



APPEL A PROPOSITION GICC 2010

Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles

Descriptif scientifique du projet

Mars 2010

A) RÉCAPITULATIF DU PROJET

Titre du projet : Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles

Acronyme : TERADCLIM

Mots-clés (5 à 10) : changement climatique, terroirs viticoles, échelles fines, modélisation spatiale méso-échelle, transfert d'échelles, adaptabilité, professionnels viticoles, Système Multi Agent, mesures météorologiques et agronomiques

Thème(s) de l'APR concerné(s):

Les impacts
Changement climatique et identification de ces effets
L'adaptation et la nécessaire descente d'échelle
Scénarios et incertitudes
Recherches en partenariat

Responsable/Coordinateur scientifique :

QUENOL Hervé,
Chargé de Recherches 1 CNRS,
UMR6554 LETG, Laboratoire COSTEL, IFR90-FR2116 CAREN, OSUR
Université Haute Bretagne, Pl. du recteur Henri le Moal, 35043 Rennes Cedex.
Tel : 0299142090
Email : herve.quenol@uhb.fr

Organisme (s) / Laboratoire (s) impliqué (s) dans le projet :

Partenaires scientifiques

Laboratoire COSTEL, UMR6554 LETG, Université Rennes 2 - Haute Bretagne, Place du recteur Henri le Moal, 35043 Rennes cedex (France). Tel. 02.99.14.20.90

Laboratoire GEOMER, UMR6554 LETG, Institut Universitaire Européen de la Mer Technopôle Brest-Iroise, place Nicolas Copernic 29280 Plouzané cedex (France). 02.98.49.87.54 (secrétariat).

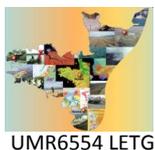
UVV-UMT Vinitera INRA-Angers, Inra Angers-Nantes, BP 71627, 44316 Nantes Cedex 03 (France) - tél : + 33 (0)2 40 67 50 00

UMR 7159 - UR 182 LOCEAN, LODYC, Tour 26. 4ème étage. Case 100, UPMC 4 Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05. France. Tél.: 33 1 44 27 23 29

UMR 6016 Laboratoire de Météorologie Physique (LAMP), Université de Clermont Ferrand (France). 24 av. des Landais 63177 Aubière Cedex (France). 04 73 40 73 65

UMR8586 PRODIG, Université Diderot Paris 7 (France), UFR GHSS (c.c. 7001) 75205 PARIS Cedex 13.

Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), LTHE - Université Joseph Fourier BP 53 38041 GRENOBLE cedex 09



Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas (DACC). Avda. Boulogne Sur Mer 3050-Capital-Mendoza-Argentina (Argentine). Tel: (54 - 261) 4413265

Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Filosofía y Letras. U.N.Cuyo – Centro Universitario - Parque General San Martín - Casilla de Correo 345 - C.P. (5500)- Mendoza - Argentina
Teléfonos:00-54-0261- 4135000 - 4135223 - Fax: 4380457

Servicio Meteorológico Nacional, 25 de mayo 658. Buenos Aires. Argentina. Teléfono:(011) 5167-6767 E-mail: smn@smn.gov.ar

Acteurs/collectivités

Association des Vignerons de la Sainte-Victoire. Vinothèque Sainte-Victoire 1, Boulevard Etienne Boyer BP n°25 13530 TRETZ (France). Tél : + 33 442 613 760

Syndicat Des Producteurs De Coteaux Du Layon. Les Noels, 49380 Faye D'anjou. Tel: 02.41.54.18.01

Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas (DACC). Avda. Boulogne Sur Mer 3050-Capital-Mendoza-Argentina (Argentine). Tel: (54 - 261) 4413265

Bodega ALTA VISTA. Terroir Expression Winemakers®. Alzaga 3972, Luján de Cuyo M5528AKJ, Mendoza, (Argentina). T+ 54 261 4964684

Diffusion internationale et vulgarisation d'information scientifique

Chaire UNESCO « culture et tradition du vin ». Institut Jules Guyot - IUVV, Campus Universitaire, BP 138 21004 DIJON CEDEX (France). Tel : 03.80.39.63.89

Nom Prénom	Laboratoire/organi sme	Coordonnées	Statut	Fonction dans le projet
Quénol Hervé	Laboratoire COSTEL UMR6554 LETG	Université Haute Bretagne, Pl. du recteur Henri le Moal 35043 Rennes cedex	CR1 CNRS	responsable et coordinateur du projet. Climatologie/traitements géostatistiques
Planchon Olivier	Laboratoire COSTEL UMR6554 LETG	Université Haute Bretagne, Pl. du recteur Henri le Moal 35043 Rennes cedex	CR1 CNRS	Climatologie / traitements géostatistiques
Bonnardot Valérie	Laboratoire COSTEL UMR6554 LETG	Université Haute Bretagne, Pl. du recteur Henri le Moal 35043 Rennes cedex	Post-doc	Climatologie/viticulture Modélisation atmosphérique Méso-échelles RAMS
Bonnefoy Cyril	Laboratoire COSTEL UMR6554 LETG	Université Haute Bretagne, Pl. du recteur Henri le Moal 35043 Rennes cedex	Doctorant	« impact du changement climatique dans les vignobles du val de Loire »
Tissot Cyril	Laboratoire	Institut Universitaire	CR1 CNRS	Modélisation SMA.

	GEOMER, UMR6554 LETG	Européen de la Mer Technopôle Brest- Iroise, place Nicolas Copernic 29280 Plouzané cedex		
Mathias Rouan	Laboratoire GEOMER, UMR6554 LETG	Institut Universitaire Européen de la Mer Technopôle Brest- Iroise, place Nicolas Copernic 29280 Plouzané cedex	IE CNRS	Ingénieur développement. Modélisation SMA
David Brosset	Laboratoire GEOMER, UMR6554 LETG	Institut Universitaire Européen de la Mer Technopôle Brest- Iroise, place Nicolas Copernic 29280 Plouzané cedex	Post-Doc CNRS	Informaticien. Modélisation SMA
Gérard Barbeau	UVV-UMT Vinitera INRA-Angers, Inra	Angers-Nantes, BP 71627, 44316 Nantes Cedex 03 (France)	Directeur UVV. Ingénieur agronome	Agronomie et œnologie. Terroirs viticoles.
Séverine Roger	UVV-UMT Vinitera INRA-Angers, Inra	Angers-Nantes, BP 71627, 44316 Nantes Cedex 03 (France)	Adjointe technique de la recherche	Agronomie. Observations in-situ.
Malika Madelin	UMR8586 PRODIG	Université Diderot Paris 7 (France), UFR GHSS (c.c. 7001) 75205 PARIS Cedex 13.	Maitre de conférences	Climatologie. Modélisation statistique.
Gérard Beltrando	UMR8586 PRODIG	Université Diderot Paris 7 (France), UFR GHSS (c.c. 7001) 75205 PARIS Cedex 13.	Professeur des Universités	Climatologie
Elodie Briche	UMR8586 PRODIG	Université Diderot Paris 7 (France), UFR GHSS (c.c. 7001) 75205 PARIS Cedex 13.	Doctorante	« Modélisation spatiale du changement climatique aux échelles fines, jusqu'à la fin du XXIème siècle dans le vignoble champenois »
Sylvie Cautenet	UMR 6016 Laboratoire de Météorologie Physique (LAMP),	Université de Clermont Ferrand (France). 24 av. des Landais 63177	Professeur émérite des universités	Modélisation atmosphérique mésos-échelles

