la partie de plaine autour de la ville d'Avignon. Par contre, les zones où il y a un intervalle de température plus élevé entre le maximum et le minimum journalier sont localisées plutôt sur les parties internes de moyenne hauteur (zones de collines – pré-montagne). L'identification des types de risque pédoclimatique dans les différentes zones peut être un outil important pour les agriculteurs, qui peuvent donc concentrer leur intervention sur les facteurs identifiés.

- Comparaison avec la carte d'Occupation du sol vigne

Carte 9 - Occupation du sol en Vaucluse



En se basant la carte ci-dessus, nous constatons que la culture de la vigne est localisée surtout au Nord du département. Cette zone correspond généralement à des valeurs moyennes des indicateurs, c'est à dire que le risque de faisabilité de la culture est en général moyen.

Par contre, il n'y a pas de valeur de risque très fort pour aucun des indicateurs utilisés.

Cela peut nous faire penser que, en agrégeant les indicateurs, la zone serait la plus adaptée à la culture effectivement, mais surtout qu'il n'y a pas un facteur de risque principal dans la zone où la vigne est localisée.

Conclusion et recommandations

Le présent travail est focalisé sur l'étude des indicateurs éco-climatiques de la culture de la vigne en Vaucluse.

L'objectif principal est de mettre au point une base de données biophysiques existantes (sol et climat en particulier) afin de proposer une couverture spatialisée d'indicateurs éco-climatiques de risque et de potentialité pour le département du Vaucluse.

Cette première étape d'étude de faisabilité de la culture nous a permis d'élaborer dans un premier temps des cartes de ces indicateurs.

Nous avons sélectionné sept indicateurs en rapport avec la qualité et la quantité de la production viticole. Ces indicateurs montrent de possibles risques de la culture pendant ses différentes phases phénologiques.

Afin de mieux analyser les cartes obtenues et considérer l'intérêt de la méthode utilisée, nous avons décidé de lire les résultats selon trois niveaux en nous basant sur l'interprétation de quatre indicateurs de notre choix.

Le premier niveau concerne l'analyse d'un seul indicateur de phénologie correspondant à la durée de la phase phénologique entre le débourrement et la floraison -10. Il s'agit de l'indicateur PHASE LENGTH. En effet, nous avons comparé cet indicateur aux trois variétés de précocité assez large. Il s'agit des variétés Chardonnay, Cabernet Sauvignon et Syrah.

Les résultats sont présentés sous forme de cartes thématiques montrant l'effet de la température froide et chaude sur la durée de la phase considérée. Ces cartes ont également permis de vérifier l'effet de la différence variétale sur la durée de la phase surtout par rapport à la première variété Chardonnay qui a une durée plus longue. Cabernet sauvignon arrive en deuxième position avec une maturité moins tardive et la variété Syrah se place en troisième position avec une maturité rapide sur presque tous les sols.

Le deuxième niveau est consacré à l'analyse d'un indicateur écoclimatique simple pour un processus écophysologique simple. Il s'agit d'une présentation des cartes qui expliquent l'effet du déficit hydrique sur la durée de la phase Phénologique entre la Floraison et la Véraison. L'indicateur utilisé à cette fin est le WATER STRESS FREQUENCY.

Sur le modèle du premier niveau, nous avons comparé cet indicateur avec la carte de la réserve utile moyenne du sol mais aussi par rapport aux trois variétés.

Les résultats de cette partie sont présentés sous forme de cartes thématiques montrant l'effet du déficit hydrique sur la croissance de la plante. Aussi, la comparaison entre les trois variétés montre que la variété Chardonnay subit plus de stress hydrique par rapport aux deux autres.

Enfin, le troisième niveau concerne l'analyse de deux indicateurs différents pour un processus écophysologique plus complexe. Pour ce faire, nous avons choisi de comparer les effets climatiques du déficit hydrique sur la qualité de la culture de la vigne, d'une part en relation avec l'excès d'eau et d'autre part en relation avec l'amplitude de la température. La phase phénologique concernée est celle entre Maturation-10 et Maturation.

Pour aboutir à la première comparaison, nous avons choisi respectivement les indicateurs WATER STRESS FREQUENCY et RAINY FREQUENCY pour expliquer le déficit hydrique et l'excès d'eau pour le processus écophysologique : qualité de la vigne. Nous pouvons affirmer que dans la zone d'étude le stress hydrique est un facteur plus limitant par rapport à l'excès d'eau.

La deuxième comparaison a concerné les indicateurs WATER STRESS FREQUENCY et AVERAGE DAILY RANGE T afin d'expliquer les effets climatiques du déficit hydrique et de l'amplitude de la température sur la qualité de la vigne. Nous pouvons conclure que la spatialisation des indicateurs montre une distribution des facteurs de risque dans la zone d'étude qui n'est pas homogène.

En se basant sur la carte d'occupation du sol, nous constatons que la culture de la vigne est surtout localisée au Nord du département. Cette zone correspond à des valeurs moyennes des indicateurs. En effet, nous pouvons dire que le risque de faisabilité de la culture y est en général moyen.

Or, pour aboutir à une étude de faisabilité, il est nécessaire d'agrèger ces indicateurs calculés car il n'existe pas de facteur de risque principal dans la zone où la vigne est localisée. En effet, des travaux en cours proposent des fonctions d'agrégation de ces indicateurs qui, par manque de temps, n'ont pas pu être appliqués à cette étude. Cette dernière se limite donc au calcul des indicateurs tels quels.

Une importante étape successive à ce travail pourrait donc être l'agrégation des indicateurs calculés pour obtenir un indice synthétique de faisabilité de la culture au niveau territorial

D'une part, ce document permet une identification des types de risques pédoclimatiques dans les différentes zones et peut constituer un outil important pour les agriculteurs leur permettant de concentrer leur intervention sur les

facteurs identifiés. D'autre part, il permet une reconnaissance de la distribution spatiale des indicateurs écoclimatiques qui serviront par la suite à une étude de faisabilité de cette culture.

En guise de conclusion, nous tenons à noter que le temps alloué à la réalisation de ce travail ne nous permet pas de nous focaliser sur la réalisation de l'étude de faisabilité proprement dite. Ce travail représente cependant une étape primordiale pour aboutir à cette étude.

Au terme de ce travail et afin de poursuivre l'étude de faisabilité, nous formulons les recommandations suivantes :

- Cette étude peut être améliorée par une intégration, en plus de l'effet du sol et du climat, de l'effet de pratiques culturelles qui peuvent avoir lieu pendant des périodes phénologiques ;
- Il serait intéressant de comparer les résultats de cette étude avec celle réalisée sur les autres cultures et aussi de proposer des cas d'étude différents dans des zones aux caractéristiques climatiques et de sol différentes, afin de pouvoir tester la méthode sous différentes conditions ;
- Enfin, ce présent travail représente une étape préliminaire et il serait intéressant de le continuer pour aboutir à une étude complète.

Références bibliographiques

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998).** *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. Rome : FAO. 174 p. (Irrigation and drainage paper, n. 56).
<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>
- Brisson N., Huard F., Graux A.-I., Lebas C., Debaeke P. (2006).** *Impacts de la variabilité des facteurs responsables de la sécheresse agricole à l'échelle du territoire par une approche de modélisation biophysique*. Document de travail réalisé dans le cadre de l'expertise collective sécheresse de l'INRA. 30 p.
- Brown I., Towers W., Rivington M., Black H.I.J. (2008).** Influence of climate change on agricultural land-use potential: adapting and updating the land capability system for Scotland. *Climate Research*, vol. 37, n. 1, p. 43-57. <http://dx.doi.org/10.3354/cr00753>
- C.A. (2014a).** *Agricultures & Territoires : l'agriculture en Vaucluse*. Avignon : Chambre d'agriculture Vaucluse.
<http://www.agriculture84.fr/1-agriculture-en-vaucluse/les-productions/la-viticulture.html>
- C.A. (2014b).** *Généralités sur le Vaucluse*. Avignon : Chambre d'agriculture Vaucluse.
<http://www.agriculture84.fr/1-agriculture-en-vaucluse/generalites-sur-le-vaucluse/generalites-sur-le-vaucluse.html>
- C.A. (2007).** *Bilan de Campagne 2007 : Agriculture en Vaucluse*. Avignon : Chambre d'agriculture du Vaucluse. 168 p.
- Caubel J., García de Cortázar-Atauri I., Launay M., de Noblet-Ducoudré N., Huard F., Bertuzzi P., Graux A.-I. (2012).** *Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical or quality criteria*. 43 p.
- Childs S.W., Gilley J.R., Splinter W.E. (1977).** A simplified model of corn growth under moisture stress. *Transactions of the ASAE*, vol. 20, n. 5, p. 858-865. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.35664>.
- Choisnel E. (1992).** Le calcul du bilan hydrique du sol: options de modélisation et niveaux de complexité. *Science du sol*, vol. 30, n. 1, p. 15-18. http://www.afes.fr/afes/sds/SDS_30_1_p15_CHOISNEL.PDF
- Chuine I., García de Cortázar-Atauri I., Kramer K., Hänninen H. (2013).** Plant development models. In : Schwarz M. (ed.). *Phenology: an integrative environmental science*. Dordrecht : Springer. p. 275-293. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0_15
- Confalonieri R., Bellocchi G., Bregaglio S., Donatelli M., Acutis M. (2010).** Comparison of sensitivity analysis techniques: a case study with the rice model WARM. *Ecological Modelling*, vol. 221, n. 16, p. 1897-1906.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.04.021>
- Debolini M., Lejeail P., Guerif M. (2014).** *Building typologies of farming systems to understand agricultural landscape dynamics at regional level*. Session 32 Global Land Project, 2. Open Science Meeting 014 Land Transformations: Between Global Challenges and Local Realities, 2014/03/19, Berlin (Allemagne).
- de Wit C.T. (1978).** Introduction. In : de Wit C.T. *Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops*. Wageningen : Centre for Agricultural Publishing and Documentation. p. 1-5.
- Eckersten H., Jansson P.-E. (1991)** Modelling water flow, nitrogen uptake and production for wheat. *Fertilizer Research*, March 1991, vol. 27, n. 2, p. 313-329. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01051137>
- Garcia De Cortaza Atauri I. (2006).** *Adaptation du modèle STICS à la vigne (Vitis vinifera L.). Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France*. Thèse (doctorat en science du sol) : Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. 292 p. + annexes.
- Garcia De Cortazar Atauri I., Brisson N., Gaudillere J.-P. (2009).** Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera L.*). *International Journal of Biometeorology*, July 2009, vol. 53, n. 4, p. 317-326. <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-009-0217-4>
- Hansen S., Jensen H.E., Nielsen N.E., Swenden H. (1990).** DAISY - Soil plant atmosphere system model . København : Miljøstyrelsen. 276 p. (NPo, Forskning, n. 10).
<http://www2.mst.dk/Udgiv/publications/1990/87-503-8790-1/pdf/87-503-8790-1.pdf>
- Holzschläger A., Calanca P., Fuhrer J. (2013).** Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 168, p. 149-159.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.004>

- INRA (Paris), Faculté des Sciences Agronomiques (Gembloux). (1990).** *Evaluation des contraintes sol-climat sur la faisabilité des cultures. Application au Maïs-grain et fourrage et au tournesol.* Bruxelles : Commission des Communautés Européennes. 21 p. Rapport de fin de travaux.
- Jones C.A., Kiniry J.R. (1986).** *CERES-Maize a simulation model of maize growth and development.* College station : Texas A & M University Press. 194 p.
- Jones J.W., Luyten J.C. (1998).** Simulation of biological processes. In : Peart R.M., Curry R.B. (ed.). *Agricultural systems modeling and simulation.* New York : Marcel Dekker. p. 19-62.
- Lepage M.-P., Bourgeois G. (2012).** *Modèles bioclimatiques pour la prédiction de la phénologie, de la croissance, du rendement et de la qualité des cultures.* Québec : Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 11 p. http://dev.agrometeo.org/help/modeles_bioclimatiques_phenologie.pdf
- Matthews K.B., Rivington M., Buchan K., Miller D., Bellocchi G. (2008).** Characterising the agro-meteorological implications of climate change scenarios for land management stakeholders. *Climate Research*, vol. 37, n. 1, p. 59-75. <http://dx.doi.org/10.3354/cr00751>
- Milly P.C.D. (1994).** Climate, soil water storage, and the average annual water balance. *Water Resources Research*, July 1994, vol. 30, n. 7, p. 2143-2156. <http://dx.doi.org/10.1029/94WR00586>
- Musy M. (2005).** Chapitre 1. Le cycle et le bilan hydrologiques. In : Musy M. *Cours Hydrologie Générale.* <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/resumes/chapitre1/resume1.html>
- Peart R.M., Curry R.B. (1998).** Preface. In : Peart R.M., Curry R.B. (ed.). *Agricultural systems modeling and simulation.* New York : Marcel Dekker. p. iii- viii.
- Plouffe D. (2012).** *Les modèles bioclimatiques utilisés en agriculture.* Québec Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire. 21 p. Colloque en Agroclimatologie. http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/documents/Plouffe_Dominique.pdf.
- Rieul L., Ruelle P. (coords.). (2003).** *Guide pratique. Irrigation.* 3. ed. Paris : Cemagref Editions. 344 p.
- Ritchie J.T., Otter S. (1985).** Chapter 10. Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model. In : Willis W.O. (ed.). *ARS wheat yield project.* Washington : Agricultural Research Service. p. 159-175. (ARS, n. 38).
- SCPARP Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale. (2009).** *Analyse territoriale du potentiel agricole et préconisations. Etude relative au foncier agricole en Vaucluse.* Vaucluse : Chambre d'Agriculture Vaucluse.
- Stapper M. (1984).** A simulation model of wheat genotypes. Model documentation. Alep : ICARDA. 108 p.
- Thornthwaite C.W., Mather J.R. (1955).** The water balance. Centerton : Laboratory of Climatology. 104 p. (Publications in Climatology, vol. 8, n. 1).
- Trnka M., Olesen J.E., Kersebaum K.C., Skjelvag A.O., Eitzinger J., Seguin B., Peltonen-Sainio P., Rotter R., Iglesias A., Orlandini S., Dubrovsky M., Hlavinka P., Balek J., Eckersten H., Cloppet E., Calanca P., Gobin A., Vucetic V., Nejedlik P., Kumar S., Lalic B., Mestre A., Rossi F., Kozyra J., Alexandrov V., Semerádova D., Zalud Z. (2011).** Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Global Change Biology*, vol. 17, p. 2298-2318. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02396.x>
- Van Diepen C.A., Wolf J., Van Keulen H., Rappoldt C. (1989).** WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, March 1989, Vol. 5, n. 1, p. 16-24. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x>
- Van Keulen H., Seligman N.G. (1987).** *Simulation of water use nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop.* Wageningen : Pudoc. 310 p. (Simulation monograph).
- Weir A.H., Bragg P.L., Porter J.R., Rayner J.H. (1984).** A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *The Journal of the Agriculture Science*, vol. 102, n. 2, p. 371-382. <http://dx.doi.org/10.1017/S0021859600042702>
- Williams J.R., Jones C.A., Dyke P.T. (1984).** A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE*, vol. 27, n. 1, p. 129-144. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.32748>

