



## Compte-rendu final

### TERADCLIM

APR 2010

Coordinateur du projet : Hervé Quénol, CR1 CNRS,  
UMR6554 LETG-Rennes

# SOMMAIRE

## A. IDENTIFICATION

## B. IDENTIFICATION

### B1. PREAMBULE

### B2. RAPPEL DU PROJET GICC-TERADCLIM

### B3. DESCRIPTION DES TRAVAUX EFFECTUES

#### ***PARTIE 1 : ACQUISITION DES DONNEES METEOROLOGIQUES ET AGRONOMIQUES A L'ECHELLE DES VIGNOBLES EXPERIMENTAUX***

##### *1.1 Méthodologie*

##### *1.2 Applications : Evolution des températures et des indices bioclimatiques à l'échelle du Val de Loire*

#### ***PARTIE 2 : MODELISATION CLIMATIQUE A L'ECHELLE DES TERROIRS VITICOLES ET INTEGRATION DES SCENARIOS IPCC AVEC NOTAMMENT LA MISE EN RELATION ENTRE LA MODELISATION ATMOSPHERIQUE (EX : RAMS, WRF, ..) ET LA MODELISATION STATISTIQUE***

##### *2.1 Contexte et méthodologie*

##### *2.2 Utilisation de la modélisation atmosphérique méso-échelle en milieu viticole*

##### *2.2 L'interpolation spatiale de données climatiques en milieu viticole*

##### *2.3 Application aux vignobles du Val de Loire*

#### ***PARTIE 3 : INTEGRATION DES SCENARIOS GIEC DANS LE MODELE MESO-ECHELLE RAMS***

##### *3.1 Méthodologie*

##### *3.2 Résultats de la modélisation numérique*

##### *3.3 Résultats des simulations méso-échelle par rapport aux sorties ARPEGE\_RETIC*

#### ***PARTIE 4 : SCENARIOS D'ADAPTATION DES VINS DE TERROIR AU CHANGEMENT CLIMATIQUE A UNE ECHELLE DE TEMPS DE 15-30 ANS AVEC L'UTILISATION D'UNE PLATEFORME MULTI-AGENTS (SMA).***

##### *4.1 Elaboration d'une base de connaissance*

##### *4.2 Construction du modèle multi-agents*

##### *4.3 Simulations*

#### ***PARTIE 5 : TRANSFERT DE L'INFORMATION AUPRES DE LA PROFESSION VITICOLE ET SENSIBILISATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE (EX : PROPOSITION D'ADAPTATION A L'ECHELLE DE L'EXPLOITATION VITICOLE ; ATELIERS PARTICIPATIFS CHERCHEURS/ACTEURS, ...).***

##### *5.1 Etude sur la sensibilité et l'adaptabilité des pratiques viticoles : Réponses des vigneronns à la variabilité climatique*

##### *5.2 Extrêmes climatiques et changement climatique dans la région viticole de Mendoza (Argentine)*

#### **B4. BILAN GENERAL ET PERSPECTIVES**

### **C. IMPACT DU PROJET DEPUIS LE DEBUT**

#### **C1. INDICATEURS D'IMPACT**

#### **C2. LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS**

#### **C3. LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION**

Rapport Final

## A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	TERADCLIM
Titre du projet	Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles
Coordinateur du projet (société/organisme)	Hervé Quénol, CR1 CNRS, UMR6554 LETG-Rennes
Date de début du projet	2011
Date de fin du projet	2014 (3 années)
Site web du projet, le cas échéant	<a href="http://terviclim.in2p3.fr/">http://terviclim.in2p3.fr/</a>

Rédacteurs de ce rapport : Hervé Quénol, Valérie Bonnardot, Sylvie Cautenet, Cyril Tissot, Gérard Barbeau, Malika Madelin	
Civilité, prénom, nom	Mr Hervé Quénol
Téléphone	06 19 21 87 81 ou 02 99 14 20 90
Adresse électronique	Herve.quenol@uhb.fr
Date de rédaction	31/01/2014
Période faisant l'objet du rapport d'activité	01/2011-12/2013

## B RAPPORT

### B.1 PREAMBULE

Le projet GICC-TERADCLIM (2011-2013) s'inscrit dans la continuité du programme ANR-TERVICLIM (2008-2012). Par conséquent, ce rapport (comme le rapport mi-parcours) comprend certains résultats de l'ANR-TERVICLIM. Ceux-ci concernent principalement l'analyse des données issues des réseaux de capteurs météorologiques installés dans les terroirs viticoles ainsi que les premières modélisations numériques réalisées avec RAMS.

Dans le programme GICC-TERADCLIM, nous avons poursuivi ces analyses et développé les modèles climatiques adaptés à l'échelle des terroirs viticoles notamment en y intégrant les modèles du changement climatique. L'automatisation des modèles statistiques par régressions multiple a été réalisée et validée sur plusieurs vignobles expérimentaux.

Concernant la désagrégation des données issues des sorties de modèles globaux, les données simulées par ARPEGE et désagrégées par le modèle atmosphérique méso-échelle RAMS ont été comparées aux données régionalisées RETIC. Les résultats ont montré que quelle que soit la méthode de transfert d'échelle utilisée (désagrégation dynamique ou statistique), les 2 distributions (RAMS et RETIC) sont statistiquement significatives et plus « réalistes » que la distribution des températures obtenues à basse résolution.

La question de l'adaptation de la viticulture de terroirs au changement climatique et principalement par les pratiques culturales est abordée par la mise en place d'un modèle multi-agent.

Le transfert de l'information auprès de la profession viticole et leur sensibilisation au changement climatique a été abordée par l'intermédiaire d'enquêtes et d'ateliers participatifs en collaboration avec les viticulteurs des sites expérimentaux (Val de Loire, Province de Mendoza).

Depuis 2013, ces travaux de recherches, sur l'impact du changement climatique sur la viticulture, se poursuivent dans le cadre du méta programme ACCAF-INRA LACCAVE (dirigé par N. Ollat et J.M. Touzard).

### B.2 RAPPEL DU PROJET GICC-TERADCLIM

Les nombreuses interrogations posées par le changement climatique engendrent une multitude de questions sur le fonctionnement des géosystèmes aux échelles locales. Un changement global du climat aura obligatoirement des répercussions sur le climat local et sur les terroirs viticoles. Dans ce contexte, les impacts attendus d'un éventuel changement climatique posent un certain nombre de questions, ne serait-ce que pour améliorer l'adaptation.

Dans un contexte d'intensification des concurrences entre les pays producteurs de vins, les viticulteurs des pays traditionnels se défendent en mettant en valeur la spécificité des *terroirs*, définis en partie par les

climats locaux. La notion de terroir est, pour le viticulteur, un outil de commercialisation car il permet d'apporter une spécificité et une identité au vin. Les professionnels viticoles sont alors demandeurs d'outils et de techniques scientifiques pour évaluer les potentialités agroclimatiques actuelles et futures, notamment à travers une meilleure connaissance des variations locales du climat afin d'adapter suffisamment tôt leurs pratiques culturales. L'évaluation du changement climatique adapté à l'échelle du terroir (échelles fines) est donc primordiale dans l'optique de la mise en place d'une politique raisonnée d'adaptation aux modifications du climat.

Les approches de ces phénomènes à partir des modèles de circulation générale (MCG) ne sont pas adaptées aux échelles fines et, de ce fait, apportent des résultats trop approximatifs. Même si de réels progrès ont été réalisés ces dernières années au niveau de la modélisation climatique régionale, aucun modèle utilisé dans un cadre opérationnel ne permet de faire une simulation du climat aux échelles locales (quelques dizaines de mètres). C'est donc à une échelle spatiale plus fine, en tenant compte des caractéristiques de surface et des capacités matérielles des viticulteurs, qu'il sera possible d'évaluer les conséquences imputables au changement climatique.

Dans ce contexte, le projet GICC-TERADCLIM a pour objectif de mettre en place une méthodologie de modélisation spatiale du climat adaptée aux échelles fines afin d'apporter des réponses aux conséquences futures du changement climatique en procédant à une simulation adaptée. Pour répondre à cet objectif, ce projet s'articule en 4 parties :

**PARTIE 1 : Acquisition des données météorologiques et agronomiques à l'échelle des vignobles expérimentaux;**

**PARTIE 2 : Modélisation climatique à l'échelle des terroirs viticoles avec notamment la mise en relation entre la modélisation atmosphérique (ex : RAMS, WRF, ..) et la modélisation statistique ;**

**PARTIE 3 : Intégration des scénarios du GIEC ;**

**PARTIE 4 : Scénarios d'adaptation des vins de terroir au changement climatique à une échelle de temps de 15-30 ans avec l'utilisation d'une plateforme Multi-agents (SMA) ;**

**PARTIE 5 : Transfert de l'information auprès de la profession viticole et sensibilisation au changement climatique (ex : proposition d'adaptation à l'échelle de l'exploitation viticole ; ateliers participatifs chercheurs/acteurs, ...).**

Pour réaliser ce projet, à l'interface de plusieurs disciplines et plusieurs techniques (Science de la vigne, climatologie, statistique, modèles numériques) en passant par les acteurs, nous sommes, de fait, amenés à faire appel aux savoir et aux savoir-faire d'autres disciplines et des professionnels viticoles.

### **B.3 DESCRIPTION DES TRAVAUX EFFECTUES**

Notre démarche scientifique vise à mettre en place une méthodologie reposant sur des observations climatiques et agronomiques *in situ* et sur de la modélisation spatiale du climat, permettant d'évaluer la variabilité spatiale des paramètres atmosphériques à l'échelle d'un terroir (valeurs moyennes et extrêmes climatiques). Confrontée à des observations agronomiques (ex : stress hydrique, phénologie, taux de sucre, taux d'alcool, ...), l'étude météorologique permet de déterminer le climat spécifique d'un terroir. En comblant le manque de données aux échelles fines, ce travail permet d'affiner les connaissances sur les modifications climatiques qui pourront apparaître dans les terroirs viticoles et donc, d'améliorer les estimations sur les possibles impacts économiques. Cette méthodologie est développée et appliquée à plusieurs vignobles de renommée internationale, vignobles pour lesquels les caractéristiques climatiques jouent un rôle important sur la qualité du vin et où des expérimentations scientifiques sont menées (par les partenaires de ce projet) depuis plusieurs années notamment dans le cadre des programmes de recherches ANR-TERVCILIM et GICC-TERADCLIM. La multiplication des sites expérimentaux (terroirs français, européens et étrangers du « nouveau monde ») permet d'étudier les potentialités agro climatiques locales des terroirs dans des conditions macro-climatiques différentes.

Les terroirs expérimentaux ont été choisis en fonction de leur renommée, de leur position géographique mais aussi en fonction de leur « historique scientifique ». Que ce soit au niveau des disciplines de la climatologie, de l'agronomie, de l'oenologie ou de la modélisation, chaque site expérimental a été/est étudiée par un ou plusieurs partenaires scientifique du projet. Par exemple, depuis 1991, le Comité Interprofessionnel des Vins de Champagne (CIVC) a entrepris un zonage du vignoble. Cette démarche a consisté, entre autres à installer un réseau de stations automatiques dans le vignoble de Champagne. Afin d'améliorer la connaissance du climat à l'échelle locale, les stations ont été installées dans des conditions topographiques différentes (haut-, mi-, bas-coteau, fond de cuvette, ...) représentatives du vignoble champenois. De nombreuses études sur la relation climat local/vigne ont été réalisées notamment sur le risque gélif et les problèmes de maladie de la vigne (Madelin, 2004).

D'autres vignobles expérimentaux ont du être équipés en stations et en capteurs météorologiques. Au total, 35 vignobles (ou régions viticoles) répartis dans 14 pays sont étudiés (tableau 1). Ces vignobles sont situés : 1- dans un même domaine climatique (Bourgogne, Champagne, Pays de la Loire, Bordelais) ; 2- dans des domaines climatiques différents (par exemple, Champagne et Afrique du Sud) ; 3- dans des secteurs géographiquement éloignés mais avec des conditions macro-climatiques proches (ex : Afrique du Sud et Argentine). Ces vignobles, même situés dans un même domaine climatique, ont leur spécificité (ex : type de cépage, mode de culture, ...) qui détermine l'identité des terroirs. Nous avons délibérément choisi des vignobles situés dans des zones macro-climatiques différentes afin d'appréhender les variations climatiques à des échelles différentes (macro-, méso-) et de tester plusieurs modèles du GIECC.

*Tableau 1 : vignobles expérimentaux où sont réalisées les observations à l'échelle locale dans le cadre du programme GICC-TERADCLIM et du Metaprogramme INRA-ACCAF LACCAVE*

<b>Pays</b>	<b>NB stations (S) et capteurs (C)</b>	<b>Réseau de mesures climatiques</b>
<b>Europe</b>		
<b>France</b>		
<b>Val de Loire</b>		
Anjou	12 (S) ; 30 (C)	LETG-Rennes, UVV-INRA
Saumurois	10 (S)	SVSC
<b>Champagne</b>	22 (S)	CIVC
<b>Bourgogne</b>		
Aloxe-Corton	6 (S) ; 27 (C)	LETG-Rennes, CRC
<b>Bordeaux</b>		
La Louvière	16 (C)	LETG-Rennes
Dauzac	15 (C)	LETG-Rennes
Saint Emilion	80(C)	ENTITAB, CIVB
Château Ausone	25 (C)	AUSONE
<b>Provence</b>		
Sainte-Victoire	9 (C)	LETG-Rennes
<b>Banyuls</b>	11 (C)	LETG-Rennes
<b>La réunion</b>		
Cirque de Cilaos	2 (S) ; 12 (C)	LETG-Rennes
<b>Espagne</b>		
Arinzano (Navarre)	15 (C)	LETG-Rennes
<b>Portugal</b>		
Quinta Napoles (Vallée du Douro)	10 (C)	LETG-Rennes
<b>Suisse</b>		
Canton de Genève	19 (C)	LETG-Rennes
<b>Roumanie</b>		
Cotnari	12 (C)	LETG-Rennes
<b>Italie</b>		
Vale di Cembras	6 (C)	LETG-Rennes

<b>Allemagne</b>		
Geisenheim	12 ( C )	LETG-Rennes Université de Geisenheim
<b>Amérique du Sud</b>		
<b>Argentine</b>		
Alta Vista (Mendoza)	2 ( S ) ; 15 ( C )	LETG-Rennes
Atamisque (Vale de Uco)	11 ( C )	LETG-Rennes
El Bolson	8 ( C )	LETG-Rennes
Cafayate	1 ( C ) ; 15 ( C )	INV, LETG-Rennes
<b>Chili</b>		
Valé de Casablanca	13 ( S )	AVC
Vallée de bio-Bio	17 ( C )	Université de Conceptcion
<b>Uruguay</b>		
Montevideo	2 ( S ) ; 10 ( C )	LETG-Rennes
<b>Bolivie</b>		
Vale de Tarija	10 ( C )	LETG-Rennes
Canyon Los Inces	3 ( S ) ; 3 ( C )	
<b>Amérique du Nord</b>		
<b>Californie</b>		
Paso Robles		
Red Hills	15 ( C )	LETG-Rennes
<b>Afrique</b>		
<b>Afrique du Sud</b>		
Stellenbosch	40 ( C )	Univ. Stellenbosch, LETG-Rennes
<b>Océanie</b>		
<b>Nouvelle Zélande</b>		
Marlborough	15 ( S ) ; 30 ( C )	Univ. Christchurch
<b>Asie</b>		
<b>Inde</b>		
Sulawines (Nasik)	12 ( C )	LETG-Rennes

Cette phase d'acquisition de données météorologiques en fonction des échelles spatiales imbriquées a débuté en 2008 dans le cadre du programme ANR-TERVICLIM. Ces données sont également utilisées dans le projet GICC-TERADCLIM pour « alimenter » les modèles et surtout pour la phase « validation » de la modélisation.

# **PARTIE 1 : Acquisition des données météorologiques et agronomiques à l'échelle des vignobles expérimentaux**

## **1.1 Méthodologie**

Avec ce dispositif de mesures et suivant cette démarche d'analyse du climat à l'échelle des vignobles, plusieurs niveaux d'observation imbriquée ont été effectués :

- a- Pour chaque région viticole, l'analyse d'une série de données journalières ou mensuelles, sur une période la plus longue possible (milieu du XXème siècle), a été réalisée, pour une ou plusieurs stations météorologiques issues des réseaux nationaux. Plusieurs méthodes statistiques ont été utilisées afin de caractériser la présence ou pas d'un réchauffement climatique. La détection des ruptures climatiques a été effectuée à l'aide du test statistique de Pettitt<sup>1</sup>. Ces analyses statistiques ont été faites sur les données météorologiques mais également sur des indices bioclimatiques adaptés à la viticulture. Ces indices permettent notamment de définir des régions climatiques adaptées à la viticulture. Par exemple, l'évolution de l'indice héliothermique de Huglin permet la classification climatique des vignobles dans différentes catégories du type « très frais » au « type très chaud ». Cet indice est généralement corrélé avec la teneur en sucre du raisin (Huglin, 1978 ; Tonietto, 2004 ; Carbonneau et al, 2004). Plusieurs indices bioclimatiques en relation avec les différents stades de croissance de la vigne ont été calculés.
- b- A l'intérieur de chaque région viticole, les données issues des réseaux météorologiques disponibles à l'échelle régionales, ont été utilisées afin d'analyser les nuances régionales. Lorsque nous disposons de suffisamment de stations et surtout de séries de données longues, nous avons pu mettre en évidence la variabilité spatio-temporelle du climat durant le XXème siècle. Les analyses statistiques similaires, à celles décrites dans le paragraphe précédent, ont été effectuées.
- c- A une échelle plus fine, des stations météorologiques et des capteurs enregistrant la température sous abri ont été installées afin d'étudier la variabilité spatio-temporelle du climat dans les vignobles. Les appareils de mesures ont été disposés d'une part, suivant les caractéristiques locales (ex : pente, exposition, type de sol, distance à une rivière ...) susceptibles d'influencer les variables climatiques et d'autre part, le mieux répartis possible sur le terrain d'étude afin de ne pas avoir de secteurs sans prises de mesures ce qui pourrait être un problème au niveau de l'interprétation et de la modélisation des données. En général, 4-5 stations météorologiques complètes (températures, humidité relative, rayonnement solaire, vitesse et direction du vent, précipitations) et une vingtaine de *Data Logger* enregistrant la température ont été réparties à hauteur moyenne de la vigne dans chaque site expérimental. Le choix des postes de mesures est effectué à partir de l'analyse des paramètres topographiques (altitude, pente, exposition) issus de Modèles Numériques de Terrain, de la cartographie des types de sol, des caractéristiques de la vigne (ex : cépages, ...) et de l'occupation du sol. Ces informations numériques sont intégrées dans un Système d'Information Géographique et leur combinaison par l'intermédiaire de requêtes, permet d'évaluer les différents paramètres locaux pouvant théoriquement influencer le climat. Cette analyse en laboratoire est en grande partie validée par l'expérience sur le terrain.
- d- La variabilité spatiale des paramètres atmosphériques à l'échelle d'un terroir doit être validée par l'intermédiaire des données de réponse viticoles et/ou oenologiques afin d'évaluer l'hétérogénéité de la qualité du raisin et du vin influencée par les facteurs locaux. La caractérisation de la réponse vitivinicole a porté sur la croissance de la plante en fonction de la période de son cycle végétatif (par l'intermédiaire du

---

<sup>1</sup> Le test de Pettitt permet de détecter la présence d'une rupture dans une série temporelle. L'absence de rupture dans la série est considérée comme l'hypothèse nulle d'homogénéité.



suivi des stades phénologiques et de la date de récolte) et sur la qualité du raisin en analysant les teneurs en sucres et acides organiques, l'acidité totale, ainsi que la teneur en anthocyanes pour les raisins rouges. Le comportement de la vigne et les analyses sur les raisins prend en compte les pratiques mises en œuvre par les viticulteurs, lesquelles, dans la majeure partie des cas ont pour objet de contrebalancer les variations climatiques saisonnières (travail effectué principalement par l'UMT VINITERA<sup>2</sup>). En cas de phénomènes météorologiques extrêmes comme des gelées de printemps ou des périodes de sécheresse, les conséquences sur les végétaux sont observées (ex : bourgeons gelés ou stress hydrique de la vigne). Pour les suivis phénologiques et les analyses des raisins, les observations sont effectuées, dans la mesure du possible, sur des vignes ayant les mêmes caractéristiques (ex : cépages, porte-greffe, ...). Les analyses sont réalisées à proximité des stations météorologiques suivant un protocole mis en place par l'UMT VINITERA d'Angers. Par exemple, les observations phénologiques sont faites sur 25 ceps pour chaque point de mesures (méthodologie mise en place par l'UMT VINITERA). Les observations phénologiques sont également réalisées avec des Plantcam (appareil photographique disposé à proximité du bourgeon de vigne) qui permettent d'enregistrer régulièrement (plusieurs fois par jour) des clichés photographiques de la croissance des bourgeons du débourrement à la maturation. Ces Plantcam ont été disposés dans le vignoble du Val de Loire. Les résultats étant concluants, nous envisageons d'en installer sur d'autres sites.

**L'analyse de la variabilité spatiale des données agoclimatiques à l'échelle des terroirs viticoles expérimentaux a été effectuée durant la première année du programme TERADCLIM. Dans la partie ci-dessous, nous présentons les résultats obtenus dans le Val de Loire. Ces résultats ont été présentés dans plusieurs colloques et plusieurs articles dans de revues à comité de lecture. Etienne Neethling (ingénieur à l'UMT-VINITERA) a participé à ce travail notamment dans le cadre d'un CDD financé par le projet GICC-TERADCLIM. Cyril Bonnefoy participe également à ces travaux dans le cadre de son doctorat intitulé « impact du changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles du Val de Loire ».**

**Une démarche scientifique similaire est appliquée dans les vignobles de Mendoza (Argentine) sur les exploitations des bodegas d'Alta Vista (Lujan de Cuyo) et d'Atamisque (Vallée d'Uco, vignoble d'altitude). Claire Trappeteau (UMT-Vinitera) a effectué son stage de Master à Mendoza dans la cadre de TERADCLIM. Collaboration avec L'université UNCuyo (Mendoza) et l'UMI-IFAECI à Buenos Aires.**

**Les vignobles bordelais de Châteaux Dauzac, Châteaux La Louvière (Groupe Lurton) ainsi que les vignobles de l'appellation Saint Emilion (collaboration avec l'ENITAB) ont également été intégrés dans le programme TERADCLIM.**

### **1.2 Applications : Evolution des températures et des indices bioclimatiques à l'échelle du Val de Loire (Cyril Bonnefoy, Etienne Neethling, Séverine Roger, Gérard Barbeau et Hervé Quénot)**

Dans le Val de Loire, l'analyse a été réalisée suivant la démarche multi-scalaire imbriquée, c'est-à-dire (1) à l'échelle de la région viticole du Val de Loire puis (2) à l'échelle des vignobles d'Anjou et du Saumurois et (3) à l'échelle de l'appellation « Quart de Chaumes » :

- (1) Les données thermiques hebdomadaires et mensuelles de 10 stations de Météo-France du Centre Ouest de la France ont été analysées de 1948 à 2010. Les indices bioclimatiques ont également été calculés (figure 2a).
- (2) Un réseau de 11 stations météorologiques Campbell a été installé en 2008 dans les vignobles d'Anjou et du Saumurois (figure 2b et figure 3a et b).

Plus de 20 Data Logger enregistrant la température ont été disposés dans le vignoble de l'appellation « Quart de Chaumes ». L'appellation « Quart de Chaumes » dans les Coteaux du Layon s'étend sur un secteur d'environ 2km sur 3km. Cette appellation est définie par des caractéristiques de sol, d'exposition (principalement sud), environnementales (proximité de la rivière Le Layon) et de cépage (Chenin) spécifiques. C'est la combinaison de ces caractéristiques (plus le travail du vigneron) qui permettent d'élaborer ce vin liquoreux avec sa spécificité reconnue. Le climat particulier de ce terroir permet la production de vin liquoreux suite à la formation d'un champignon (*Botrytis Cinerae*) et à des vendanges tardives (Duchêne, 2005), en général au mois d'octobre voire novembre. Le choix des postes de mesures a été effectué avec l'utilisation de la cartographie des terroirs (ex : type de sol, type de cépages, pratiques agricoles,...) réalisée par l'UMT VINITERA, un Modèle numérique de terrain (pente, exposition, ...), la cartographie de l'occupation du sol et les conseils des viticulteurs (figure 2c).

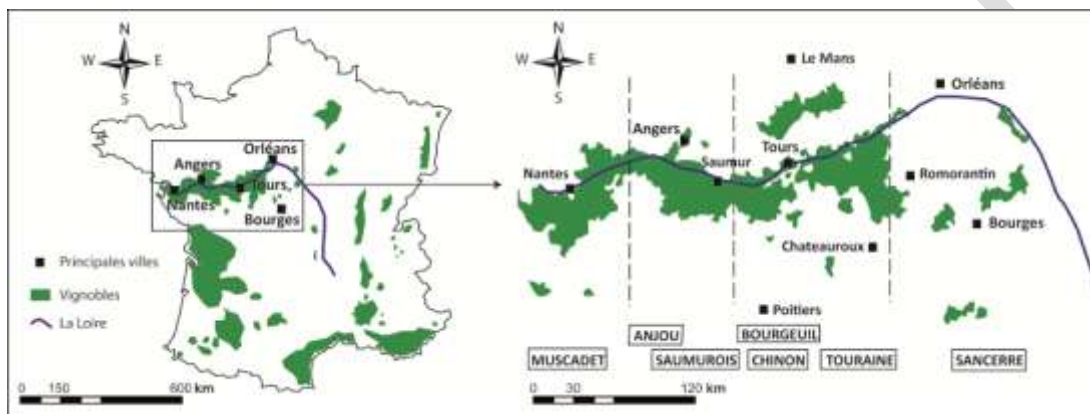


Figure 2 : Dispositif d'analyse climatique déterminé en fonction des échelles spatiales imbriquées : a) de la Vallée de la Loire, b) en passant par les vignobles d'Anjou et Saumurois c) jusqu'au Quart de Chaumes

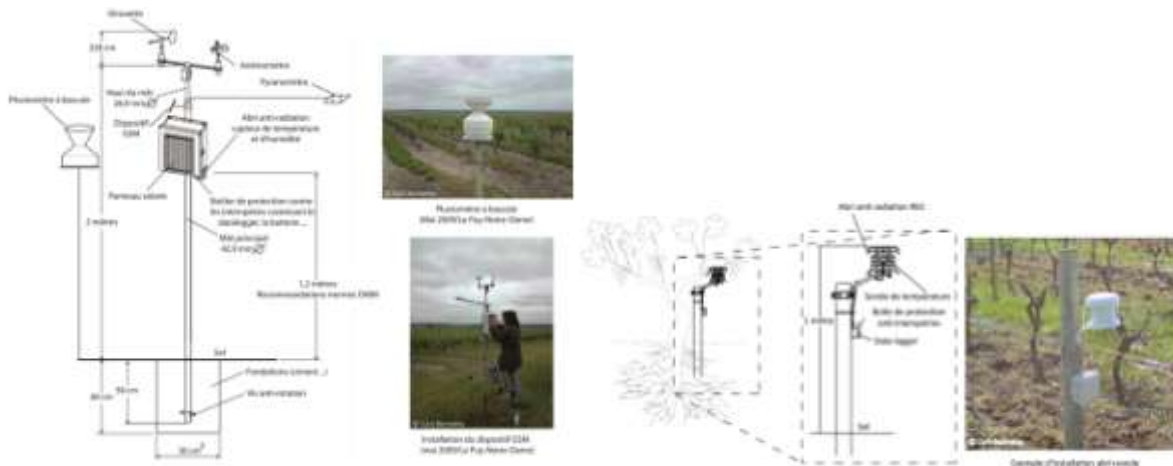


Figure 3 : Appareils de mesures disposés dans les vignobles : Station météorologique CAMPBELL BWS200 (a), data logger Tinytag sous abri antiradiation RS3 (b).