		Aubière Cedex (France).		
Jean Philippe Boulanger	UMR 7159 - UR 182 LOCEAN, LODYC,	Tour 26. 4ème étage. Case 100, UPMC 4 Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05. France.	DR2 IRD	Changement climatique. Modélisation. Adaptation
Sylvain Bigot	Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE)	LTHE - Université Joseph Fourier BP 53 38041 GRENOBLE cedex 09	Professeur des Universités	Climatologie / traitements géostatistiques
Raúl Besa	Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas (DACC).	Avda. Boulogne Sur Mer 3050-Capital-Mendoza-Argentina (Argentine). Tel: (54 - 261) 4413265	Directeur DACC Ingénieur agronome	Risques agro-climatiques. Changement climatique.
Claudia Marcela Polimeni	Facultad de Filosofía y Letras. U.N.Cuyo	Universidad Nacional de Cuyo. Centro Universitario - Parque General San Martín - Casilla de Correo 345 - C.P. (5500)- Mendoza - Argentina	Professeur des Universités	Climatologie régionale
BALIKIAN Jean-Jacques	Association des Vignerons de la Sainte-Victoire.	Vinothèque Sainte-Victoire 1, Boulevard Etienne Boyer BP n°25 13530 TRETZ (France). Tél : + 33 442 613 760	Chargé de mission	Diffusion de l'information auprès des viticulteurs. Conceptualisation de la sensibilisation des viticulteurs au changement climatique.
Syndicat des vignerons des Coteaux du Layon	Syndicat des vignerons des Coteaux du Layon	Les Noels, 49380 Faye D'anjou.		Diffusion de l'information auprès des viticulteurs.
Mathieu Grassin	Bodega ALTA VISTA. Terroir Expression Winemakers®.	Alzaga 3972, Luján de Cuyo M5528AKJ, Mendoza, (Argentina). T+ 54 261 4964684	Chef d'exploitation	Très grande connaissance du milieu viticole argentin.
Jocelyne Perard	Chaire UNESCO « culture et	Institut Jules Guyot - IUVV, Campus	Présidente de la chaire	Diffusion internationale de

	tradition du vin ».	Universitaire, BP 138 21004 DIJON CEDEX (France)	UNESCO	l'information scientifique. Vulgarisation de l'information.
--	---------------------	--	--------	--

Organisme (s) gestionnaire (s) des crédits :

- Pour les laboratoires de l'UMR6554 LETG, il s'agit de la Délégation Régionale Bretagne et Pays de Loire (DR 17) du CNRS
- Pour l'UMR-LOCEAN, il s'agit de la Délégation Régionale Paris B du CNRS
- Inra Angers-Nantes, BP 71627, 44316 Nantes Cedex 03 (France) - tél : + 33 (0)2 40 67 50 00
- UMR8586 PRODIG, Université Diderot Paris 7 (France), UFR GHSS (c.c. 7001) 75205 PARIS Cedex 13.

Pour les partenaires étrangers, afin d'éviter les problèmes de transferts financiers, les crédits seront gérés par la DR17 et la DR Paris B du CNRS.

Pour les partenaires « professionnels », les crédits (stages, frais, ...) seront gérés par les instituts de recherches.

La collaboration entre ce projet **GICC-TERADCLIM** et le partenaire LTHE (Grenoble) dans le cadre du programme **GICC-ECLAIRA-DECLIC** consistera en des appuis et des échanges méthodologiques.

Coût prévisionnel total (TTC) : 1 828 000 euros

Montant de l'aide (TTC) demandé au programme GICC (MEEDDM et/ou autres financeurs du programme) : 298 000 euros

Cofinancements assurés et/ou prévus (TTC) (y compris autres que nationaux)

- ANR-JC 07194103 TERVICLIM (2008-2011) (Laboratoire COSTEL, UMR6554 LETG) : 140 000 euros (une grande partie de ce financement a permis d'acquérir les stations météorologiques installées dans les terroirs viticoles expérimentaux.
- ECOS-SUD n°C08U02 (Laboratoire COSTEL, UMR6554 LETG) : 2 missions/an en Amérique du Sud
- Projet CINES-DARI n° c2010016342 (2010) (Laboratoire COSTEL, UMR6554 LETG) : « **Modélisation atmosphérique méso-échelle des terroirs viticoles** » correspondant à une attribution de ressources informatiques de 40 000 heures de calcul par le Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur (CINES) pour effectuer la modélisation RAMS.
Attributions supplémentaires pour les 36 mois à venir si le projet est accepté.

Durée (36 mois maximum) : 36 mois

Résumé du projet de recherche

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 culturelles. 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 :

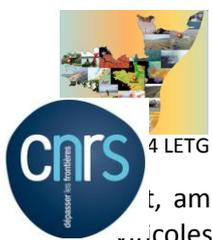
- Acquisition des données météorologiques et agronomiques à l'échelle des vignobles expérimentaux;
- Modélisation climatique à l'échelle des terroirs viticoles et intégration des scénarios IPCC avec notamment la mise en relation entre la modélisation atmosphérique (ex : RAMS, WRF, ..) et la modélisation statistique ;
- 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) ;
- 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, ...).

La modélisation climatique sera réalisée pour l'ensemble des vignobles expérimentaux étudiés depuis 2008 dans le cadre de l'ANR-TERVICLIM (Val de Loire, Champagne, Provence, Bourgogne, Bordeaux en France, Roumanie, Espagne, Italie, Maroc, Argentine, Chili, Bolivie, Uruguay, Afrique du Sud, Nouvelle Zélande). Nous avons délibérément sélectionné/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 IPCC.

Les scénarios d'adaptation au changement climatique (par SMA) seront effectués en collaboration avec les professionnels viticoles par l'intermédiaire de syndicats, d'association de viticulteurs et des exploitations viticoles dans 3 vignobles :

- Les vignobles français des Coteaux du Layon et de la Montagne Ste Victoire car des collaborations scientifiques/acteurs sont déjà en place (ex : interactivité de la cartographie des Terroirs dans les Coteaux du Layon réalisée par l'INRA d'Angers).
- Les vignobles de Mendoza notamment la Bodéga Alta-Vista. Cette exploitation viticole (appartenant au groupe français EDONIA) définit ces différents vins de terroirs par la variabilité des types de sol. Les autres exploitations viticoles de la région de Mendoza seront également intégrés dans le SMA (collaboration avec la Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas).

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



B) DESCRIPTIF DU PROJET

I Justifications du projet de recherche

- **Position par rapport aux termes de l'appel à propositions :**

Le projet GICC-TERADLIM consiste à apporter des réponses scientifiquement fondées sur l'impact du changement climatique à l'échelle de terroirs viticoles mondiaux.

Le projet se positionne dans plusieurs questions mentionnées dans les objectifs de l'APR :

- La *composante* « *changement climatique* » et la question « *des impacts* » se trouvent au centre du projet.

Certaines questions soulevées par l'appel d'offre sont abordées :

- *Changement climatique et l'identification de ses effets*
- *L'adaptation et la nécessaire descente d'échelle*
- *Scénarios et incertitudes*
- *Recherches en partenariat*

Ce projet s'inscrit dans le contexte de programmes de recherches régionaux (PSDR-CLIMASTER), nationaux (ANR-TERVICLIM, GICC-DRIAS, GICC-ECLAIRA-DECLIC, CINES-DARI) et internationaux (programme européen CLARIS, programme ECOS-SUD).