Webographie

1France (2014). *Carte du département de Vaucluse.*

<http://www.1france.fr/departement/84-vaucluse/carte-plan-departement.php>

INRA (2014). *Centre INRA, Provence-Alpes-Cotes d'Azur.*

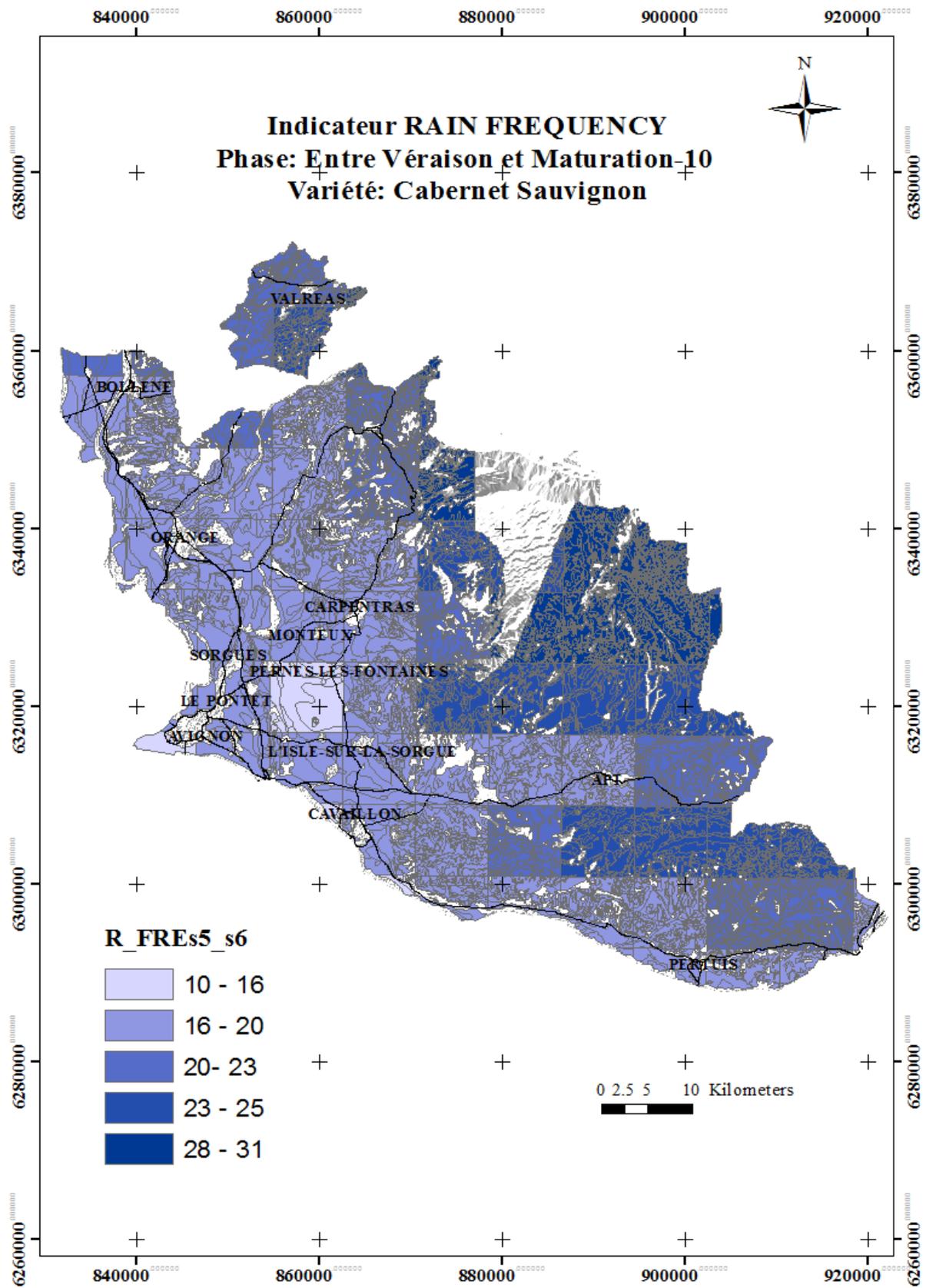
<http://www.paca.inra.fr/>

Poulain C. (2013). *Quel vin fera-t-il demain ?* INRA.

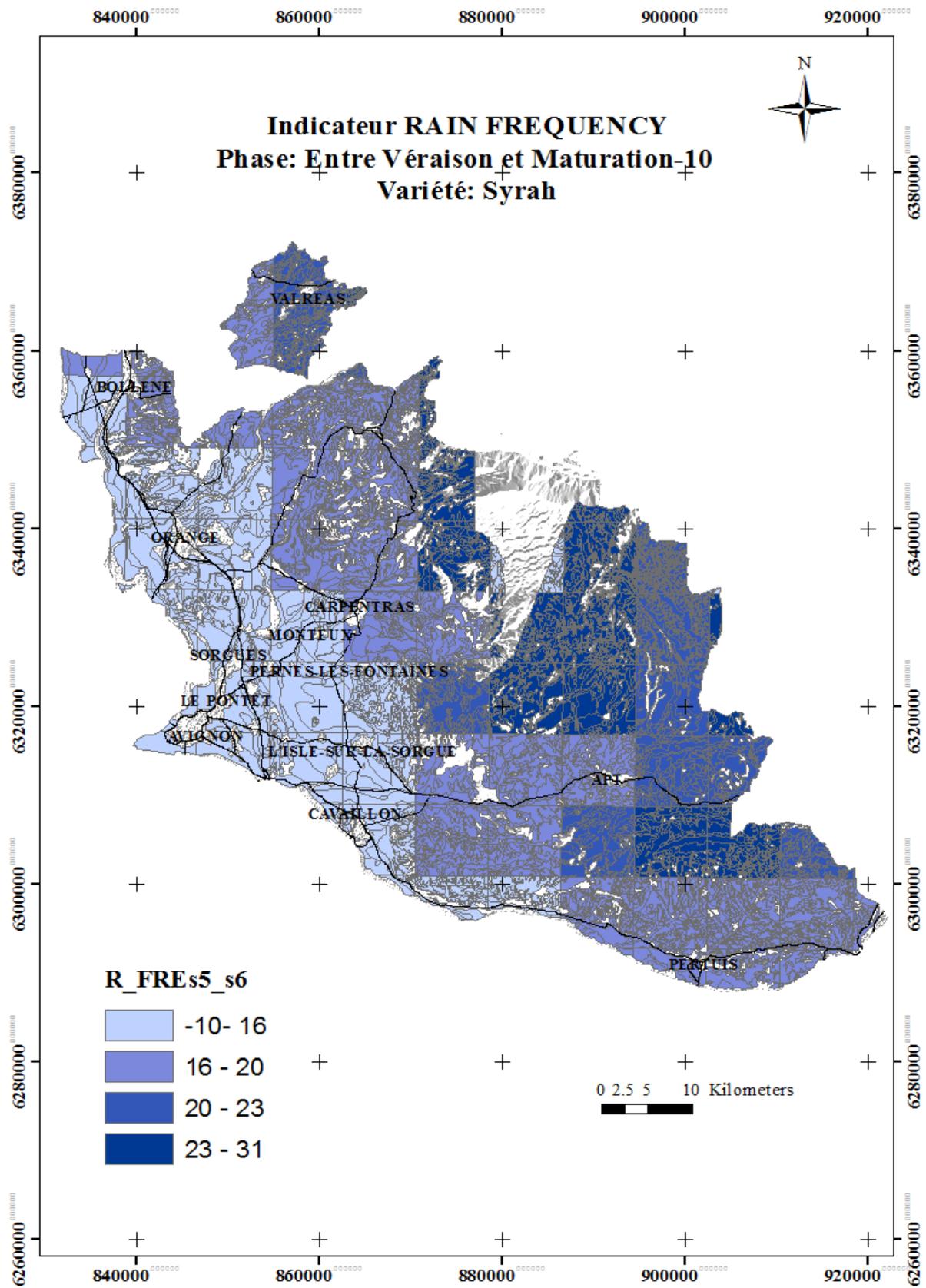
<http://www.inra.fr/Grand-public/Rechauffement-climatique/Toutes-les-actualites/Vigne-et-rechauffement-climatique>

Annexes

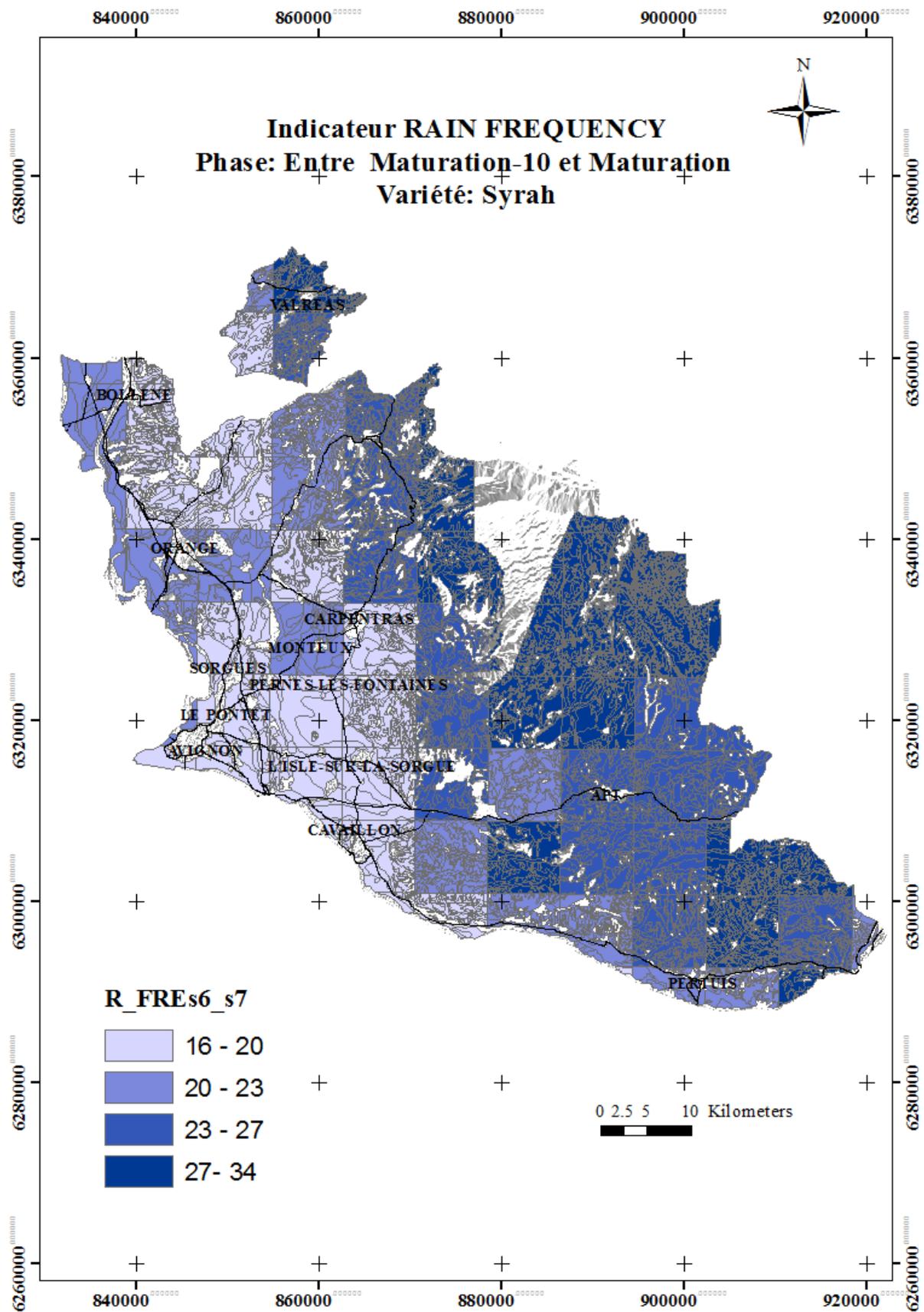
Annexe 1 - Carte de l'indicateur RAIN FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation



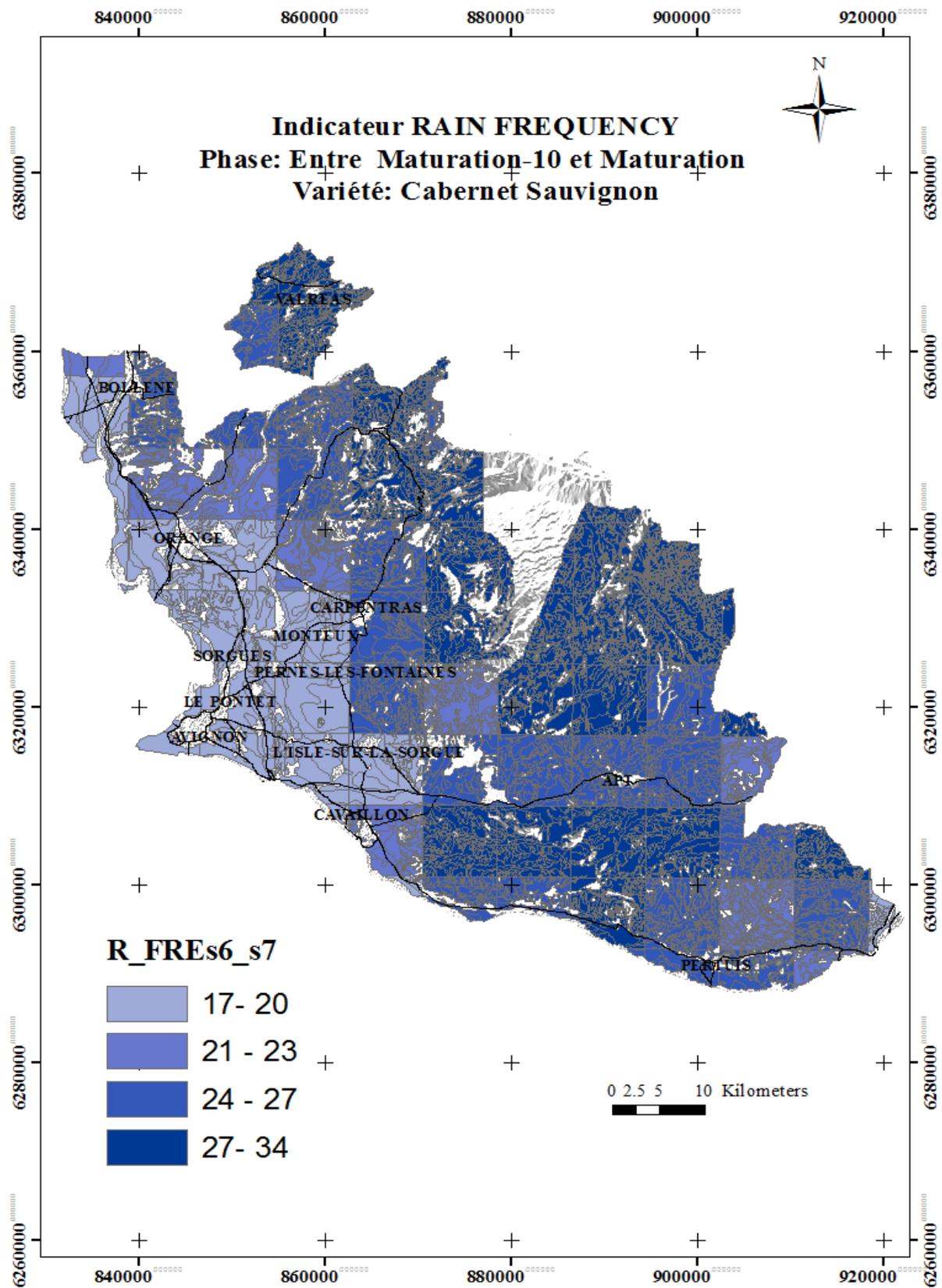
Annexe 2 - Carte de l'indicateur RAIN FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation pour la variété Syrah



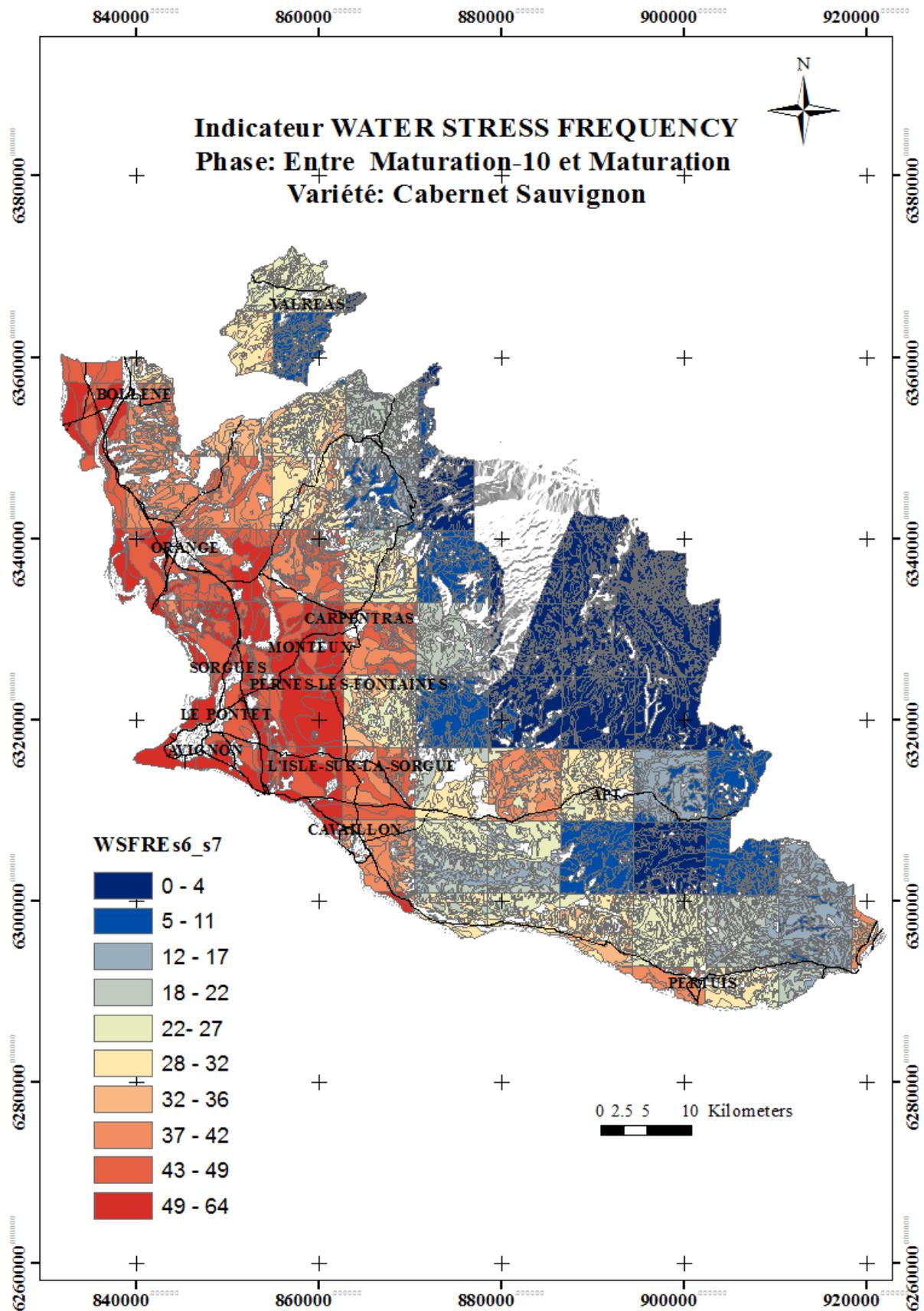
Annexe 3 - Carte de l'indicateur RAIN FREQUENCY entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Syrah



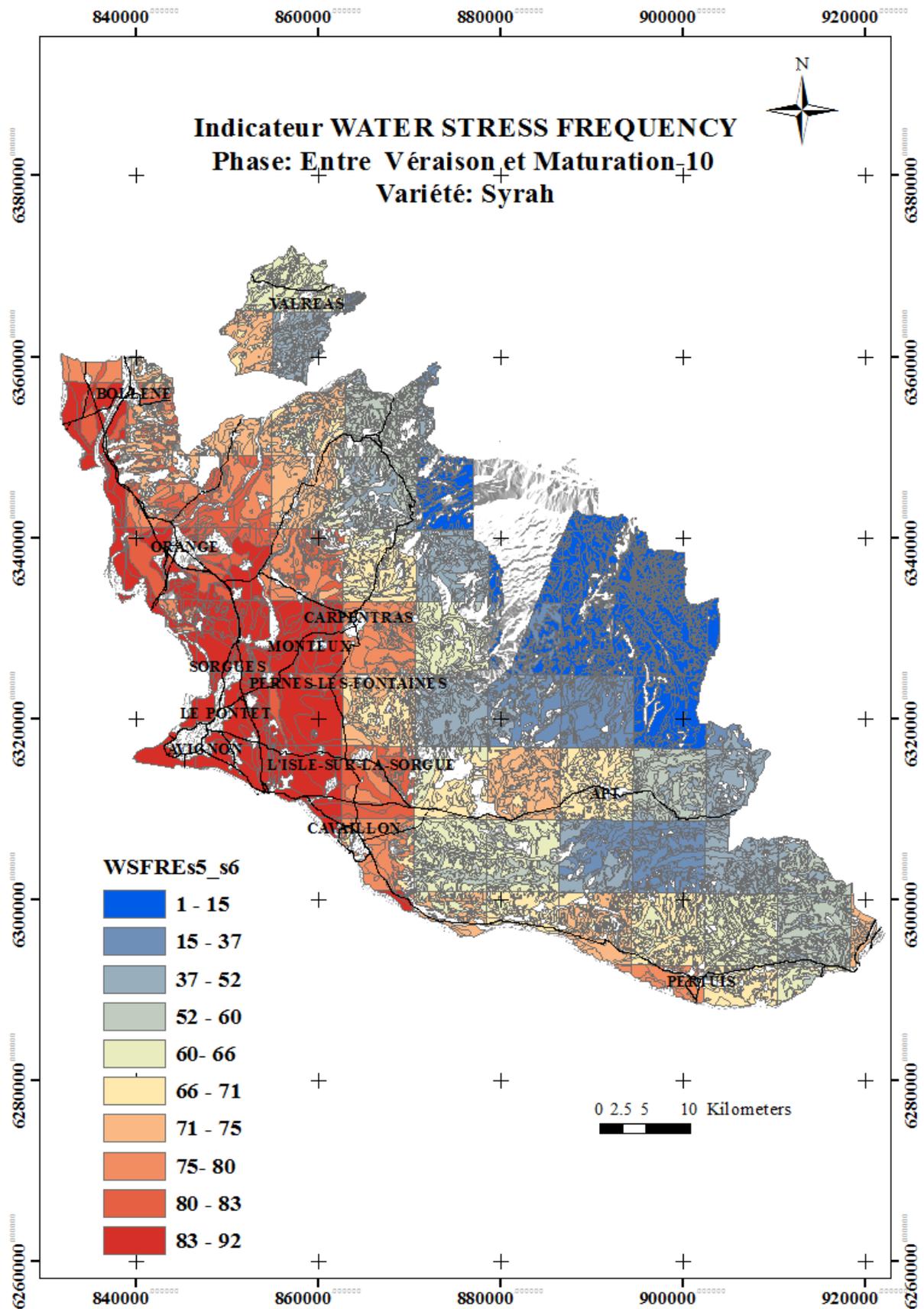
Annexe 4 - Carte de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Sauvignon



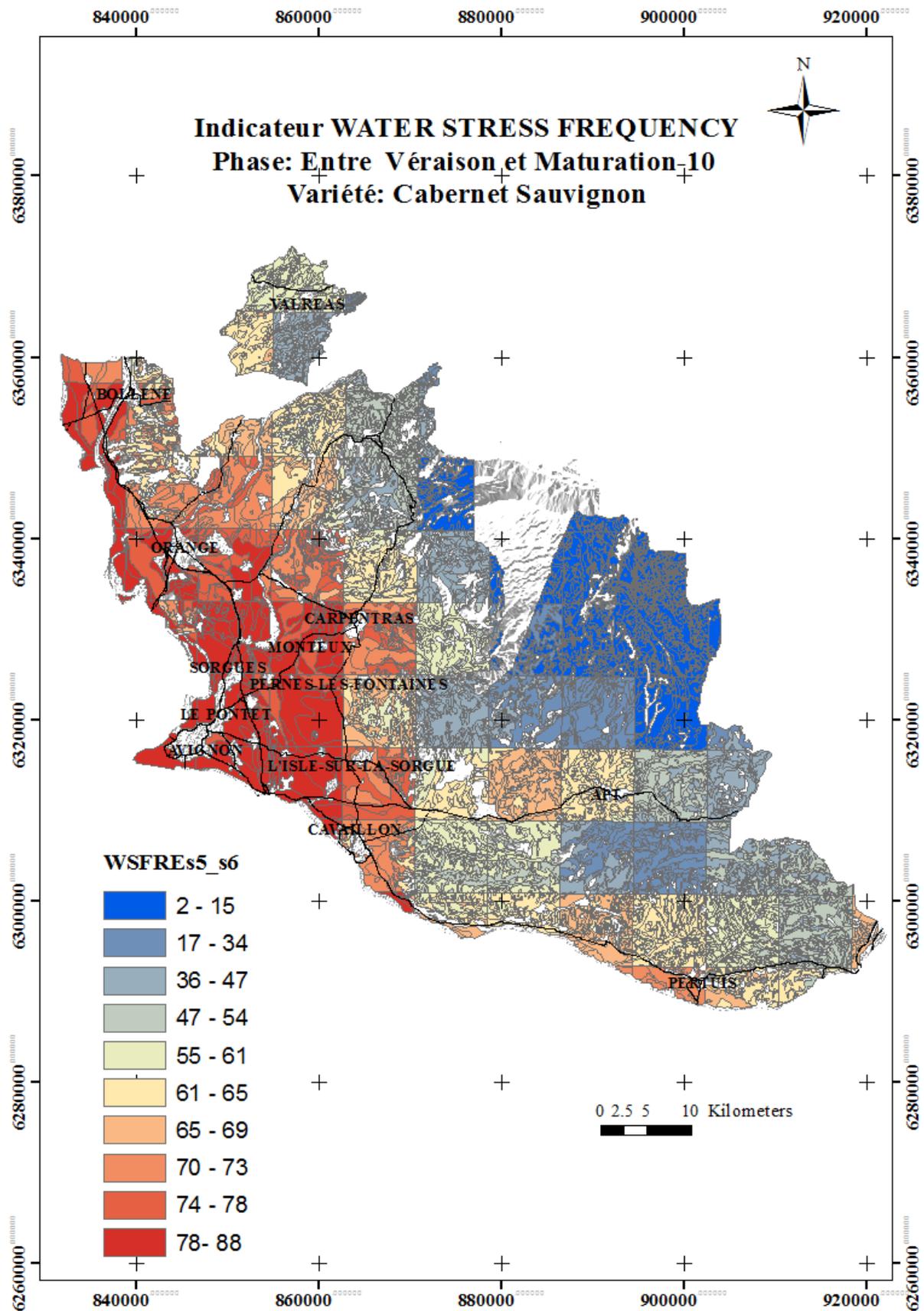
Annexe 5 - Carte de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Sauvignon