Les températures minimales, maximales et moyennes du Val de Loire, calculées à partir des 12 stations automatiques de la base de données climatiques, ont augmenté significativement de 1946 à 2009 (figure 3). La température moyenne a augmenté de 1,35°C Évolution du climat et de la composition des raisins des principaux cépages cultivés dans le Val de Loire ( $p < 0,0001$ ) ce qui correspond à une forte évolution climatique, étant donné que la température moyenne du globe a augmenté de 0,65°C de 1955 à 2006 (GIEC, 2007). La température minimale du Val de Loire a augmenté de 1,4°C ( $p < 0,0001$ ) et celle maximale de 1,3°C ( $p = 0,000$ ) de 1946 à 2009. Cependant, l'augmentation de la température n'a pas été uniforme dans le temps. La température moyenne annuelle de Nantes permet d'analyser l'augmentation de la température au cours d'une série plus longue. La température moyenne de Nantes a augmenté de 1,1°C ( $p < 0,0001$ ) de 1851 à 2010 (figure 4).

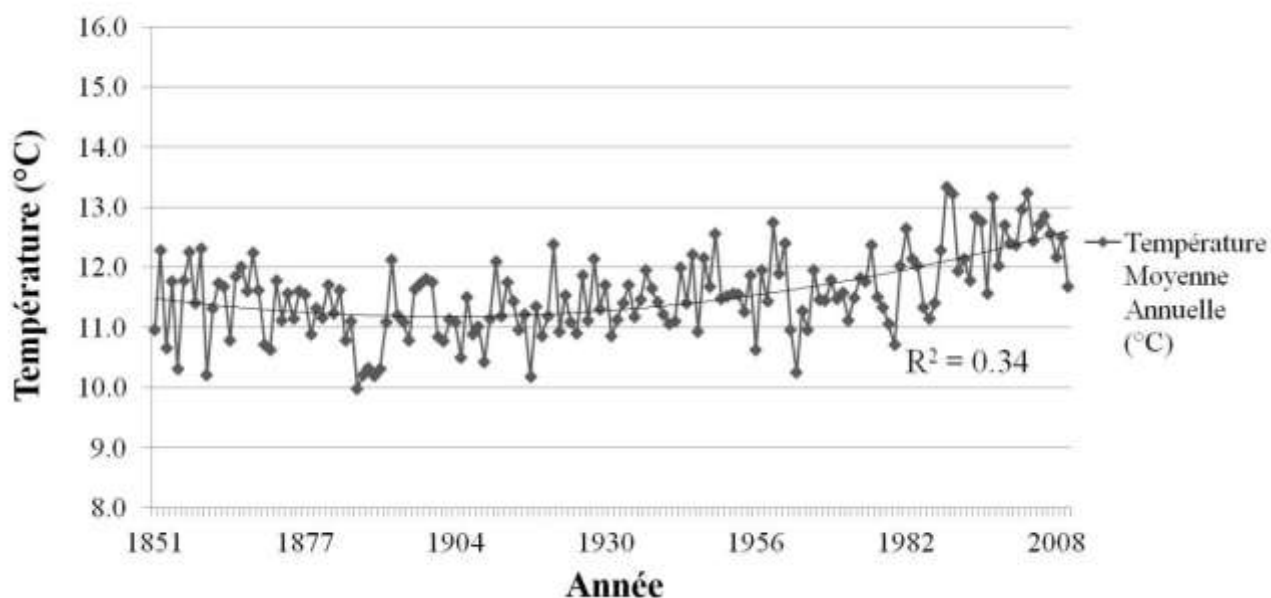


Figure 4 : Evolution de la température moyenne de Nantes de 1851 à 2010 (Source données : Météo France). (Neethling et al, 2012)

Depuis 1950, cette augmentation a été plus forte (1,3°C) et huit des vingt dernières années ont été les années les plus chaudes enregistrées depuis le début de la série, en 1851. Bonnefoy et al. (2010) ont démontré, pour plusieurs stations météorologiques situées dans le Val de Loire, l'existence d'une rupture

en 1987 dans l'évolution de la température. Cela illustre le fait que pendant les vingt dernières années, la température a augmenté encore de manière plus significative. Par exemple, la température moyenne annuelle de Saumur a évolué de 11,8°C pour la période avant la rupture (1950-1987) à 12,8°C pour la période après la rupture (1988-2010).

Si l'augmentation de la température n'a pas été uniforme dans le temps, elle a également évolué différemment à l'échelle des différents sous-bassins du Val de Loire. Le cycle de la croissance de la vigne étant généralement calculé de début avril à la fin de septembre dans l'hémisphère nord, l'évolution de la température pour cette période a été calculée de 1953 à 2009. Toutes les stations météorologiques montrent une augmentation significative des températures minimales, maximales et moyennes, sauf pour les minimales de Romorantin, qui n'ont pas augmenté de manière significative. Les températures minimales de Nantes et de Beaucouzé ont augmenté plus vite que les maximales. Comme l'influence océanique se réduit plus lorsqu'on se situe vers l'est du Val de Loire, les températures maximales de Saumur, Tours, Romorantin, Châteauroux et Orléans ont augmenté plus vite (figure 5). L'influence de l'océan pourrait expliquer cette forte augmentation de la température minimale de Nantes et d'Angers. Les régions océaniques ont en effet une présence plus importante de la couverture nuageuse (IPCC, 2007). Comme les nuages jouent un rôle très important sur l'effet de serre, ils limitent la quantité du rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre pendant la journée, ce qui conduit à une température maximale inférieure (IPCC, 2007). Cependant durant la nuit, les nuages bloquent le rayonnement infrarouge réémis par la terre. Ce rayonnement est alors renvoyé vers la terre par les nuages, ce qui conduit à une augmentation des températures minimales. En conséquence, l'intensité de l'évolution de la température est également influencée par des facteurs tels que la proximité de l'océan.

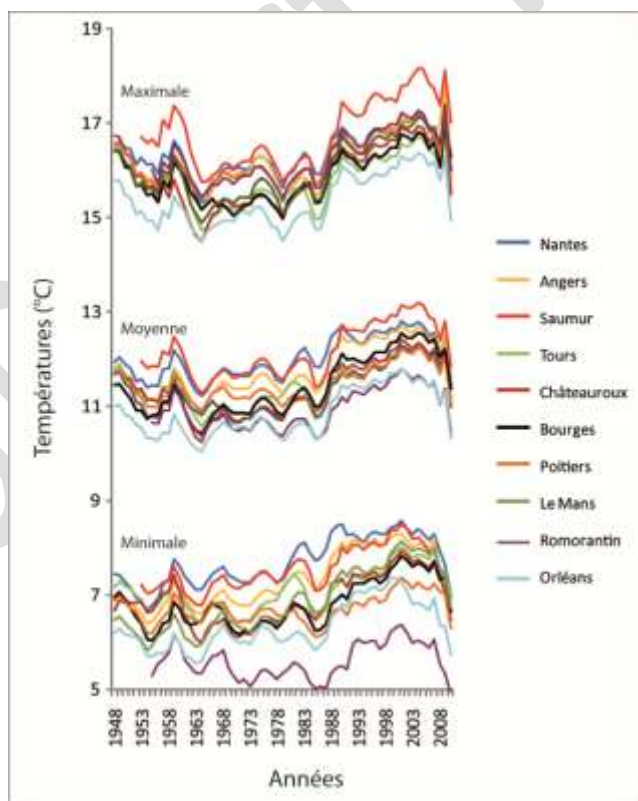


Figure 5 : Evolution de la température pour la période allant de début avril jusqu'à la fin de septembre (de 1948 à 2009), pour plusieurs stations météorologiques situées dans le Val de Loire (Source des données : Météo-France ; Source de la carte : Cellule Terroirs Viticoles 49).

L'augmentation de la température n'a pas non plus été uniforme entre les quatre saisons de l'année. Bien que les températures aient augmenté de façon significative pour chaque saison, toutes les stations météorologiques indiquent que c'est la température estivale (température moyenne pour la période du début de juin jusqu'à la fin d'août) qui a augmenté le plus fortement. Par conséquent, le nombre de jours pendant lesquels la température maximale était supérieure à 25°C a augmenté de façon significative. A Nantes, l'augmentation a été de 17 jours ( $p=0,016$ ) et à Saumur de 21 jours ( $p=0,009$ ) de 1950 à 2010.

Finalement, les données mensuelles de la pluviométrie des différentes stations n'ont montré aucune évolution significative, que ce soit pour les précipitations annuelles, les précipitations saisonnières, ou les précipitations sur la période avril-septembre. De plus, les données des précipitations journalières de la station de Montreuil-Bellay ne font pas apparaître d'évolution significative depuis 1976, en termes de distribution ou d'intensité.

La variabilité spatiotemporelle des températures ont une influence au niveau de la croissance e la vigne et les caractéristiques du vin. La date de la vendange a avancé significativement depuis 1970 dans le Val de Loire (figure 6). Pour le Cabernet franc, cette avance est de 15 jours ( $p=0,000$ ) à Beaumont-en-Veron et de 17 jours ( $p=0,001$ ) à Restigné. Pour le Chenin, elle est de 17 jours ( $p=0,000$ ) à Rochecorbon et pour le Gamay de 13 jours ( $p=0,002$ ) à Chargé.

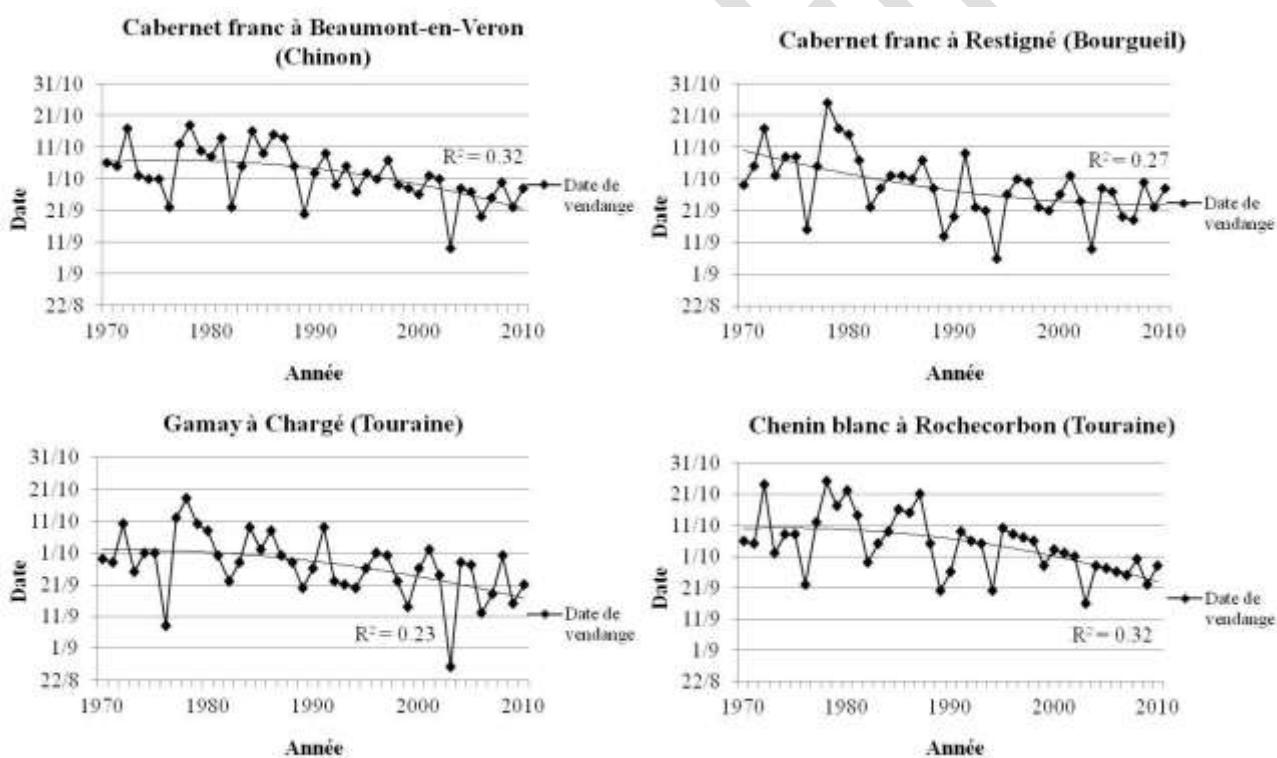


Figure 6 : Evolution de la date de vendange pour quatre parcelles, situées dans le Val de Loire, de 1970 à 2010 (Source des données : Laboratoire de Touraine). (Neethling et al, 2012)

En comparant la moyenne de la date de la vendange de 1990 à 2010 des principaux cépages cultivés en Anjou et en Saumur avec celle d'une étude réalisée sur la période allant de 1950 à 1969, les résultats montrent que la date de la vendange a avancé de 12 à 15 jours, selon le cépage. Comme la date de la vendange est d'environ deux semaines plus précoce, la période de la maturation correspond désormais à une période plus chaude de l'année. Barbeau et al. (1998) ont démontré l'importance de la précocité du cycle végétatif et de la date de vendange pour assurer une bonne maturation des raisins dans le Val de Loire. De ce fait, les températures plus chaudes favorisent de plus en plus le fonctionnement de la vigne dans le Val de Loire et, par conséquent, influencent la composition des baies de manière significative.

Etant donné que la teneur en sucre dans les raisins est déterminée par l'activité photosynthétique de la vigne (Jackson, 2008), des températures plus chaudes vont permettre à la vigne de fonctionner plus régulièrement à une température optimum de 25°C pour la photosynthèse. Un climat plus chaud va permettre à des variétés tardives telles que le Cabernet Sauvignon et la Syrah d'atteindre une bonne maturité. La figure 7 illustre qu'en 2003, l'indice de Huglin de Saumur était bien situé dans un climat « tempéré-chaud ». En conséquence, la Syrah (clone 470) ainsi que le Tempranillo (clone 771) ont réussi à atteindre Évolution du climat et de la composition des raisins des principaux cépages cultivés dans le Val de Loire une bonne maturité sur le domaine expérimental de l'INRA à Montreuil-Bellay cette année-là. Les raisins de Syrah ont été vendangés à une teneur en sucre de 205 g/L (12,2°alc.) et une acidité totale de 4,1 g/L. Par ailleurs, les raisins de Tempranillo ont été vendangés à une teneur en sucre de 192 g/L (11,4°alc.) avec une acidité totale de 3,5 g/L. Vu que les températures doivent continuer à augmenter au cours du 21ème siècle en France (Brisson et al., 2010), les cépages tardifs seront en mesure d'atteindre une bonne maturité, comme en 2003. Par contre, des cépages traditionnels et précoces comme le Grolleau et le Gamay vont atteindre leur maturité trop précocement en saison, ce qui va nuire à l'équilibre des composantes du raisin pour produire des vins de qualité.

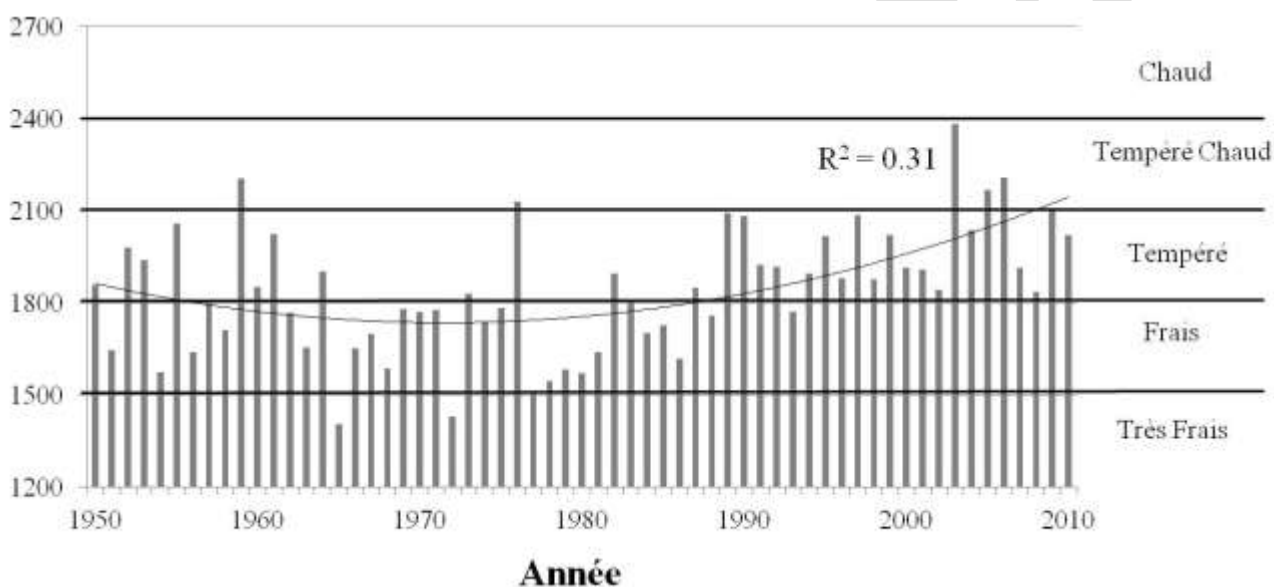


Figure 7 : Evolution de l'indice de Huglin (IH) à Saumur, de 1950 à 2010. (Source des données : Météo-France). (Neethling et al, 2012)

Les six cépages blancs et rouges principaux (Muscadet, Melon, Anjou, Sauvignon blanc, Chenin, Cabernet Franc) cultivés dans le Val de Loire montrent une évolution significative de la composition des raisins. Pour chaque cépage, la moyenne de la teneur en sucre et la moyenne de l'acidité totale ont été calculées à partir de plusieurs parcelles dans une même région. De plus, les cinétiques d'augmentation de la teneur en sucre et de diminution de l'acidité totale ont été calculées en relation avec l'année. Bien que ces cépages soient cultivés dans différents sous-bassins du Val de Loire, une tendance similaire à une diminution de l'acidité totale et une augmentation de la teneur en sucre est observée. En Anjou, par exemple, pour le cépage Cabernet franc la teneur en sucre est passée de moins de 170 g/L à plus de 200 g/L et, pour le Chenin, de moins de 180 g/L à plus de 210 g/L depuis 1981. Par conséquent, le degré d'alcool probable a augmenté de 10° à plus de 12,5° pour le Cabernet franc et d'environ 10,5° à plus de 12° pour le Chenin. Pour ces deux cépages, l'acidité totale a diminué de 2 g/L et, par conséquent, les raisins sont vendangés désormais à une teneur en acidité totale allant de 4,5 g/L à 6 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



Le potentiel de la composition des raisins à la vendange n'est pas simplement lié aux conditions climatiques du millésime et aux caractéristiques du sol, mais aussi à l'influence des pratiques et stratégies viticoles (Morlat, 2010). Au cours des trente dernières années, les pratiques viticoles ont évolué (Barbeau, 2007). Nous mentionnons deux pratiques qui ont considérablement changé en Val de Loire. Durant les années 1970, la pratique la plus courante pour l'entretien du sol était le désherbage chimique sur toute la parcelle. Aujourd'hui, les parcelles sont conduites avec un enherbement dans les inter-rangs ou dans un inter-rang sur deux. Par conséquent, la vigne est soumise à plus de concurrence, ce qui conduit à une diminution de la vigueur, de l'incidence des maladies et du rendement par cep. Plusieurs études ont montré que les raisins sont plus riches en sucre et ont une acidité plus faible lorsque la vigueur de la vigne est réduite (Barbeau et al., 1998 ; Tesic, 2001 ; Morlat, 2010). D'autres changements des pratiques incluent l'introduction de l'effeuillage et de l'éclaircissage des grappes. Ces deux pratiques permettent une meilleure aération de la vigne, une meilleure exposition des raisins au soleil ainsi qu'un meilleur équilibre entre le rendement et la surface foliaire (Jackson, 2008). Spayd et al. (2002) ont démontré que des raisins plus exposés au soleil sont plus riches en sucre et ont une acidité plus faible. Ces changements dans les pratiques viticoles ont également eu un effet sur la composition des raisins. En conséquence, il faut tenir compte de ces évolutions des pratiques lorsque l'influence du changement climatique sur la viticulture et la composition des raisins est analysée et discutée. Des études complémentaires seraient nécessaires pour étudier la part respective de l'évolution des pratiques viticoles dans le Val de Loire et du climat sur la composition des raisins.

Les températures minimales, maximales et moyennes ont augmenté significativement dans le Val de Loire au cours des soixante dernières années. Cependant, ce réchauffement observé n'a pas été uniforme dans le temps ni dans l'espace. Les températures minimales de Nantes et Beaucouzé ont fortement augmenté par rapport aux maximales. Vers l'est du Val de Loire, ce sont les températures maximales de Saumur, Tours, Romorantin, Châteauroux et Orléans qui ont le plus augmenté. En revanche, aucune évolution significative des précipitations n'a été observée. Les différents indices bioclimatiques ont fortement augmenté. Selon l'indice de Huglin, la région viticole du Val de Loire a évolué d'un climat froid à un climat tempéré. Le comportement de la vigne a été influencé par ces changements climatiques, ce qui s'est traduit par une avancée des dates de vendange, accompagnée d'une augmentation de la teneur en sucre et une diminution de l'acidité des raisins. Cette tendance s'applique à l'ensemble du Val de Loire, de Nantes à Sancerre, pour les principaux cépages qui y sont cultivés.

**Ces résultats obtenus à l'échelle du Val de Loire puis de l'Anjou/Saumurois ont montré la nécessaire prise en compte des échelles d'observation. Le même type d'analyse agroclimatique a été réalisé à l'échelle d'une appellation sur quelques kilomètres carrés.**

L'analyse des capteurs thermiques disposés dans le vignoble des Coteaux du Layon au niveau de l'Appellation Quart de Chaumes ont mis en évidence une forte variabilité spatio-temporelle des températures liée à la topographie (pente et exposition), à la distance à la rivière et au type de sol.

Les notations du comportement de la vigne suivent des critères bien précis. Il a tout d'abord été choisi de suivre 30 ceps de vigne sur chacune des 10 parcelles de Chenin sélectionnées. Cette méthode présente le double avantage de compter sur un nombre de ceps suffisant par parcelle ce qui minimise une valeur erronée à cause d'un éventuel dysfonctionnement d'un cep de vigne, et aussi de disposer d'un « réseau de parcelles » suffisamment dense pour comparer les dates des différents stades phénologiques entre elles. Les 30 ceps sont divisés en groupes de 6 ceps consécutifs sélectionnés aléatoirement sur 5 rangs différents à proximité du capteur installé dans la parcelle. Les parcelles utilisées dans ce protocole abritent en effet un capteur de température afin de corréliser les données de températures avec le développement des stades

phénologiques. Dans la mesure du possible, le capteur est placé prioritairement dans le rang du milieu (rang 3) afin de ne pas prendre en compte des ceps trop éloignés (figure 8).

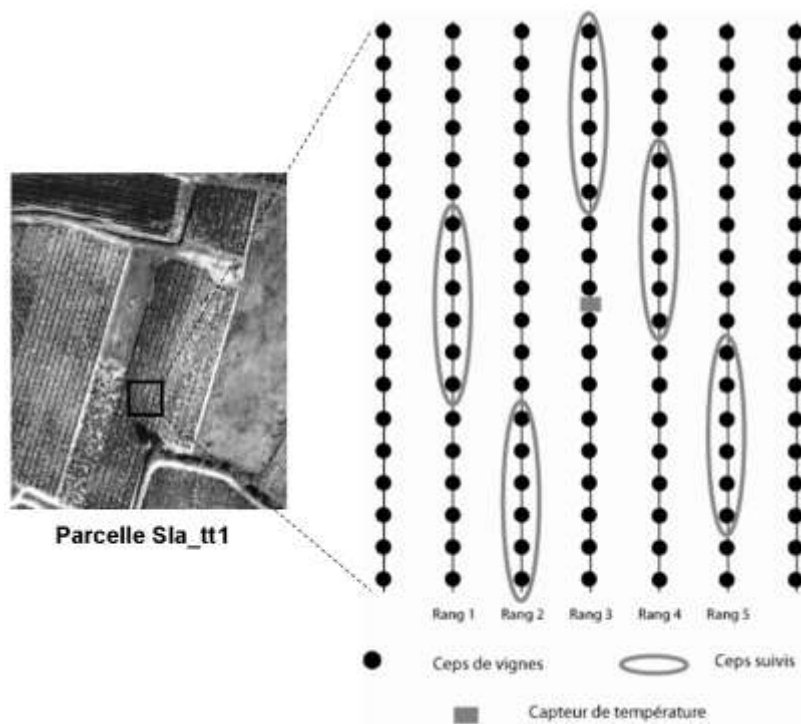


Figure 8 : Dispositif de mesures climatique et agronomique à l'échelle de l'appellation Quart de Chaumes.

- Des indices bioclimatiques contrastés

Initialement utilisés à une échelle régionale, les indices de Winkler et de Huglin ont été calculés dans les vignobles des coteaux du Layon afin d'évaluer au mieux les différences qui peuvent exister entre les parcelles à une échelle très fine. La figure 9 montre les deux indices calculés pour 19 capteurs où aucune donnée journalière n'était manquante.

Dans ces vignobles les degrés jours varient de 1 184 à 1 481. En accord avec la classification de l'indice régionale de Winkler, la plupart des capteurs seraient classés en Région I, ce qui constitue la région viticole la plus fraîche dans le monde (850-1 389 DJ). Cependant, six des dix neuf capteurs ont des valeurs qui correspondent plus à la région II (1 389-1 667 DJ). Cela montre à quel point le climat peut être diversifié d'un point de vue thermique à une échelle aussi locale. Les indices les plus élevés sont calculés sur les pentes et/ou sur un versant exposé sud, pendant alors que les indices les plus faibles se retrouvent soit aux endroits les plus élevés, soit dans les points les plus bas et/ou sur un versant exposé nord. Concernant l'autre indice basé sur la formule de Huglin, il varie de 1 953 à 2 191. Ainsi, presque tous les capteurs tomberaient se situeraient dans le type de climat tempéré, alors qu'un seul capteur tomberait dans la catégorie climat tempéré chaud (2 100-2 400). Une différence de plus de 200 unités pour un tel indice n'est pas anodine sur seulement 600 ha de vignobles. Les indices les plus faibles se retrouvent sur les points les plus élevés et les indices les plus forts aux points les plus bas avec une orientation sud. En effet les plus hautes températures maximales sont régulièrement observées en fond de vallée et l'indice de Huglin prend plus en considération ces températures maximales que l'indice de Winkler, qui n'est basé que sur les températures moyennes.

L'indice de fraîcheur des nuits est corrélé ( $R^2 = 0,72$ ) avec l'altitude en raison des fréquentes inversions thermiques observées dans le secteur (Bonnefoy et al., 2009). En conséquence, l'indice le plus bas ( $9,6\text{ }^\circ\text{C}$ )



est enregistré par le capteur avec l'altitude la plus faible (28 mètres sur un versant nord). A l'opposé, les nuits sont plus douces en haut des pentes avec un indice au-dessus de 12 °C au-delà d'une altitude de 65 mètres environ. Ainsi, les conditions nocturnes peuvent être classées en deux différentes catégories différentes dans les coteaux du Layon : nuits froides aux points les moins élevés et nuits très fraîches aux points les plus hauts. Cette fraîcheur nocturne est très bénéfique pour la vigne, particulièrement durant cette période de maturation où les arômes et la couleur des grappes raisins se développent.

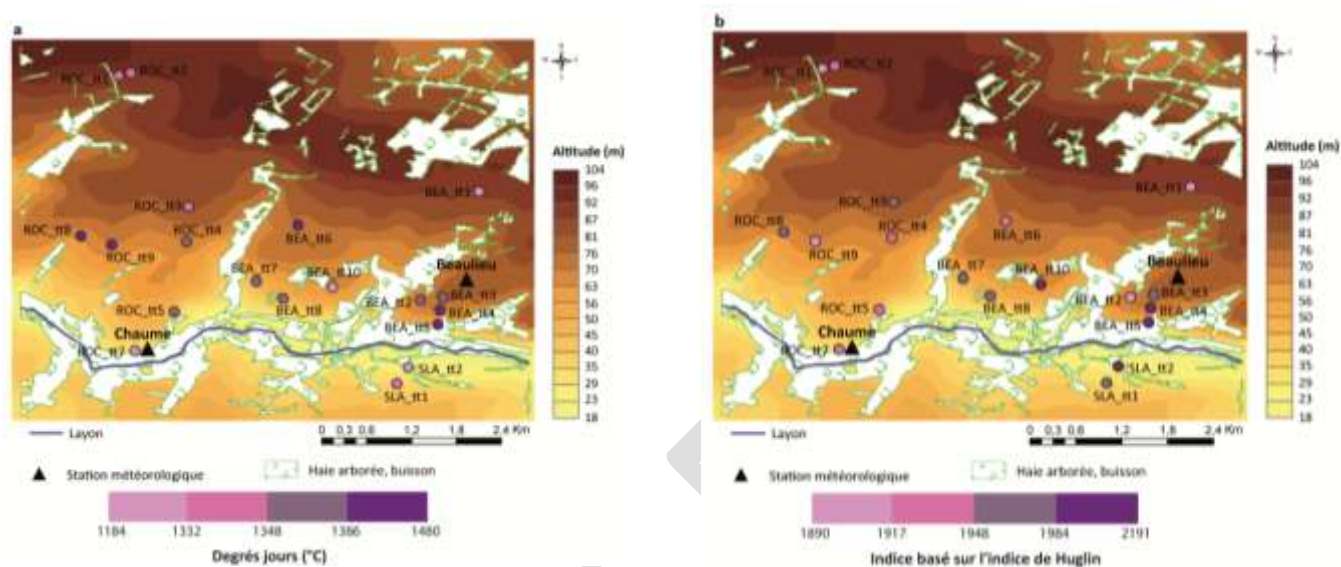


Figure 9 : Cumuls des degrés jours (a) et Indice d'Huglin (b) calculés pour la période végétative de 2009.