- **L'état de la question**

Concernant les études sur l'impact du changement climatique, de nombreuses recherches agronomiques ont été développées dans le but d'étudier les conséquences de ces modifications sur l'agriculture et notamment sur la viticulture : comme l'indique Seguin (2004), on peut se référer aux travaux de Rozenzweig et Hillel (1998), de Reddy et Hodges (2000), de Soussana (2001) ou encore des rapports du GIEC (2001 et 2007) pour avoir un premier diagnostic des conséquences du changement climatique sur les productions agricoles à l'échelle mondiale. En viticulture, Bonnardot (1996) mettait en évidence un raccourcissement de la période floraison-récolte sur le cépage Pinot noir en Bourgogne associé à une augmentation de la température durant la période de maturation dès 1990. Depuis la parution d'un article sur l'effet de l'augmentation du gaz carbonique sur la photosynthèse de la vigne (Schlutz, 2000), l'évolution des dates des stades phénologiques et des indices bioclimatiques a été largement étudiée dans le monde entier. Ainsi, les travaux de l'INRA, notamment ceux de Delécolle et al. (1999) et de Seguin (2002), portant sur plusieurs zones géographiques françaises et diverses cultures, ont montré, par exemple, une avance significative dans la date de floraison pour le cépage Chasselas. Dans sa thèse, Garcia de Cortazar (2007) a étudié « *les interactions dynamiques entre la plante, le sol, le climat et les techniques culturales à l'échelle parcellaire. Le travail a eu comme objectif d'adapter un modèle générique de cultures, le modèle STICS, à la vigne à l'échelle des grands vignobles de France pour ensuite l'appliquer à une étude d'impact du changement climatique à la même échelle* ». De même, Ganichot (2002) a mis en évidence une avance des dates de vendange de presque un mois en cinquante ans dans la région de Châteauneuf-du-Pape ; Le Chuine *et al* (2004) observent des résultats similaires en Bourgogne. Ces premières observations sur l'action du réchauffement climatique sur les cultures ont conduit les agronomes de l'INRA à mettre en place une base de données phénologiques (Phenoclim).

En relation avec les premières constatations faites sur l'impact du changement climatique sur la croissance des plantes, **d'autres travaux portent plus spécifiquement sur l'adaptation des**

pratiques culturelles (ex : évolution des variétés, adaptation des techniques culturelles, ...). Ils permettent de définir les potentialités agroclimatiques adaptées à une nouvelle donne climatique. Ainsi, Carbonneau (1992), Schultz (2000) Tonietto *et al* (2004), et Jones (2005) ont évalué l'impact du changement climatique par des simulations d'indices bioclimatiques (ex : indice héliothermique saisonnier, indice de sécheresse, indice de fraîcheur des nuits, ...), de dates de maturité du raisin, de taux de sucre ou d'avancées phénologiques. De plus, ils proposent des méthodes d'adaptation de la viticulture aux modifications climatiques : adaptation à l'évolution de l'encépagement, par le changement technologique (ex : irrigation qualitative de précision en zone méditerranéenne) et adaptation par l'extension de la viticulture à des régions plus septentrionales. Par exemple, Vaudour (2003) indique que les répercussions viticoles au niveau des potentialités thermiques sont considérables et conduisent à envisager un changement de l'encépagement. "*La géographie viticole s'en trouverait modifiée, admettant une frange supplémentaire de 100 km dans chaque hémisphère vers 2020-2050* (2003). Les travaux sur les adaptations au changement climatique aboutissent à des simulations d'extension spatiale de la vigne, de changement d'encépagement, ou d'évolution de la teneur en sucre du raisin pour les différentes régions viticoles de la planète (Tonietto et Carbonneau, 2004 ; Jones G. et al, 2005).

Concernant les simulations du changement climatiques, « Différentes méthodes de régionalisation (ou de « downscaling »), soit les modèles régionaux du climat (MRC) ou les méthodes de downscaling statistique, ont été développées au cours des 10-15 dernières années afin de raffiner l'information climatique issue des modèles globaux du climat (MGC). Les méthodes statistiques de downscaling (SD) ont été initialement développées pour les prévisions météorologiques, et de nombreuses méthodes sont en opération à travers le monde. » (Gachon, 2009). Par exemple, la désagrégation des scénarios climatiques globaux réalisée par le CERFACS et Météo-France a permis d'atteindre une résolution spatiale de 8km sur la France et la Suisse (Pagé *et al.*, 2008 ; Pagé, 2008). Le programme ANR-CLIMATOR (2007-2010) aborde le développement d'outils permettant de régionaliser les scénarios issus des GCM afin de les appliquer aux agrosystèmes. Plusieurs méthodes de régionalisation sont testées à partir des sorties ARPEGES (résolution 60 km).

Dans le cadre du projet européen CLARIS, des comparaisons entre modélisation dynamique et statistique (Menendez *et al.*, 2010) ont montré le potentiel d'une approche combinée des deux approches pour étudier les possible simipacts du changement climatique sur l'Amérique du Sud. Dans le cadre du nouveau projet européen CLARIS LPB, une action de réalisation d'ensembles de simulations régionales est coordonnée et permettra d'étudier à la fois la sensibilité des scénarios régionaux aux modèles globaux (conditions de bord) et au modèle régionale (paramétrisation physique). Cet ensemble servira de base d'analyse pour les études d'événements extrêmes. Il est également prévue d'y combiner une méthode de régionalisation statistique (CHAC ; D'Onofrio *et al*, 2010) qui sera accessible à tous sous forme d'un logiciel libre.

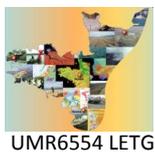
Bien que d'importants progrès ont été réalisés ces dernières années dans la régionalisation des données, les méthodes de descente d'échelle, « *restent un domaine sensible dans la mesure où elles conditionnent une étude plus réaliste des impacts et des actions d'adaptation* » (GICC 2010). Les méthodes de descente d'échelle sont intensément utilisées pour développer de l'information sur le changement climatique au niveau local. « *En effet, même si les MRC permettent par exemple de mieux capturer l'influence de la topographie et des processus physiques d'échelle régionale que les MGC, ils ne résolvent pas toujours toutes les échelles spatiales et temporelles nécessaires au besoin des études d'impact et d'adaptation. Par conséquent, le développement et l'application du SD s'avère nécessaire.* » (Gachon, 2009 ; X, 2010).



Ces différentes études abordent les conséquences du réchauffement climatique au niveau agronomique et aux échelles globales voire au mieux à l'échelle régionale mais pas à l'échelle du terroir. A notre connaissance, peu d'études n'abordent les conséquences futures du changement climatique sur les potentialités agroclimatiques aux échelles fines. Pourtant, dans certains terroirs (notamment en milieu accidenté), les variations des paramètres atmosphériques sont très importantes, sur des espaces relativement restreints (de l'ordre de quelques kilomètres à quelques mètres) et la qualité du raisin ou du vin est souvent en relation avec les caractéristiques locales (pente, sol, etc...). Ce sont ces variations du milieu aux échelles fines qui déterminent les spécificités du terroir. Il faut les prendre en compte dans le cadre d'une politique raisonnée d'adaptation des terroirs viticoles au changement climatique.

La variabilité spatiale du climat aux échelles fines est abordée (principalement par les géographes-climatologues et les agronomes) dans le cadre d'études sur les risques climatiques et sur les potentialités agroclimatiques en viticulture et en arboriculture. La mise en place de réseaux de mesures météorologiques et de méthodes de spatialisation (interpolation) adaptées aux échelles fines permet de mettre en évidence les interactions entre l'atmosphère et la surface terrestre et de représenter spatialement les phénomènes atmosphériques. L'analyse statistique et la représentation spatiale des données thermiques du réseau météorologique disposé dans le vignoble de Champagne ont permis de réaliser une cartographie précise des secteurs à risque gélif (Madelin, 2004). Ou encore, dans le nord du Portugal (région de *Entre Douro e Minho*), un réseau d'une vingtaine de capteurs météorologiques a été disposé dans deux terroirs viticoles (produisant du *vinho verde*) séparés de quelques kilomètres et avec des caractéristiques topographiques et agronomiques (type de cépage, qualité du vin) différentes, afin de comprendre l'influence locale des caractéristiques de la surface (relief, occupation du sol) sur les paramètres atmosphériques, et plus largement de mettre en évidence ainsi les potentialités agroclimatiques locales de ces terroirs (Quénol et al, 2004). Les méthodes de spatialisation adaptées aux échelles fines sont principalement basées sur la modélisation multicritères. Elles s'appuient sur l'hypothèse que plusieurs facteurs locaux de natures diverses (pentes, occupation du sol, ...) sont susceptibles d'interférer dans la variabilité spatiale que connaît la variable étudiée entre les points de mesures. Le rôle de ces composantes explicatives est établi à partir de l'étude de leurs relations avec le phénomène étudié. Ensuite, le modèle final est construit couramment à partir d'une régression multiple pas à pas prenant en compte le rôle des descripteurs indépendamment les uns des autres. 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) (Quénol et al 2004 ; Fury et Joly, 1995 ; Carrega, 1994).