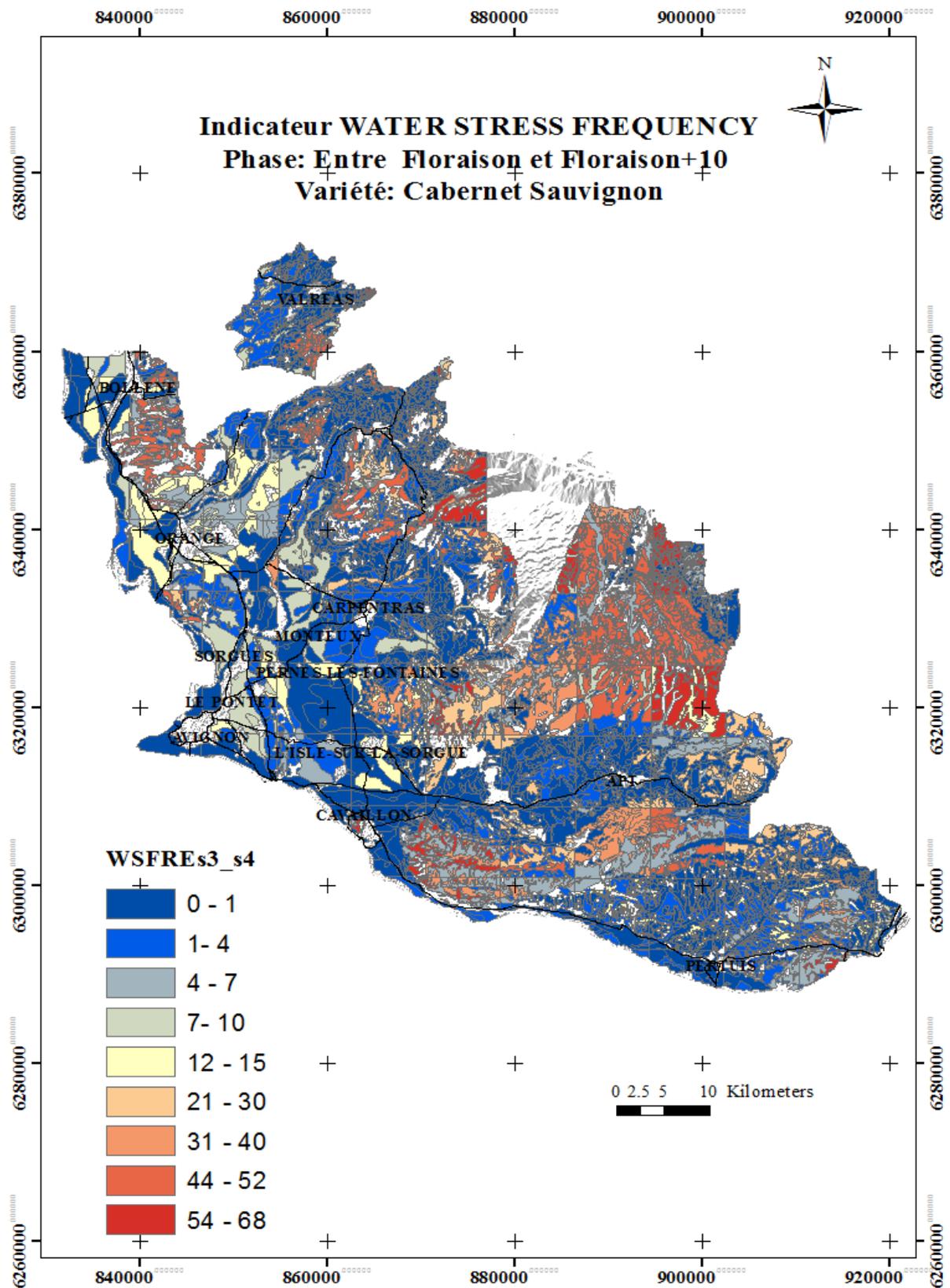
Annexe 6 - Carte de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Syrah



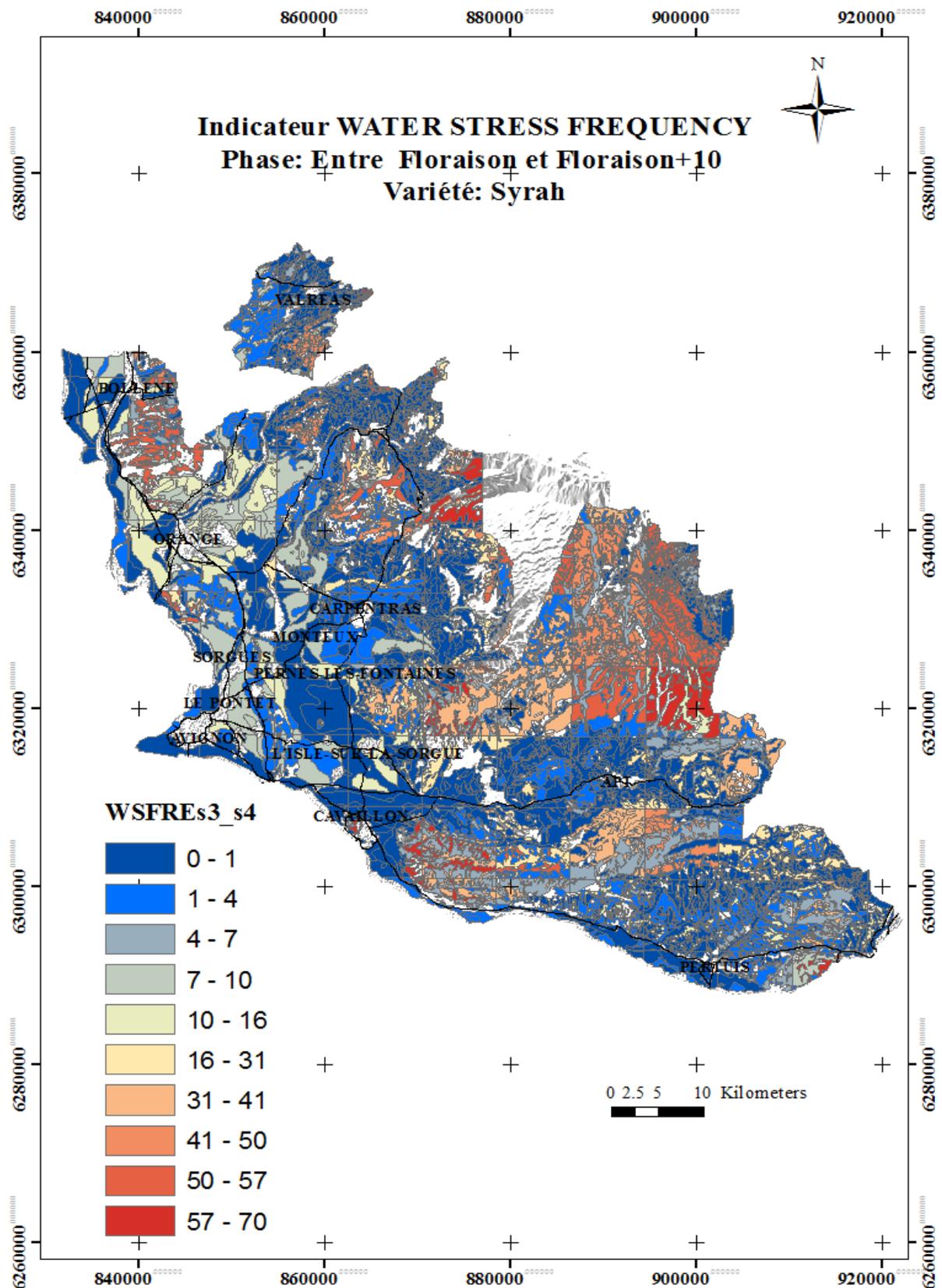
Annexe 7 - Carte de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Sauvignon



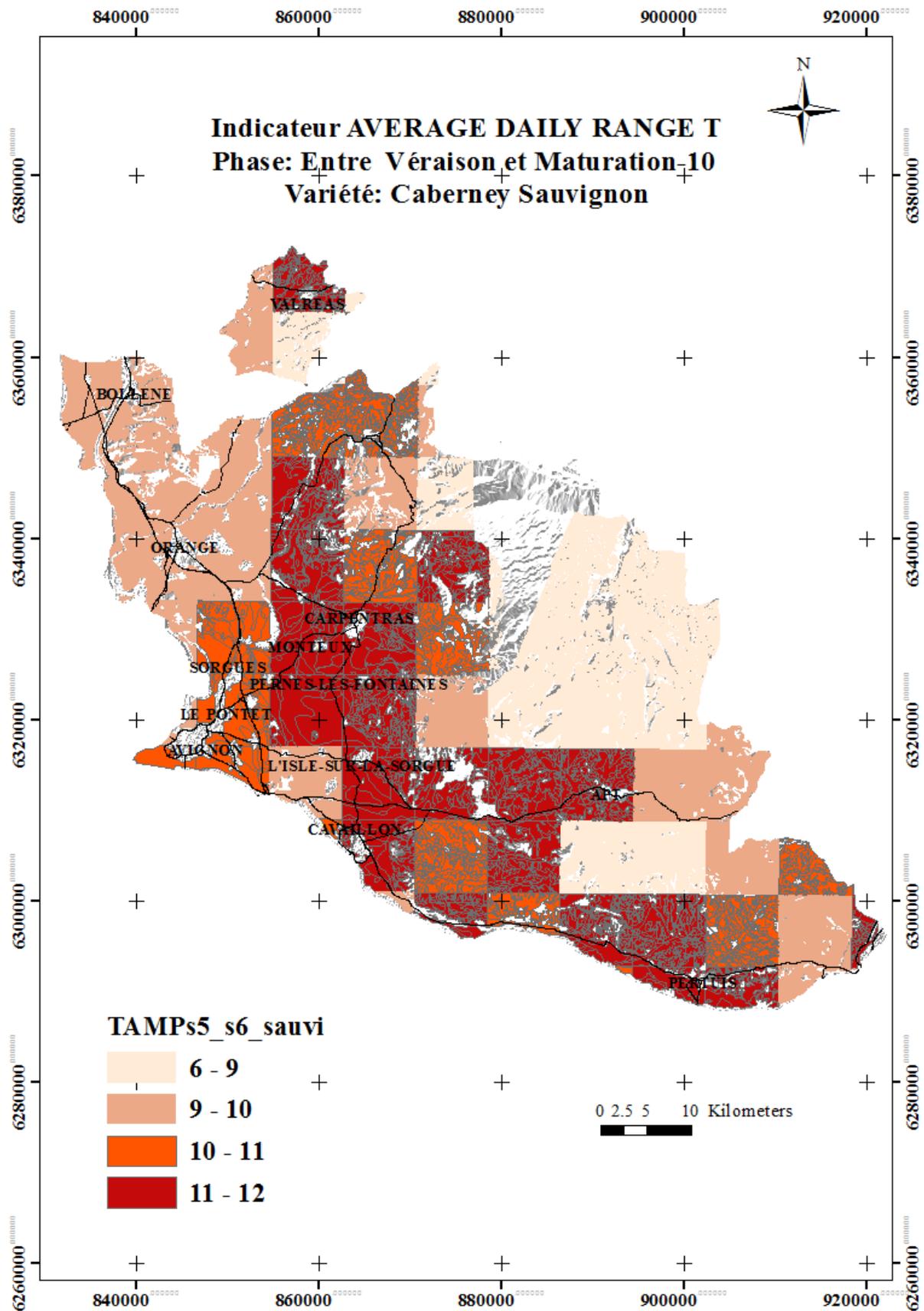
Annexe 8 - Carte de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY entre la phase Floraison et Floraison+10 et pour la variété Sauvignon



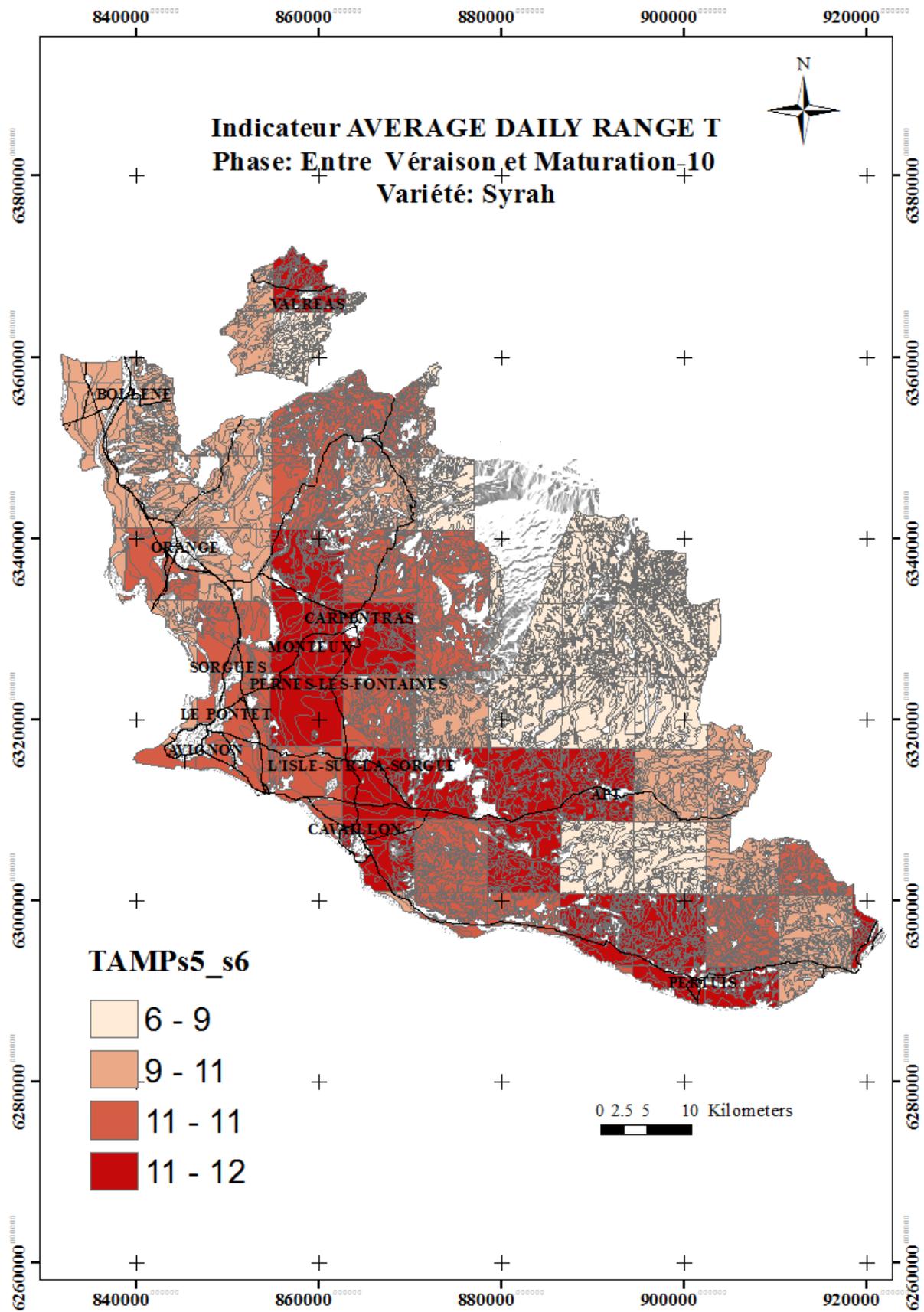
Annexe 9 - Carte de l'indicateur WATER STRESS FREQUENCY entre la phase Floraison et Floraison+10 et pour la variété Syrah