- Variabilité spatiale du comportement de la vigne

L'étude du comportement de la vigne en 2011 et 2012 montre que le climat du millésime est prépondérant par rapport à d'autres facteurs, mais on observe cependant chaque année une forte variabilité spatiale du fonctionnement de la vigne et notamment de la composition des raisins entre les parcelles, à l'échelle fine des vignobles de coteaux du Layon (tableau 2).

Tableau 2 : Différence de qualité des raisins entre les 10 parcelles de Chenin, 5 semaines après la date de mi-véraison

Année	Date de prélèvement	Sucre (g/L)	Acidité totale (g/L)	Indice de Maturité
2011	06/09	176 à 226	4.6 à 8.1	21.7 à 48.5
2012	26/09	187 à 226	5.1 à 7.5	25.6 à 41.5

En général, les parcelles les plus précoces avec un indice de maturité plus fort sont situées à mi-coteau, sur un versant sud alors que les parcelles tardives avec un indice de maturité plus faible sont situées en bas de coteau et à proximité du Layon (figure 10). Par exemple en 2011, la mi-floraison a eu lieu du 26 mai au 1 juin, soit un écart de 6 jours entre les parcelles. Les dates de mi-véraison montrent une variabilité encore plus grande, avec un écart de 13 jours entre la parcelle la plus précoce et la plus tardive. Et pendant la période de la maturation, l'analyse des baies de raisins a montré que la teneur en sucre a varié de 176 à

226 g/L, soit un écart équivalent à 3 degrés d'alcool probable (tableau 2). Cette différence de la qualité des raisins se reflète sur l'indice de maturité (rapport sucres/acides), qui a varié de 22 à 48. Ainsi, on observe un comportement de la vigne très différent aux échelles fines, où une parcelle est en cours de maturation alors qu'une autre est déjà en surmaturation.

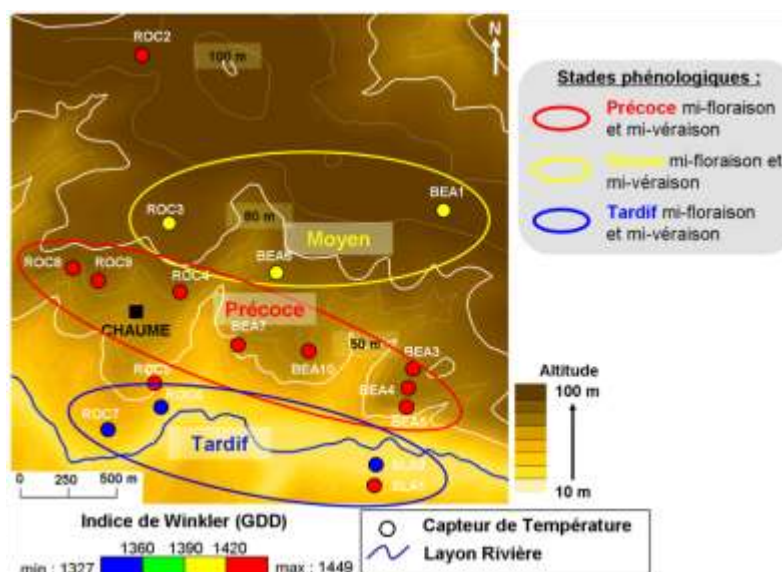


Figure 10 : Variabilité spatiale des cumuls de degré-jours selon l'indice de Winkler et la variabilité spatiale du comportement de la vigne selon les dates de mi-floraison et mi-véraison en 2011.

La variabilité spatiale de la température se reflète sur le déroulement du fonctionnement de la vigne et la maturation des raisins. Les parcelles caractérisées par un cumul de degrés-jours plus élevé ont un cycle phénologique plus précoce que les parcelles caractérisées par des cumuls plus faibles. Cependant, cette forte variabilité du fonctionnement de la vigne est aussi expliquée par les caractéristiques édaphiques du sol, notamment sa capacité de rétention en eau et sa capacité thermique. L'influence du type de sol sur le comportement de la vigne et sur la composition des raisins a été bien observée dans les parcelles situées au sein du même type de climat, tel qu'indiqué par les cumuls de degrés-jours.

La phase d'acquisition des données agro-climatiques à l'échelle du terroir viticole (décrite ici avec l'exemple du Val de Loire) a été mise en place dans les 35 vignobles étudiés dans les programmes ANR-TERVICLIM, GICC-TERADCLIM et ACCAF-LACCAVE. Les résultats ont permis de mettre en évidence une importante variabilité spatiale du climat (notamment pour les températures) sur des espaces relativement restreints. Les analyses agronomiques ont montré aussi une relation entre ces différences climatiques locales et la vigne que cela soit au niveau de la phénologie ou des caractéristiques du raisin. Dans un contexte de changement climatique où les différents scénarios simulent une augmentation de 2 à 6°C à l'horizon 2100, la modélisation de la variabilité spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles est un objectif primordial pour la profession viticole dans une optique d'adaptation.

## **PARTIE 2 : Modélisation climatique à l'échelle des terroirs viticoles et intégration des scénarios IPCC avec notamment la mise en relation entre la modélisation atmosphérique (ex : RAMS, WRF, ..) et la modélisation statistique (Bonnardot V., Cautenet S., Bonnefoy C., Leroux R. et Madelin M.)**

### **2.1 Contexte et méthodologie**

Dans une démarche similaire à celle de l'acquisition des données climatiques et agronomiques, les techniques de modélisation spatiale doivent prendre en compte l'influence de ces paramètres locaux sachant qu'ils agissent sur les variables météorologiques à différentes échelles spatiales imbriquées. Il convient donc d'utiliser des méthodes permettant d'établir les relations entre les caractéristiques de surface (topographie, occupation du sol) et les variables météorologiques. Mais les modèles utilisés doivent également être compatibles avec les modèles climatiques intégrant les scénarios du changement climatique.

Les méthodes de modélisation spatiale doivent suivre la même démarche que pour les analyses des données météorologiques, c'est-à-dire, prendre en compte l'influence des paramètres locaux sachant qu'ils agissent sur les variables météorologiques à différentes échelles spatiales imbriquées. La modélisation numérique méso-échelles par l'intermédiaire des modèles régionaux RAMS (Regional Atmospheric Modelling System) et WRF (Weather Research and Forecasting) et la modélisation géostatistique multicritères ont été/sont appliquées aux vignobles expérimentaux situés en France (Val de Loire, Champagne, Bordeaux, ...), en Afrique du Sud et en Nouvelle Zélande.

**Valérie Bonnardot (chercheur contractuelle au laboratoire UMR6554 LETG-Rennes-COSTEL) a participé à ce travail dans le cadre d'un CDD financé par le projet GICC-TERADCLIM. Sylvie Cautenet (Professeur émérite à l'UMR-LAMP) a réalisé les simulations RAMS. Les données ARPEGE ont été fournies par Michel Déqué (Météo France). Toutes les simulations climatiques réalisées dans le cadre du programme GICC-TERADCLIM et rapportées ci-dessous ont bénéficié d'un accès aux moyens de calcul du CINES au travers des allocations de ressources 2011 et 2012 attribué par le Grand Equipement National de Calcul Intensif (GENCI) au projet uhb6342 intitulé « modélisation atmosphérique méso-échelle et échelle fine des terroirs viticoles » (Bonnardot et Cautenet, 2012). La modélisation multicritères est réalisée par Malika Madelin (UMR8586 PRODIG), Cyril Bonnefoy (LETG-Rennes) et Renan Leroux (LETG-Rennes). Cyril Bonnefoy et Renan Leroux ont bénéficié d'un financement TERADCLIM pour mettre en place un modèle multicritère applicables sur l'ensemble des vignobles du programme.**

### **2.2 Utilisation de la modélisation atmosphérique méso-échelle en milieu viticole**

En termes de modélisation climatique régionale, beaucoup de travaux ont montré l'intérêt de l'utilisation des différents modèles atmosphériques régionaux et de l'augmentation de la résolution pour caractériser la variabilité du climat, les potentialités et les risques climatiques dans un environnement viticole.

Les modèles atmosphériques dits physiques permettent d'appréhender la complexité du milieu (transferts sol/atmosphère). Ces modèles atmosphériques méso-échelle, tels que ALADIN (aire limitée adaptation dynamique développement international, <http://www.cnrm-game.fr>), RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) ([www.atmet.com](http://www.atmet.com)), MM5 : la cinquième génération du Penn State/modèle NCAR ([www.mmm.ucar.edu/mm5](http://www.mmm.ucar.edu/mm5)) ou WRF (Weather Research and Forecasting) (<http://wrf->

model.org/index.php), sont utilisés notamment dans la prévision/prédiction météorologique, de la qualité de l'air ou encore dans la prévision climatique régionale. Ces modèles sont utilisés depuis plusieurs décennies à des fins différentes et surtout qu'ils évoluent rapidement grâce à l'augmentation des capacités de calcul des ordinateurs qui permet l'amélioration aussi bien de leur résolution que de leur complexité.

Le modèle RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) a été utilisé pour étudier les circulations locales dans le district viticole de Stellenbosch en Afrique du Sud (Bonnardot et al., 2005 ; Bonnardot et Cautenet, 2009), en Champagne et la Vallée de la Loire (Briche et al., 2011 ; Bonnefoy, 2012). Des études similaires de modélisations ont été menées en Australie (Lyons et Considine, 2007). Le modèle WRF (Advanced Research Weather Research and Forecasting) a été utilisé pour étudier la variabilité spatiale du climat en Bourgogne (Bonnefoy et al. 2010 ; Cuccia, 2013 ; Xu et al., 2012), en Nouvelle-Zélande (Bonnardot et al., 2012).

Dans le cadre des programmes de recherches TERADCLIM, le RAMS (v6.0) (<http://www.atmet.com>) a été utilisé afin de réaliser des simulations haute résolution (1 km et 200 m) de cas réels de situation atmosphérique à risque gélif sur le Val de Loire. Le transfert d'échelle est assuré par le modèle RAMS avec les différentes grilles imbriquées. Dans cette étude, la grille 1 a une résolution de 25 km (1500 km x 1500 km) et correspond au forçage de grande échelle sur l'Océan Atlantique Nord et l'Europe. La position de la grille 1 a été adaptée en fonction des différentes situations lors de la modélisation des événements extrêmes. La grille 2 a une résolution horizontale de 5 km (935 km x 935 km) et représente les circulations locales sur la France en prenant en compte les hétérogénéités de surface et permet ainsi de fournir des informations plus adaptées à l'échelle régionale. Enfin la grille 3 a une résolution de 1 km et la grille 4 de 200 m, grilles qui permettent d'évaluer la variabilité spatiale de la température à l'échelle des terroirs viticoles. Toutes les grilles échangent des informations entre elles de manière bidirectionnelle, c'est le two-way nesting (figure 11).

Ici, le modèle numérique RAMS a été utilisé afin de tester sa capacité à reproduire des événements extrêmes pour la vigne (gelées et vagues de chaleur). Plusieurs simulations, jusqu'à 200 m de résolution horizontale pour la grille 4, ont ainsi été lancées.

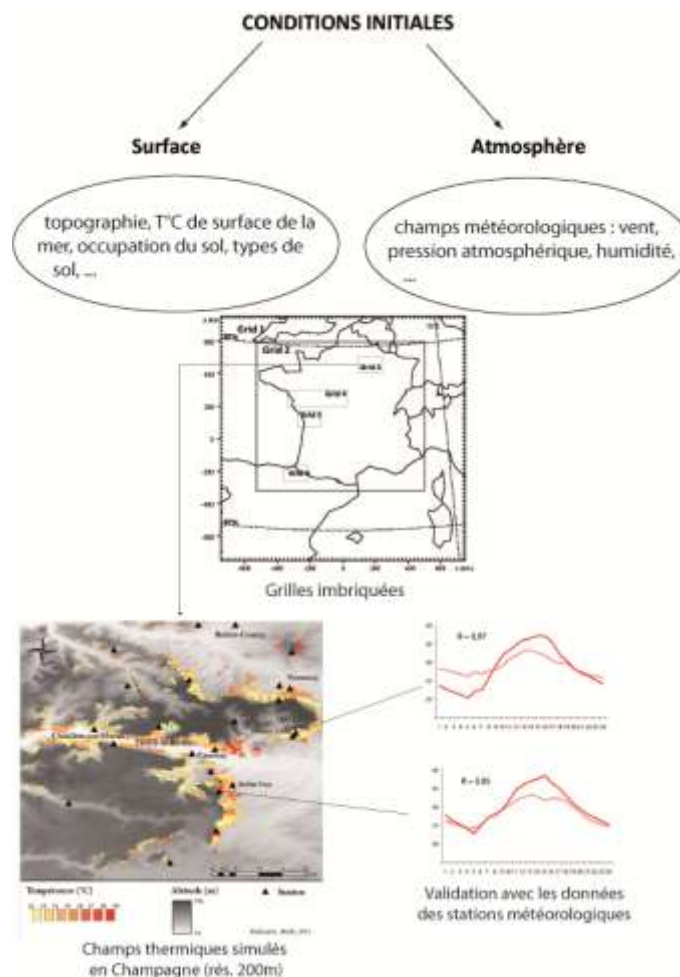


Figure 11 : Principes de la modélisation atmosphérique à méso-échelle (d'après Bonnardot)

## 2.2 L'interpolation spatiale de données climatiques en milieu viticole

L'utilisation de la modélisation atmosphérique méso-échelles permet de réaliser une désagrégation scalaire à partir des modèles globaux, mais, la nécessité d'une importante capacité de calcul ne permet pas d'obtenir des résultats satisfaisants à une échelle très fine. L'imbrication des différents phénomènes atmosphériques en fonction de l'imbrication des échelles (du synoptique au local) rend difficilement faisable ce type de modélisation à un niveau très fin. Pour pallier à ces limites, les méthodes statistiques multicritères permettent de réaliser une interpolation spatiale des données climatiques obtenues à échelles fines.

Les méthodes statistiques constituent des outils essentiels pour résumer un grand nombre de données à traiter, pour identifier d'éventuelles structures ou récurrences dans le temps et dans l'espace, en somme pour dégager l'information contenue dans les bases de données. Outre leur apport dans l'étude de la variabilité d'un phénomène, les méthodes statistiques permettent également de tester des hypothèses sur les relations entre plusieurs phénomènes (Madelin, 2004).

Comme l'indique Madelin (2004), les méthodes statistiques constituent des outils essentiels pour résumer un grand nombre de données à traiter, pour identifier d'éventuelles structures ou récurrences dans le temps et dans l'espace, en somme pour dégager l'information contenue dans les bases de données. Outre leur apport dans l'étude de la variabilité d'un phénomène, les méthodes statistiques permettent également de tester des hypothèses sur les relations entre plusieurs phénomènes. Dans ce type d'étude, l'existence d'un lien entre les éléments climatiques et différents facteurs (topographie, occupation du sol, etc.) est testée. Afin de spatialiser les données ponctuelles des mesures sur le terrain, nous cherchons donc

à déterminer quels sont les facteurs géographiques, environnementaux et topographiques influençant de manière significative la distribution spatiale des mesures observées. Ainsi, dans une démarche hypothético-déductive, il s'agit de quantifier leur rôle en testant et en mesurant les effets respectifs de chaque facteur sur les paramètres météorologiques et de construire in fine des modèles statistiques à partir de régressions multiples. L'équation de cette régression est alors utilisée pour spatialiser, par l'intermédiaire d'un Système d'Information Géographique (SIG), le phénomène en tout point de l'espace (en fonction des paramètres locaux) (figure 12).

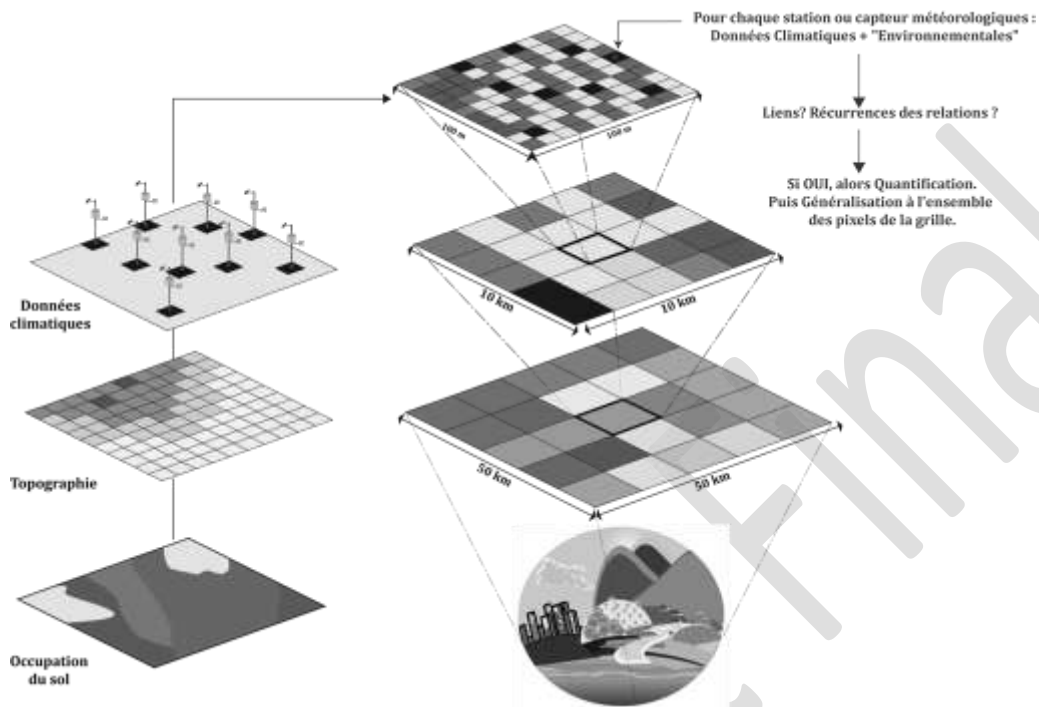


Figure 12 : Principes de la modélisation statistique multicritères appliquée aux échelles fines (d'après Madelin)

Des modèles multicritères ont été développés afin de comprendre le rôle et le poids de l'ensemble des capteurs dans la variabilité spatiale de la température. La première étape a été de déterminer statistiquement les prédictors potentiels et les relations linéaires simples entre ces facteurs et la température. Cette première étape a alors permis de sélectionner les prédictors essentiels à prendre en compte dans le modèle statistique. Une régression linéaire multiple pas à pas a ensuite été appliquée sur les séries de températures mensuelles moyennes et journalières. Ces traitements ont été réalisés à la fois sur les séries de températures minimales et maximales. Afin de faciliter les calculs, dans l'ensemble du développement du modèle, les relations entre prédictors et prédicants ont été considérées linéaires. Néanmoins, certains types de relation sont souvent non-linéaires, en particulier dans les cas d'inversions thermiques entre l'altitude et la température minimale (figure 13).



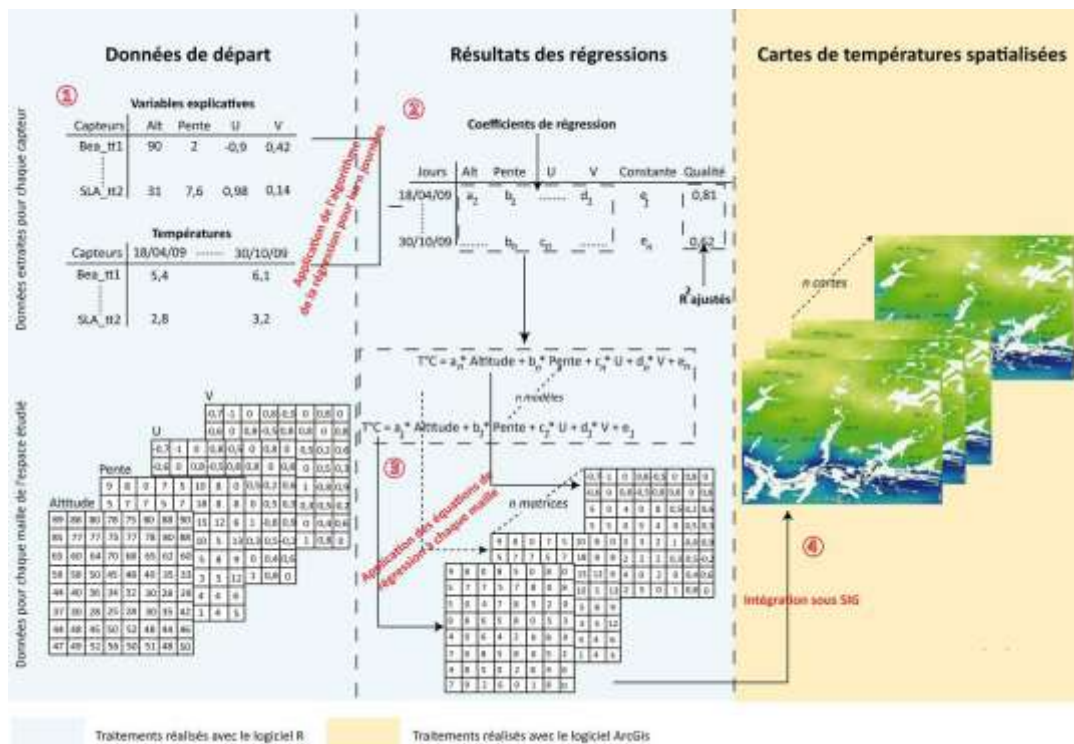


Figure 13 : Schéma récapitulatif des étapes de la procédure d'automatisation des modèles multicritères issues des régressions multiples pas à pas (exemple pour le calcul des modèles journaliers).

### 2.3 Application aux vignobles du Val de Loire

- Modélisation numérique

La simulation de quatre épisodes ponctuels de gel et de vague de chaleur pour la vigne a permis de contrôler la capacité de RAMS à reproduire les valeurs extrêmes journalières et la variabilité spatiale des températures liée notamment à la topographie. L'aléa gélif d'avril 2003 a été légèrement surestimé par le modèle avec des valeurs de températures minimales modélisées inférieures à celles observées. Les températures maximales lors des épisodes de chaleur ont, à l'inverse, été souvent sous-estimées, de parfois plusieurs degrés comme en 2003. La simulation de la canicule d'août 2003 est par ailleurs l'épisode qui a été le moins bien reproduit par le modèle. En effet, un décalage des températures maximales dans le temps est constaté entre la simulation et l'observation. Le caractère exceptionnel des conditions de cette canicule et notamment la mauvaise prise en compte des échanges entre la végétation et l'air peuvent expliquer ce décalage (figure 14 et 15). Les vagues de chaleur plus classiques de 2009 et 2010 n'ont pas connu de températures maximales aussi tardives et le modèle a ainsi bien reproduit le cycle journalier et les valeurs de température (figure 16 et 17). Une canicule comme celle de 2003 a une période de retour probablement supérieure à 150 ans. Les vagues de chaleur, déjà intenses, des étés 1976 et 1983 en France n'ont même pas atteint la même durée et intensité. Des vagues de chaleur comme celles de 2009 et 2010 sont beaucoup plus courantes et se produisent en moyenne 1 fois par an en moyenne vallée de la Loire. Le modèle RAMS arrive donc plus facilement à reproduire des épisodes plus classiques que ceux trop extrêmes comme 2003. Enfin, les valeurs des températures minimales lors de ces 3 vagues de chaleurs ont été plutôt bien reproduites par le modèle en août 2003 mais avec des biais positifs récurrents en août 2009 et juillet 2010 et donc une surestimation des températures minimales. Les conditions de maturation modélisée sont plus chaudes que les conditions réelles observées dans les parcelles.

Ainsi, la modélisation à échelle fine d'épisodes extrêmes par un modèle régional tel que RAMS peut s'avérer complexe même si l'ensemble des données locales, concernant le terrain et la végétation, ont été intégrés en entrée au modèle. Néanmoins, RAMS présente un réel intérêt pour la modélisation des champs

thermiques au sein des vignobles, en particulier lors de ces épisodes de gel ou de chaleur intense, afin de déterminer les zones les plus exposées à des risques climatiques pour la vigne.

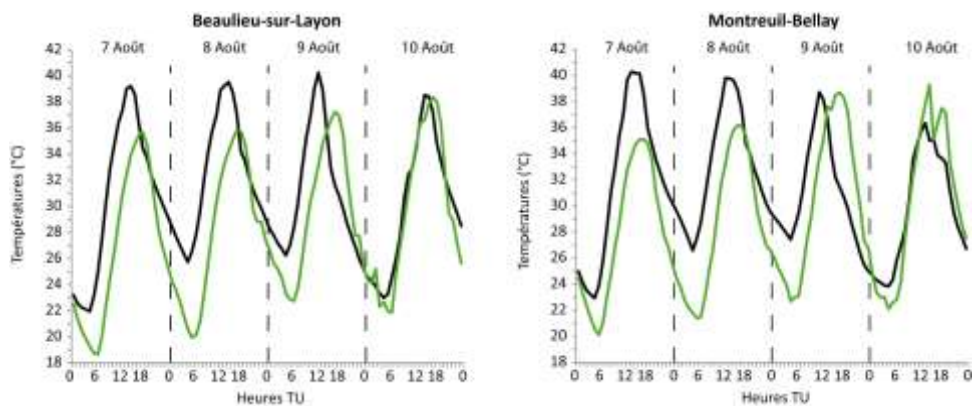


Figure 14 : Températures horaires observées (en vert) par deux stations de l'INRA et de Météo-France et simulées (en noir) par le modèle RAMS pour la période caniculaire d'août 2003 en moyenne vallée de la Loire

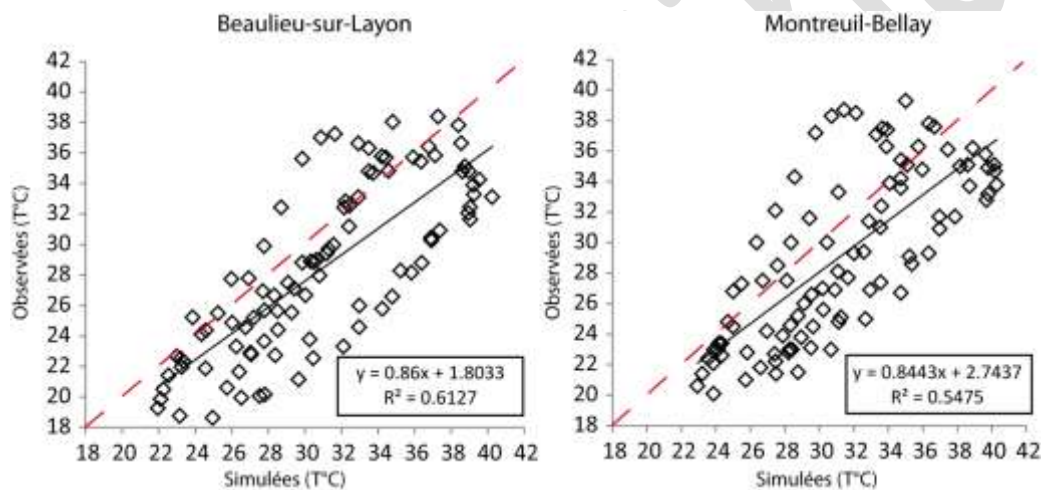


Figure 15 : Graphique cartésien des températures observées en fonction des températures simulées par le modèle RAMS pour 2 stations durant l'épisode caniculaire d'août 2003 (la droite en pointillé rouge représente la première bissectrice).