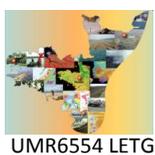
Les modèles physiques à méso-échelle (par exemple, modèles méso-échelle RAMS et WRF) sont également utilisés. La région viticole de Stellenbosch (Western Cape, Afrique du Sud) a fait l'objet d'une modélisation atmosphérique en utilisant le Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). Des simulations RAMS (résolutions de 25km, 5km, 1km et 200m) prenant en compte des situations synoptiques variées ont permis d'étudier le développement des circulations atmosphériques locales, notamment la brise de mer et d'évaluer son influence sur le vignoble en fonction des états de surface. Des différences topo climatiques, l'ampleur de gradients thermiques et des différences thermiques entre versants ainsi que l'influence des différentes conditions synoptiques sur l'avancée de la brise de mer ont été mis en évidence (Planchon et al, 2001 ; Bonnardot et al., 2002, 2005, Carey et al, 2002 et 2003). Les simulations, réalisées avec une résolution de 200m, ont été validées statistiquement à partir de données observées par un réseau de stations météorologiques présentes dans le vignoble (Bonnardot et al, 2009).



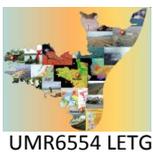
L'analyse bibliographique montre qu'il est indispensable de rassembler les compétences des agronomes et des géographes-climatologues (spécialisés dans les domaines de la mesure et de la spatialisation aux échelles fines) et des modélisateurs du climat afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur la viticulture à l'échelle d'un terroir. En comblant le manque de données aux échelles fines, cela d'affiner les simulations sur les possibles impacts dus au changement climatique attendu et donc, de permettre au monde viti-vinicole de mettre en place une politique d'adaptation raisonnée. C'est suivant cette démarche que le programme ANR-JC07194103 TERVICLIM « observation et modélisation spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique » (2008-2011) a été mis en place.

Bibliographie

- Barbeau G., Bottois N., Goulet E., Morlat R., 2008 : Vers une meilleure valorisation des vins : une méthode pour caractériser les terroirs. *FaçSade*, Résultats des recherches du département INRA-SAD. 28, 4p.
- Bonnardot, 1996: Le climat et la vigne en Bourgogne orientale. Climatologie appliquée et recherche d'indices climatiques pour la vigne en Côte de Beaune. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Dijon.
- Bonnardot V, and Cautenet S., 2009 : Mesoscale Atmospheric Modeling Using a High Horizontal Grid Resolution over a Complex Coastal Terrain and a Wine Region of South Africa. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* ,48(2), 330 (on line).
- Bonnardot V., Planchon O. & Cautenet S. 2005. The sea breeze development under an offshore synoptic wind in the South Western Cape and implications for the Stellenbosch wine producing area. *Theor. Appl. Clim.* (81, 203-218).
- Bonnardot V, Planchon O, Carey V & Cautenet S, 2002. Diurnal wind, relative humidity and temperature variation in the Stellenbosch-Klein Drakenstein wine-growing area. *S Afr J Enol Vitic* 23 (2), 62-71.
- Bonnardot V. & Carey V.A, 2007. Climate change: observed trends, simulations, impacts and response strategy for the South African vineyards. Actes du colloque "Réchauffement climatique: quels impacts probables sur les vignobles?" (Dijon, 28-30 mars 2007), sous l'égide de la Chaire UNESCO Vin et Culture, le Centre de Recherche de Climatologie et la Coordination des Recherches sur Chardonnay et Pinot de l'Université de Bourgogne.
- Carbonneau A., 1992 : *Météorologie et viticulture*. OMM, Météorologie Agricole, Genève, Rapport CMAG n°42A, WMO TD n°484, 72p.
- Carbonneau A., Riou C., Guyon D., Riom., Scheider C., 1992. Agrométéorologie de la vigne en France. 165 pp. *Centre Commun de Recherche. Commission des Communautés européennes. EUR 13911 FR.*
- Carey VA & Bonnardot VMF, 2002. A viticultural perspective of meso-scale atmospheric modeling in the Stellenbosch wine growing area, South Africa. In: Proc 4th International Symposium on vitivincultural zoning, June 2002, Avignon, France.
- Carey VA, Bonnardot VMF & Knight F, 2003. The zoning of terroirs for wine production: South Africa. In: Fregoni M, Schuster D & Paoletti A (Eds). *Terroir, Zonazione, Viticoltura, Trattato internazionale*. Phytoline s.r.l., Verona, 227-241.
- Carrega P., 1994 : *Topoclimatologie et Habitat*. *Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée*, Th. Et., 35 & 36, 408p.
- Chuine I., YouTsup P., Viovy N., Seguin B., Daux V. and E. Le Roy Ladurie, 2004 : *Grape ripening as past a climate indicator*. *Nature*, **432**, 289-290.
- D'onofrio, A., J.-P Boulanger and E. C. Segura, A weather pattern classification system for regional climate downscaling of daily precipitation and temperature, *Climatic Change*, CLARIS Special issue, DOI 10.1007/s10584-009-9738-4, 2010.
- Delecalle R., Soussana J.-F. & Legros J.-P. 1999. Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 85, 45-51.
- Fury R. et Joly D., 1995 : Interpolation spatiale à maille fine des températures journalières. *La météorologie*, 8e série, **11**, 36-43.
- Gachon P., 2009 : les méthodes de régionalisation utilisées dans le développement de scénarios de changements climatiques : forces, faiblesses et applications. Conférence au Cérège, Aix-en-Provence, 27/11/09.
- Ganichot B., 2002 : Evolution de la date des vendanges dans les Côtes-du-Rhône méridionales. *6èmes Rencontres Rhodaniennes*. Orange. Institut Rhodanien éditeur. 38-41.