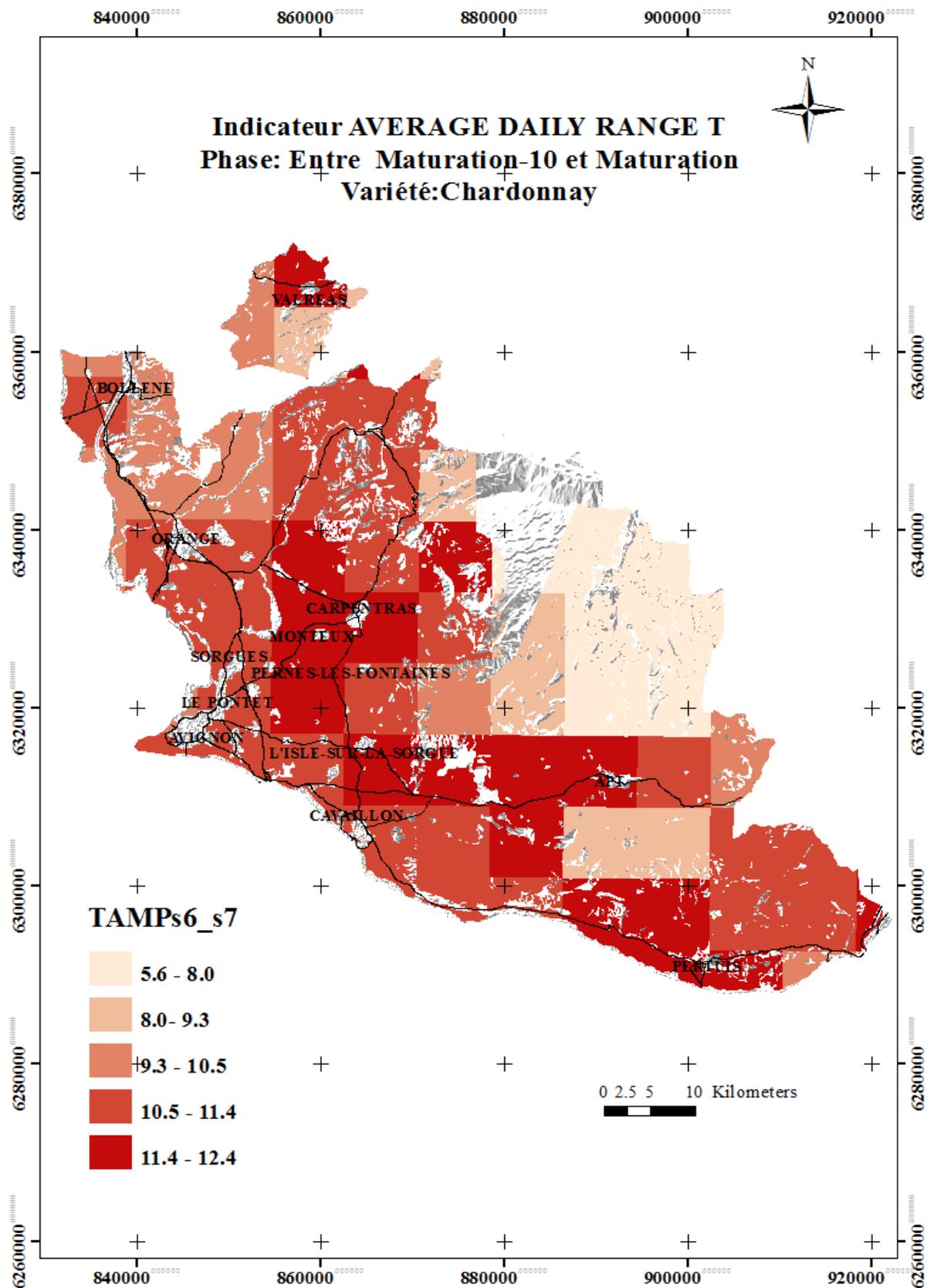
Annexe 10 - Carte de l'indicateur AVERAGE DAILY RANGE T entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Sauvignon



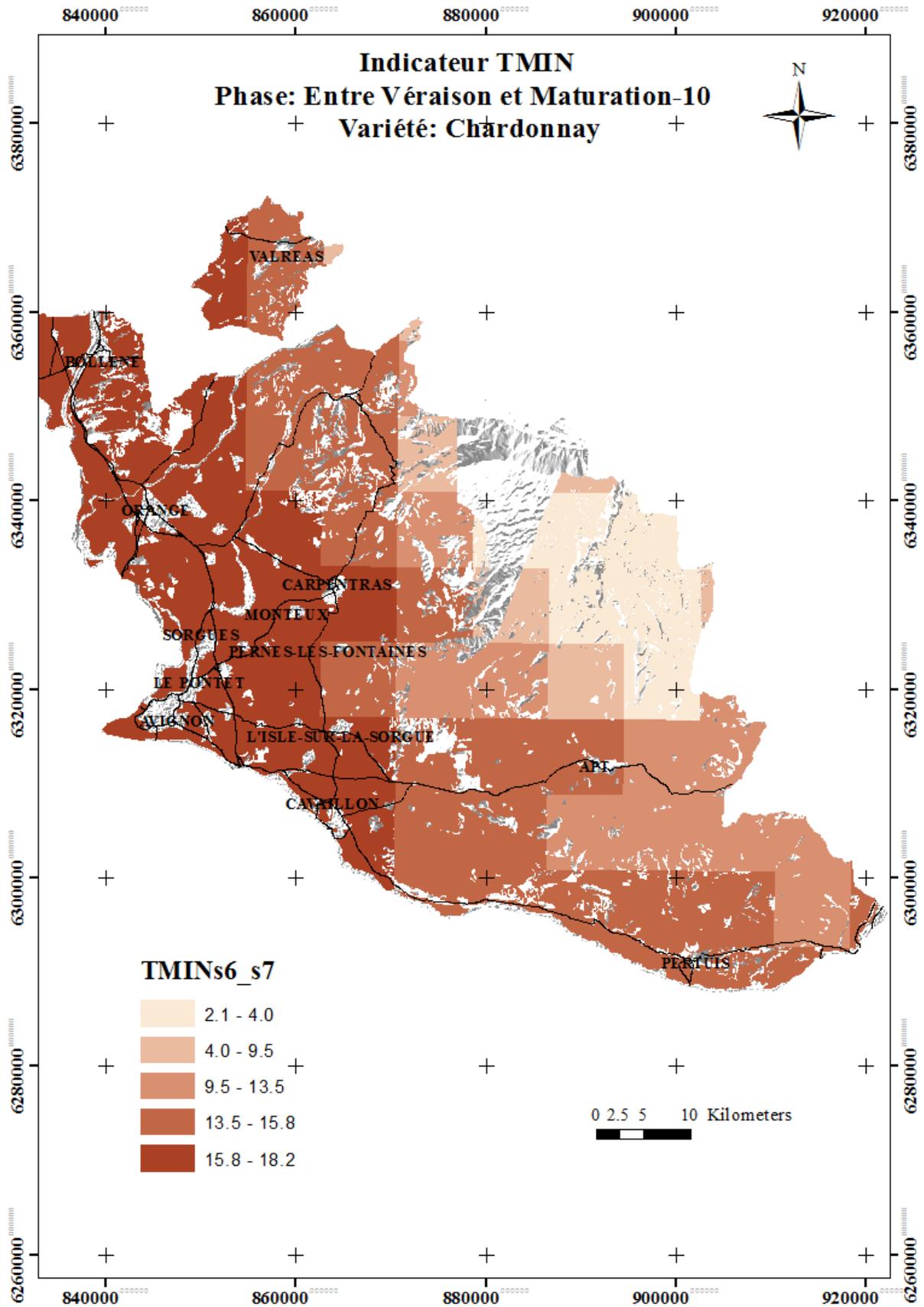
Annexe 11 - Carte de l'indicateur AVERAGE DAILY RANGE T entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Syrah



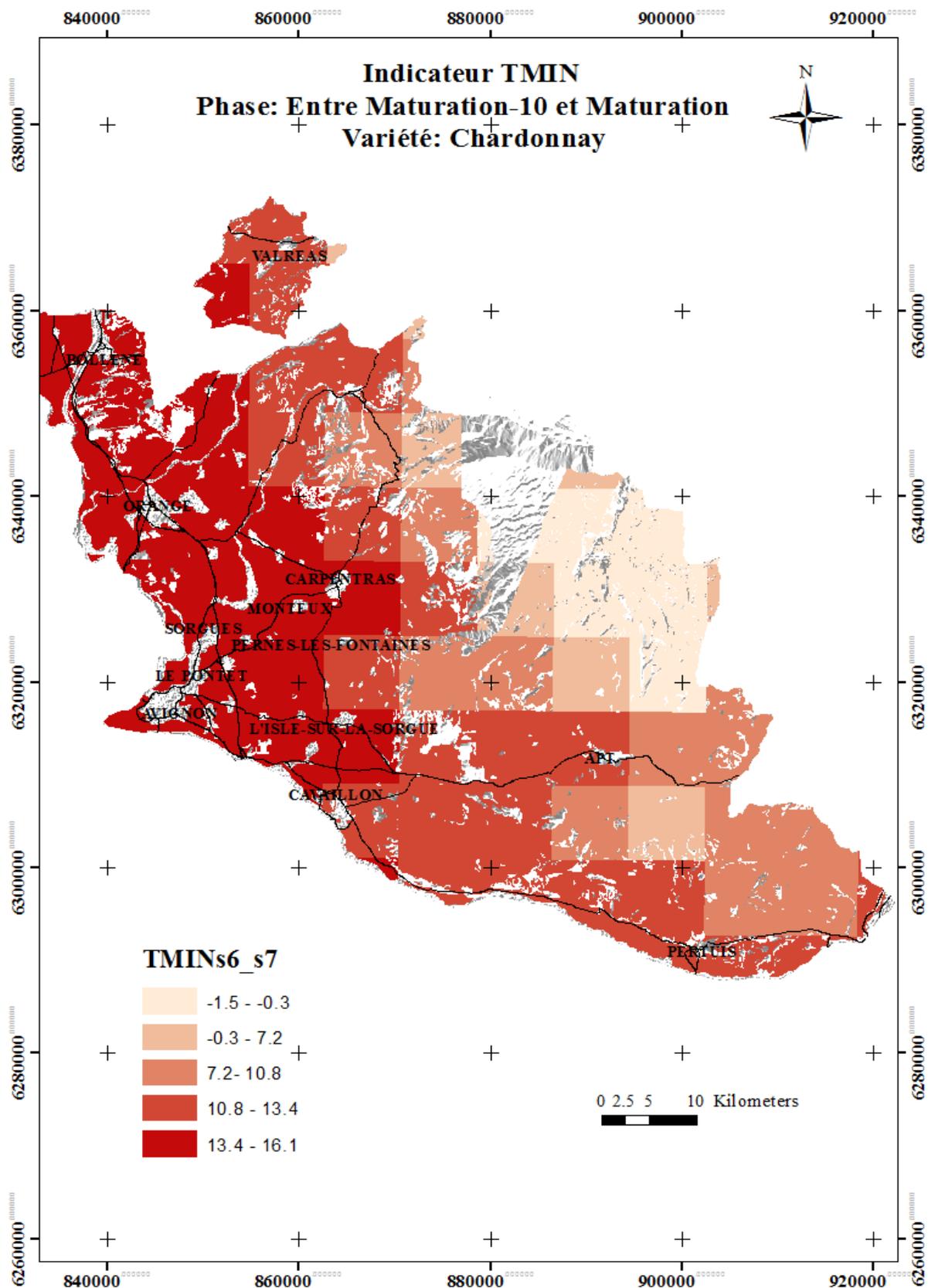
Annexe 12 - Carte de l'indicateur AVERAGE DAILY RANGE T entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Chardonnay



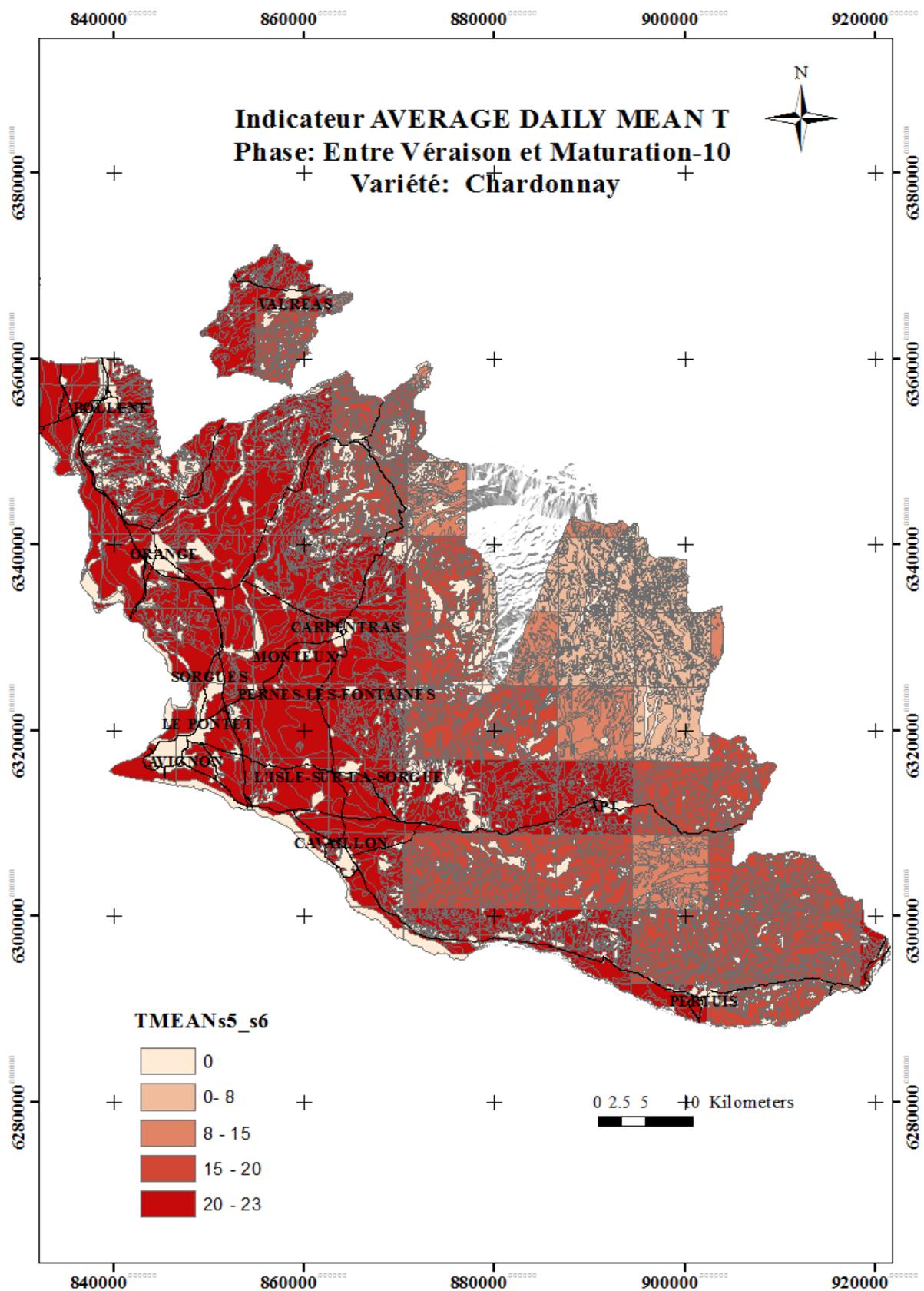
Annexe 13 - Carte de l'indicateur T MIN entre la phase Véraison et Maturation-10