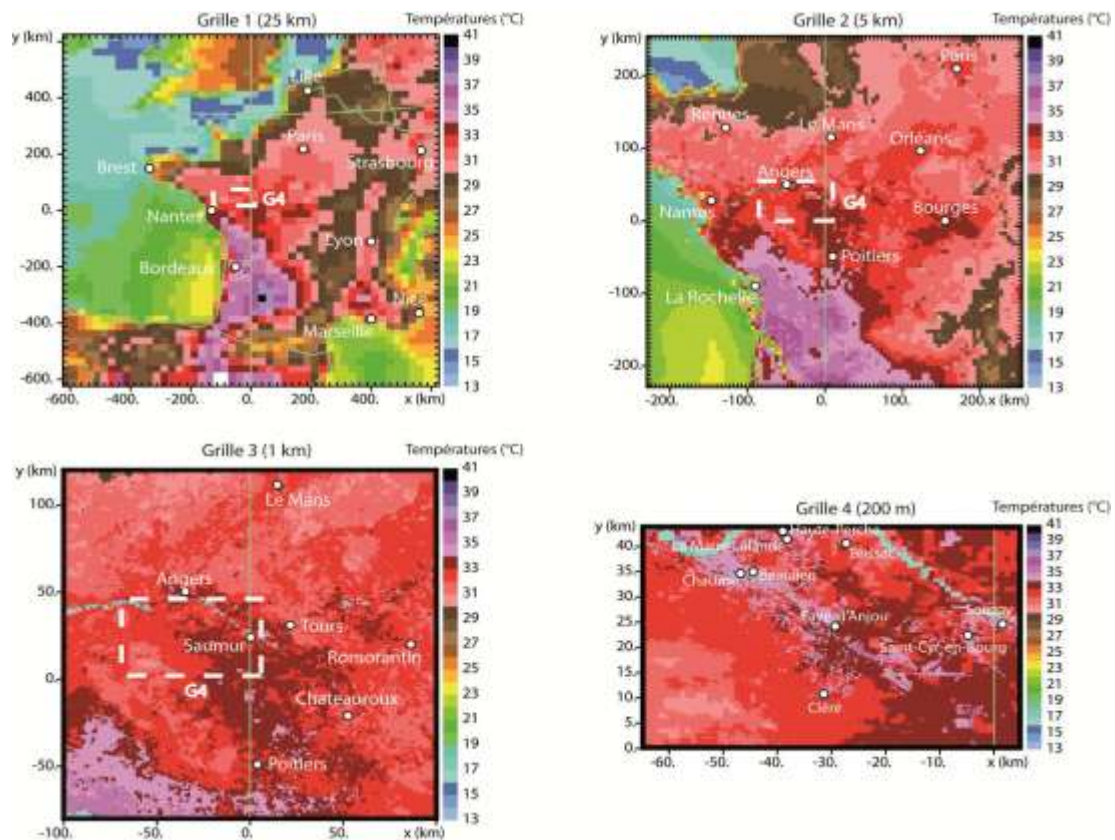


Figure 16: Températures simulées à 2 m par le modèle RAMS le 8 juillet 2010 à 15h TU pour les 4 grilles imbriquées.

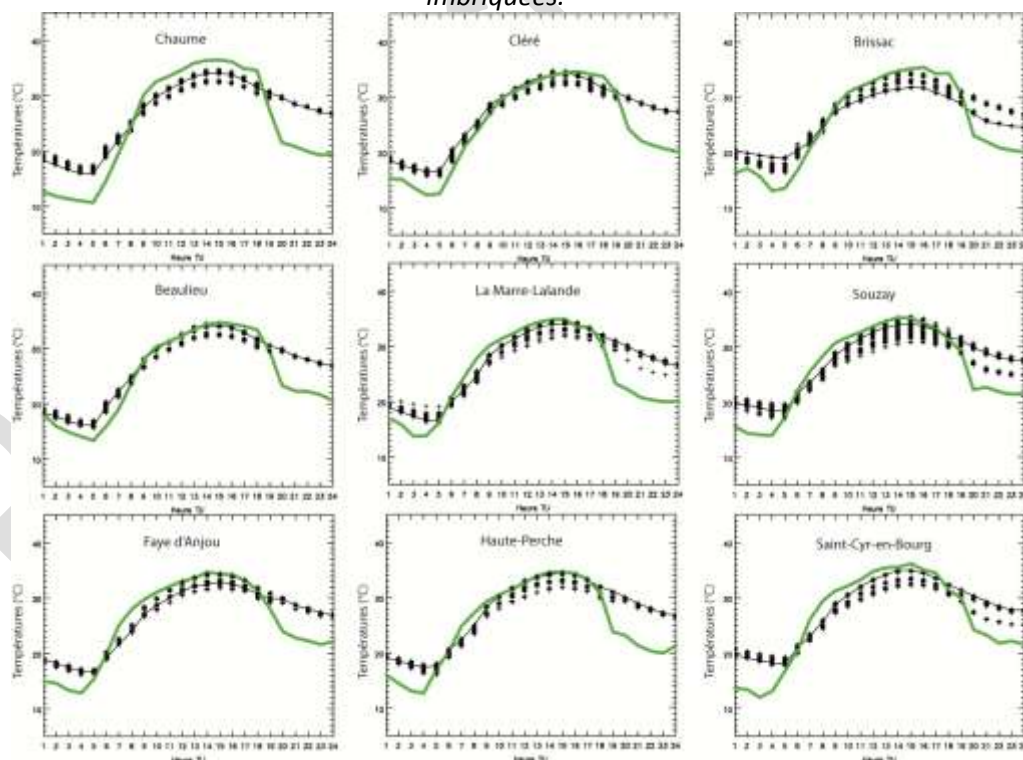


Figure 17 : Températures horaires observées (en vert) par les différentes stations du réseau TERVICLIM/INRA et simulées par RAMS (en noir) pour le 8 juillet 2010. Les barres de part et d'autre de la courbe noire représentent la variabilité spatiale de la température dans un rayon de 1,5 km autour de la maille correspondant à la station.

- *Modélisation multicritère*

La modélisation spatiale des températures minimales et maximales a également été réalisée au pas de temps mensuel et journalier avec la construction d'un modèle statistique multicritères. La modélisation par régressions multiples a permis de quantifier les relations existantes entre les différents facteurs locaux liés à la topographie et la variabilité de la température dans site expérimental des Coteaux du Layon. L'ensemble des modèles multicritères réalisés explique une part plus ou moins importante de la variabilité de la température, et suivant les mois ou les dates ces modèles sont perfectibles.

La spatialisation de la température minimale est beaucoup moins complexe que celle de la température maximale. En effet, la part des facteurs locaux lors des nuits calmes, sans vent et avec ciel dégagé, est importante. Des inversions thermiques se mettent souvent en place et des contrastes thermiques marqués peuvent alors être observés entre la vallée et les plateaux (figure 18).

La spatialisation de la température maximale est beaucoup plus complexe. En journée, la turbulence de l'air se met en place, en lien avec l'énergie solaire et les inversions thermiques disparaissent. La relation avec l'altitude s'inverse donc mais pour le site des Coteaux du Layon, le dénivelé étant très faible, cette relation ne ressort pas comme évidente. Des facteurs comme l'inclinaison de la pente et son orientation vont expliquer en partie, la variabilité spatiale de la température maximale (figure 19). Dans les modèles mensuels et journaliers, nous avons vu que certainement d'autres éléments locaux devaient permettre de mieux modéliser les champs thermiques. Ces facteurs environnementaux seraient à relier avec les positions d'abri de certaines parcelles et la ventilation plus importante de certains coteaux. Des indices tels que l'ouverture du paysage, l'exposition aux vents pourraient être calculés et intégrés aux modèles. Enfin, le nombre de capteurs utilisé dans le cadre de cette expérimentation pourrait être augmenté afin d'améliorer la couverture spatiale et donc la représentativité du site viticole.

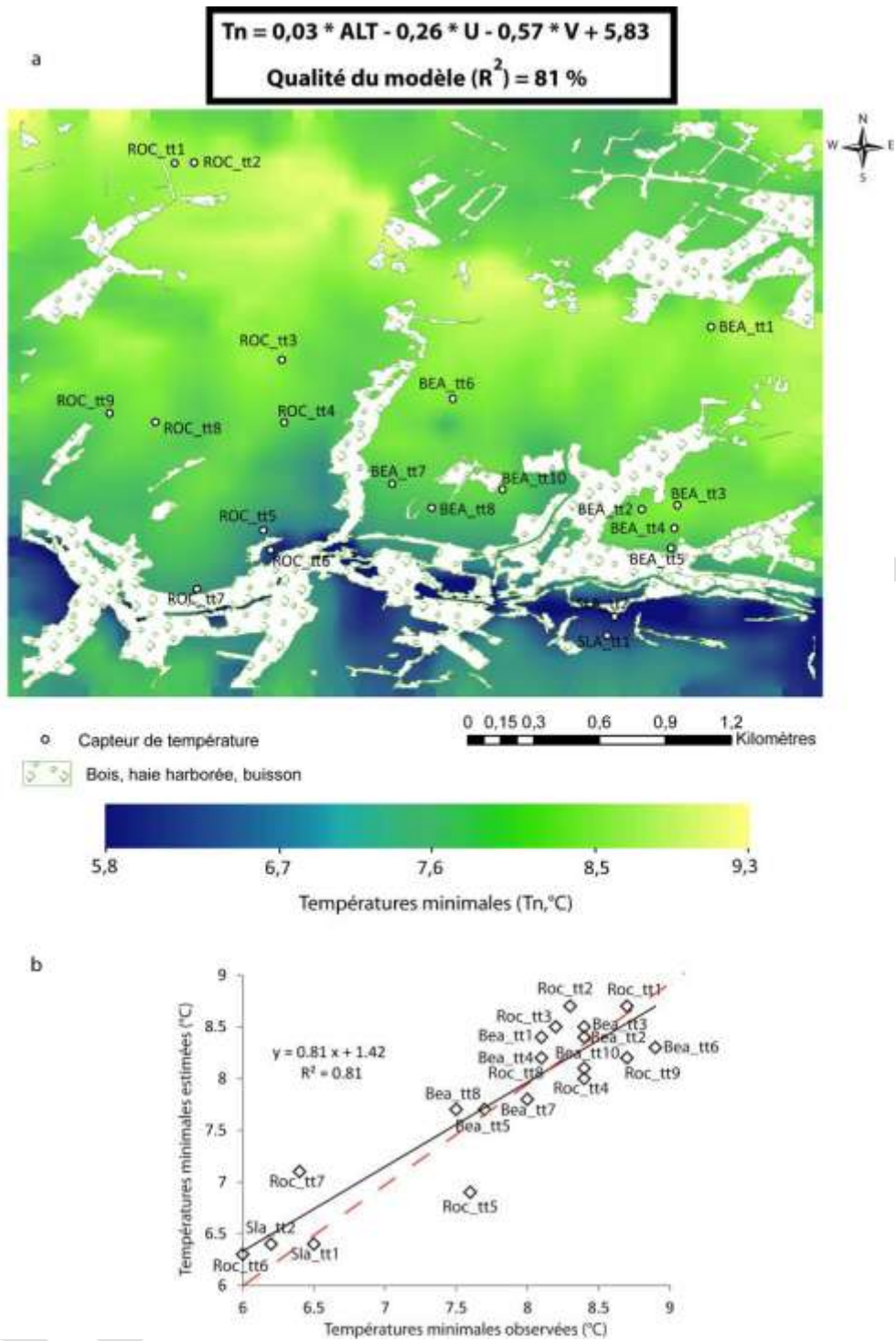


Figure 18 : Spatialisation de la température minimale pour le mois d'octobre 2009 (a) et graphique cartésien des températures minimales enregistrées par les capteurs et des températures minimales estimées par le modèle multicritères (b).

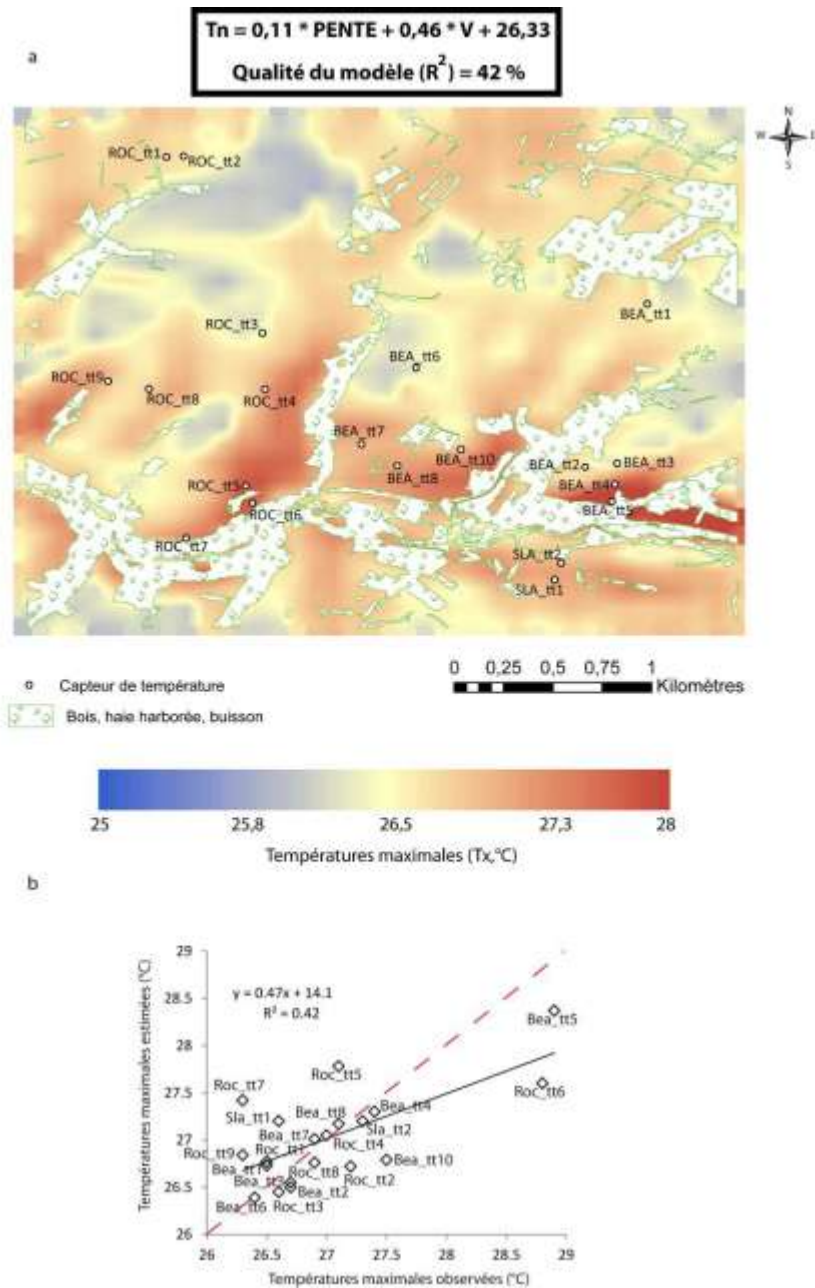


Figure 19 : Spatialisation de la moyenne des températures maximales du le mois de juillet 2009 (a) et graphique cartésien des températures maximales enregistrées par les capteurs et des températures maximales estimées par le modèle multicritères (b).

L'utilisation des modèles de régression multiple permettent, de modéliser et spatialiser à échelle fine sur l'ensemble du territoire des variables climatiques. Cependant, les variables à introduire dans le modèle doivent être étudiés préalablement à l'étude statistique. Cette dernière doit correspondre aux mieux au phénomène étudié, et ne peut être utilisé tel quel pour justifié l'ensemble des résultats. Elle doit être confrontée à la réalité et aux connaissances terrain pour être validé. La modélisation par régression est un outil puissant permettant d'obtenir une multitude d'information sur un espace. Mais elle ne peut qu'être qu'une approximation (relativement précise) de la réalité, particulièrement à échelle fine ou de nombreux phénomènes climatiques locaux interviennent dans la variabilité des températures.

Toutefois, dans le cadre de nos travaux sur l'impact du changement climatique aux échelles locales, l'utilisation des modèles de régression multiple permettent de modéliser la variabilité spatiale du climat engendrée par les effets locaux. Un modèle de base a été mis en place afin d'être applicable sur l'ensemble



des vignobles expérimentaux. Celui-ci a été appliqué pour les vignobles des Coteaux du Layon et de Saumur Champigny (figure 20).

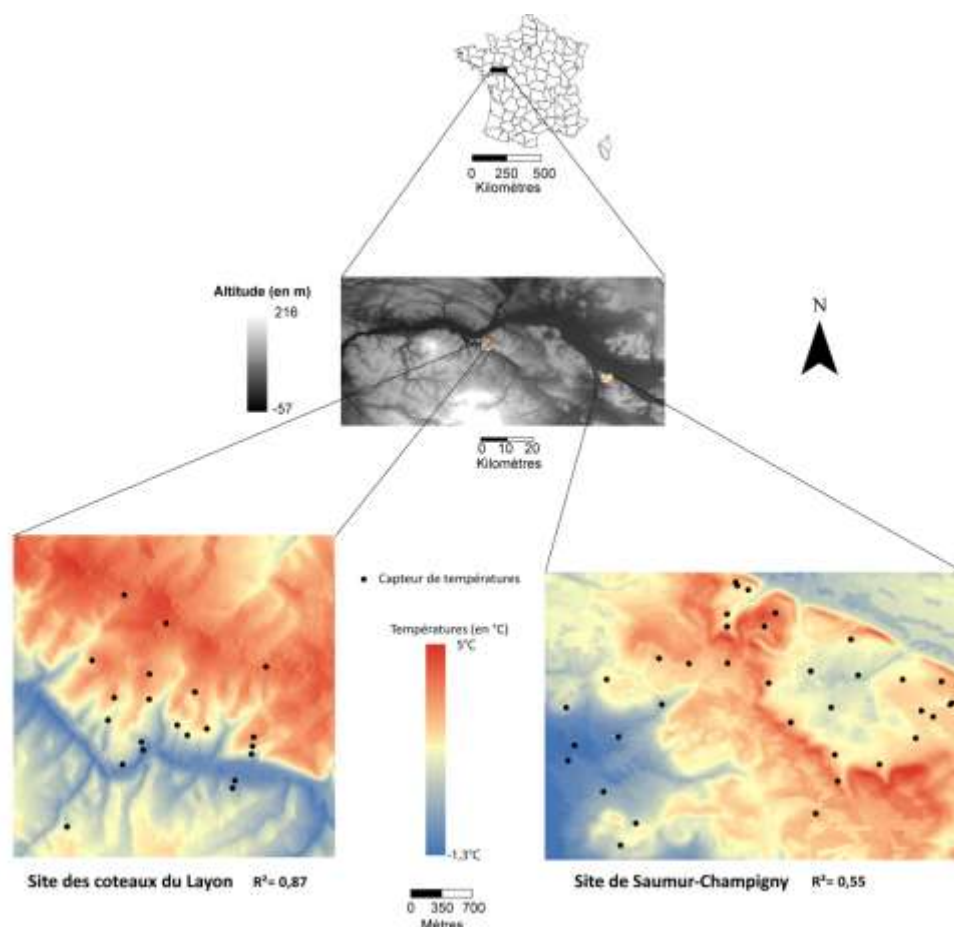
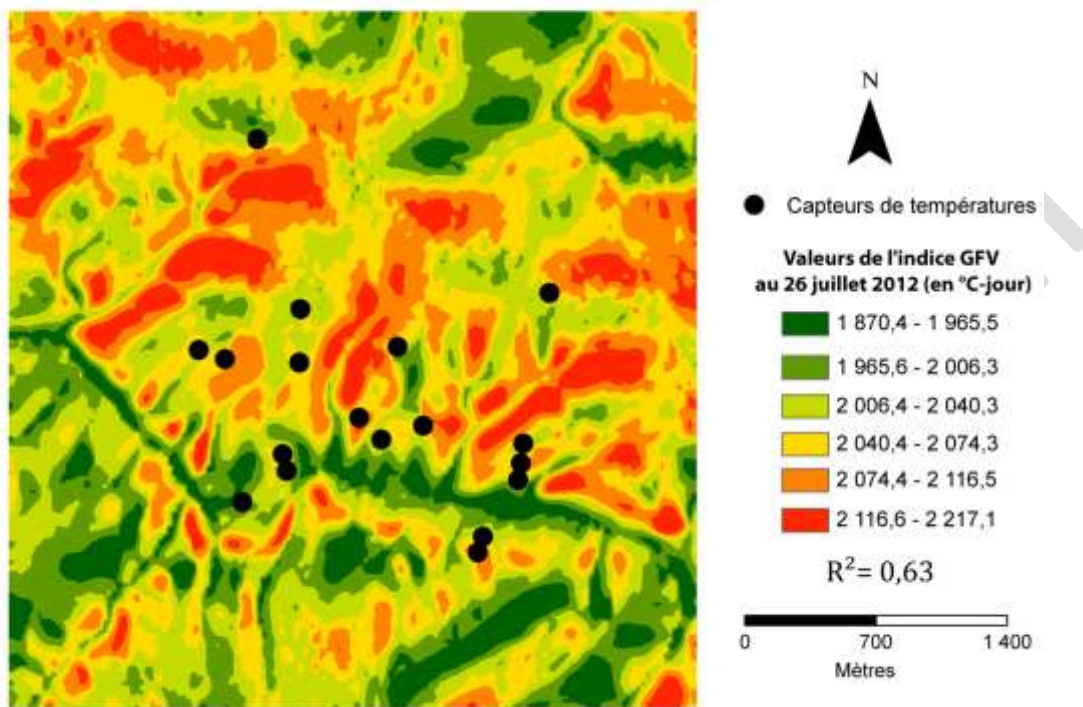


Figure 20 : Application du modèle multicritères (régressions multiples) aux vignobles des Coteaux du Layon et de Saumur Champigny.

Les modèles de régression multiple ont également été développés et appliqués avec les indices bioclimatiques calculés durant la croissance de la vigne en fonction des différents stades phénologiques. Comme les modèles sont basés sur les stades phénologiques clés, ce sont les conditions climatiques (température en particulier) qui déterminent ces stades-clés et finalement les conséquences le développement de la vigne. En utilisant données de température du modèle GFV (GDD ; base de 10 °C) (Parker et al., 2011), nous avons modélisé la variabilité de cet indice dans le Val de Loire. Dans le vignoble des Coteaux du Layon, les résultats montrent une forte variabilité spatiale des sommes de degrés/jours en relation avec les caractéristiques locales (ex : pente, exposition, ...) et la phénologie du Chenin (figure 21).

**Spatialisation de l'indice GFV  
dans les coteaux du Layon le 26 juillet 2012**



*Figure 21 : Spatialisation des sommes de degrés/jours dans les Coteaux du Layon.*

Actuellement, nous intégrons les scénarios du changement climatique dans ces modèles multicritères adaptés à l'échelle des terroirs viticoles. La variabilité spatiale du climat locale est modélisée par les régressions multiples. Ces modèles sont couplés avec les sorties régionalisées des sommes de degrés jours (sorties de modèles avec une résolution de 8km issues du portail DRIAS) (figure 22).

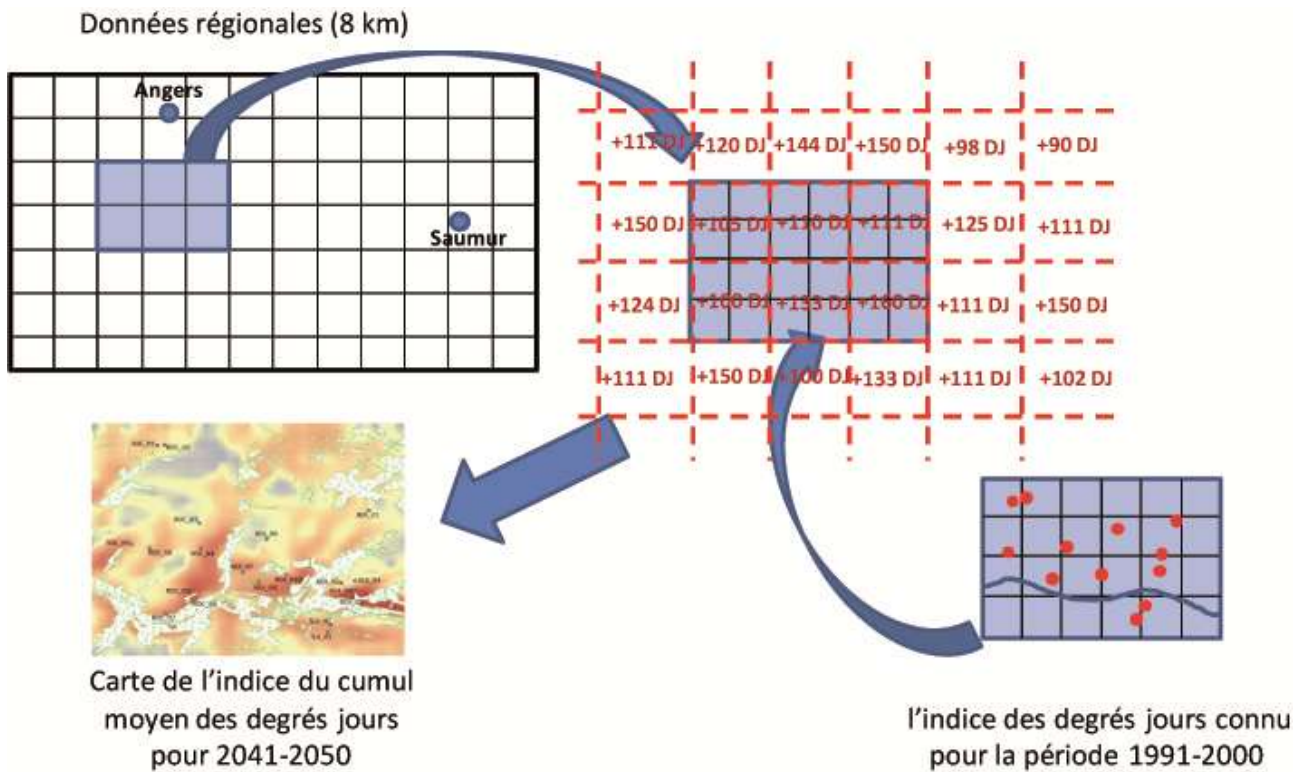


Figure 22 : Méthodologie de spatialisation des sommes de degrés/jours en fonction des scénarios du changement climatique.

Les deux types de modélisation présentés ci-dessus (modélisation numérique et multicritères) présentent chacun des avantages et des inconvénients.

La modélisation numérique à méso-échelle et l'interpolation spatiale de données climatiques ont leur spécificité, leurs avantages et inconvénients. La modélisation numérique à méso-échelles permet de prendre en compte les conditions atmosphériques d'échelle synoptique ainsi que l'imbrication des échelles, mais elle reste difficilement utilisable aux échelles fines notamment à cause des « temps de calcul » et de problèmes de paramétrisation. L'interpolation spatiale par régressions multiples présente l'avantage d'être adaptée aux échelles locales, mais les résultats n'apportent qu'une explication partielle car le modèle est statique.

## **Partie 3 : Intégration des scénarios GIEC dans le modèle méso-échelle RAMS (Bonnardot V. et Cautenet S.)**

La partie 2 a montré l'intérêt de l'utilisation de modèles climatiques méso-échelle pour la régionalisation de phénomènes atmosphériques avec des résolutions fines inférieures à 10 km (Castel et al., 2010) jusqu'à 1 km et 200 m (Bonnardot et Cautenet, 2009). Les simulations numériques réalisées dans TERADCLIM ont été effectuées pour différentes régions viticoles en France et dans le monde (Bonnardot et al., 2010 ; Briche et al., 2011).

Grace à une résolution spatiale fine obtenue avec RAMS (5 km) par rapport à ARPEGE\_Climat (50 km), les hétérogénéités de surface  $\gamma$  sont mieux représentées, on peut donc s'attendre à une meilleure adéquation entre les observations et les valeurs simulées. Avant l'intégration de différents scénarios de changement climatique du GIEC dans le modèle à méso-échelles, une phase de validation de données a été effectuée sur une période de référence (1991-2000) puis une phase de simulation future sur la période 2041-2050.