- Garcia de Cortazar Aauri I., 2007 : Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France. *Séminaire EGFV, 2 février 2007*.
- Giec / IPCC. 2001. Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the third assessment report of IPCC, Cambridge University Press, Cambridge.
- Giec/IPCC 2007. : *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse*. 104p.
- Huglin P., Schneider C., 1998. Biologie et écologie de la vigne. 370 pp. Diffusion : *Lavoisier TEC-DOC, 11 rue Lavoisier, F-75384 Paris Cedex 08*.
- INAO, 1984 : *Une réussite française : l'appellation d'origine contrôlée, vins et eaux de vie*. Institut national des appellations d'origine, Euro-impressions, Paris.
- Joly D., Nilsen L., Fury R., Vermot-Desroches B. Et Jacquinet J-P., 1994. Interpolation des températures à grande échelle. *Revue Internationale de Géomatique*, vol 4, n°1, 55-85.
- Jones G., White M. Cooper O. and Storchmann K., 2005 : Climate change and global wine quality. *Climatic Change*, **73**, 319-343.
- Le Tixerant M., Tissot C., 2008, Impact evaluation of a Marine Renewable Energy project on human activities dynamic, Second International Conference on Ocean energy (ICOE) "Targeting successful deployment of commercially viable ocean energy systems worldwide", Brest, 12 p.
- Madelin M., 2004 : *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air*. Thèse de doctorat de l'université Paris 7.
- Menéndez, C. G., M. de Castro, J.-P. Boulanger, A. D'Onofrio, E. Sanchez, A.A. Sörensson, J. Blazquez, A. Elizalde, D. Jacob, H. Le Treut, Z.X. Li, M.N. Núñez, S. Pfeiffer, N. Pessacg, A. Rolla, M. Rojas, P. Samuelsson, S.A. Solman, C. Teichmann, Downscaling extreme month-long climate anomalies in southern South America, *Climatic Change*, CLARIS Special issue, DOI 10.1007/s10584-009-9739-3, 2010.
- Merlier C., 2001. *Interpolation des données spatiales en climatologie et conception optimale des réseaux climatologiques*. Annexe du rapport de Météo-France concernant ses activités en rapport avec la Commission for Climatology (CCI) de l'OMM, 21p.
- Oke T.R., 1987: *Boundary Layer Climates*. Second Edition, London, 372p.
- Pagé C., 2008 : *Format des données SAFRAN et scénarios climatiques désagrégés au CERFACS*. Climate modelling and Global Change TR/CMGC/08/27, 8p.
- Pagé C., Terray L. et Boé J., 2008 : *Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08*. Rapport Climate Modelling and Global Change TR/CMGC/08/64. 21p.
- Planchon, O., Bonnardot, V. & Cautenet, S., 2001. Simulation de brise de mer dans la Province Occidentale du Cap (Résolution à 5 km): Exemple de la journée du 4 février 2000. *Pub. Assoc. Int. Climatol.*, 13, 482-489.
- Programme CLIMATOR (2007_2011) : Elaboration d'outils et de références pour l'analyse de la vulnérabilité des agro-écosystèmes face au changement climatique. Coord. Nadine Brisson.
- Quénol H., 2002 : *Climatologie appliquée aux échelles spatiales fines : influence des haies brise-vent et d'un remblai ferroviaire sur le gel printanier et l'écoulement du mistral*. Edition ANRT, ISBN 2-284-04081-0, 283 p.
- Quénol H., Maciel A., Monteiro A. et Beltrando G., 2004 : Mesures climatiques aux échelles fines (météorologiques et agronomiques) et variabilité spatiale du gel printanier dans le vignoble de Vinho Verde. *Norois*, **193**, 117-132.
- Reddy K. R. & Hodges H. F. 2000. Climate change and global cropproductivity. *CABI Publishing*, Wallingford.
- Rosensweig C. & Hillel D. 1998. *Climate change and the global harvest*. Oxford University Press, Oxford.
- Schultz H.R., 2000 : "Climate change and viticulture: A European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6, 2-12.
- Seguin B., 2002 : la recherche agronomique face à l'effet de serre. *Le courrier de l'environnement*, 46, 5-20.
- Seguin B., 2004 : Le réchauffement climatique récent en France : impact et conséquence sur la culture des arbres fruitiers et de la vigne. *Lettre n°16 PIGB-PMRC*.
- Soussana J.-F. 2001. Changement climatique. Impacts possibles sur l'agriculture et adaptations possibles. In Demeter, Armand Colin, Paris, 195-222.
- Tillier I., Tissot C., 2010, Modelling spatial use conflicts and Nature-Society interactions in coastal areas coupling MAS and GIS, in: Maanan M., Robin M., Geomatic solutions for coastal environments, Nova Science Publishers, Inc., 20 p., in press.



Tillier I., Tissot C., Rouan M., Trouillet B., Brosset D., Robin M., 2009. Modélisation du déroulement d'activités conchylicoles en zone côtière par couplage sig/sma, MASHS : Modèles et Apprentissage en Sciences Humaines et Sociales, Toulouse, 12 p.

Tissot C., Cuq F., 2005. Modélisation spatio-temporelle d'activités humaines à fort impact environnemental, Cybergéo : Revue européenne de géographie, n°313, 20 juin 2005, 14 p.

Tonietto J. and Carbonneau A., 2004 : A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, **124**, 81-97.

Tonietto J., Carbonneau A., 2000. Système de classification climatique multicritères (CCM) géoviticole. *3er Simposio Internacional « Zonificación vitivinícola »*, Tenerife, Espagne.

Vaudour E., 2003 : *Les terroirs viticoles : définitions, caractérisation et protection*. Ed. Dunod, 293p.

X, 2010 : validation required. *Nature*, Vol 463, Issue no. 7283, 18 February 2010, 1p.

Yoshino M., 1975: *Climate in a small area : an introduction to local meteorology*. University of Tokyo Press, 549p.

- **Articulation avec des programmes régionaux, nationaux et européens conduits par les proposantts:**

ANR- JC07194103TERVICLIM (2008-2011)

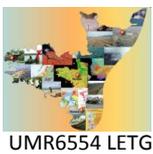
Coordinateur : Hervé QuénoI (UMR6554 LETG)

L'ANR Jeune Chercheur TERVICLIM est le programme qui est à la base de notre projet GICC. L'ANR-TERVICLIM a pour objectif de mettre en place une méthodologie de mesures (météorologiques et agronomiques) et de modélisation spatiale du climat adaptée aux échelles fines afin de définir le climat actuel des vignobles et d'autre part, d'apporter des réponses aux conséquences futures du changement climatique en procédant à une simulation adaptée. Au cours des Deux premières années de ce programme, les réseaux de mesures météorologiques et agronomiques ont été mis en place dans plus de 15 vignobles répartis dans le monde. Les premiers résultats permettent de mettre en évidence la forte variabilité spatiale du climat sur des espaces restreints. La variabilité spatiale des paramètres atmosphériques est confrontée et validée par l'intermédiaire des données de réponses viticoles et/ou œnologiques ; nous évaluons ainsi l'influence des facteurs locaux sur l'hétérogénéité de la qualité du raisin et du vin observée. Enfin, après avoir acquis les données ponctuelles par l'intermédiaire de mesures in situ, la phase suivant de cette étude consiste à les spatialiser et à réaliser un modèle applicable sur les différents terroirs. La modélisation est en cours de réalisation. Ce programme nous a également permis de mettre en place une équipe pluridisciplinaire dans le domaine de l'analyse et de la modélisation du climat aux échelles locales appliqués aux terroirs viticoles.

Programme européen CLARIS LPB

Coordinateur : Jean Philippe Boulanger (UMR 7159 - UR 182 LOCEAN, LODYC)

CLARIS LPB (A Europe South America Network for Climate Change Assessment and Impact Issues in La Plata Basin) est un projet européen financé par le 7ème Programme Cadre de la Commission Européenne, coordonné par l'Institut de Recherche pour le Développement, et qui le 1er octobre 2008 a commencé ses activités de recherche. Ce consortium scientifique international analyse les scénarios régionaux de changement climatique, leurs incertitudes, les évolutions de risques d'événements extrêmes et les possibles impacts sur la société (secteur agricole et système hydrologique). L'un des résultats attendus de ce projet est le développement de stratégies d'adaptation pour de nombreux secteurs du bassin de La Plata (e.g. activités agricoles, développement rural, production hydroélectrique, transport fluvial, écosystèmes en régions inondées). Ce projet regroupe des spécialistes en sciences exactes et sociales, des communautés scientifiques des NordS comme des Suds, appartenant à vingt institutions de recherche distribuées dans dix pays d'Europe et d'Amérique du Sud. L'un des défis majeurs de



CLARIS LPB est d'associer au processus de recherche lui-même les acteurs des secteurs agricole et hydrologique et les décideurs politiques (stakeholders) afin que les stratégies d'adaptation répondent à leurs besoins.