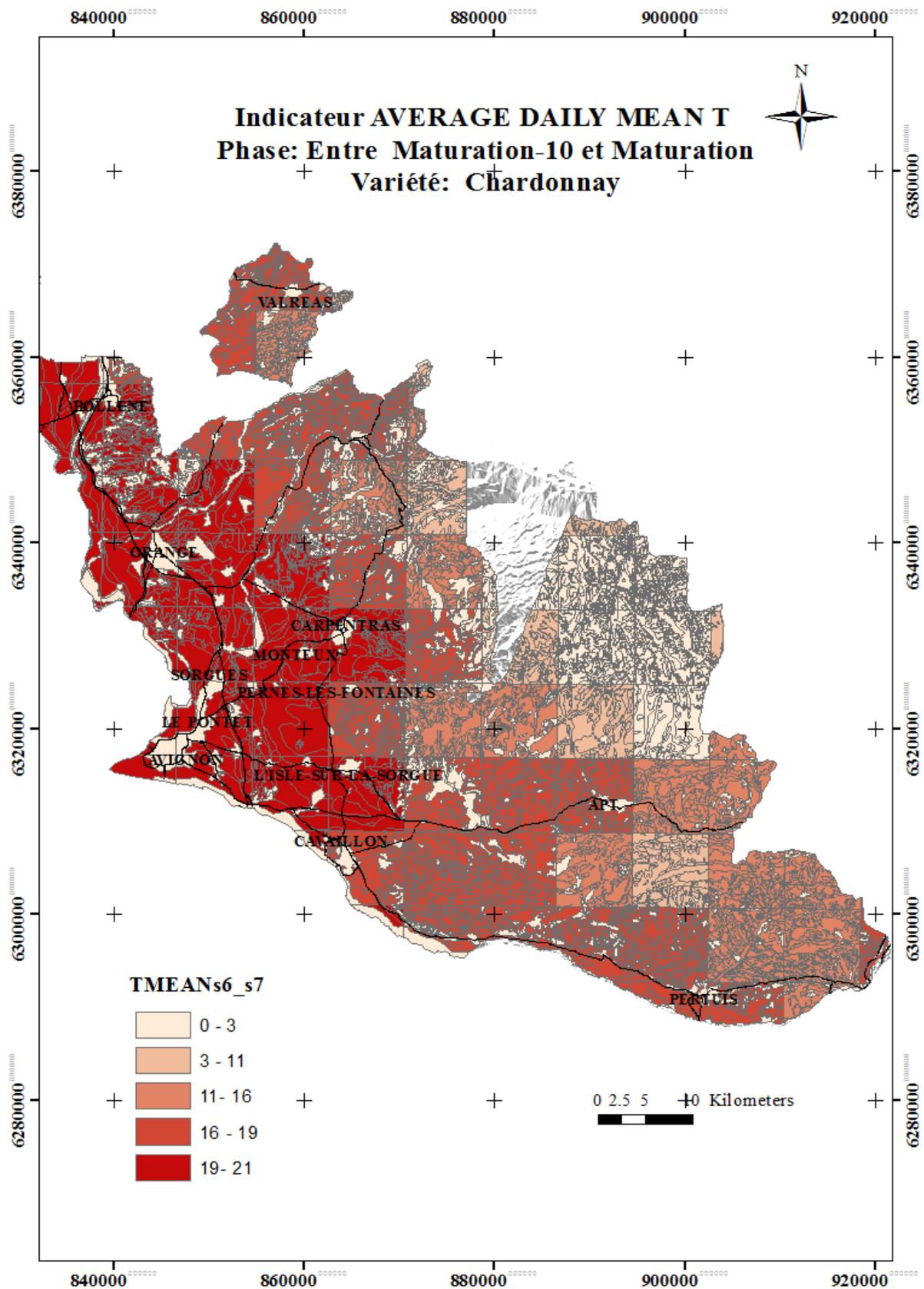
Annexe 14 - Carte de l'indicateur T MIN entre la phase Maturation-10 et Maturation



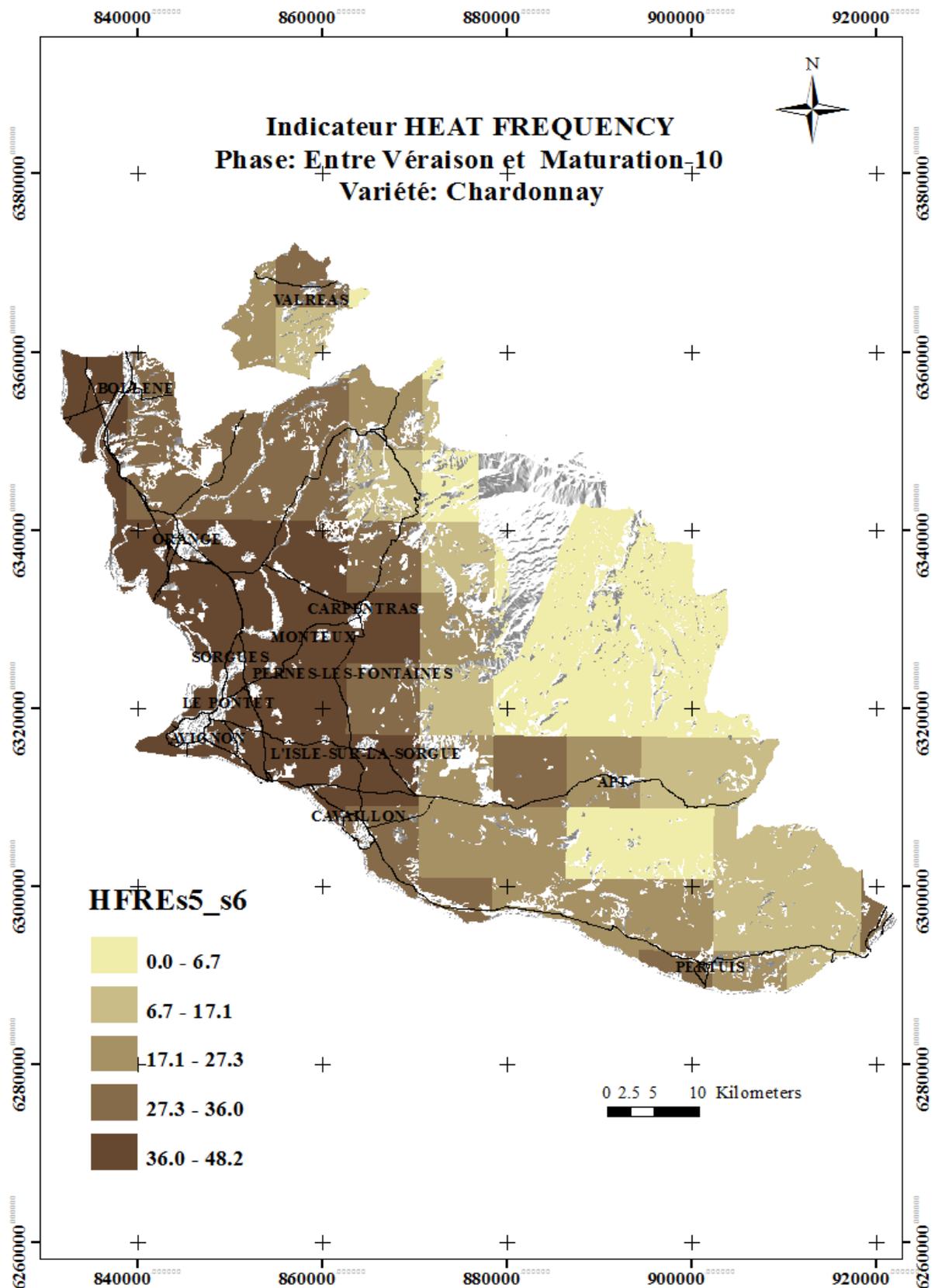
Annexe 15 - Carte de l'indicateur AVERAGE DAILY MEAN T entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Chardonnay



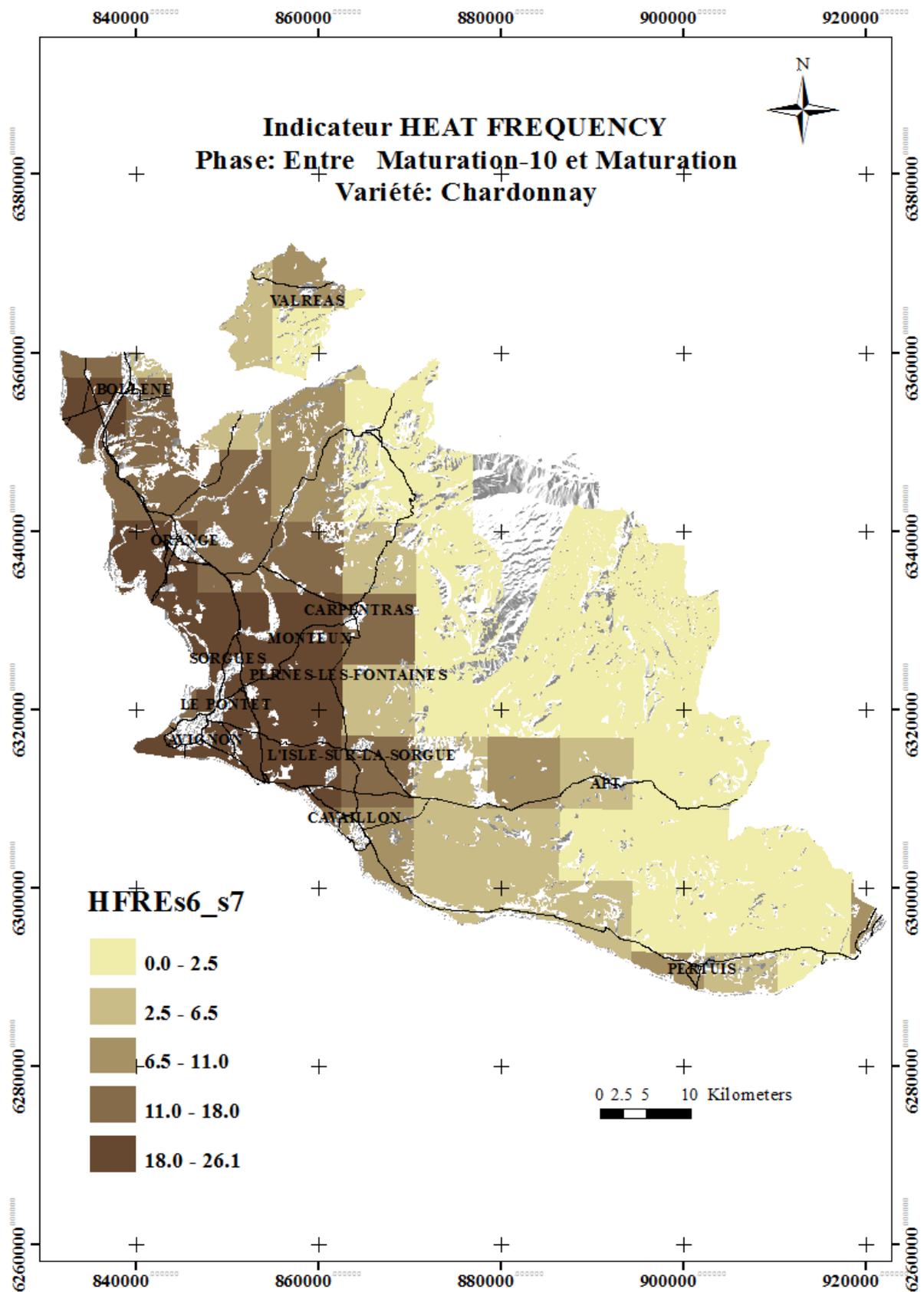
Annexe 16 - Carte de l'indicateur AVERAGE DAILY MEAN T entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Chardonnay