### **3.1 Méthodologie**

Le modèle atmosphérique méso-échelle –RAMS- (v6.0) (Cotton et al., 2003) a été initialisé et forcé toutes les 6 heures aux limites latérales par les champs 3D issus d'ARPEGE\_Climat (v.3) –ARPEGE- (Météo-France; Déqué, 2001).

Les données ARPEGE nous ont été délivrées par Michel Déqué (Météo-France). Ce sont celles qui ont servi dans les projets européens MERCURE et PRUDENCE (Déqué et al., 2005) et dans les projets GICC-CARBOFOR et IMFREX (Déqué, 2007) simulant une succession de conditions climatiques pour la période de contrôle et pour le scénario A2. Le modèle ARPEGE\_Climat, qui prend en compte les forçages tant anthropiques que naturels (incluant les émissions biogéniques et volcaniques, et le forçage solaire), reproduit les caractéristiques climatiques moyennes de la période 1971-2000 sur l'Europe de l'Ouest (Terry et al., 2010).

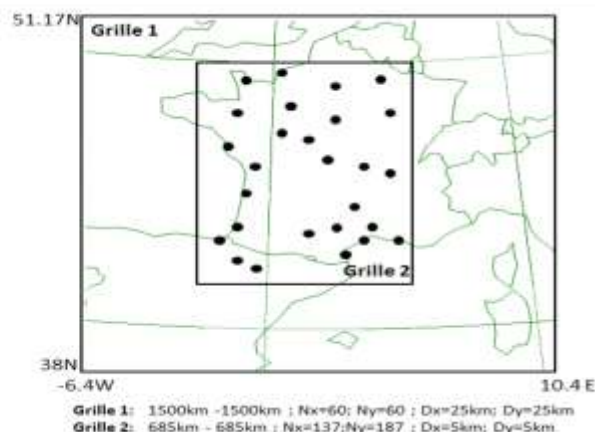
Dans ce programme GICC-TERADCLIM, les sorties d'ARPEGE ont ainsi été désagrégées pour 2 périodes de 10 ans pour réduire les temps et coûts de calcul au CINES: **1991-2000** (période de contrôle) et **2041-2050** pour la projection climatique future proche. Les champs 3-D utilisés pour la période future sont ceux générés sous les conditions pessimistes du scénario SRES A2 pour la fin de ce siècle avec des concentrations de CO<sub>2</sub> passant de 350 ppm à 850 ppm entre 2000 et 2100 (Nakićenović & Swart, 2000).

Les simulations climatiques méso-échelle ont été effectuées pour certains mois clés du cycle de la vigne (avril, juillet et août), sur la période de référence 1991-2000 et en utilisant deux grilles imbriquées : Grille 1 avec une résolution horizontale de 25 km correspondant au domaine de forçage ; Grille 2 avec une résolution horizontale de 5 km (Figure 17). Cette dernière grille à haute résolution permet une comparaison des sorties de modèle avec les données observées à une échelle plus pertinente pour les différents vignobles étudiés en Europe de l'ouest (Champagne, Val de Loire, Bordelais et Navarre).



**Champs 3D**  
**ARPEGE\_Climat (v3)**  
**(Météo-France)**  
 [MERCURE et PRUDENCE (Déqué *et al.*, 2005)  
 GICC-CARBOFOR et IMFREX (Déqué, 2007)]  
**Résolution 0.5°**  
**Europe de l'Ouest**

**Modèle atmosphérique**  
**méso-échelle (RAMS V6.0)**  
**2 grilles imbriquées avec**  
**résolutions de 25 km et 5 km**  
**(+ T° surface mer**  
**RAMS 1991-2000)**



*Figure 17 : Grilles imbriquées et localisation des stations météorologiques utilisées  
 Répartition des 34 stations utilisées pour la validation. (Bonnardot *et al.*, 2012)*

*Les points représentent la localisation des stations dont les données ont été utilisées pour la validation des simulations*

Les données journalières de température (34 stations) ont été issues du fichier européen ECA&D (Klein Tank, 2002) ; de Météo-France et du Bureau météorologique de la province de Navarre. L'intérêt s'est porté sur 3 stations situées dans les vignobles français de la Champagne (Reims), du Val de Loire (Angers) et du Bordelais (Bordeaux).

Une analyse statistique a été réalisée sur les différences entre les valeurs simulées (par RAMS et ARPEGE) et les valeurs observées de la période de référence. Etant dans une démarche de scénario climatique, les différences entre les valeurs simulées et observées journalières n'ont pas été effectuées, mais les températures moyennes, maximales et minimales moyennées sur le mois ont été analysées. La validation a donc été effectuée sur les moyennes mensuelles (Déqué, 2007).

Puis, nous avons voulu essayer de produire des données climatiques à une résolution spatiale de 5 km sur la France en utilisant un modèle climatique régional et de les confronter aux données régionalisées (à 8 km) fournies par le CERFACS (Pagé *et al.*, 2010) afin de montrer la contribution ou non de la désagrégation dynamique à haute résolution.

### **3.2 Résultats de la modélisation numérique**

Les résultats concernent les simulations des températures moyennes mensuelles pour les mois d'avril, juillet et août, ainsi que celles des températures minimales moyennées sur le mois d'avril (période de débourrement de la vigne pour évaluer les risques de gel printanier) et des températures maximales moyennées sur le mois de juillet (mois le plus chaud pour évaluer les fortes chaleurs). Seuls les résultats pour les stations de Reims, Angers, et Bordeaux sont présentés en détails. D'après la matrice de corrélation de Pearson, les températures moyennes mensuelles simulées par RAMS (5 km) ont été meilleures que celles simulées par ARPEGE (50 km), notamment en avril et août.

Les différences entre les températures moyennes mensuelles (avril, juillet et août) simulées par les deux modèles et les températures ont été observées pour 34 stations permettent d'avoir une vue générale des simulations. Les écarts moyens varient de -2,1 à +2,1°C avec RAMS (axe des abscisses) et de -4,5 à +1,2°C avec ARPEGE (axe des ordonnées), selon les stations. Dans l'ensemble, les simulations des températures moyennes sont sous-estimées par les deux modèles au mois d'avril. Elles sont meilleures pour les mois de juillet et août. Les biais, surtout celui d'avril, proviennent, selon Déqué, de la physique des basses couches d'ARPEGE donc du forçage de grande échelle.

Par exemple, les simulations des températures minimales moyennes d'avril ont été mieux reproduites par RAMS que par ARPEGE (figure 18). Les différences entre les valeurs simulées par RAMS et les valeurs observées sont en moyenne plus réduites (de  $-0,7^{\circ}\text{C}$  à Bordeaux à  $+1,2^{\circ}\text{C}$  à Reims) que les différences entre les valeurs simulées par ARPEGE et les valeurs observées (de  $-1,8^{\circ}\text{C}$  à Reims à  $-3,5^{\circ}\text{C}$  à Bordeaux). ARPEGE a sous-estimé plus fortement les valeurs minimales du mois d'avril que RAMS qui a fourni des valeurs plus proches des observations avec cependant des différences spatiales, les sous-estimant à Bordeaux et Angers et les surestimant à Reims. Par ailleurs, RAMS a sous-estimé les valeurs moins fréquemment qu'ARPEGE. Le pourcentage avec des écarts réduits (entre  $-2,5$  et  $2,5^{\circ}\text{C}$ ) est toujours plus élevé avec RAMS quelles que soient les 3 stations.

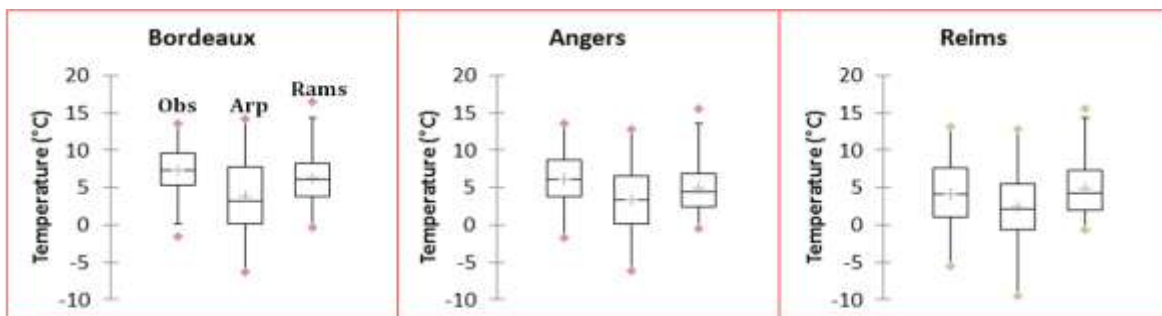


Figure 18 : Températures minimales d'avril (1991-2000) : observées (Obs), Arpège (Arp) et RAMS (Rams) (Bonnardot et al, 2012)

Les séries journalières produites par les modèles ARPEGE-Climat et RAMS forcé par ARPEGE-Climat n'ont pas eu forcément la même distribution statistique que les séries journalières observées mais, malgré des différences spatiales, les modèles ont reproduit plus ou moins correctement les valeurs mensuelles minimales, maximales ou moyennes. Les résultats ont montré l'apport et la pertinence de la résolution 5 km par rapport aux sorties de modèle global ARPEGE-Climat qui, vu son échelle, a eu des résultats « honorables » comparés aux observations, mais insuffisantes pour les besoins des viticulteurs pour lesquels une échelle très fine est requise.

Les biais sont dus à l'échelle de comparaison entre des données en points de grille de résolutions différentes et des données stationnelles. Cependant les résultats ont montré que le modèle méso-échelle a réduit aussi bien les biais froids sur les moyennes des minimales d'avril que les biais chauds sur les moyennes des maximales d'août ce qui peut permettre une meilleure évaluation des risques de gel printanier et de fortes chaleurs estivales.

La figure 19 illustre la distribution des températures minimales d'avril simulées par les deux modèles pour la période 2041-2050 (SRES A2) avec la modélisation méso-échelle fournissant une meilleure précision, à l'image de la figure 18. En général, ARPEGE a projeté des valeurs plus basses que RAMS.

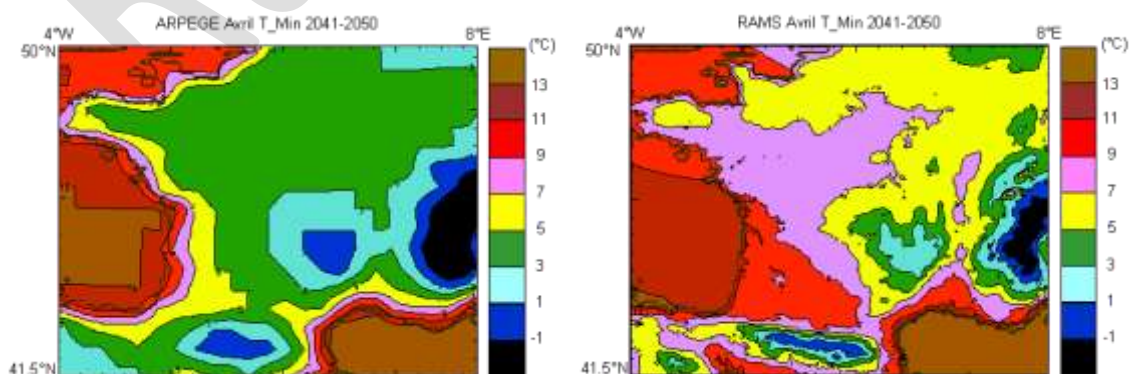


Figure 19. Températures minimales d'avril simulées par a) ARPEGE (résolution 50 km) et b) RAMS (résolution 5 km), pour la période 2041-2050 (SRES scénario A2) et pour le domaine de la grille 2.

Le biais froid significatif de grande échelle observé sur la période de contrôle a été reproduit sur la période future. Les simulations d'ARPEGE pour la période 2041-2050 sont même plus basses que les observations sur la période 1991-2000 dans les six stations (Angers, Bordeaux, Reims, Savigny, Montélimar, Nîmes). En revanche, le modèle méso-échelle simule un réchauffement important pour 2041-2050.

La figure 20a représente la distribution des températures maximales de juillet simulées par RAMS pour la période 2041-50 sous conditions de scénario A2 et la figure 20b représente les anomalies par rapport à la période de référence. RAMS fait ressortir trois pôles régionaux de chaleur dans les régions du centre-ouest et du sud-ouest de la France, c'est-à-dire le bassin de la Loire moyenne et inférieure et l'Aquitaine intérieure ainsi que la vallée du Rhône et de la Saône. On distingue très bien en 2041-2050 avec RAMS la limite de la forêt landaise. Le gradient littoral est fort avec des conditions climatiques uniformément plus chaudes sur les bordures du continent.

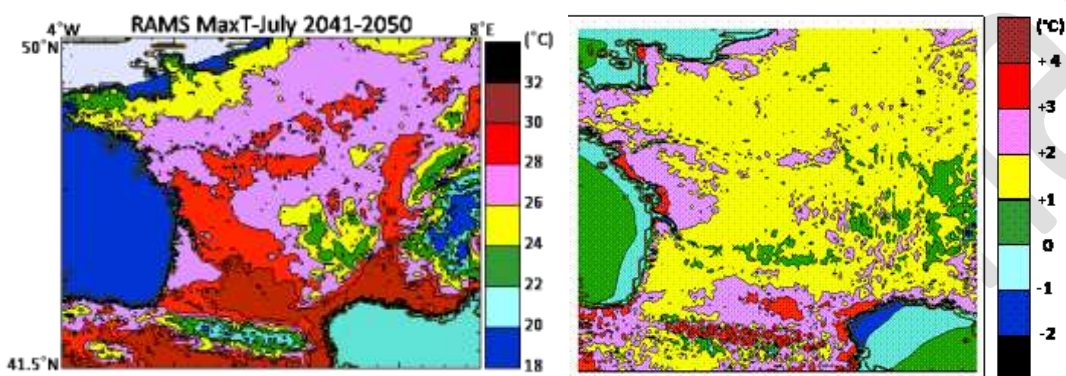


Figure 20 : Température maximale du mois de juillet simulée par RAMS pour la période 2041-2050 sous conditions SRES A2 et pour la grille 2 (a) ; Différence entre 1991-2000 and 2041-2050 (b). (Bonnardot et al, 2012)

### 3.3 Résultats des simulations méso-échelle par rapport aux sorties ARPEGE\_RETIC

Les données simulées par ARPEGE et désagrégées par le modèle atmosphérique méso-échelle RAMS ont été comparées aux données simulées par ARPEGE et régionalisées par la méthode « type de temps » du CERFACS et confrontées aux données observées de températures minimales d'avril (figure 21) et températures maximales de juillet (figure 22) sur la période 1991-2000.

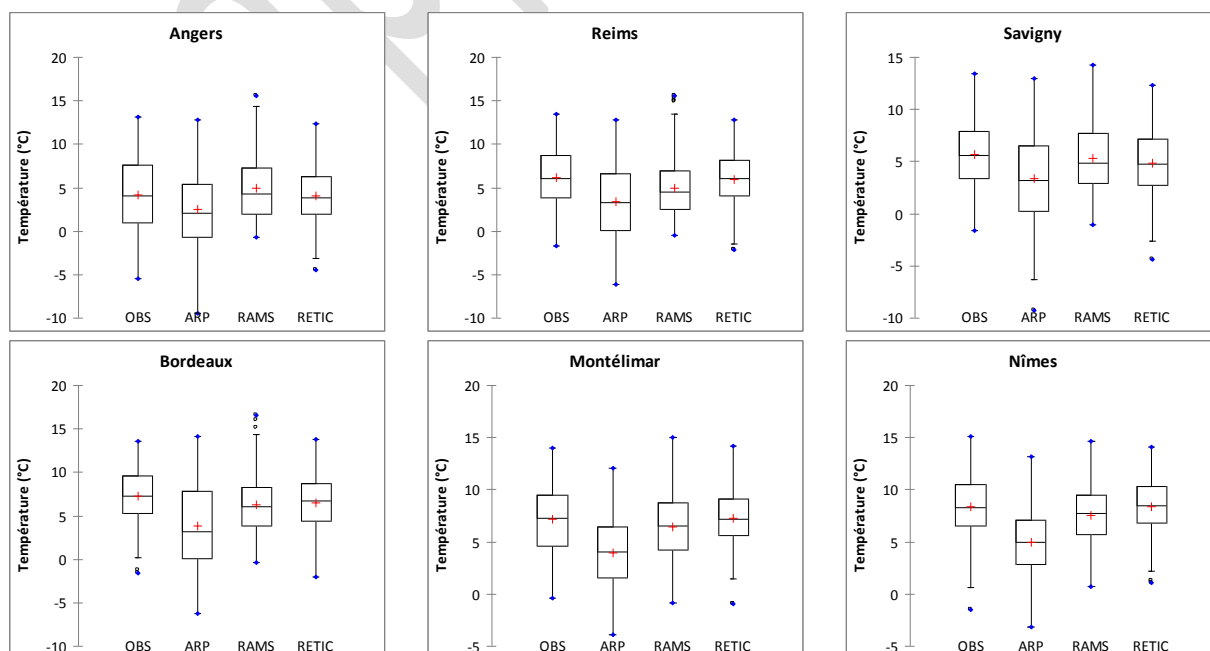


Figure 21 : Distribution des températures minimales d'avril observées (OBS) à Angers-Beaucouzé (Angers), Reims-Courcy (Reims), Savigny-lès-Beaune (Savigny), Bordeaux-Mérignac (Bordeaux), Montélimar-Ancône (Montélimar) et Nîmes-Courbessac (Nîmes) ; simulées par ARPEGE (résolution 50 km) (ARP), désagrégées par RAMS (résolution 5 km) (RAMS) et régionalisées (simulations ARPEGE\_RETIC désagrégées à 8 km) (RETIC) pour la période 1991-2000

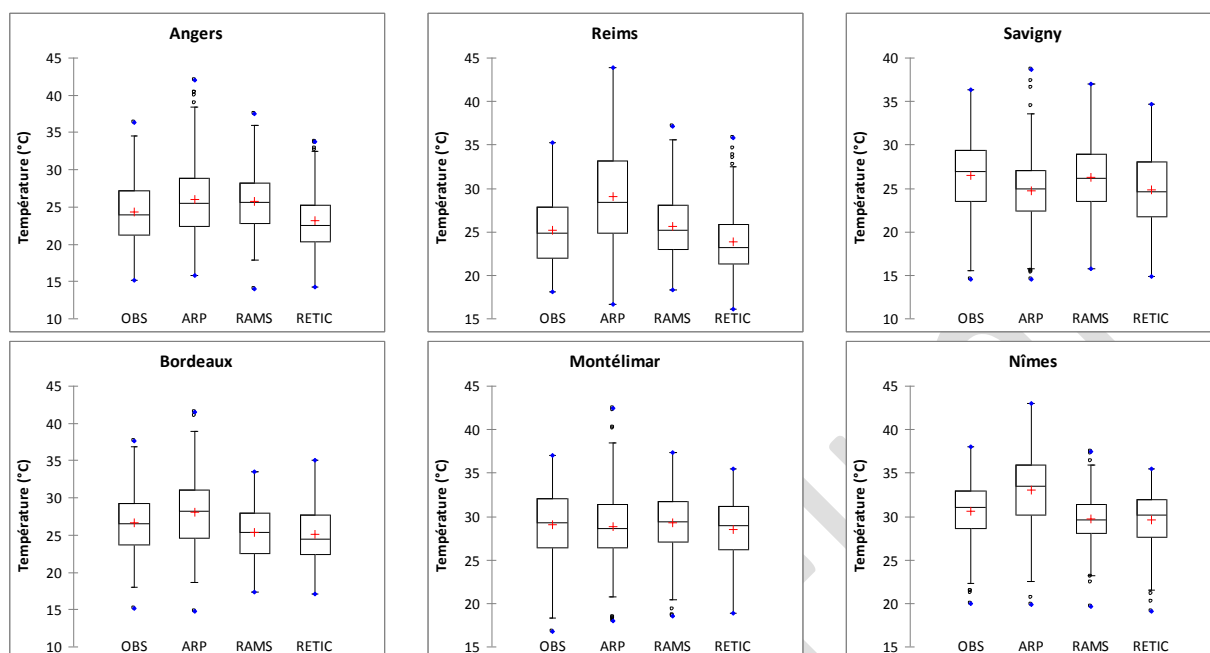


Figure 22 : Distribution des températures maximales de juillet observées (OBS) à Angers-Beaucouzé (Angers), Reims-Courcy (Reims), Savigny-lès-Beaune (Savigny), Bordeaux-Mérignac (Bordeaux), Montélimar-Ancône (Montélimar) et Nîmes-Courbessac (Nîmes) ; simulées par ARPEGE (résolution 50 km) (ARP), désagrégées par RAMS (résolution 5 km) (RAMS) et régionalisées (simulations ARPEGE\_RETIC désagrégées à 8 km) (RETIC) pour la période 1991-2000

La distance la plus courte et la différence d'altitude la plus réduite entre les centroïdes des grilles de modélisation (aux différentes résolutions) et les points de mesure (localisation des stations météorologiques) ont été un critère de sélection pour le choix des mailles représentatives des stations météorologiques et ainsi l'extraction des données modélisées.

Quelle que soit la méthode de transfert d'échelle utilisée (désagrégation dynamique ou statistique), les résultats présentés montrent que dans tous les cas (pour les 6 stations et les températures minimales d'avril et maximales juillet), ces 2 distributions (RAMS et RETIC) sont statistiquement significatives et plus « réalistes » que la distribution des températures obtenues à basse résolution (ARP). Les distributions des températures simulées à 5 km, proches de celles à 8 km sont donc proches de la distribution des températures observées.

Seules les simulations RAMS des températures minimales d'avril pour Savigny, ainsi que celles des températures maximales de juillet pour Reims et Savigny semblent être « meilleures » que celles de RETIC.

## Conclusion

Le Regional Atmospheric Modeling System a contribué à délivrer une série de données climatiques désagrégées à une résolution de 5 km. Les résultats montrent l'apport indéniable de la simulation méso échelle. Elle réduit les biais induits par le forçage grande échelle et aboutit à une meilleure adéquation entre les valeurs simulées et les valeurs observées en raison de la prise en compte de l'hétérogénéité de surface par rapport au modèle climatique global. La haute résolution permet de mieux évaluer les

structures spatiales des températures et par conséquent les futurs risques climatiques, avec cependant des différences régionales notables et une part d'incertitude liée au scénario et à la période de référence. La simulation méso échelle des températures pour 2041-2050 en assimilant le scénario pessimiste A2 aboutit à une augmentation de la température minimale d'avril qui varie de 0,3 °C à 2,7 °C et de la température maximale de 0,4 à 3,4 °C avec parfois des biais selon les régions viticoles étudiées. Ainsi, le gel printanier est projeté inexistant en avril même dans les stations septentrionales et les jours de fortes chaleurs (TX > 35 °C) sont projetés plus nombreux, jusqu'à 2 jours de plus dans l'ouest.

Les résultats obtenus avec RAMS s'appuient sur une phase préalable d'évaluation de la méthode en comparant des observations et des simulations sur la période 1991-2000 pour des sites spécifiques. Cependant, il faut les relativiser car ils sont dépendants des sorties d'ARPEGE utilisées pour le forçage ainsi que de la période de référence choisie. Ils seraient sans doute différents avec d'autres runs, d'autres scénarios et d'autres périodes de contrôle. Le seul inconvénient de la désagrégation dynamique reste le temps de calcul, trop coûteux qui ne permet pas de traiter de longues périodes et un grand nombre de scénarios limitant l'évaluation de l'incertitude.

Après la simulation du changement climatique à l'échelle des terroirs, la phase suivante consiste à proposer des scénarios régionalisés/localisés d'adaptation pour la profession viticole. L'objectif est donc de parvenir à spécifier un environnement de modélisation systémique et intégré capable de simuler la croissance de la vigne sous des contraintes multiples (pente, exposition, nature des sols, variabilité climatique...) et d'intégrer des stratégies de production et des règles d'adaptation de ces stratégies en fonction de l'évolution de ces contraintes.

## Partie 4 : Scénarios d’adaptation des vins de terroir au changement climatique à une échelle de temps de 15-30 ans avec l’utilisation d’une plateforme Multi-agents (SMA). (Cyril Tissot, Mathias Rouan, David Brosset, Etienne Neethling).

Cette action de recherche visait à simuler l'impact de la variabilité du climat sur la dynamique de la vigne et les capacités d'adaptation des viticulteurs au changement climatique. Les travaux de recherche menés ont abouti au développement d'un modèle multi-agents permettant de modéliser les activités viticoles dans un contexte de changement climatique et d'analyser l'évolution des stratégies de production viticole.

L'objectif est de relier les itinéraires agro-techniques à l'évolution des contraintes d'environnement de la vigne pour évaluer les méthodes de production et les stratégies d'adaptation des viticulteurs. La technologie multi-agents permet de modéliser l'ensemble des composantes de l'activité viticole et d'analyser les relations entre ces différentes composantes. Cette démarche systémique s'accompagne d'une approche analytique qui vise à étudier les modifications des pratiques viticoles en fonction de la dynamique de la vigne, des contraintes d'environnement, de l'orientation des productions et de la structure économique des exploitations.

L'approche proposée s'appuie sur les observations climatiques et agronomiques menées sur le terrain (Bonnefoy et al., 2009, Neethling et al., 2011) et les questionnements liés à la recherche d'une adaptation optimale de la vigne à la spécificité des terroirs viticoles (Barbeau et al., 2001 ; Asselin et al., 2003).

### 4.1 Elaboration d'une base de connaissance

La production d'une base de connaissance (données des enquêtes, du milieu naturel, etc.) regroupant l'ensemble des informations permettant de décrire les pratiques et d'expliquer la relation entre la vigne et le climat constituait un préalable indispensable à la démarche de modélisation. Il s'agissait de produire une description fine du déroulement des activités viticoles en les replaçant dans un contexte de changement climatique.

Pour cela, des enquêtes approfondies et indépendantes ont été réalisées auprès des viticulteurs afin de bien comprendre les interactions entre la variabilité climatique et les pratiques culturelles (annuelles et pérennes, cf. figure 23).

	1. Enquêtes	2. Enquêtes
<b>Objectif</b>	<b>Etude de la sensibilité des pratiques annuelles aux conditions climatiques</b>	<b>Etude de la capacité d'adaptation des viticulteurs</b>
<b>Méthode</b>	Semi-dirigée	Semi-dirigée
<b>Questions et thèmes abordés</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Périodes de travail</li> <li>• Techniques et machines impliquées</li> <li>• Variables climatiques favorables et défavorables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comment les pratiques ont évolué</li> <li>• Facteurs menant aux changements</li> <li>• Conditions climatiques caractérisant « bon » et « mauvais » millésimes</li> <li>• Stratégies d'adaptation</li> </ul>

Figure 23 : Caractéristiques des enquêtes approfondies et indépendantes réalisées auprès des viticulteurs.



La première étape consistait à évaluer la sensibilité de 21 pratiques annuelles aux conditions météorologiques. Cette enquête semi-dirigée a traitée les questions et les thèmes concernant les périodes favorables et défavorables de travail, les techniques et les machines impliquées et l'influence des conditions climatiques sur la période de travail. La deuxième étape visait à évaluer la capacité d'adaptation des vigneron. Les vigneron ont lors de cette enquête été interrogés sur la façon dont les pratiques ont changé, les facteurs menant à ces changements, les conditions climatiques qui caractérisent les «bons» et les «mauvais» millésimes et les stratégies d'adaptation adoptées au cours de ces millésimes.

L'ensemble de ces informations ont été recueillies au sein d'une base de données au format postgresql/postgis qui permet d'administrer les informations collectées et d'y associer des couches d'information géographique. Cette configuration offre la possibilité de lier des variables de terrain à des objets spatiaux et de réaliser des requêtes pour produire des documents cartographiques.

#### **4.2 Construction du modèle multi-agents**

La modèle multi-agent à été construit sur la base des concepts de la plateforme DAHU (Tissot, 2003 ; Tissot et al., 2012) qui permet de décrire le fonctionnement et la distribution spatio-temporelle d'activités humaines, modélisés sous la forme d'agents réactifs contraints par des variables exogènes (contraintes biophysiques, socio-économiques et réglementaires). Chaque activité est représentée par un agent autonome capable de réagir à un environnement vraisemblable préalablement modélisé. Ces agents restent à des niveaux de spécification génériques et ne possèdent aucune spécificité liée à l'implantation spatiale des activités modélisées. En revanche ils intègrent des capacités de réaction et d'adaptation à l'évolution de leur environnement, celui-ci résultant d'une combinaison de contraintes naturelles et anthropiques associées à un territoire.