Programme GICC-ECLAIRA-DECLIC

Coordinateur : Pierrick YALAMAS, Rhônalénergie–Environnement (RAEE)

Dans le cadre du projet GICC-TERADCLIM, une collaboration est envisagée avec le programme en cours GICC-ECLAIRA-DECLIC (mené au LTHE, Grenoble), sur la thématique de l'adaptation au changement climatique et du partenariat opérationnel entre équipes de recherche et collectivités territoriales. L'expérience des expérimentations régionales menées sur le département de la Drôme, en collaboration avec le Conseil Général, pour proposer un diagnostic des impacts potentiels du changement climatique et évaluer les conditions de la mise en place de stratégies d'adaptation, pourra directement resservir au projet GICC-TERADCLIM. Les échanges et collaborations porteront d'abord **sur des méthodologies d'analyse et de traitement de données environnementales et socio-économiques, ainsi que sur la modélisation (statistique ou conceptuelle via système à base de connaissances)**. De nombreuses comparaisons pourront ainsi être faites dans le cadre de la modélisation de certaines situations systémiques (boucles de rétroactions entre variables environnementales, activités anthropiques et choix sociétaux).

Le programme GICC-DECLIC doit par ailleurs aider à **la formulation et à la conception de fiches synthétiques de recommandations pour la valorisation des stratégies d'adaptation au changement climatique à destination des gestionnaires et acteurs territoriaux (agriculteurs notamment)**. Cette rédaction de préconisations thématiques pourra là aussi bénéficier au projet GICC-TERADCLIM afin d'améliorer cette démarche pratique et collaborative.

Programme GICC-DRIAS

Coordinateur : Jean-Marc Moisselin, Philippe Dandin (Météo France)

« DRIAS vise à organiser un service de mise à disposition de scénarios climatiques régionalisés français en développant un portail d'accès et en pérennisant un ensemble de mécanismes existants. Ces données simulées, à haute résolution, sont ou seront obtenues par différentes méthodes de descente d'échelle mises en œuvre par les organismes partenaires. La communauté d'utilisateurs contient à la fois les chercheurs et l'ensemble des acteurs publics ou privés concernés par les impacts et l'adaptation aux changements climatiques. Pour tous, DRIAS permettra d'optimiser et de réduire une grande part du travail technique avant l'exploitation scientifique.

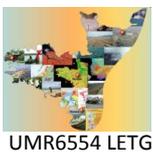
La gouvernance du projet est assurée par un Comité de Pilotage (CoPil), au sein duquel sont représentés le GICC, les principales directions du MEEDDM (DGPR, DGALN, DGEC), le CGDD et Météo-France.

Un Comité des Utilisateurs (CoUtil) est également institué pour aider le projet dans la prise en compte des besoins des différents types d'utilisateurs. L'instauration de ce comité résulte notamment d'une demande du Conseil Scientifique du GICC. ». **Extrait du compte rendu Projet GICC/DRIAS, Journée « Utilisateurs » du 21/9/2009.**

Le porteur du projet GICC-TERADCLIM (H. Quéno) a été intégré dans le comité des utilisateurs du programme GICC-DRIAS. **Cette participation permettra de faciliter l'accès aux différents scénarios climatiques régionalisés français afin de les appliquer et de les tester dans les vignobles.**

Programme PSDR CLIMASTER

Coordinateur : Philippe Merot



<http://www.rennes.inra.fr/climaster/>

« CLIMASTER est un programme de recherches intégré aux programmes PSDR de l'INRA et dont l'échelle d'observation est le grand ouest (GO).

Les objectifs de CLIMASTER sont :

- S'interroger sur et caractériser la réalité du changement climatique (CC) dans le grand ouest à la fois en termes de tendance mais aussi d'extrêmes climatiques, de variabilité et de répartition spatiale ;
- Identifier et caractériser les réponses actuelles des acteurs agricoles à la perception qu'ils ont de ce CC, en le situant par rapport à d'autres contraintes ;
- Mesurer les changements observés sur les ressources en eau, en sol, et analyser et modéliser l'influence sur ces ressources du CC et des changements de pratiques agricoles associés ;
- Confronter les différentes perceptions du CC et de ses conséquences en termes de développement territorial qu'ont d'une part les chercheurs, et, d'autre part, 2 types d'acteurs aux prises avec cette gestion spatiale des ressources que sont d'une part les agriculteurs et leurs structures professionnelles et d'autre part les nouveaux gestionnaires de l'eau.

Plusieurs partenaires du projet GICC-TERADCLIM (**UMR6554 LETG par l'intermédiaire de Hervé Quéno**l , **Olivier Planchon et Cyril Bonnefoy** et **UVV-UMT Vinitera INRA-Angers par l'intermédiaire de Gérard Barbeau et Séverine Roger**) participent à CLIMASTER sur l'analyse et la simulation du changement climatique dans les vignobles du Val de Loire.

Projet CINES-DARI

Coordination : Valérie Bonnardot (Laboratoire COSTEL, UMR6554 LETG)

« Modélisation atmosphérique : méso-échelles et échelles fines des terroirs viticoles » : 40 000 heures de calcul (pour 2010) en attribution de ressources informatique dans le cadre de la modélisation RAMS.

II Projet scientifique détaillé

A. Contexte et objectifs

La communauté scientifique s'intéresse au changement climatique global et s'interroge sur ses impacts futurs à l'échelle planétaire. Or, même si les recherches dans le domaine des modèles régionaux progressent, les conséquences de ces variations climatiques sont encore assez peu abordées aux échelles locales. Pourtant, certains phénomènes météorologiques se produisent sur des espaces relativement restreints et peuvent engendrer un risque pour les individus et leurs activités (inondation, brouillard, gelée ...). C'est, par exemple, le cas de la viticulture où la qualité du vin, le choix des cépages ou encore la spécificité des terroirs qui dépendent de caractéristiques locales tels que la topographie (pente, exposition, ...), la proximité d'une rivière ou d'un plan d'eau qui vont agir localement sur le climat. Un changement global du climat aura obligatoirement des répercussions sur le climat local, sur les caractéristiques du vin et donc des conséquences au niveau économique.

Dans un contexte d'intensification des concurrences entre les différents pays producteurs (notamment avec l'avènement des nouveaux pays viticoles) et où les viticulteurs des pays traditionnels se défendent en mettant en avant le « terroir viticole »¹, une estimation des

¹ L'Institut National des Appellations d'Origine (INAO) définit le terroir comme un ensemble de terrains qui par la nature plus ou moins variée de leur sol (caractères agronomiques et géopédologiques), leur situation et leur environnement (topographie, exposition, ... influant sur le climat) se sont révélés par l'expérience et les usages propices à la production des vins fins (INAO, 1984). Dans une même unité de terroir, les facteurs susceptibles d'agir sur la qualité du raisin et de caractériser ce terroir, sont les composantes « climat et sol », qui sont en interaction avec la plante et les technologies de

conséquences du changement climatique à une échelle fine permettrait de mieux orienter les possibles conséquences économiques et sociales de changement. L'objectif étant que les professionnels viticoles puissent adapter leurs pratiques culturelles en fonction d'une nouvelle donne climatique en mettant à l'œuvre leur savoir-faire (techniques culturales raisonnées, évolution des variétés, ...).

Les approches du changement climatique par les modélisateurs du climat sont aujourd'hui trop approximatives pour apporter des réponses à l'échelle d'un terroir viticole. Les résolutions spatiales des sorties de modèles sont de plusieurs kilomètres de côté (ex : par exemple, les données SAFRAN sont aujourd'hui à 8km) alors que très souvent, des appellations viticoles concernent des secteurs de quelques kilomètres carrés. Par exemple, 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.