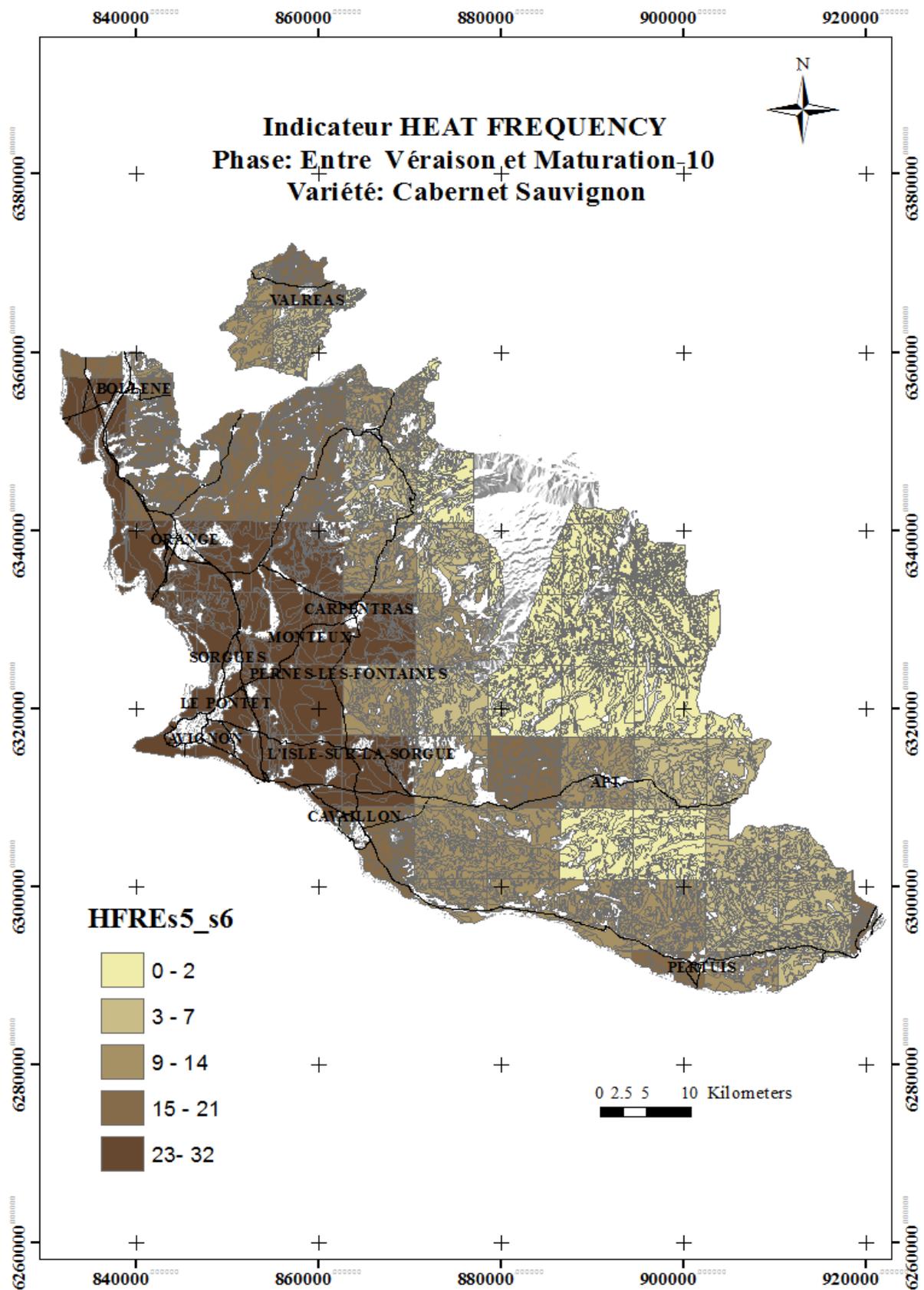
Annexe 17 - Carte de l'indicateur HEAT FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Chardonnay



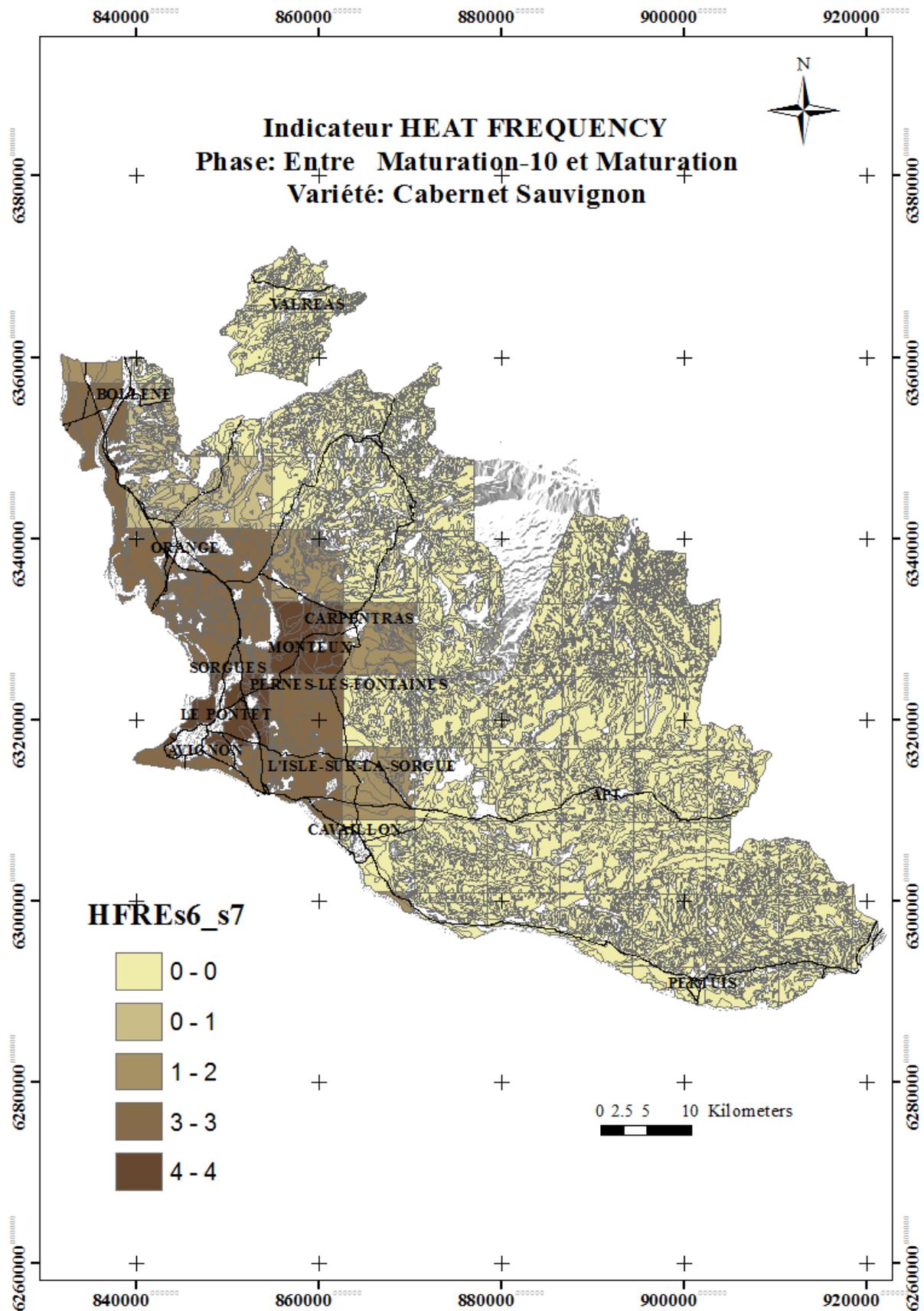
Annexe 18 - Carte de l'indicateur HEAT FREQUENCY entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Chardonnay



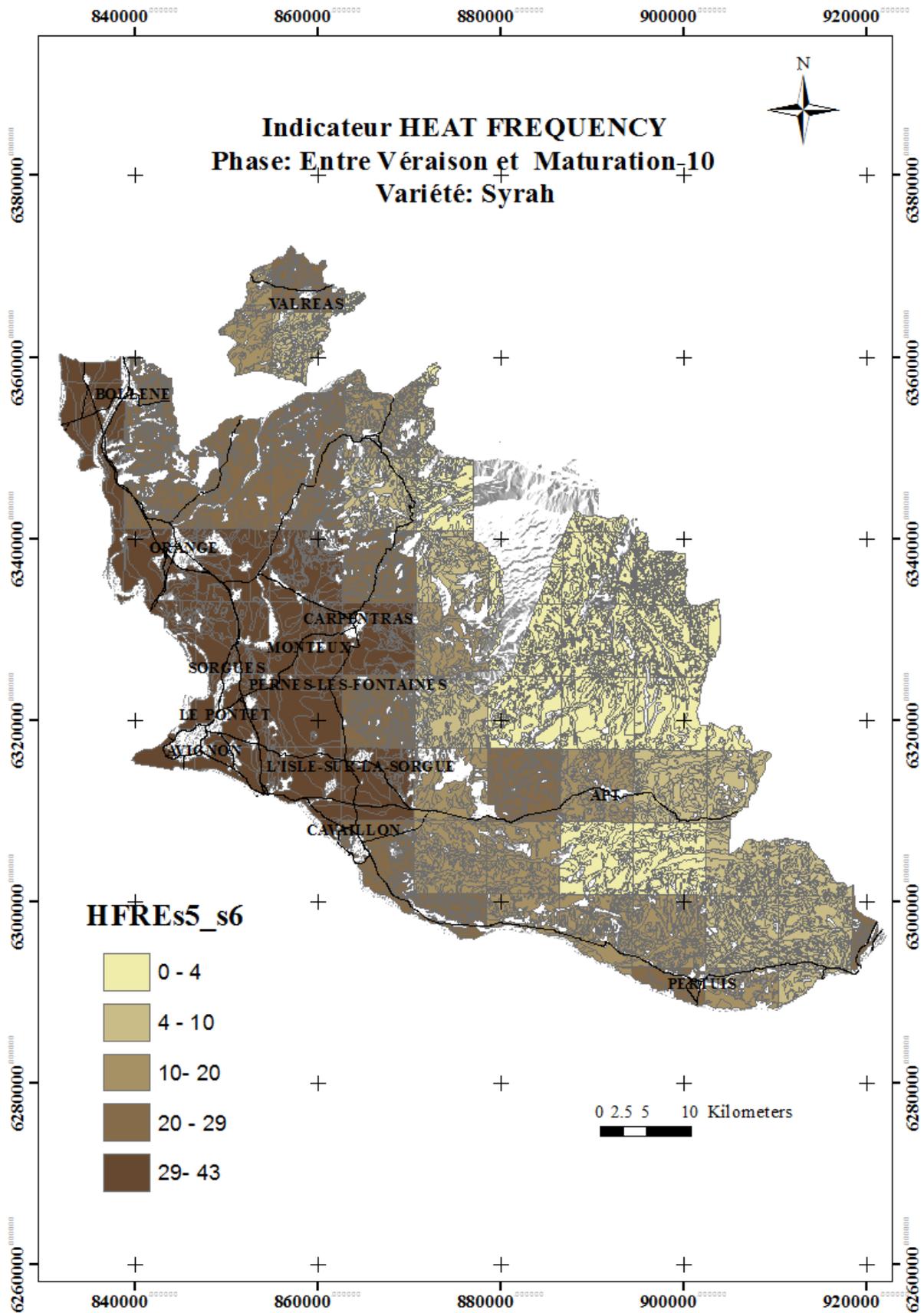
Annexe 19 - Carte de l'indicateur HEAT FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Chardonnay



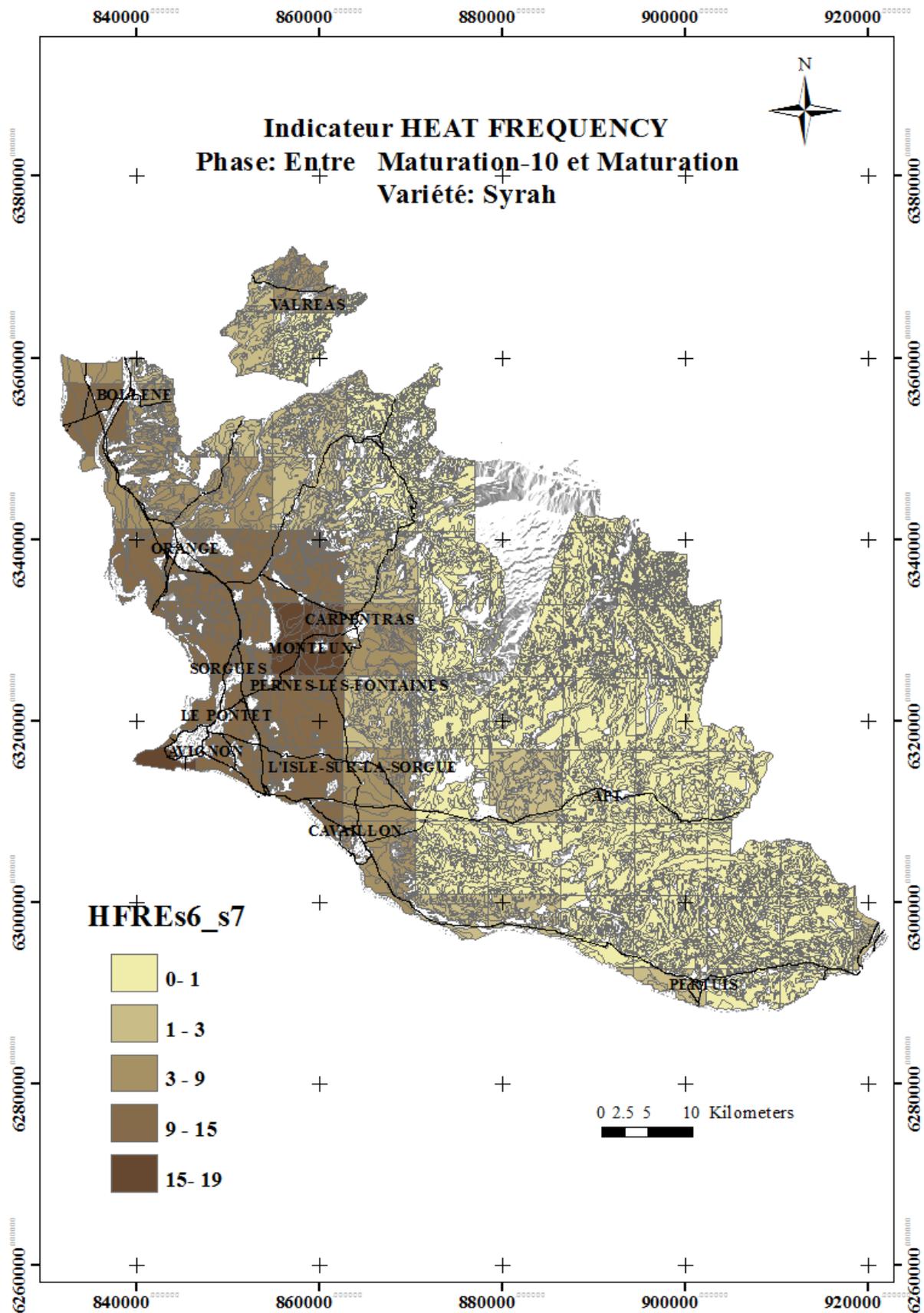
Annexe 20 - Carte de l'indicateur HEAT FREQUENCY entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Sauvignon