- *Formalisation des agents*

Trois types d'agents permettent de hiérarchiser les relations entre les activités anthropiques et leur environnement :

- les Agents Superviseurs représentent les structures de régulation. Ils orientent et contrôlent le bon déroulement des activités,

- les Agents Exploitants restituent le déroulement des pratiques associées à chaque activité. Ils possèdent des objectifs et élaborent une stratégie,

- les Agents Production ont pour objectif de produire des ressources dans un environnement contraint. Ils représentent l'élément central du simulateur car ils déterminent la nature et la qualité des ressources disponibles pour les Agents Exploitants. Ils jouent donc un rôle essentiel dans la stratégie des Agents Exploitants et dans l'attitude des Agents Superviseurs qui, en fonction de l'état de cette ressource ou de son environnement, peuvent prendre des mesures restrictives. Chaque Agent Production est construit, à partir d'un archétype, comme un processus "hors-sol" de manière à appréhender l'ensemble des échelles temporelles en excluant toute perturbation liée au particularisme des contraintes d'environnement. A ce stade, le temps est considéré comme un élément structurant chargé de faire le lien entre des agents en perpétuelle évolution et des états de l'environnement observés à des instants t.

Ce schéma relationnel est rendu possible grâce à la gestion conjointe des dimensions spatiales et temporelles au sein du modèle. Les différents modèles d'activités intègrent des informations provenant de la base de données spatio-temporelle, administrées sur un serveur postgresql/postgis, comme autant de contraintes au fonctionnement des agents. En retour, chaque agent est doté de capacités réactives qui se manifestent par un comportement adaptatif en fonction de l'évolution de son environnement.

Ces différentes classes d'agents ont été transcrites pour répondre aux besoins spécifiques de la modélisation des activités viticoles. Trois types d'agents ont ainsi été implémentés dans un module dédié "DAHU-Vigne" (figure 24) :

- l'Agent "INAO" a un rôle de superviseur au sein du modèle. Il fixe les cahiers des charges des différentes appellations de vins et impose des modes de production spécifiques. Il est en relation directe avec les Agents "Viticulteurs" qui lui transmettent des informations sur la qualité du raisin produit par leurs vignes. En fonction de ces informations l'agent "INAO" peut modifier ce cahier des charges ;

- les Agents "Viticulteurs" ont pour objectif de produire du vin conforme à un cahier des charges spécifiques en fonction de l'appellation visée. Cette action implique de cultiver la vigne dans des conditions optimales compte tenu des spécificités agronomiques des parcelles du viticulteur ;

- les Agents "Vignes" sont des entités de production du raisin. Elles correspondent généralement à une parcelle ou une entité jugée comme homogène au plan des caractéristiques agronomiques (délimitation à partir d'unités de terroir par exemple (Bodin et al. 2006)). Ces agents ont pour rôle de restituer la dynamique de croissance de la vigne en fonction des conditions climatiques.

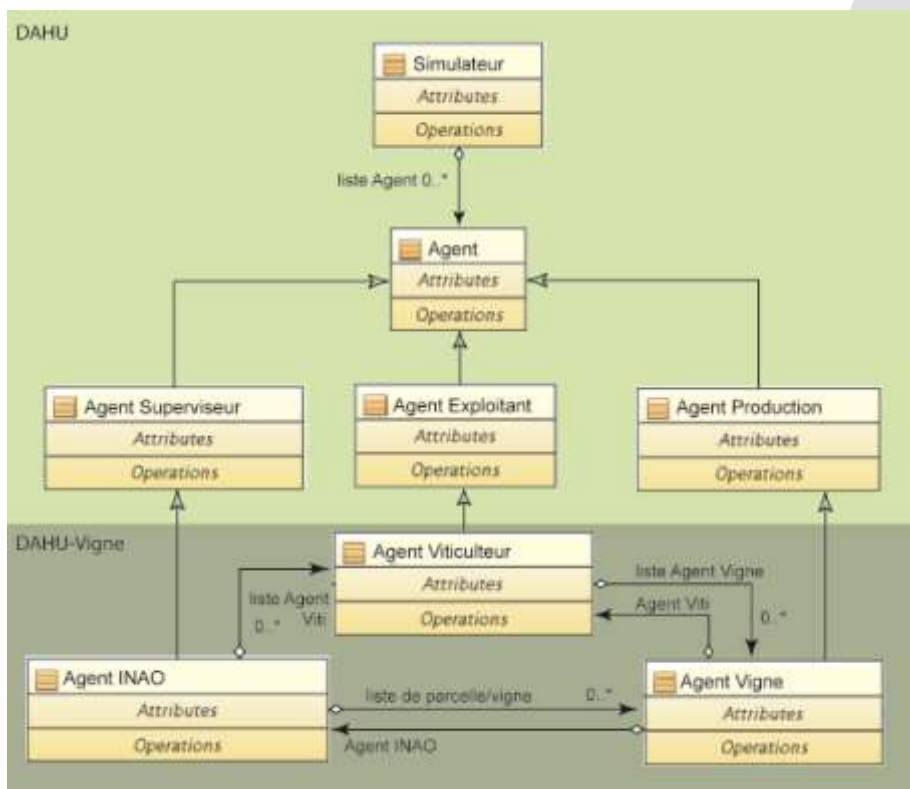


Figure 24 : Architecture du modèle DAHU-Vigne

Les relations entre ces trois types d'agents déterminent les stratégies de production adoptées par les viticulteurs. La classe Agent Exploitant a donc été enrichie de règles de décisions construites à partir d'une base de règles sous contraintes climatiques.

- *Méthodes et procédures*

Dans l'optique de disposer d'un modèle spécifique mais surtout dans la perspective d'interagir avec les viticulteurs un prototype implémenté dans l'environnement NetLogo3 est en cours de développement. Cette démarche répond au besoin de conduire des simulations et d'en contrôler les variables en temps réel. L'environnement de modélisation NetLogo convient tout particulièrement à la modélisation de systèmes

<sup>3</sup> NetLogo est un environnement de modélisation programmable libre permettant de simuler des phénomènes naturels et sociaux. Il a été créé par Uri Wilenski en 1999 et son développement est poursuivi de manière continue par le Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling.



complexes évoluant au cours du temps. Il permet notamment d'explorer les liens entre les comportements des individus à leur niveau et les schémas généraux (comportements de groupe ou de masse) qui émergent des interactions implémentées. NetLogo étant écrit en Java, il peut tourner sur tous les systèmes majeurs (Mac, Windows, Linux et autres). Il fonctionne en tant qu'application indépendante. Les modèles peuvent être sauvegardés sous forme d'applets Java et tourner dans tous les navigateurs internet modernes (Sklar, E., 2011).

Les développements réalisés ont été dédiés à la construction d'un prototype sur la zone de production du Quart de Chaume dans l'aire d'appellation des Coteaux du Layon en Val de Loire (Figure 25). Ils mobilisent, via une collaboration étroite avec l'UMT-Vinitera, une importante base de connaissances renseignant l'ensemble des données biophysiques et les paramètres agronomiques de la vigne.

Cette base permet de reconstituer le cycle végétatif de la vigne sous contraintes climatiques et d'associer des actions de conduites agronomiques à des paramètres d'environnement contrôlés par l'agent viticulteur.

L'agent « Vigne » dispose ainsi de nombreux attributs liée aux caractéristiques des parcelles de production (réserve en eau, indice de pente, vigueur, ...). Cet agent suit différents stades lors de son cycle végétatif et réagit à certains facteurs climatiques, et autres perturbations. L'ensemble des attributs de l'agent peut être observé en temps réel au cours de la simulation.

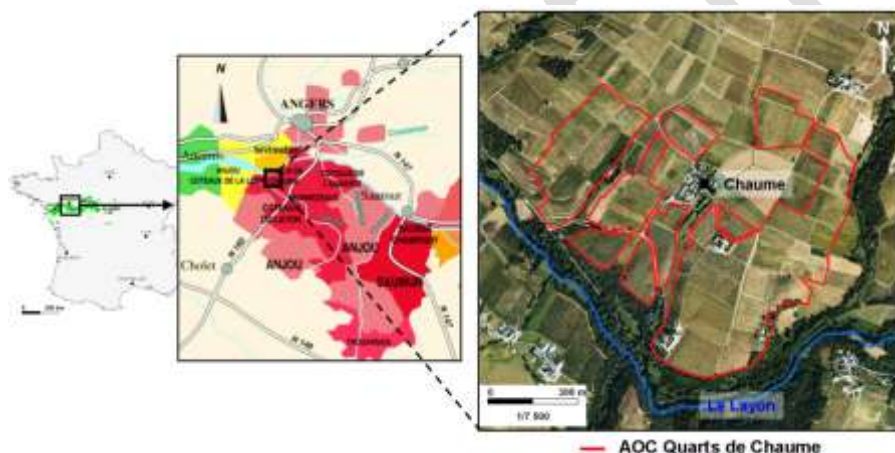


Figure 25: Localisation de la zone de production du Quart de Chaume dans l'aire d'appellation des Coteaux du Layon, Val de Loire.

La dynamique de croissance de la vigne fait appel à des algorithmes simples permettant de restituer le cycle végétatif à partir d'indices bioclimatiques. Le recours à ces indices vise à étudier l'évolution du climat en relation avec la viticulture notamment en caractérisant les potentialités climatiques d'une région viticole en fonction des types de cépages (Morlat, 2010 ; Tonietto, 2004 ; Huglin, 1986).

Le découpage en stades phénologiques suivant la classification de Baggiolini (Baggiolini M., 1952) est utilisée pour matérialiser cette croissance. Le passage d'un stade à l'autre est calculé à partir de l'indice de degré-jours (GDD), tel que :

Indice de degré-jours (GDD) = Somme de la température moyenne  $[(T_x + T_n)/2] - 10^\circ\text{C}$  (température de base) à partir du 1er Janvier. (Van Leeuwen et al., 2004)

La valeur de cet indice est calculée quotidiennement par les agents-vignes afin de savoir si la vigne est apte, ou non, à passer au stade suivant. Les données de températures proviennent de six capteurs installés dans la cadre du projet TERVICLIM. Ces capteurs ont été positionnés afin de tenir compte des spécificités de la zone d'appellation "Quart de Chaume" (topographie, distance des parcelles aux cours d'eau, morphologie de la végétation...) et de restituer la variabilité des températures à un échelle fine.

Les données de température permettent également de calculer l'indice héliothermique de Huglin (Huglin, 1978) qui est utilisé par le modèle pour déterminer la date de vendange potentielle (le lancement de la vendange dépend de la prise de décision du viticulteur). La valeur de l'Indice de Huglin pour une station correspond à la valeur cumulée de l'indice à la date du 30 septembre, le cumul se faisant depuis le 1er avril (pour l'hémisphère Nord, pour l'hémisphère sud, l'indice est calculé sur la période du 30 septembre au 1er avril) à l'aide de la formule suivante :

$$IH = \sum [(T_m - 10) + (T_x - 10)/2] * k$$

où  $T_m$  = Température moyenne,  $T_x$  = Température maximale et  $k$  le coefficient de longueur du jour variant de 1,02 à 1,06 (en fonction de la latitude de la zone d'intérêt)

L'architecture du modèle vise à formaliser une relation entre le cycle de la vigne, le type de cépage produit et le mode de production utilisé. Le couplage du modèle DAHU-Vigne avec un serveur postgresql/postgis répond à cet objectif. La structuration de la base de données (figure 26) facilite la mise en relation des différentes composantes intervenant dans la conduite de la vigne. Elle permet notamment d'intégrer l'ensemble des données d'enquêtes comme des variables d'initialisation et de forçage des agents.

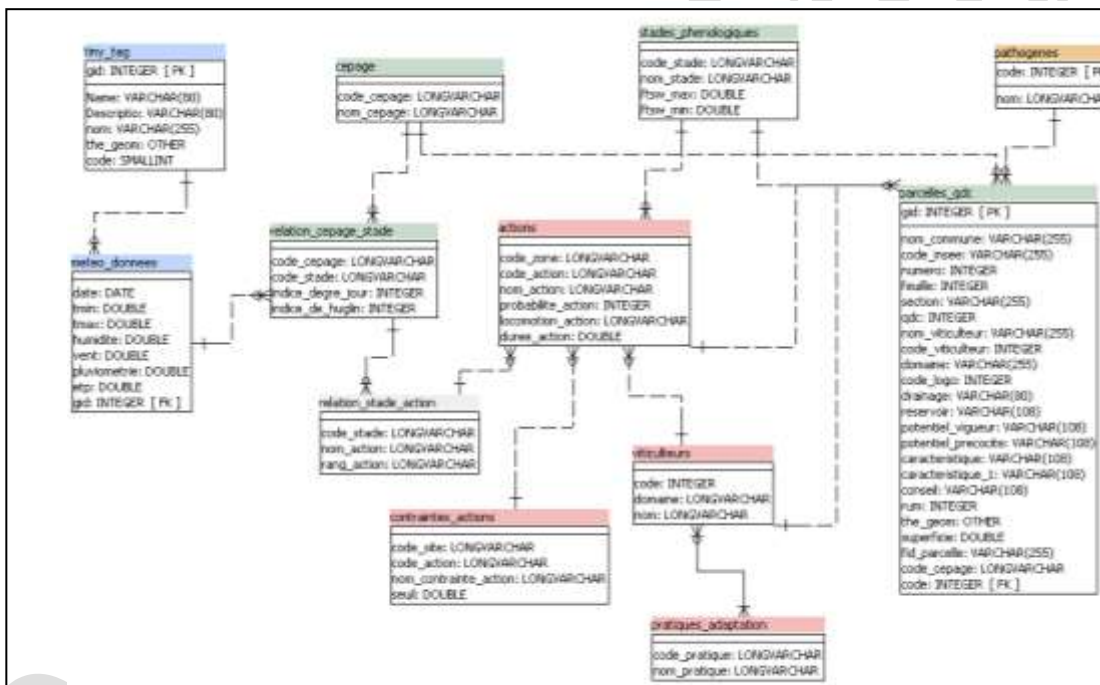


Figure 26 : Schéma de la base de données postgresql/postgis couplée au modèle DAHU-Vigne

La variabilité des conditions climatiques conditionne le choix des actions agronomiques qui dépendent également de la stratégie de production du viticulteur. L'ensemble de ces éléments détermine des itinéraires de conduites qui sont ajustés en temps réel dans le modèle. Autrement dit, les actions réalisées à un pas de temps  $t$  peuvent avoir une influence sur les choix opérés à  $t+n$ . Cette chaîne de relation est difficile à modéliser car elle se réfère à des expériences individuelles. L'enjeu principal du modèle est donc de parvenir à modéliser les chaînes décisionnelles aboutissant aux différents modes de conduite de la vigne observés sur le terrain.

Pour déterminer le choix d'une action une vérification des conditions d'environnement (stade de la vigne, conditions météorologiques) est réalisée par l'agent viticulteur. Cette première phase permet de déterminer si le jour considéré est « agronomiquement disponible » pour mener une action sur les parcelles concernées. Par exemple, si la moyenne journalière du vent est supérieure ou égale à 19km/h,

alors les viticulteurs ont l'interdiction d'utiliser des pesticides, et doivent donc attendre ou pratiquer des actions de substitution.

Parmi les actions que les viticulteurs vont pouvoir mener, certaines vont jouer directement un rôle sur la conduite de la vigne, d'autres vont faciliter son développement (pratique de l'enherbement, travail du sol). La communication entre les agents vignes et viticulteurs est donc permanente.

Afin de tenir compte des différents modes de conduite agronomique, des profils de production ont été associés aux agents viticulteurs (mode conventionnel, raisonné ou biologique). Ils permettent de prendre en compte des stratégies plus spécifiques associées à des orientations de production.

Enfin, dans la perspective d'intégrer des contraintes socio-économiques dans le modèle, des profils d'entreprises ont également été implémentés. L'objectif est de pouvoir catégoriser les exploitations viticoles en fonction de leur structure économique (entreprise familiale, grand domaine, multinationale). Cette information n'est que partiellement exploitée à ce stade de développement du modèle et ne se répercute que sur la main d'œuvre potentiellement mobilisable pour mener à bien des actions.

- *Intégration de la composante climatique*

Les données climatiques sont intégrées dans le modèle à partir de requêtes spatio-temporelles réalisées sur le serveur postgresql/postgis. Elles proviennent d'une station météorologique et des capteurs de températures installés dans les vignes du Quart de Chaumes (Tiny Tag) et fournissent des données de températures, précipitations, vitesse et direction du vent et rayonnement solaire (Bonney et al., 2010). Ces données sont affectées à une parcelle en fonction de son implantation géographique (distance par rapport aux stations et capteurs). Elles permettent de calculer l'ensemble des indices bioclimatiques utiles au modèle pour simuler la croissance de la vigne et donnent des informations indispensables à l'agent viticulteur pour conduire des actions agronomiques et déterminer sa stratégie. La variabilité des conditions météorologiques agit donc directement et en temps réel sur la dynamique de la vigne et le comportement de l'agent viticulteur. Dans ce contexte une fenêtre de connaissance des données à +4 jours est fournie aux agents viticulteur de manière à leur donner les moyens d'établir une stratégie prévisionniste.

L'intégration des données simulées sur le long terme par les modèles climatiques s'avère beaucoup plus complexe à mettre en œuvre. Cette difficulté résulte d'une incompatibilité des échelles de restitution de ces modélisations avec les spécificités d'un territoire très restreint comme celui de l'appellation Quart de Chaume mais également de l'absence ou de l'imprécision de certaines données simulées (ETP, précipitations). Pour contourner cette limite, une méthode alternative a été mise en œuvre. Après avoir réalisé une classification des vingt dernières années en fonction de leurs profils climatiques (calcul des variables du climat et des indices bioclimatiques propres à la vigne), un ensemble de scénarios hypothétiques ont été construits. Ils intègrent différentes tendances de changement et peuvent être introduits dans le modèle de manière aléatoire ou choisie par l'utilisateur. Le choix d'un scénario chaud et sec par exemple, se traduira au niveau de la modélisation par l'intégration majoritaire de données issues d'années chaudes et sèches (classées en fonction de la typologie) au cours de la période de simulation. Cette procédure totalement probabiliste peut être paramétrée par l'utilisateur en fonction du type de scénario privilégié.

### **4.3 Simulations**

L'objectif des simulations est de mettre en relation les stades phénologiques de la vigne avec les conditions climatiques et les modes de conduites agronomiques dans un contexte de changement global. Les premiers tests réalisés dans les coteaux du layon visent à évaluer les capacités d'adaptation des

viticulteurs pour la production d'un vin liquoreux dans un contexte de réchauffement important des températures (Bonnefoy et al., 2009).

- *Déroulement des simulations*

La procédure de simulation débute par une phase d'initialisation qui crée l'ensemble de agents manipulés par le modèle à partir des bases de données stockées sur le serveur postgresql/postgis.

L'agent INAO est initialisé avec les caractéristiques du cahier des charges encadrant l'appellation d'origine contrôlée "Quart de Chaume". Ces éléments de contrôle seront utilisés pour vérifier la conformité de la production fixée par cette AOC.

Les agents vignes sont affectés de variables agro-environnementales concernant le type de cépage, le type de sol et ses caractéristiques physiques ainsi que les données météorologiques de la période considérée.

Les agents viticulteurs sont créés à partir de trois profils de production : conventionnel (viticulture traditionnelle), raisonnée (limitation des produits phytosanitaires et des engrais) et biologique (cahier des charges spécifique limitant fortement l'usage de produits phytosanitaires). Les enquêtes, menées auprès des viticulteurs permettent d'associer des calendriers de pratique à chaque profil de production. Ces calendriers permettent de construire des arbres de décisions sous contraintes agro-climatiques. Les données de températures et de précipitations sont utilisées pour calculer des jours agronomiquement disponibles pour la réalisation des tâches de travail de la vigne (Barbeau, 2011). En fonction de ces données, de son profil de production et des caractéristiques agro-climatiques de ses parcelles (nature du sol, pente, exposition, bilan hydrique...), chaque Agent Viticulteur réalise des choix de conduite agronomique (figure 27).

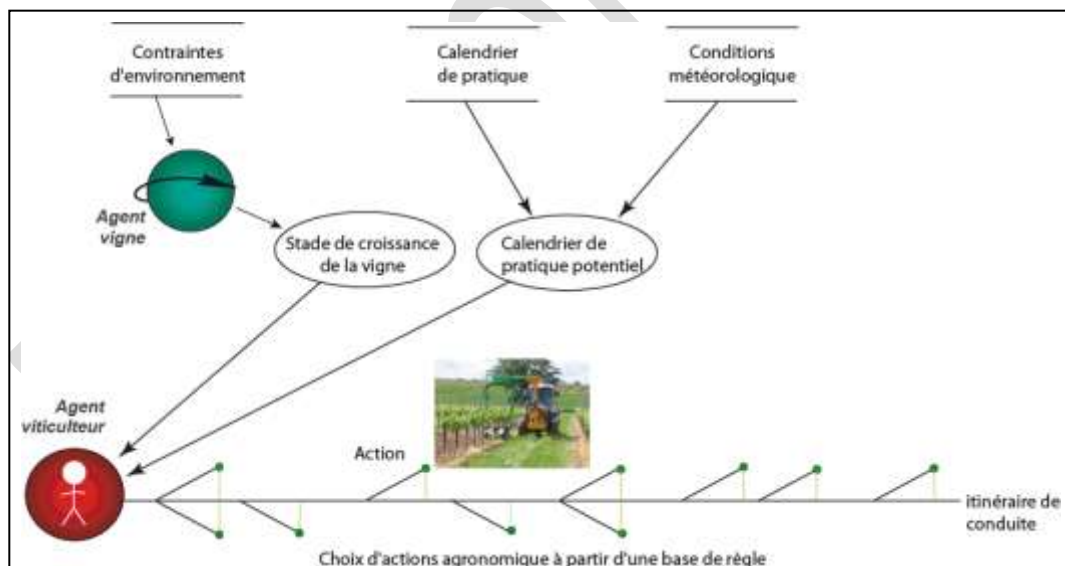


Figure 27 : Eléments de la base de règle

Ces choix permettent de construire des itinéraires de conduites agronomiques qui peuvent intégrer des actions classiques du travail de la vigne (taille, rognage, effeuillage...) comme des outils d'adaptations à des contraintes spécifiques (travail du sol, entretien de l'enherbement...). Cette étape de modélisation, actuellement en test, nécessite d'être validée en raison de complexité de la chaîne de relations aboutissant à la prise de décision. Dans ce contexte des enquêtes régulières sont menées auprès des viticulteurs afin de connaître les mécanismes orientant leurs choix d'actions agronomiques. Cette phase est cruciale car elle permet de valider une part importante du modèle et de crédibiliser la démarche auprès de la profession viticole ce qui constitue un préalable indispensable à la conduite de simulations participatives et prospectives.

- *Contrôle des paramètres, évaluation des résultats*

L'ensemble des paramètres et des actions réalisés par les agents peuvent être contrôlés via l'interface graphique du modèle. La plateforme NetLogo, utilisée comme support de développement, facilite la visualisation des résultats en cours de simulation via un affichage cartographique mis à jour à chaque pas de temps (figure 28). Le déroulement des actions agronomiques peut ainsi être suivi en temps réel. Des sondes permettent également de visualiser sous une forme graphique de nombreux paramètres comme des indices bioclimatiques par exemple.

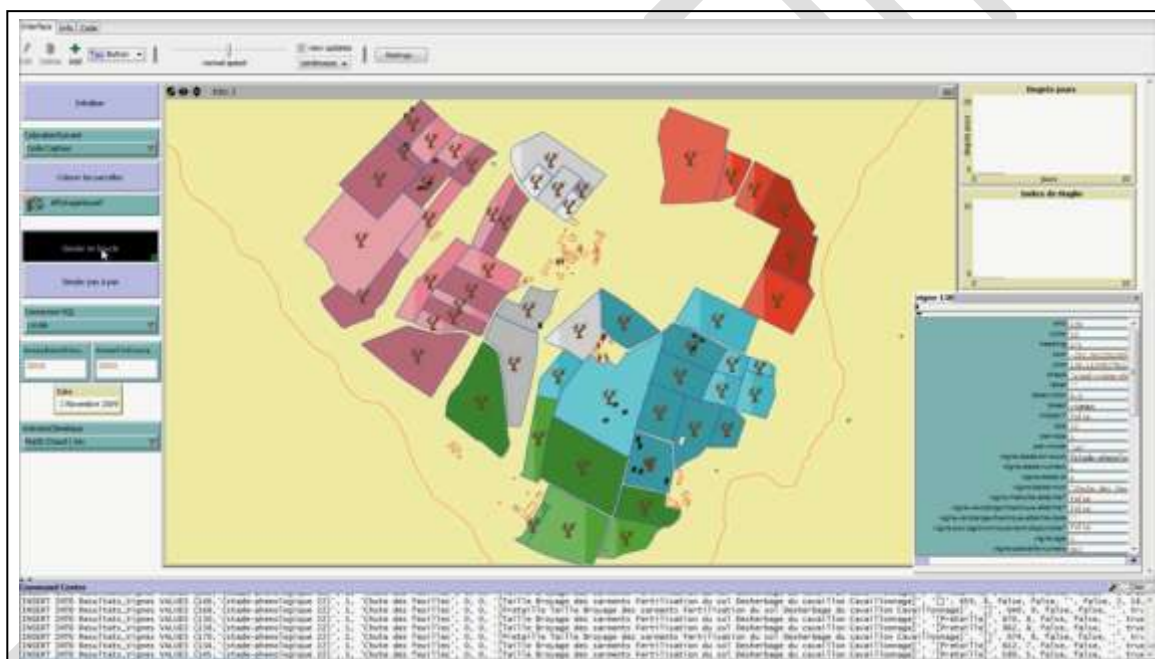


Figure 28 : Capture d'écran du modèle DAHU-Vigne

Ces outils sont une aide au contrôle du bon déroulement de la simulation et un support de communication vers la profession viticole. Ils restent néanmoins perfectibles car ils proposent une vision instantanée des sorties de calcul du modèle et nécessitent d'être complétés de nombreuses analyses à postériori pour expliciter les résultats obtenus.

La validation de ce type de modèle reste difficile à mener car elle nécessite de reconstituer l'ensemble de la chaîne de simulation et notamment d'intégrer les mécanismes conduisant à la prise de décision et in fine à l'action agronomique. Les résultats issues de DAHU-Vigne sont validés en deux étapes. Dans un premier temps des simulations rétrospectives sont réalisés pour vérifier que la dynamique de la vigne est correctement restituée. Les dates de changement de stade sont comparées à celle relevées sur le terrain et

au niveau de domaine expérimental de Montreuil-Bellay. Dans un second temps les itinéraires agronomiques suivis par les viticulteurs sont contrôlés de manière à vérifier leur cohérence.

Les premières validations réalisées montre que le choix de modéliser la dynamique de la vigne à partir d'indices bio-climatiques s'avère pertinente puisque les dates de passage de stade sont conformes aux observations menées sur site (marge d'erreur de +/- 5 jours en fonction des années de simulation) . Concernant les itinéraires de conduites agronomiques, l'évaluation des résultats s'avère beaucoup plus complexe car de nombreux facteurs interviennent dans le choix des actions. Il s'avère donc nécessaire d'associer plus significativement les viticulteurs à la démarche dans l'optique de construire des scénarios rétrospectifs permettant d'analyser les facteurs orientant la prise de décision et prospectifs pour évaluer les stratégies de conduite de la vigne.

### ***Conclusion et perspectives***

La démarche de modélisation entreprise dans le cadre de TERADCLIM propose une approche globale visant à simuler le déroulement des activités viticoles sous contraintes d'environnement. Abordée via le développement d'un modèle multi-agents chargé de modéliser les interactions entre les différentes composantes de la viticulture, la problématique de l'impact de la variabilité des conditions climatiques sur les stratégies de production viticole a été plus spécifiquement ciblée. La finalité recherchée était double : il s'agissait d'une part de restituer la dynamique de la vigne à partir d'indices bio-climatiques et d'autre part de simuler les itinéraires de conduites agronomiques dans un contexte de changement climatique.