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 (labellisés Chaire UNESCO « Vin et Culture »), 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 du programme ANR-TERVICLIM. 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.

Ce type de démarche, sur la compréhension du fonctionnement du système climatique aux échelles fines avec la mise en place de méthodes de mesures (météorologiques et agronomiques) ou des techniques de modélisation spatiale, fait inévitablement appel au savoir-faire d'autres disciplines. Cette équipe interdisciplinaire composée de géographes, d'agronomes, de physiciens de l'atmosphère et de professionnels viticoles (ingénieurs, viticulteurs, ...) a été composée de manière à mettre en relation différentes compétences nécessaires pour répondre à cette problématique. Ce projet de recherche est conduit en collaboration avec l'industrie viticole pour répondre aux besoins du monde viti-vinicole et améliorer la connaissance des relations plante/environnement afin d'assurer la production de vins de terroirs de qualité, uniques et compétitifs sur le marché international.

La constitution de la majeure partie de l'équipe pluridisciplinaire ainsi que la mise en place des expérimentations *in situ* ont été réalisées lors de la première phase de l'ANR-JC TERVICLIM (2008-2009). Par conséquent, le projet de recherche **GICC-TERADCLIM** aborde principalement les questions de modélisation et d'adaptation : trois objectifs principaux sont définis :

production (Vaudour, 2003). Les spécificités des terroirs viticoles sont donc liées à des caractéristiques locales dont le climat est un élément essentiel.

- **Développer une méthode de modélisation spatiale et de simulation du changement climatique adaptée à l'échelle des terroirs viticoles**
- **Elaborer des scénarisassions régionalisées ou localisées d'adaptation au changement climatique par l'intermédiaire d'une plateforme multi-agents**
- **Diffusion l'information vers la profession viticole et sensibilisation aux effets du changement climatique**

Pour répondre à ces objectifs, nous nous appuyons d'une part, sur l'équipe pluridisciplinaire formée dans le cadre de l'ANR-TERVICLIM et d'autre part, sur l'intégration de nouveaux partenaires ayant une forte expérience dans le domaine de la modélisation régionale et l'adaptation au changement climatique et coordonnant d'autres programmes complémentaires à ce projet (projet européen CLARIS coordonné par Jean Philippe Boulanger et projet GICC-ECLAIRA-DECLIC dans lequel participe Sylvain Bigot).

B. Méthodologie et résultats attendus

Aux échelles fines, les conditions atmosphériques au niveau de la couche limite sont tributaires des conditions de surface (Yoshino, 1975 ; Oke, 1987). La morphologie, les aspérités et la nature de la surface définies par le relief, la végétation ou par diverses infrastructures humaines, modifient le comportement des variables météorologiques et caractérisent à terme le microclimat (Quénol, 2002). Cela explique, en partie, l'importante variabilité spatiale du climat dans les terroirs viticoles (surtout en terrain accidenté) et les variations de qualité du vin que l'on peut observer à l'intérieur même d'un vignoble.

Pour étudier le climat aux échelles fines, il faut aborder le milieu dans sa globalité et définir l'influence des différents éléments de la surface susceptibles de modifier le climat local. Face à cette complexité et dans l'optique d'évaluer, par l'intermédiaire de la modélisation climatique, l'impact du changement climatique attendu sur les terroirs viticoles, les conditions initiales à la modélisation consistent à disposer de données (météorologiques et agronomiques) *in situ* adaptées à ces échelles.

1. Acquisition des données

L'acquisition des données météorologiques se réalise suivant une démarche d'échelles spatiales imbriquées. Les raisons de cette approche sont liées au fonctionnement de l'atmosphère. Sachant qu'une même masse d'air, générant un même type de temps peut concerner un territoire étendu il est certain que sur une entité spatiale plus petite, des caractères communs sont présents. Plus le niveau d'observation s'affine, plus le nombre d'éléments influant sur les paramètres météorologiques est grand et schématiquement, la compréhension augmente au fur et à mesure que l'espace se réduit ...

L'observation du climat à l'échelle du terroir implique donc une méthode d'acquisition des données météorologiques adaptée. Les stations météorologiques automatiques des réseaux nationaux permettent d'obtenir des informations en continu et simultanément sur plusieurs points de l'espace. Cependant ces réseaux sont peu adaptés aux expérimentations climatiques aux échelles fines. Ainsi pour définir les spécificités climatiques d'un vignoble, les stations météorologiques du réseau national sont souvent trop espacées (à part quelques exceptions comme le réseau de la Champagne viticole ou dans les vignobles de Stellenbosch en Afrique du Sud) et les données issues de celles-ci ne permettent pas de mettre en évidence les variations climatiques spatiales à l'échelle locale. Face à l'insuffisance du réseau classique, la mise en place d'un dispositif de mesures météorologiques adapté aux échelles fines est nécessaire pour déterminer et comprendre la forte variabilité spatiale des éléments du climat surtout lorsque le terrain est accidenté.

Suivant cette démarche, deux types de données sont utilisés :

- Les données issues des réseaux météorologiques nationaux ou régionaux. Ces données permettent de déterminer le climat à l'échelle régionale mais également d'analyser les évolutions dans le temps afin de déterminer des ruptures au niveau du changement climatique (lorsque les séries sont suffisamment longues) ;
- Les données issues des réseaux de capteurs et de stations météorologiques que nous installons dans les terroirs viticoles de manière à étudier la variabilité spatio-temporelle du climat à l'échelle des vignobles ;

Cette phase d'acquisition de données météorologiques en fonction des échelles spatiales imbriquées a été mise en place dans le programme ANR-TERVICLIM dans 14 vignobles² répartis dans le monde³. Ces données seront utilisées dans le projet GICC-TERADCLIM pour « alimenter » les modèles et surtout pour la phase « validation » de la modélisation.

Le projet TERADCLIM a également comme objectif de pérenniser ces réseaux, originaux et uniques, de mesures météorologiques afin d'obtenir des séries de données climatiques les plus longues possibles en application avec la viticulture.

2. Modélisation spatiale et de simulation du changement climatique adaptée à l'échelle des terroirs viticoles

Dans une démarche similaire à l'acquisition des données météorologiques, 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 une méthode permettant d'établir les relations entre les caractéristiques de surface (topographie, occupation du sol) et les variables météorologiques.

Deux types de modélisation complémentaires seront utilisés et l'un des objectifs principaux de ce projet sera de pouvoir les combiner :

La modélisation statistique : 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 projet, nous testerons l'existence d'un lien entre les éléments climatiques et différents facteurs (topographie, occupation du sol, ...). Afin de spatialiser les données ponctuelles des mesures sur le terrain, nous chercherons 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'agira de quantifier leur rôle en testant et en mesurant les effets

² Vallée de Casablanca et vallée de Bio-Bio (Chili) ; région de Mendoza (Argentine) ; Vallée de Tarija (Bolivie) ; région de Montevideo (Uruguay) ; région de Stellenbosch (Afrique du Sud) ; Coteaux du layon et Saumur en Val de Loire, Aloxe Corton en Bourgogne, Champagne, région de la Sainte Victoire (France) ; Navarre (Espagne) ; région de Moldavie (Roumanie) ; région de Marlborough (Nouvelle Zélande) ; Trento (Italie).