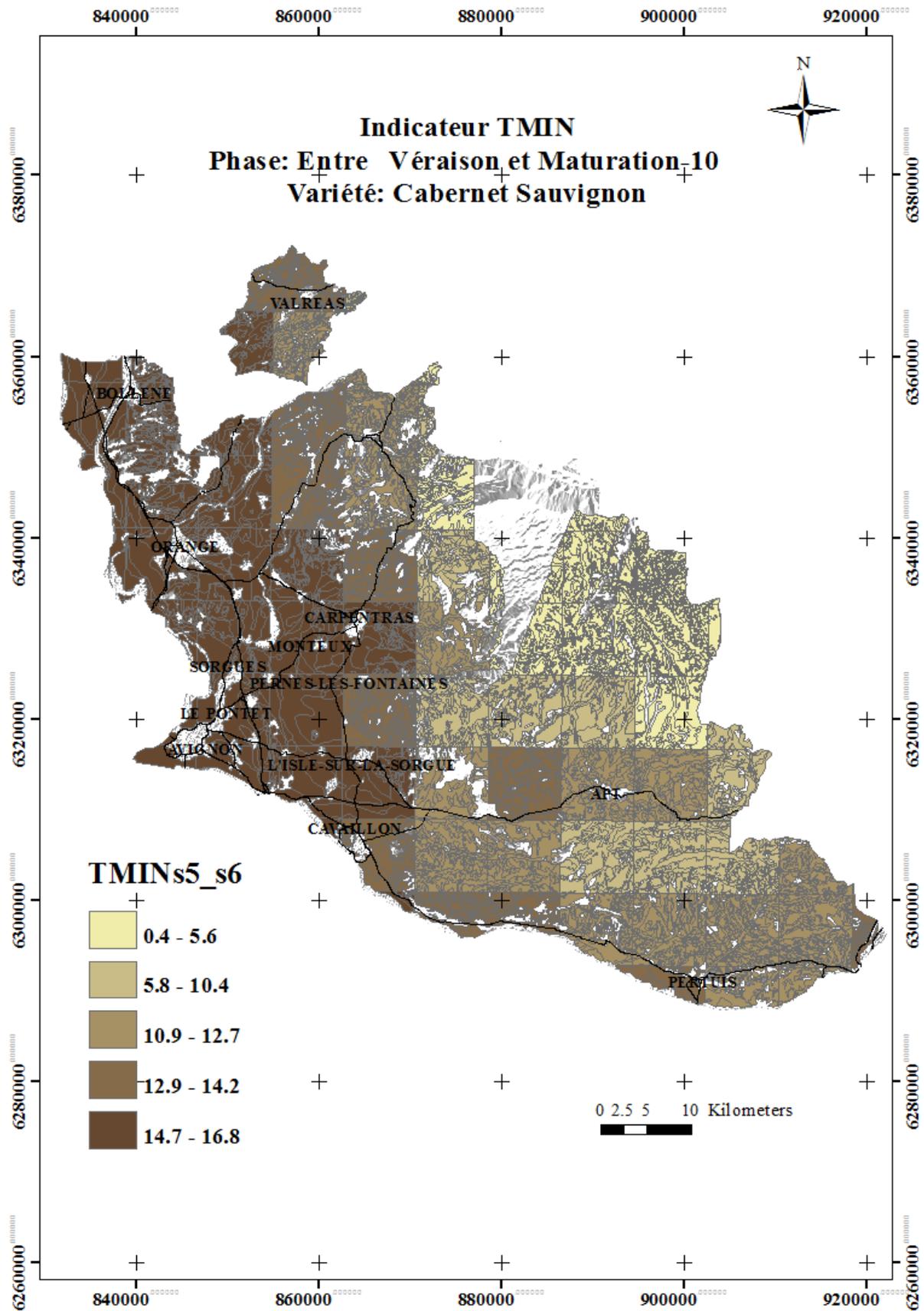
Annexe 21 - Carte de l'indicateur HEAT FREQUENCY entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Syrah



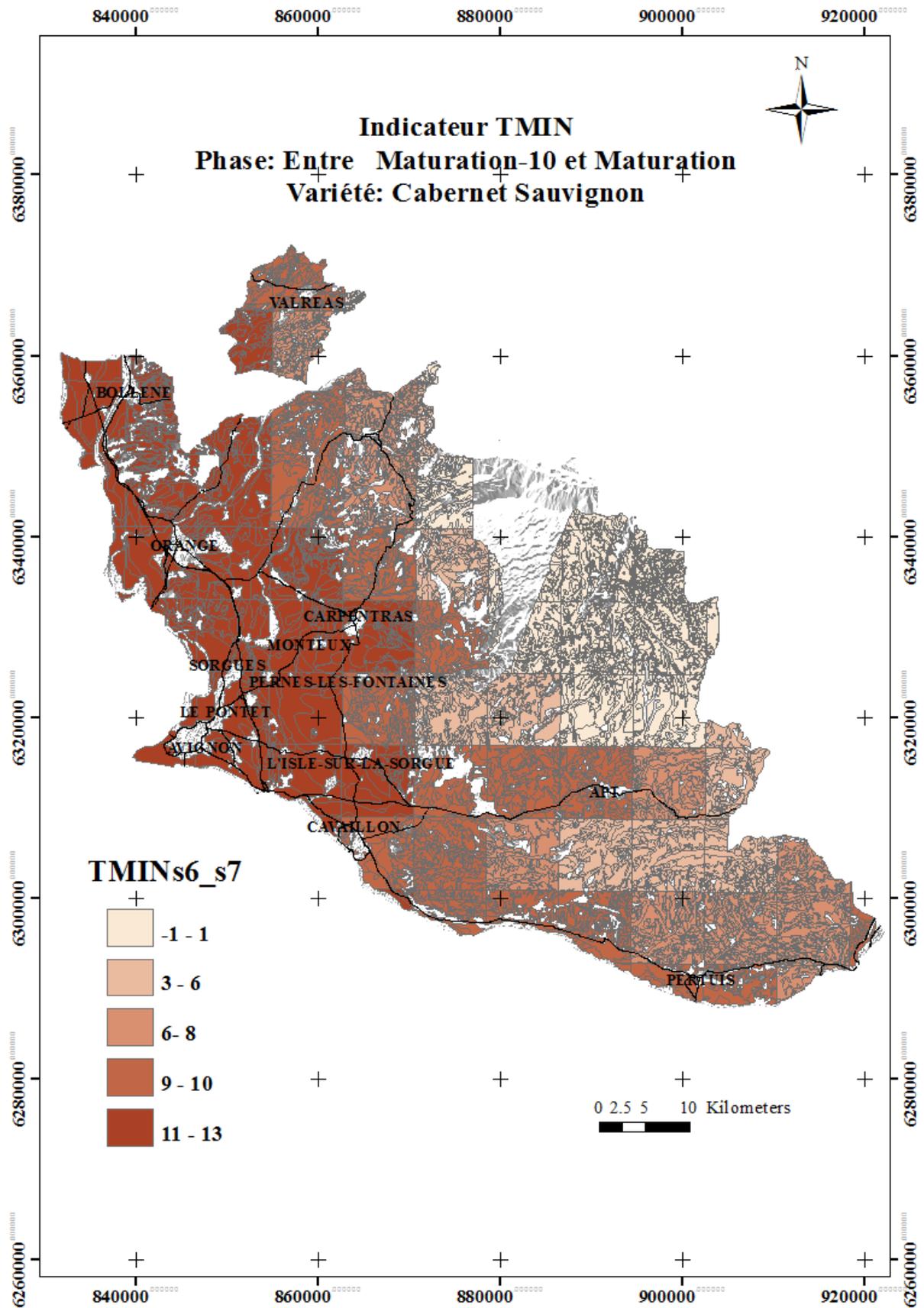
Annexe 22 - Carte de l'indicateur HEAT FREQUENCY entre la phase Maturation-10 et Maturation pour la variété Syrah



Annexe 23 - Carte de l'indicateur T MIN entre la phase Véraison et Maturation-10 pour la variété Sauvignon



Annexe 24 - Carte de l'indicateur T MIN entre la phase Maturation-10 et Maturation



Le mémoire de *Master* du CIHEAM

L'année de Master 2 est composée de deux séquences. La première est constituée de modules d'enseignement théorique et méthodologique, d'applications techniques, et de travaux individuels ou de groupes. La deuxième séquence est consacrée à un stage professionnel ou de recherche, à la rédaction et la soutenance d'un mémoire.

L'objectif du stage est de permettre à l'étudiant d'appliquer les outils théoriques et méthodologiques acquis pour analyser un sujet ou répondre à un questionnement dans un contexte précis. Le mémoire présente et discute les résultats obtenus ainsi que le cadre théorique et la méthodologie utilisée.

La collection *Master* du CIHEAM publie et valorise les meilleurs mémoires des étudiants de Montpellier ayant obtenu la « mention publication » lors de la soutenance. L'objectif de cette collection est de donner l'occasion aux étudiants du pourtour méditerranéen de réaliser une première publication et de faire connaître leurs travaux de recherche.

CIHEAM's Master dissertation

Master 2 training consists of two sequences. The first comprises theoretical and methodological units, technical applications, and individual or group work. The second is devoted to a professional or research internship and to the writing and defence of a dissertation.

The internship aims to provide students with the opportunity to apply the acquired theoretical and methodological tools in order to analyze a topic or answer questions in a specific context. The dissertation is a presentation and discussion of the results obtained, and the theoretical framework and methodology used.

The collection Master of CIHEAM publishes and promotes the best dissertations of students of Montpellier who were awarded the "publishable work" distinction during the defence. The objective of this collection is to provide opportunities for students around the Mediterranean to achieve a first release and publicize their research.

CIHEAM

**Centre International de Hautes Etudes
Agronomiques Méditerranéennes**

***International Centre for Advanced
Mediterranean Agronomic Studies***

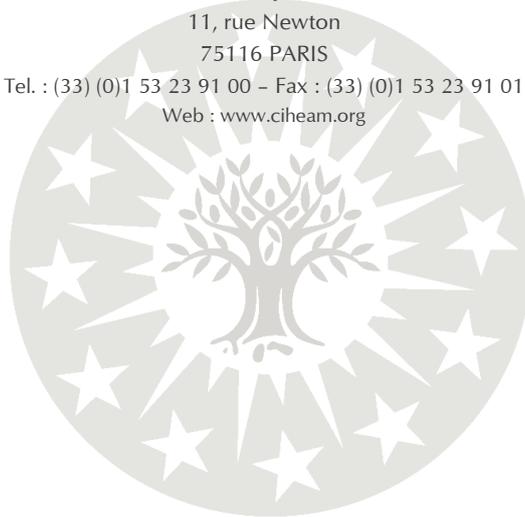
Secrétariat Général / *General Secretary*

11, rue Newton

75116 PARIS

Tel. : (33) (0)1 53 23 91 00 – Fax : (33) (0)1 53 23 91 01

Web : www.ciheam.org



**Instituts Agronomiques Méditerranéens
Mediterranean Agronomic Institutes
(IAM)**

Bari - Chania - Montpellier – Zaragoza

IAM - Bari

Via Ceglie 9

70010 Valenzano, Bari, Italy

Tel. : (39) 080 4606111 – Fax : (39) 080 4606206

Web : www.iamb.ciheam.org

IAM - Chania

Alsyllo Agrokepio, 1 Makedonias str

73100 Chania, Crete, Greece

Tel. : (30) 28210 35000 – Fax : (30) 28210 35001

Web : www.maic.ciheam.org

IAM - Montpellier

3191, Route de Mende

34093 Montpellier Cedex 5, France

Tel. : (33) (0)4 67 04 60 00 – Fax : (33) (0)4 67 54 25 27

Web : www.iamm.ciheam.org

IAM - Zaragoza

Av. Montañana 1005

50059 Zaragoza, Spain

Tel. : (34) 976 71 6000 – Fax : (34) 976 71 6001

Web : www.iamz.ciheam.org

El Amraoui M. (2016). *Les indicateurs écoclimatiques pour l'analyse de la faisabilité des cultures : cas de la vigne en Vaucluse.* Montpellier (France) : CIHEAM-IAMM. 93 p. (Master, n. 151).

Résumé

Les conditions climatiques dans la région méditerranéenne jouent un rôle fondamental dans la faisabilité des cultures et surtout pour la vigne. Le climat influence largement sa croissance et son développement, ainsi que sa qualité et son rendement. L'évaluation de la manière dont le climat est favorable pour la culture est très utile pour pouvoir proposer et appliquer des stratégies d'adaptation afin d'améliorer les potentialités de la viticulture. Des indicateurs éco-climatiques ont été largement utilisés à cette fin. Le présent travail a pour objectif de mettre au point la base de données biophysiques existantes, sol et climat en particulier, et de spatialiser des indicateurs de faisabilité et de risque de la culture de la vigne pour le département du Vaucluse. L'étude a été réalisée sur une base de données climatique de 50 ans, soit de 1961 à 2011, dans différentes mailles du département en considérant trois cépages comme études de cas. L'approche utilisée a consisté à appliquer une méthode de faisabilité basée sur des indicateurs éco-climatiques calculés sur des périodes phénologiques. Une fois spatialisés, ces indicateurs vont nous permettre d'évaluer les effets du climat sur les processus particuliers de la plante et du coût, afin de mieux comprendre les déterminants biophysiques de la distribution spatiale des cultures et les mettre en relation avec les changements d'usage des sols viticoles. Ce document permet d'une part, une identification des types de risque pédoclimatique dans les différentes zones du département et d'autre part, une reconnaissance de la distribution spatiale des indicateurs écoclimatiques qui serviront par la suite à une étude de faisabilité de cette culture.

Abstract

The climatic conditions in the Mediterranean region play a key role in the feasibility of crops and especially for growing grapes. The climate largely influences its growth and development as well as its quality and performance. The evaluation of the way the climate is favorable for cultivation is very useful to propose and implement adaptation strategies in order to improve the potential of viticulture. Eco-climatic indicators have been widely used for this purpose. The present work aims to develop the existing biophysical database, in particular soil and climate data and to spatialize indicators of feasibility and risk of growing grapes in Vaucluse. The study was performed on a climate database of 50 years, from 1969 to 2010 in different department grids considering three varieties as case studies. The approach was to apply a method based on eco-climatic indicators for feasibility assessment calculated on phenological periods. Once they were spatialized, these indicators will allow us to assess the effects of climate on individual processes of the plant and cost, to better understand the biophysical determinants of the spatial distribution of crops and put them in relation with the changes in use of vineyard soils (land use, level of intensity of use ...). This document allows on one hand, an identification of the types of soil and climate risk in different areas of the department and on the other hand, the recognition of the spatial distribution of eco-climatic indicators as the result of a feasibility study of this culture.