Sur le plan méthodologique, les développements réalisés ont contribué à formaliser une relation cohérente entre un réseau d'agents réactifs et un territoire viticole à partir d'une série de contraintes techniques, socio-économiques, réglementaires et environnementales. Le couplage entre base de données spatio-temporelles et modèle multi-agents s'inscrit dans cette perspective et vise notamment à améliorer l'intégration de données spatio-temporelles composites comme variables de forçage afin de restituer la variabilité du déroulement des activités viticoles.

Sur le plan thématique, l'analyse des implications du changement climatiques sur les itinéraires de conduites agronomiques et les stratégies de production représente un enjeu important pour la profession viticole qui doit s'adapter aux modifications des conditions d'environnement tout en conservant la typicité des terroirs et les caractéristiques des vins d'appellation.

Les premiers résultats obtenus même s'ils restent partiels montre que le modèle DAHU-Vigne est en mesure de restituer la dynamique de la vigne et de simuler des itinéraires de conduites agronomiques en lien avec la variabilité des conditions climatiques. Cette étape est cruciale car elle constitue un préalable indispensable à l'analyse des stratégies de conduite de la vigne dans un contexte perturbé.

A l'issue de cette première phase de développement de nombreuses perspectives sont donc envisagées. Elles concernent principalement des améliorations du code de calcul de DAHU-Vigne qui nécessite d'être étoffé pour évaluer les implications de certains outils d'adaptation sur la dynamique de la vigne. Sur le plan technique cela revient à introduire des boucles de rétroaction au sein du modèle pour simuler les implications des choix de conduites agronomiques sur les caractéristiques de la vigne (vigueur, précocité, résistance aux pathogènes...). Dans cette perspective le couplage de DAHU-Vigne au modèle Walis (Celette et al., 2010) implémentés sous R a été engagé. Cette démarche permet de modéliser l'influence d'actions sur le contrôle du bilan hydrique de la vigne. Elle est actuellement testée en Argentine sur le site de Mendoza (Bodega Alta Vista).

L'intégration d'autre indicateurs permettant notamment de mesurer la qualité potentielle de la baie de raisin est également envisagée. Ces développements permettrait de contrôler des variables par anticipation



et intervenir dans la prise de décision des viticulteurs pour réaliser ou non une action agronomique au regard de la stratégie globale adoptée.

Les collaborations engagées avec les viticulteurs posent également la question de l'appropriation d'une telle démarche de modélisation dans un contexte où les savoir-faire et l'expérience restent les meilleurs outils d'adaptation au changement des conditions climatiques. Les échanges avec les professionnels sont indispensables pour valider et améliorer le modèle mais plus encore pour construire des scénarios tangibles concernant l'adaptation des pratiques au changement climatique. Dans ce contexte un séminaire de restitution et des sessions de travail sont envisagées pour co-construire des simulations scénarisées et prospectives.

**A terme, la réalisation de scénarios d'adaptation des pratiques viticoles au changement climatique par Système Multi-Agents permettra d'apporter des « réponses » à la profession viticole sur les méthodes à employer afin de mettre en place une politique raisonnée d'adaptation au changement climatique. Nous avons délibérément choisi une petite appellation (par la taille) d'un vin français (Chaumes/Quart de Chaumes) où l'impact du changement climatique est actuellement positif et des bodegas argentines situées dans un secteur où l'impact du changement climatique a déjà engendré des modifications et des conflits (ex : problème de disponibilités en eau).**

**La construction de ces modèles multi-agents nécessite une forte implication des acteurs. Dans le Chaumes/Quart de Chaumes, les viticulteurs sont peu nombreux et très impliqués dans cette démarche. Pour l'Argentine, nous avons mis en place des ateliers participatifs où tous les viticulteurs ont été conviés. Des premières réunions entre les chercheurs de TERADCLIM et les organismes viticoles ont montré l'intérêt pour ce type de démarche. Les ateliers participatifs ont été organisés par Jean Philippe Boulanger (ECOCLIMASOL), Cyril Tissot et Hervé Quénot en 2012 et 2013.**

## **PARTIE 5 : Transfert de l'information auprès de la profession viticole et sensibilisation au changement climatique (ex : proposition d'adaptation à l'échelle de l'exploitation viticole ; ateliers participatifs chercheurs/acteurs, ...).**

Les professionnels viticoles sont impliqués dans TERADCLIM dès l'amont. Des ateliers participatifs ont été réalisés dans le Val de Loire et à Mendoza (Argentine). Les résultats de ces ateliers et de ces enquêtes sont utilisés dans la modélisation Multi-Agents.

### **5.1 Etude sur la sensibilité et l'adaptabilité des pratiques viticoles : Réponses des vigneronns à la variabilité climatique**

Le concept du terroir est défini comme l'interaction complexe entre des facteurs physiques, biologiques et des pratiques culturelles qui influencent le comportement de la vigne, la composition des baies et la qualité et la typicité du vin. Les impacts des stratégies viticoles et l'application de règles de décision sont très importants. Avec des évolutions significatives du climat, une meilleure compréhension de la capacité des pratiques viticoles à faire face aux risques et opportunités climatiques est nécessaire afin de mieux évaluer les perspectives d'une adaptation au changement climatique. Dans ce contexte, les réponses des vigneronns à des expériences climatiques passées et actuelles ont été analysées, afin d'identifier la sensibilité climatique des pratiques viticoles et d'étudier la capacité d'adaptation des vigneronns.

Deux enquêtes approfondies, indépendantes, ont été réalisées dans la région viticole de la moyenne vallée de la Loire, située dans le nord-ouest de la France (figure 23). En 2011, 15 vigneronns de l'AOP Anjou et de l'AOP Saumur ont répondu à la sensibilité de 21 pratiques annuelles aux conditions météorologiques. Cette enquête semi-dirigée a traité les questions et les thèmes concernant les périodes favorables et défavorables de travail, les techniques et les machines impliquées et l'influence des conditions climatiques sur la période de travail. En 2012, 15 vigneronns de l'AOP Coteaux du Layon ont été enquêtés afin d'évaluer leurs capacités d'adapter. Ils ont été interrogé sur la façon dont les pratiques ont changé, les facteurs menant à ces changements, les conditions climatiques qui caractérisent les « bons » et les « mauvais » millésimes et les stratégies d'adaptation adoptées au cours de ces millésimes.

Pour les 21 pratiques annuelles, les contraintes climatiques et les seuils qui déterminent les périodes favorables et défavorables de travail, les techniques et matériels impliqués, ont été identifiés. Pour l'ensemble des pratiques, le traitement phytosanitaire a été considéré comme la pratique pour laquelle les conditions météorologiques sont une contrainte majeure. Cette sensibilité dépend aussi des stratégies de production adaptées, ainsi l'agriculture biologique a été considérée plus sensible. Au cours des 20 dernières années, les pratiques pérennes et annuelles ont évolué, notamment les pratiques liées à la gestion du sol dans l'inter-rang, car les vigneronns cherchent à mieux gérer les ressources en eau dans un climat plus chaud et plus sec. Les stratégies d'adaptation ont été dynamiques, là où les viticulteurs ont bien pris en compte les facteurs environnementaux de chaque parcelle. Dans un contexte de la poursuite du changement climatique au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, les vigneronns ont répondu comment ils perçoivent une adaptation progressive à différentes échelles temporelles. La figure 29 montre que selon les vigneronns, les pratiques de vinification et les pratiques annuelles liées à la gestion du sol permettront des adaptations à court terme, les changements de porte-greffe, des adaptations à moyen terme et enfin, il serait nécessaire de changer le type de cépage à long terme ainsi que d'utiliser l'irrigation pour maîtriser la sécheresse pendant la période de croissance.

Cette étude a permis d'illustrer la sensibilité des pratiques viticoles aux conditions climatiques et de mettre en évidence la capacité d'adaptation et la vulnérabilité des vignerons pour s'adapter au changement climatique (Neethling et al, 2013).

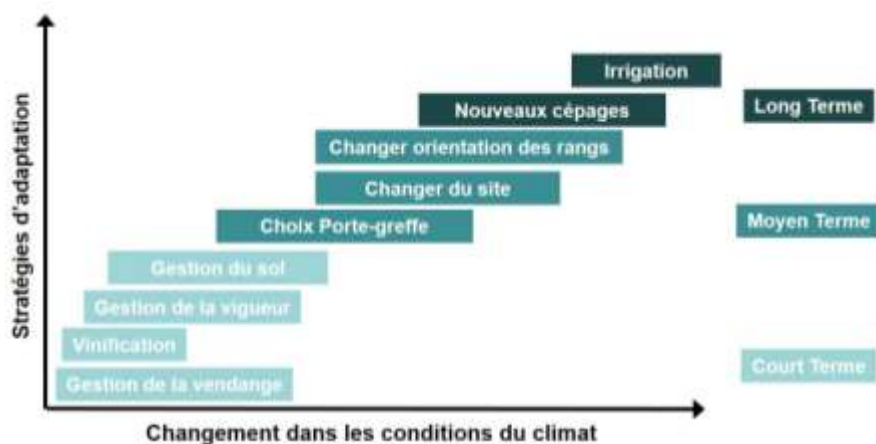


Figure 29 : Stratégies d'adaptation au changement climatique selon les réponses des vignerons

## 5.2 Extrêmes climatiques et changement climatique dans la région viticole de Mendoza (Argentine)

Le 21 novembre 2012, un atelier participatif avec les principaux viticulteurs de la région de Mendoza a été organisé dans le cadre du programme TERADCLIM. Cet atelier visait à étudier les stratégies d'adaptation des vignobles de Mendoza au changement climatique. Après avoir présenté les différents résultats des analyses et de la modélisation réalisés dans les vignobles expérimentaux argentins, l'atelier participatif s'est déroulé en 3 étapes : 1- impact du climat sur l'activité viticole ; 2- stratégies d'adaptation ; 3- actions nécessaires pour lutter contre le changement climatique.

Durant cet atelier, les vignerons ont identifié les principaux défis climatiques auxquels ils sont confrontés. D'une part, les changements lents du climat qui redéfiniront les zones favorables à la culture de la vigne et d'autre part, l'augmentation des phénomènes extrêmes comme les sécheresses, les vagues de chaleur, la grêle ou les gelées de printemps. L'augmentation des températures de ces dernières décennies ont un impact sur le cycle phénologique de la vigne et surtout sur l'augmentation des taux de sucre et de la teneur en alcool des vins. Face à ces nouveaux défis en matière de gestion des risques climatiques, la majorité des exploitations viticoles ont déjà incorporé des stratégies de lutte active ou passive (des assurances) contre les événements climatiques.

Les principales inquiétudes des viticulteurs mendocinos concernent l'augmentation des extrêmes mais surtout la forte diminution des ressources en eau. Les méthodes d'adaptations sont évoquées à des échelles temporelles différentes. En comparaison avec les enquêtes réalisées dans le Val de Loire, les méthodes d'adaptation évoquées à long terme sont ici (à Mendoza) déjà mise en place. Il s'agit notamment de l'irrigation et des pratiques œnologiques permettant de limiter les niveaux de sucre et d'alcool. Dans une optique à plus long terme, les propriétaires viticoles de Mendoza plantent de la vigne dans des régions plus au sud (ex : Patagonie) ou plus en altitude (ex : Vallée de Tupungato).

Les résultats de ces enquêtes et des ateliers participatifs avec la profession viticole sont actuellement intégrés le système multi-agents afin de relier les itinéraires agro-techniques à l'évolution des contraintes

d'environnement de la vigne pour évaluer les méthodes de production et les stratégies d'adaptation des viticulteurs.

#### **B4. BILAN GENERAL ET PERSPECTIVES**

Les simulations régionalisées du changement climatiques en fonction des différents scénarios SRES permettent d'obtenir des estimations de l'évolution climatique future avec une résolution de quelques kilomètres. Les progrès réalisés au niveau de la modélisation atmosphérique montrent une convergence des modèles vers des résultats largement partagés et qui semblent significatifs à grande échelle (Le Treut, 2010). Toutefois, la succession de phases d'incertitudes de la conception des modèles aux différents scénarios envisagés rend très difficile la mise en place de scénarios d'adaptation au changement climatique à plus ou moins long terme.

Afin de limiter ces incertitudes, l'analyse de la variabilité spatiale du climat aux échelles fines peut être un bon outil d'adaptation au changement climatique futur. La forte variabilité spatiale du climat sur des espaces très restreints engendrée par les aspérités (topographie, ...) et la nature de la surface (type d'occupation du sol, ...) sont du même ordre voire supérieure à l'augmentation de températures simulée par les différents scénarios de l'IPCC. Le vigneron s'adapte à cette variabilité spatiale du climat notamment par ses pratiques culturales. Dans le contexte du changement climatique, la connaissance préalable de la variabilité spatiale du climat aux échelles fines est un atout pour imaginer des possibilités d'adaptation à l'évolution temporelle du climat à plus ou moins long terme. La connaissance du climat actuel aux échelles locales permet à l'Homme d'adapter ses activités. Par exemple, un viticulteur ne plantera pas des cépages sensibles à la sécheresse sur une parcelle où le déficit hydrique est important. Cette connaissance climatique locale est un point de départ pour sensibiliser les acteurs à l'adaptation de leurs activités au changement climatique.

La démarche multiscalair de TERADCLIM a permis d'étudier les modalités de la variabilité climatique et des impacts du réchauffement global à des échelles fines. Des modèles adaptés à l'échelle locale et des terroirs viticoles ont exploité conjointement des données issues du réseau météorologique conventionnel, mais aussi des données issues de mesures climatiques et agronomiques opérées au sein des vignobles. Le réseau de capteurs installés dans les vignobles offre ainsi une base de données exceptionnelle pour cibler la variabilité spatiale et temporelle du climat viticole aux échelles fines. Dans un certain nombre de vignobles pris en compte dans cette étude, la variabilité du climat à l'échelle d'un terroir - qui marque sensiblement le millésime et la typicité du vin - s'affirme plus forte que celle enregistrée à l'échelle régionale, ou même globale.

L'étude des différents exemples géographiques de modélisation climatique à l'échelle des terroirs viticoles, souligne, dans tous les cas, pour l'avenir, une nécessaire adaptation des terroirs viticoles au réchauffement climatique. Cette adaptation « permettant de simuler les activités viticoles dans un contexte de changement climatique et d'analyser l'évolution des stratégies de production viticole » doit intégrer non seulement des pratiques culturales ou œnologiques nouvelles et cela dès le court terme, mais aussi un aménagement des conditions socio-économiques et de la législation des régions de vignoble. En France, les normes actuelles d'AOC/AOP pourraient ainsi devoir être révisées, le cas échéant, pour permettre un recours à l'irrigation, ou même pour autoriser une « nouvelle donne » géographique des cépages. Dans d'autres pays où la législation est plus souple, des adaptations sont déjà en cours. En Argentine, la pénurie en eau liée à la forte diminution des précipitations neigeuses sur le massif andin a conduit à des modifications de la gestion de l'eau en viticulture, par exemple par la réduction de l'irrigation gravitaire. Certains viticulteurs de la province de Mendoza pratiquent maintenant une « irrigation raisonnée » avec un système de goutte à goutte qui économise l'eau tout en réduisant les pertes par évaporation et préservant les sols du lessivage. Là encore, les fortes contraintes hydriques liées au changement climatique poussent

certain viticulteurs à déplacer leur vignobles plus en altitude, vers les versants du piedmont andin (vallée d'Uco et de Cafayate).

Plusieurs objectifs du programme TERADCLIM n'ont pas encore été atteints :

- l'intégration des scénarios du changement climatique dans les modèles de régressions multiples. Cette phase de l'étude est actuellement en cours ;

- le modèle multi-agent DAHU mis en place dans l'appellation Quart de Chaumes est en cours de validation et les résultats des simulations devraient être obtenus ces prochains mois ;

- le modèle multi-agent DAHU sera ensuite appliqué dans les vignoble de la bodega Alta Vista. Les bases de données (occupation du sol, type de cépage, calendriers culturaux, données climatiques, ...) ont été réalisées. La mise en place du modèle sera effectuée fin février 2014 (mission prévue entre le 20 février et 5 mars 2014).

La continuité du programme TERADCLIM concerne principalement à la sensibilisation de la profession viticole à l'adaptation des terroirs viticoles au changement climatique. Nous avons déposé des projets ("ADapation of Viticulture to CLiMate change : High resolution observations of adaptation scenarii for viticulture") dans le cadre des appels d'offre LIFE et FACCE-Smart Agriculture (figure 30).

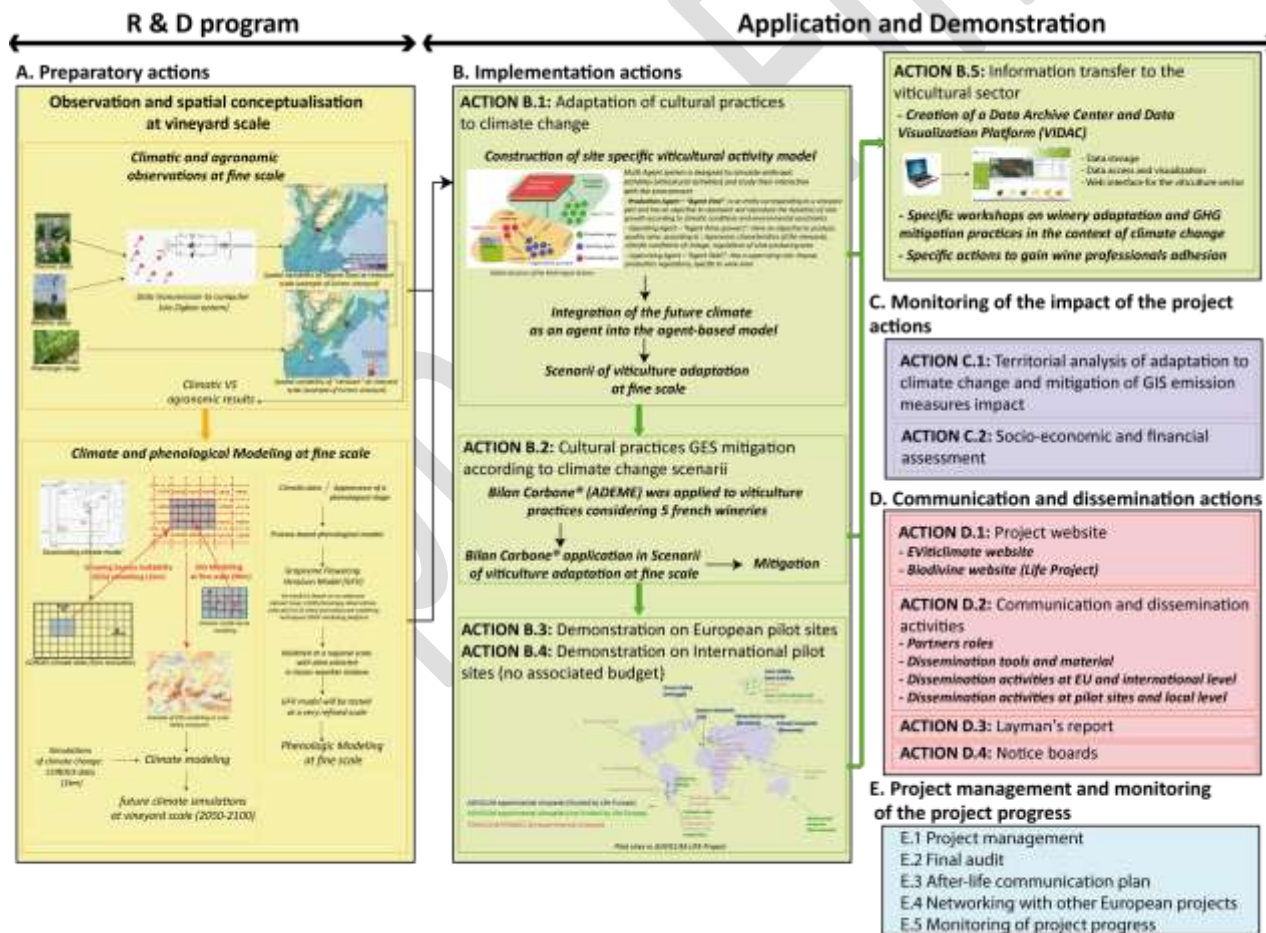


Figure 30 : Différentes étapes du projet LIFE-ADVCLIM déposé dans le cadre de l'appel d'offre européen LIFE.

## Bibliographie

- Barbeau G., 2007 : *Climat et vigne en moyenne vallée de la Loire, France*. Congreso sobre Clima y Viticultura. Congress on Climate and Viticulture, Zaragoza (Espagne), 106-111.
- Bindi M., Fibbi L., Gozzini B., Orlandini S., Miglietta F., 1996 : Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. *Climate Research*, 7, 213-224.
- Bonnardot et Cautenet, 2012 : Rapport d'activités pour l'année 2012, projet uhb6342« modélisation atmosphérique méso-échelle et échelle fine des terroirs viticoles », DARI-CINES, 4p.
- Bonnefoy C., Quénot H., Barbeau G., Madelin M., 2009 : Analyse multiscalaire des températures dans le vignoble du Val de Loire. *Geographia Technica*, Actes du XXII<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Cluj (Roumanie), Numéro spécial, 85-90.
- Bonnefoy C., Quénot H., Planchon O., Barbeau G., 2010 : Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo* [Online], 14, 13 pages, <http://echogeo.revues.org/12146>.
- Brisson N., Levrault F., 2010 : *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*. Livre Vert du projet CLIMATOR, 334 pages.
- Carbonneau A., Tonietto J., 2004 : A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 81-97.
- Carey V. A., Archer E., Barbeau G., Saayman D., 2008 : Viticultural terroirs in Stellenbosch, South Africa. II. The interaction of Cabernet-Sauvignon and Sauvignon blanc with environment. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 42 (4), 185-201.
- Coombe BG (1987) Influence of temperature on composition and quality of grapes. *Acta Hort* 206:23-33
- Cotton WR, Pielke RA, Walko RL, Liston GE, Tremback CJ, Jang H, McAnelly RL, Harrington J-Y, Nicholls ME, Carrio GG, McFadden JP (2003) : RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteorol Atmos Phys* 82:5-29
- Déqué M (2001) Seasonal predictability of tropical rainfall : probabilistic formulation and validation. *Tellus* 53 A:500-512
- Déqué M, Rowell DP, Lüthi D et al (2007) An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Clim Change* 81:53-70
- Downing TE, Butterfield RE , Bindi M et al (2002)
- Scaling methods in regional integrated assessment: from points upward and from global models downwards. *Integr Assess* 3:167-187
- Duchene E., Schneider C., 2005: Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agron. Sustain. Dev.*, 25, 93-99.
- GIEC., 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.
- Huglin P., 1978 : Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. In : *Symposium International sur l'écologie de la vigne*, 1, Constança, Ministère de l'Agriculture et de l'Industrie Alimentaire, 89-98.
- Jackson R. S., 2008 : *Winescience*. Third Edition. 751 pages.



Le Treut H., 2010 : Modèles climatiques : certitudes, incertitudes et impacts locaux. Actes du XXIII<sup>e</sup> colloque de l'Ass. Int. Climatologie « Risques et changement climatiques », ISBN 978-2-907696-16-6, Rennes, 7-10.

Moisselin J. M., SCHNEIDER M., CANELLAS C., MESTRE O., 2002 : Les changements climatiques en France au XX<sup>e</sup> siècle. Étude de longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie*, 38, 45-56.

Morlat R., 2010 : *Traité de Viticulture de Terroir*. 492 pages.

Nakićenović N, Swart R (2000) *Special Report on Emissions Scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC SRES)*, Cambridge University Press, ISBN 0-521-80081-1

Neethling E., Barbeau C., Quénot H., Barbeau G., 2013. Study on the sensitivity and adaptability of viticultural practices: Wine growers' responses to climate variability. 18th International Symposium GiESCO, Porto, Portugal, July 7-11, 2013.

Pagé C (2008) *Format des données SAFRAN et scénarios climatiques désagrégés au CERFACS*. Technical report TR/CMGC/08/27, CERFACS/CNRS No 1875, Toulouse

Parker A. et al., « Classification of varieties for their timing of flowering and veraison using a modeling approach. A case study for the grapevine species *Vitis vinifera* L », *Agricultural Forest Meteorology*, 180, 249-264, 2013.

Pieri P (2010) *Changement climatique et culture de la vigne: l'essentiel des impacts*. In Brisson N, Levrault F (Eds): *Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces*. Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 213-224

Terray L, Pagé C, Déqué M, Flécher C (2010) *L'évolution du climat en France au travers quelques indicateurs agroclimatiques*. In Brisson N, Levrault F (Eds): *Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces*, Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 19-32

Trenberth KE, Jones PD, Ambenje P et al (2007) *Observations: Surface and Atmospheric Climate Change*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the AR4 of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon et al (ed). Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA

Van Leeuwen C., Friant P., Xavier C., Tregoat O., Koundouras, S., Dubourdieu, D., 2004 : Influence of Climate, Soil, and Cultivar on Terroir. *American Journal of Enology and Viticulture*, 55 (3), 207-217.

## C IMPACT DU PROJET DEPUIS LE DEBUT

### C.1 INDICATEURS D'IMPACT

*Nombre de publications et de communications (à détailler en C.2)*

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
Publications scientifiques	Revue à comité de lecture	16	1
	Revue sans comité de lecture	1	
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	4	1
	Actes de colloques (avec comité de lecture)	22	1
	Colloques (avec résumés publiés)	17	2
	Conférenciers invités		11
	Rapport	2	
Actions de diffusion	Articles vulgarisation	1	
	Conférences « grand publique »		2
	Autres (TV, Radio, ...)		10
	Documentaires vidéo	2	

#### *Autres valorisations scientifiques*

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Autres (préciser)	organisation d'une formation CNRS (voir D3)
	Création de la business unit TerraClima

### C.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

- publications dans revues à comité de lectures

- Briche E., **Quénoil H.** et Beltrando G., 2011 : Changement climatique dans le vignoble champenois. L'année 2003, préfigure-t-elle les prévisions des modèles numériques pour le XXIe siècle ? *L'Espace Géographique*, 2/11, 164-175.
- Irimia L., Patriche C.V. and **Quénoil H.**, 2011: GIS applications in viticulture. The spatial distribution of climatic suitability for grape growing in Husi wine-growing Centre (Romania). In *Cercetari Agronomice in Moldova*. Vol XLIV, 3 (147), 75-87.
- Bonnardot V., Carey V., Madelin M., Cautenet S. and **Quénoil H.**, 2012: Using atmospheric and statistical models to understand local climate and assess spatial temperature variability at fine scale over the Stellenbosch wine district, South Africa. *International Journal of Vine and Wine Sciences*. 46/1, 1-13.
- Neethling E., Barbeau G., Bonnefoy C. et Quénoil H., 2011 : Evolution du climat et de la composition des raisins des principaux cépages cultivés dans le Val de Loire. *Climatologie*, 79-93.
- Neethling E., Barbeau G., Bonnefoy C. et Quénoil H., 2012 : Evolution in climate and berry composition for the main grapevine varieties cultivated in the Loire Valley. *Climate Research*, 53, 89-101.
- Sturman A. and Quénoil H., 2012: The effect of changes in atmospheric circulation on temperature trends in the major vineyard region of Marlborough, New Zealand. *International Journal of Climatology*. (in press)

7. Bonnefoy C., Quénoł H., Bonnardot V., Barbeau G., Madelin M., Planchon O. and Neethling E., 2012: Temporal and Spatial Analysis of Temperatures in a French wine-producing area: the Loire Valley. *International Journal of Climatology*. DOI: [10.1002/joc.3552](https://doi.org/10.1002/joc.3552)
8. Irimia L., Partiche C., Quénoł H., 2012: Mapping viticultural potential in temperate climate areas. Case study: Bucium vineyard (Romany). *Cercetări Agronomice în Moldova*, Vol. XLV, No. 2 (150), 75-84.
9. Irimia L., Patriche C., Quénoł H., 2012: GIS-Aided analysis of vineyards damaged by winter frosts. *Cercetări Agronomice în Moldova*, Vol. XLV, No. 4 (152), 75-88.
10. Van Leeuwen C., Schultz H., Garcia de Cortazar-Atauri I., Duchêne E., Ollat N., Pieri P., Bois B., Goutouly J.P., Quénoł H., Touzard J.M., Malheiro A.C., Bavaresco L. and Delrot S., 2013: Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), letter, 2013 110 (33) E3051-E3052; published ahead of print June 21, 2013, doi:10.1073/pnas.1307927110*
11. Quénoł H., 2013 : Analyse du climat aux échelles locales dans le contexte du changement climatique. *Revue Pollution Atmosphérique. Climat, santé, société. N° spécial climat - Juin 2013*. 1-10.
12. Quénoł H. and Bonnardot V., 2014: A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change : the "TERADCLIM" project. *International Journal of Vine and Wine Sciences*. (in press)
13. Briche E., Beltrando G., Somot S. and Quénoł H., 2014 : Critical analysis of simulated daily temperature data from the ARPEGE-Climate model: application to climate change in the Champagne wine-producing region. *Climatic Change*. DOI: [10.1007/s10584-013-1044-5](https://doi.org/10.1007/s10584-013-1044-5).
14. Fourment, M.; Ferrer, M.; González-Neves, G.; Barbeau, G.; Bonnardot, V.; Quénoł, H. 2013. Spatial variability of temperature and grape berry composition at terroir scale in Uruguay. *Ciência y Técnica Vitícola*, 28, 1, 329-334.
15. Irimia L., Patriche C.V., Quénoł H., 2013: Viticultural Zoning: a Comparative Study Regarding the Accuracy of Different Approaches in Vineyards Climate Suitability Assessment. *Cercetări Agronomice în Moldova*, XLVI, 3 (155), 95-106.
16. Fourment M., Ferrer M., Quénoł H., 2013 : *Vitis vinifera* L. cv. Tannat: respuesta a la variabilidad climática. *Agrociencia Uruguay* [online]. 2013, vol.17, n.2, pp. 45-54. ISSN 1510-0839.
17. Tissot C., Brosset D., Rouan M., Le Tixerant M., Le Guyader D., 2013. Modeling Human Activities under Environmental Constraints. *Environmental Modelling and Software*, (submitted).

- **Publication dans revue sans comité de lecture**

1. Barbeau G., Coulon C., Neethling E., Bonnefoy C. et Quénoł H., 2011 : Le changement climatique et les interactions sol-climat. *Géologues*, 168, 26-29.

- **Ouvrages et chapitres d'ouvrages**

1. Quénoł H., 2011 : *Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique*. Habilitation à Diriger des Recherches à l'Université de Haute Bretagne, 2 vol., 298p.
2. Quénoł H., Barbeau G., Bonnefoy C. et Neethling E., 2012. Le changement climatique et les vignobles du Val de Loire. In 303 « Arts, recherches et créations », Numéro spécial « Val de Loire, Patrimoine Mondial », 21/2012, 271p.
3. Bonnefoy C., Barbeau G., Quénoł H., Neethling E., Madelin M. et Jouannon A., 2012 : Changement climatique et viticulture : le cas du Val de Loire. In *Changement climatique dans l'Ouest*. Presses Universitaires de Rennes. 325-342.

4. Quénol H., 2014 : *Changement climatique et viticulture*. Ed. Lavoisier, coll. Tech. & Doc. 441p. (sous presse).

- **Communications à des colloques : actes publiés avec comité de lecture**

1. Bonnardot V., Cautenet S., Planchon O. et Quénol H., 2011 : Simulations climatiques méso-échelles : comparaison de données observées et simulées en vue d'une intégration de scénarios de changement climatique. *Actes du XXIVème colloque de l'AIC, Rovereto, Italie*, 93-98.
2. Briche E., Bonnefoy C., Cautenet S., Bonnardot V., Beltrando G., Madelin M. et Quénol H., 2011. Simulations du modèle à méso-échelle RAMS à résolution fine lors des épisodes extrêmes de 2003 : application à deux vignobles du nord de la France. *Actes du XXIVème colloque de l'AIC, Rovereto, Italie*, 111-116.
3. Patriche C.V., Irimia L., Pirnau R., Rosca B. et Quénol H., 2011 : Application SIG pour la modélisation spatiale des conditions climatiques, topographiques et pédologiques favorables pour la viticulture. *Actes du XXIVème colloque de l'AIC, Rovereto, Italie*, 459-464.
4. Powell S., Sturman A., Quénol H. , 2011 : Changement climatique et variabilité spatiale du climat dans les vignobles de Marlborough (Nouvelle Zélande). *Actes du XXIVème colloque de l'AIC, Rovereto, Italie*, 477-482.
5. Mónica Alexandra Rodrigues, Ana Monteiro, Alfredo Rocha and Hervé Quénol, 2011: Climatic Zoning and Vineyard Aptitude in the Demarcated Douro Region. *Proceedings of the 19th Annual Colloquium of the International Geographical Union Commission on the Sustainability of Rural Systems, National University of Ireland, Galway, Ireland, 1-7 August 2011*. pp-.
6. Mónica Alexandra Rodrigues, Ana Monteiro, Alfredo Rocha, Hervé Quénol and José Rodrigues de Freitas, 2011: Climate – Related Risks on Agriculture in Demarcated Douro Region. *Proceedings of the 5th International Scientific Conference Rural Development 2011 in Global Changes, Aleksandras Sulginskis University, Kaunas district, Lithuania. Volume 5, Book 2, ISSN: 1822-3230*. pp. 216 – 220.
7. Sturman A., Quénol H., Powell S., Soltanzadeh I., Zawar-Reza P. and Bonnardot V., 2011: Investigating the adaptability of New Zealand's vineyard areas to changing climate using a multi-scale approach. *19th International Congress of Biometeorology, 4-8 December 2011 Auckland*. 6p.
8. Bonnardot V., Sturman A., Soltanzadeh I., Zawar-Reza P., Hunter J. and Quénol H., 2011: Investigation of grapevine areas under climatic stress using high-resolution atmospheric modelling: case studies in South Africa and New Zealand. *19th International Congress of Biometeorology, 4-8 December 2011 Auckland, New Zealand*. 6p.
9. Bois B., Chabin J.P., Petitot P., Adrian M., Madelin M., Quénol H., Thévenin D., Villery J., Castel T. and Richard Y., 2011: Frost risk spatial analysis and zoning for viticulture at local scale level using digital geographical information data, field information and winegrowers survey. *17th International Symposium GIESCO, 29th August-2nd September 2011 Asti-Alba (CN), Italy*. 4p.
10. Merot P., Corgne S., Delahaye D., Desnos P., Dubreuil V., Gascuel C., Giteau J.L., Joannon A., Planchon O. et Quénol H., 2012 : Évaluations, impacts et perceptions du changement climatique dans le Grand Ouest : le projet CLIMASTER. *Symposium « les chemins du développement territorial », Clermont Ferrand, 19, 20 et 21 juin 2012*. 25p.
11. Quénol H., 2012 : Observation et modélisation du climat à l'échelle des terroirs viticoles. *Actes du IX Congrès International des Terroirs, Dijon/Reims, 25-29 juin 2012*. 3, 15-17.
12. Bonnardot V., Cautenet S., Cautenet G. and Quénol H., 2012: Meso-scale future climate modeling (5 km resolution) : application over French wine regions under the SRES A2 scenario (2041-2050). *Actes du IX Congrès International des Terroirs, Dijon/Reims, 25-29 juin 2012*. 8, 14-17.

13. Neethling E., Barbeau G., Bonnefoy C. and Quénoł H., 2012: Influence of climate change on grape berry composition from 1960 to 2010 in the Loire Valley, France. *Actes du IX Congrès International des Terroirs, Dijon/Reims, 25-29 juin 2012*. 3, 45-47.
14. Neethling E., Sicard S., Barbeau G., Bonnefoy C. and Quénoł H., 2012: Spatial variability of temperature and grapevine growth at terroir scales in the context of climate change. *Actes du IX Congrès International des Terroirs, Dijon/Reims, 25-29 juin 2012*. 3, 48-50.
15. Briche E., Beltrando G., Cautenet S., Langellier F. et Quénoł H., 2012 : Vagues de chaleur dans la région du vignoble du Champagne jusqu'en 2050. *Actes du IX Congrès International des Terroirs, Dijon/Reims, 25-29 juin 2012*. 3, 21-24.
16. Neethling E., Coulon C., Barbeau G., Courtin V., Quénoł H. and Bonnefoy C., 2012 : Viticultural strategies to adapt to climate change: Temporal and spatial changes in land use and crop practices. *10th European IFSA Symposium in 2012, Danemark (2012)*, 9p.
17. Delay E., Zottele F., Quénoł H. et Deros G., 2013 : La montagne : une voie d'adaptation au changement climatique? In: *Proceedings of 18th International Symposium GiESCO. 7th to 11th July. Porto, Portugal*.
18. Foissard X., Quénoł H. et Dubreuil V., 2013 : Analyse et spatialisation de l'Ilot de Chaleur Urbain dans
19. Quénoł H., 2013 : Terroirs viticoles et changement climatique. in *11e Journée Technique du CIVB - 5 février 2013*. 110-116.
20. Irimia L., Patriche C. and Quénoł H., 2013: Viticultural potential assessing and natural terroir units delimitation using environmental criteria specific to Romanian viticulture. Case study: Uralti wine-growing center, Dealul Mare vineyard. *Symposium international « Terroirs, vigne et vin », Iasi, 19-22 septembre 2013*, 14p.
21. Cabre F., Quénoł H. and Nunez M., 2013: Regional climate change scenarios applied to viticultural zoning in Argentina. *XIV Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología, 20-22 novembre 2013*. , Tarija (Bolivie). 20p.
22. Fourment M., Quénoł H. y Ferrer M., 2013 : Variabilidad espacial de la temperatura en una región vitícola de Uruguay. *XIV Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología, 20-22 novembre 2013, Tarija (Bolivie)*.

- **Communications dans des colloques avec résumés publiés**

1. Quénoł H., 2011 : Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles (APR 2010: TERADCLIM). *Programme GICC, Séminaire Projets à mi-parcours 2008, lancement des projets 2010 - 20-21 janvier 2011, Aussois, France*.
2. M. Rodrigues, A. Rocha, A. Monteiro, H. Quénoł and J. R. de Freitas., 2011: Simulation of the Climatic Risks episodes in the Demarcated Douro Region Vineyards using the WRF model. *European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 13, EGU2011-200-11. Vienna, Aústria. (Poster)
3. M. Rodrigues, A. Monteiro, S. Leite and H. Quénoł, 2011: Climate observation and modeling over land vines in the context of climate change: a Douro region case study. *European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 13, EGU2011-5350-2. Vienna, Aústria. (Oral)
4. M. Rodrigues, A. Monteiro, M. H. Pina, H. Quénoł and J. Rodrigues de Freitas, 2011: Contribution of the Agriculture Advices in the Prevention and Evaluation of Risks in Vineyard within the Demarcated Douro Region. *European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 13, EGU2011-4111-7. Vienna, Aústria. (Poster)
5. Bonnefoy C., Quénoł H. and Lambert J.L., 2011: Regional and Local Scale Temperature Analysis in Two Winegrowing Regions of California. *62nd American Society for Enology and Viticulture (ASEV) National Conference, June 20–24, 2011 Monterey, California USA*. (Oral).

6. Madelin M. and Quénol H., 2011: Spatial and temporal variability of temperature in the vineyards of Mendoza Province (Argentina). Regional Geographic Conference UGI2011, 14-18 November 2011, Santiago Chile. (Poster)
7. Quénol H. and Sturman A., 2012: Understanding local climatic keys to adapting/surviving global warming in viticulture. *8th International Cool Climate Symposium, 31 Jan-4 Feb 2012, Tasmania*. (Poster)
8. Mónica Alexandra Rodrigues, Ana Monteiro, Alfredo Rocha, Hervé Quénol and José R. Freitas, 2012 : Use Information of Agrometeorological Stations in the Prediction of Agriculture Diseases: Douro Region case study. *Presented in Planet Under Pressure 2012, Elsevier Conference*. London, 26-29 March 2012.
9. Sturman A. and Quénol H., 2012: Recent changes in atmospheric circulation over New Zealand and their impact on temperature trends in the Marlborough vineyard region. *10<sup>th</sup> ICSHMO, 23-37 april 2012, Noumea, New Caledonia*.
10. Thomas A., Corgne S., Planchon O., Bonnefoy C., Quénol H., Lecerf R., 2012 : Phenological monitoring of vine using MODIS imagery in the vineyard of Saumur-Angers (Loire Valley area, France), *EGU General Assembly Conference*. Vienne, 22-27 avril 2012.
11. Quénol H., 2012 : Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles. Les changements globaux : enjeux et défis. Journées du CNFCG, 9-11 juillet 2012, Toulouse.
12. Briche E., Cabre F., Saulo C., Nunez M. and Quénol H., 2013: Characterization and comparison of mean temperatures and Winkler index evolution between observed and simulated MM5 data (1970-1989) in wine-growing regions of Argentina. *CCRR 2013, Dresden, May 27-29*.
13. Quénol H., 2013 : Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique. *Journée "climat e société du CNFG"*, 14-15 mars 2013, Epernay.
14. Bonnefoy C., Madelin M. et Quénol H., 2013 : Modélisation spatiale de la température dans un site viticole des Coteaux du Layon. *SAGEO, Brest du 23 au 26 septembre 2013*.
15. Neethling E., Barbeau G., Quénol H., Rouan M., Tissot C., 2013. Adapting to climate change: A case study on modeling viticultural farming practices under spatial and temporal constraints. *International conference. Climate Change and Regional Response – Impacts and adaptation strategies for public, commercial and private actors. Dresden, Germany*. Oral communication.
16. Fourment M., Ferrer M., González-Neves G., Barbeau G., Bonnardot V. and Quénol H. 2013. Spatial variability of temperature and grape berry composition at terroir scale in Uruguay. In: *Proceedings of 18th International Symposium GiESCO*. 7th to 11th July. Porto, Portugal.
17. Neethling E., Barbeau C., Quénol H., Barbeau G., 2013. Study on the sensitivity and adaptability of viticultural practices: Wine growers' responses to climate variability. *18th International Symposium GiESCO 2013. Porto, Portugal*. Oral communication.

- **Conférenciers invités**

1. « Climate Change, Viticulture and Water Resources Congress », *March 9th and 10th 2011 Mendoza, Argentina*. Conférencier invité : « *Impacto del Cambio Climatico en viñedos* ». Quénol H. <http://www.congresoclimayvino.com.ar/enq/congress/programme.html>
2. « Vignes, Vins : jeux et enjeux de la diversité » *Rencontres du Clos Vougeot 2011, 6-8 octobre 2011*. Quénol H. Conférencier invité : " *Variabilité spatiotemporelle du climat aux échelles fines et terroirs viticoles* ".
3. « *changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles* ». 07/06/11 à l'Université d'Angers dans le cadre des séminaires de l'IFR QUASAV.



4. *Présentation de TERVICLIM et TERADCLIM 13 mars 2012 lors de l'Assemblée Générale de l'Organisation Internationale de la Vigne et du Vin.* QuénoI H.
5. « *Le climat et la biodiversité, deux enjeux intimement liés* », 20 mars 2012. Comprendre le changement climatique: cycle de conférences-débats, Espace des Sciences d'Angers. QuénoI H. Conférencier invité.
6. « *Quand les vignobles s'adaptent au changement climatique* », 15 mai 2012, Espace des Sciences de Rennes. QuénoI H. Conférencier invité : <http://www.espace-sciences.org/conferences/comment-les-vignobles-s-adaptent-au-changement-climatique>
7. « *La vitiviniculture face au changement climatique ?* », 6 juillet 2012, Le Clos Vougeot. Journées Internationales des Eclairés du Vin. Conférencier invité et coordinateur de la table ronde.
8. - "Terroirs viticoles et changement climatique". Conférencier invité pour les *11e Journée Technique du Comité Interprofessionnel des Vins de Bordeaux - 5 février 2013*. 110-116. (invité par le CIVB)
9. - "Climat et viticulture dans le contexte du changement climatique" et "*Impact du changement climatique sur la viticulture en Amérique du Sud : observation et modélisation*". Workshop "Impactos del cambio climático sobre la viticultura en América del Sur : entre observaciones, estudios de campo y modelizaciones", 12-13 novembre 2013 Chillan (Chili). (conférence en espagnol ; invité par l'ambassade de France en Argentine)
10. -"Observation et modélisation spatiale du climat à l'échelle locale dans le contexte du changement climatique". Conférence du Centre Scientifique et Technique Franco-Argentin (CECTAF) à Buenos Aires. 21 novembre 2013. (conférence en espagnol ; invité par l'ambassade de France en Argentine)
11. - "Analyse et modélisation du climat à méso-échelle dans un objectif de zonage climatique". Conférence dans le cadre du séminaire de zonage vitivinicole en Argentine, 19 novembre 2013, Mendoza (Argentine). (conférence en espagnol ; invité par la Corporation Vitivinicole Argentine (COVIAR)).

- **Rapports**

1. Bonnardot et Cautenet, 2012 : Rapport d'activités pour l'année 2012, projet uhb6342« modélisation atmosphérique méso-échelle et échelle fine des terroirs viticoles », DARI-CINES, 4p.
2. QuénoI H., Bonnardot V., Cautenet S., Tissot C., Barbeau G., Madelin M., 2012 : *Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles : programme GICC-TERADCLIM*. Rapport intermédiaire GICC. 36p.

- **Vulgarisation scientifique**

- **Conférences « grand publique »**

1. « *Le climat et la biodiversité, deux enjeux intimement liés* », 20 mars 2012. Comprendre le changement climatique: cycle de conférences-débats, Espace des Sciences d'Angers. Conférencier invité.
2. « *Quand les vignobles s'adaptent au changement climatique* », 15 mai 2012, Espace des Sciences de Rennes. Conférencier invité : <http://www.espace-sciences.org/conferences/comment-les-vignobles-s-adaptent-au-changement-climatique>

- **Presse écrite et audiovisuelle**

1. « Les vendanges tardives ne le sont plus... ! ». Revue Sciences Ouest : n°283, janvier 2011. p9.

2. Communiqués de presse par l'Agence TELAM dans les différents quotidiens argentins (20 mars 2011) pour présenter les programmes TERVICLIM et TERADCLIM en Argentine.  
<http://ar.noticias.yahoo.com/analizan-impacto-cambio-climatico-terroir-viticola-20110320-111501-551.html>  
<http://noticias.terra.com.ar/analizan-impacto-del-cambio-climatico-en-el-terroir-viticola,f246994d154de210VgnVCM20000099f154d0RCRD.html>  
<http://www.lacapital.com.ar/informacion-gral/Investigan-como-impacta-el-cambio-climatico-en-la-produccion-de-vinos-20110321-0023.html>  
<http://www.winereport.com.ar/2011/03/18/bodega-alta-vista-lidera-el-analisis-de-los-cambios-climaticos-a-la-escala-del-terroir/>  
<http://www.ecodes.org/noticias/analizan-impacto-del-cambio-climatico-en-el-terroir-viticola>  
<http://www.viagourmet.com/noticias/gourmet/bodega-alta-vista-lidera-el-analisis-de-los-cambios-climaticos-a-la-escala-del-terroir.html>
3. « Adapting Vineyards to Climate Change ». CNRS International Magazine - No.22, p17 - July 2011, Current Trends in Superconductivity, 22, July 2011. Article de Ruth Surridge.  
<http://www.cnrs.fr/fr/pdf/cim/CIM22.pdf>
4. « Quand les vignobles s'adaptent au changement climatique », 15 mai 2012. Journal télévisée du soir sur TV Rennes. <http://www.tvrennes35bretagne.fr/fr/grille/tvrsoir-27820>
5. « Changement climatique : que pouvons-nous espérer de la conférence de Durban ? ». « ça commence à bien faire » animé par Bruno Gaulin sur France Bleu Armorique. Diffusion 10/12/11.
6. Reportage de 30mn dans l'émission « On en parle » (Radio Suisse Romande) sur « Les vendanges du changement climatique » le 28 novembre 2011 sur « Les vendanges du changement climatique ».
7. Reportage dans le journal de la Radio Suisse Romande le 28 mars 2011 sur « Changement climatique et vignobles de Mendoza (Argentine) »
8. "La vigne, thermomètre du climat" dans l'émission "Prise de Terre" sur la RSR, le samedi 16 avril 2011 de 9h00 à 10h00 et le dimanche 17 avril 2011 de 4h00 à 5h00. Émission de Lucile Solari Intervention de Marcela Polimeni, Cyril Tissot, Mathieu Grassin et Hervé Quénot.
9. Festival du Film de Chercheur « Rencontre entre les chercheurs et les réalisateurs ». Projet « Comment les terroirs viticoles peuvent s'adapter au changement climatique ? » sélectionné par le jury parmi les 10 auditionnés. 08/06/12 à Nancy.

#### **- Documentaires scientifiques**

- "Coup de Chaleur sur le Vin". Un film de 52mn écrit et réalisé par Eric Michaud Une coproduction Saison cinq, France Télévisions avec la participation de la RTBF. Eric Michaud et son équipe sont venus sur les sites TERVICLIM dans le Val de Loire et à Mendoza pour filmer le travail sur le terrain que nous effectuons dans ce programme. Première diffusion mai 2011.

<http://www.youtube.com/watch?v=MAudaLSqOgQ>

- "Pour quelques degrés de plus..." Réalisation d'un documentaire scientifique sur les programmes TERVICLIM et TERADCLIM avec le CNRS-Images en septembre 2013. Réalisateur : Christophe Gombert.

### **C.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION**

1. Le projet LACAVE (Long term impacts and Adaptations to Climate change in Viticulture and Enology) a été débuté dans le cadre du méta-programme « Adaptation au Changement Climatique de l'Agriculture et de la

Forêt » (ACCAF) de l'INRA. Ce projet est coordonné par N. Ollat (INRA-Bordeaux) et J.M. Touzard (SUPAGRO-Montpellier). Je co-coordonne avec N. Ollat et G. Barbeau (INRA-Angers) du WP1 sur la caractérisation et la perception du changement climatique en viticulture. Dans le cadre de ce projet, les vignobles expérimentaux du programme GICC-TERADCLIM (Val de Loire), de Saint-Emilion (Bordelais) et du Languedoc Roussillon sont étudiés.

2. Obtention du bourse bilatéral Bernardo Houssay pour un Post-doctorat d'un an à l'Université de Buenos Aires (UMI IFACEI). Elodie Briche effectue ce post-doctorat en collaboration scientifique avec TERADCLIM sur la modélisation méso-échelle du climat dans les vignobles argentins.
3. Organisation d'un colloque international intitulé « Changement Climatique et Terroirs Viticoles » à l'Université Catholique de Valparaiso (PUCV) et à l'Université Cuyo à Mendoza (UNCuyo) du 7 au 11 novembre 2011. (bilan en annexe).

#### ***Bilan du colloque « changement climatique et terroirs viticoles »***

La manifestation scientifique internationale intitulée « Changement Climatique et Terroirs Viticoles » s'est déroulée à l'Université Catholique de Valparaiso (PUCV) et à l'Université Cuyo à Mendoza (UNCuyo) du 7 au 11 novembre 2011. Ce colloque, organisé conjointement par le CNRS (France), l'UNCuyo, la PUCV et l'université de Rennes 2 (France) a regroupé 40 personnes, chercheurs et professionnels du vin, de 8 nationalités (Argentins, Uruguay, Bolivie, Nouvelle Zélande, France, Suisse, Chili, Afrique du Sud) dont 2 membres du Groupe Intergouvernemental d'Etudes des Changements du Climat (GIEC).

Les deux premières journées, qui se sont déroulées à Valparaiso, ont débuté par une table ronde réunissant les scientifiques et des représentants de la viticulture chilienne. Une discussion s'est instaurée sur l'impact du changement climatique sur la viticulture chilienne. L'augmentation des extrêmes climatiques (sécheresses, grêles, gel, ...) et la gestion de l'eau ont été les principales interrogations de la profession viticole.

Les communications suivantes ont concerné la méthodologie et les résultats des programmes internationaux ANR-TERVICLIM et GICC-TERADCLIM. L'objectif de ces programmes est d'étudier l'impact du changement climatique à l'échelle des vignobles par l'intermédiaire de mesures agroclimatiques et de la modélisation du climat future afin de fournir aux viticulteurs des scénarios d'adaptation au climat à plus ou moins long terme (2040-2100). Les principaux résultats concernant les vignobles expérimentaux européens (Champagne, Val de Loire, Bourgogne, Navarre, Bordeaux) ont été présentés.

Après avoir traversé les Andes en bus le mercredi 9 novembre, le colloque s'est poursuivi à la Faculté de Philosophie et des Lettres de l'Université de Cuyo à Mendoza. La deuxième partie du colloque a été inaugurée par la Présidente de la Faculté de philosophie et des Lettres, le Président de la Faculté d'Agronomie et le Directeur des relations Internationales de l'UNCuyo. Les résultats obtenus dans les vignobles expérimentaux d'Amérique (Argentine, Chili, Uruguay, Bolivie), d'Afrique du Sud et de Nouvelle Zélande ont été présentés au cours de la matinée. L'après-midi a été consacré à la modélisation climatique à l'échelle des terroirs viticoles notamment avec l'intégration des scénarios issus des modèles du changement climatique globaux (résolution de 50 km) dans les modèles méso-échelles (1 km).

Une réunion de synthèse a ensuite été organisée sous la direction des 2 experts du GIEC afin de mettre en évidence les avancées en matière de résultats des programmes TERVICLIM et TERADCLIM.

Le vendredi matin a été consacré à une table ronde sur l'impact du changement climatique sur la viticulture. Des échanges enrichissants entre les scientifiques et l'œnologue de la bodega Alta vista (Matthieu Grassin) ont permis d'aborder les principales inquiétudes climatiques de la profession viticole dans la région de Mendoza. Il apparaît que, comme 3 jours plus tôt à Valparaiso, les principales questions concernent les extrêmes climatiques (gelées, grêle et vagues de chaleur) et la pénurie en eau.

Le colloque a été clos autour d'un asado organisé à la bodega Alta vista.

4. Organisation d'un atelier participatif (adaptation de la viticulture au changement climatique) avec les principaux viticulteurs de la région de Mendoza. Lujan de Cuyo, le 21 novembre 2012.
5. « Advanced weather and climate modeling of vineyard regions. MAF Sustainable land management and climate change (2012-2014). Responsables du projet : Andy Sturman (University of Canterbury) , Hervé Quénol et Valérie Bonnardot (LETG).
6. Réalisation d'un ouvrage intitulé « changement climatique et terroirs viticoles » aux éditions Lavoisier.
7. Réalisation d'un documentaire scientifique "**Et pour quelques degrés de plus...**" sur les programmes TERVICLIM et TERADCLIM avec le CNRS-Images en septembre 2013. Réalisateur : Christophe Gombert.

## 8. Création d'une business unit : TerraClima

### TerraClima, lauréat du Concours national d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes

2 Jul. 2013

autre événement

**Mardi 2 juillet a eu lieu l'annonce des résultats du 15<sup>e</sup> Concours national d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes en présence de Madame Geneviève Fioraso, Ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.**

**Cyril Bonnefoy, directeur du projet TerraClima, est lauréat dans la catégorie « en émergence ».**



Créée par deux chercheurs du laboratoire LETG-Rennes, Hervé Quénel et Valérie Bonnardot, TerraClima est une business unit dédiée au diagnostic climatique à l'échelle locale en milieu urbain et agricole. Cyril Bonnefoy a intégré TerraClima, suite à sa thèse sur l'observation et la modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique.

Ensemble, ces chercheurs en climatologie ont mis en place une méthodologie innovante d'analyse des données climatiques à échelle fine grâce à une mise en relation des facteurs environnementaux des territoires avec les paramètres climatiques. Cette méthodologie, qui peut être utilisée par les viticulteurs pour la gestion d'une exploitation, la recherche d'investisseurs ou comme outil marketing est aussi applicable au système agricole en général et même en milieu urbain. Dans l'agglomération rennaise, un système d'acquisition de données enregistrées par des stations météorologiques est en cours de développement, en partenariat avec Rennes Métropole.

TerraClima est un projet accompagné par Ouest Valorisation, Rennes Métropole et Oséo.

Le concours national d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes vise à favoriser la diffusion des résultats de la recherche dans le monde économique et faire émerger des projets de création d'entreprises s'appuyant sur des technologies innovantes en offrant un soutien financier et un accompagnement adaptés.

15 lauréats ont été sélectionnés parmi 897 candidatures reçues.

Rapport