³ Par exemple, dans le vignoble d'appellation « Quart de Chaumes », 2 stations météorologiques complètes (température de l'air, humidité, insolation, précipitations, vitesse et direction du vent) de type Campbell ont été installées (1 en bas de coteau et 1 en haut de coteau). 20 capteurs de températures et d'humidité enregistrant les données toutes les 15mn ont été répartis sur l'ensemble de l'appellation en fonction de caractéristiques topographiques et environnementales. 2 mats d'une hauteur de 9m équipés de capteurs de températures à 1m50, 3m, 6m et 9m ont été installés en bas et en haut de coteau afin d'étudier la stratification verticale de l'air.

respectifs de chaque facteur sur les paramètres météorologiques, toutes choses étant égales par ailleurs et de construire, au final, des modèles statistiques à partir de régressions multiples.

Ces méthodes d'interpolation multicritère s'appuient sur l'hypothèse que plusieurs facteurs locaux de natures diverses (altitude, occupation du sol, ...) sont susceptibles d'interférer dans la variabilité spatiale que connaît la variable étudiée entre les points de mesures. Le rôle de ces composantes explicatives est établi à partir de l'étude de leurs relations avec le phénomène étudié (le plus souvent linéaire). Ensuite le modèle final est construit à partir d'une régression multiple pas à pas, prenant en compte le rôle des descripteurs indépendamment les uns des autres. L'équation de cette régression est alors utilisée pour spatialiser le phénomène en tout point de l'espace (en fonction de ses paramètres locaux). Chacun de ces descripteurs est défini selon plusieurs fenêtres spatiales centrées sur les sites. Les données (ici, principalement les températures) de chaque pixel sont alors estimées à partir de ces deux composantes, régionales et locales, soit deux niveaux d'échelles. L'application de cette démarche d'interpolation spatiale multicritère sur nos terroirs expérimentaux nécessitera, entre autre, l'utilisation de modèles numériques de terrains (MNT) avec une résolution fine, de l'occupation du sol et des données météorologiques. La relation statistique entre ces différents éléments est ensuite spatialisée dans un Système d'Information Géographique (SIG).

L'explication apportée par le modèle de « régressions multiples », centré sur les facteurs géographiques et environnementaux reste partielle. D'autres facteurs tels que la circulation atmosphérique ne peuvent être qu'appréhendés par l'utilisation du modèle physique à méso-échelle de type RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) ou WRF (Weather Research and Forecasting). Les modèles dits physiques permettent d'appréhender la complexité du réel, difficilement prise en compte par le modèle précédent.

La modélisation physique à méso-échelles: Ces types de modèles sont des modèles parallélisés qui permettent la simulation ou la prévision de circulations atmosphériques dont l'échelle spatiale s'étend de moins de 1 km au millier de km. Par exemple, le modèle méso-échelle RAMS, développé par l'Université du Colorado (USA), est un modèle non-hydrostatique, qui prend donc en compte les hétérogénéités de surface ainsi que les processus de convection et de condensation. RAMS étant un modèle méso-échelle, c'est-à-dire d'aire restreinte, il est nécessaire de l'initialiser à l'aide de données issues d'un modèle global. La restitution des champs météorologiques à l'échelle dite « locale » se fait via l'imbrication de grilles de plus en plus petites, jusqu'à l'échelle voulue (ici, le vignoble). Le modèle global, en effet, est inapte à restituer les climats à échelles fines. RAMS intègre, entre autres :

(1) Une analyse objective sur des niveaux isentropiques qui permet l'initialisation du modèle à partir de données météorologiques telles que les analyses issues du modèle global du centre européen de Reading (CEPMMT), l'assimilation des radiosondages locaux et les paramètres atmosphériques relevés par les stations météorologiques au sol.

(2) Un code de circulation atmosphérique et de couche limite, incluant notamment un modèle de sol et de végétation très détaillés décrivant les interactions sol-végétation-atmosphère (LEAF3).

(3) Un module qui permet la visualisation des résultats obtenus.

Les circulations locales peuvent être simulées grâce à des grilles imbriquées (jusqu'à 12) dont le rapport d'échelles est compris entre 3 et 5. Ainsi, il est possible de descendre jusqu'à une résolution horizontale de 200m.

Le choix de l'utilisation du Regional Atmospheric Modeling System (RAMS)⁴ fait suite à des résultats intéressants concernant des modélisations à imbrications d'échelle multiples effectuées sur le vignoble de la Province occidentale du Cap en Afrique du Sud. Située dans une région à topographie complexe et proche de la mer, la région offrait un cadre d'étude extraordinaire pour étudier les circulations atmosphériques locales. Les dernières simulations ont montré l'intérêt et l'apport de la grille haute résolution (200m) fournissant des paramètres météorologiques pertinents pour la viticulture. Des tests statistiques ont été effectués afin de voir quelle résolution était la plus pertinente. Pour chaque cas, les simulations à 1km et 200 m de résolution étaient supérieures à celles à 5km de résolution et reproduisaient mieux les circulations locales (brise de mer/brise de pente) en raison d'une meilleure représentation des états de surface (sol, végétation et topographie) (Bonnardot et Cautenet, 2009).

Les premiers résultats (obtenus dans le cadre de l'ANR-TERVICLIM) de la modélisation physique et statistiques à l'échelle des terroirs viticoles sont très satisfaisants. Les deux méthodes ont été testées dans les vignobles d'Afrique du Sud (résolution de 200m pour la modélisation physique et résolution de 50m dans une grille plus petite pour la modélisation statistique) et les validations par l'intermédiaire des réseaux de stations météorologiques (15 stations météorologiques type Campbell et 40 capteurs de températures) sont significatives (publication en cours : Bonnardot, Cautenet, Madelin, Carey et Quénol, 2010).

Ces premiers résultats appuient notre démarche quant à une nécessaire combinaison des deux méthodes de modélisation spatiale. Le travail qui sera réalisé pour la mise en relation entre les 2 types de modélisation abordera principalement la question du transfert d'échelles.

Après l'élaboration de ces modèles adaptés aux échelles locales, la seconde étape consistera à y intégrer les scénarios IPCC issus de différents modèles MCG et régionaux⁵. Ces simulations climatiques seront réalisées à une échelle temporelle de 15-30 ans.

Connaissant les limites des modèles IPCC, nous nous appuierons sur les résultats du projet européen CLARIS LPB qui réalise un ensemble coordonné de simulations régionales (avec des modèles hydrostatiques et non-hydrostatiques). Cet ensemble nous permettra à la fois de sélectionner le(s) modèle(s) IPCC fournissant les conditions initiales à la régionalisation dynamique et aussi de mieux apprécier les incertitudes sur les projections locales.

3. Simulation de l'adaptation des vins de terroir au changement climatique avec l'utilisation d'une plateforme Multi-agents (SMA)

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 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.

Dans cette perspective, nous proposons l'utilisation de la plateforme Multi-agents DAHU (Dynamique des Activités Humaines) qui est développée au laboratoire GEOMER de Brest depuis une quinzaine d'années. Cette plateforme a pour vocation de modéliser la variabilité du déroulement d'activités anthropiques sous contraintes multiples (environnementales et socio-

⁴ Dans le projet GICC-TERADCLIM, nous utiliserons donc le modèle méso-échelle RAMS car les premières simulations ont déjà été effectuées dans le cadre de l'ANR-TERVICLIM. Toutefois, il est prévu de faire des comparaisons sur certains sites avec le modèle WRF.

⁵ La collaboration avec le GICC-DRIAS sera ici un partenariat important.

économiques) et d'en étudier les interactions avec l'environnement. L'architecture de DAHU apporte des avancés méthodologiques significatives dans la modélisation des interactions agents/environnement. Contrairement aux approches classiques l'espace n'est pas considéré comme un élément structurant du modèle mais comme une donnée de forçage résultant d'une combinaison de phénomènes opérant à différentes échelles spatiales et temporelles (Tissot *et al.* 2005).

Cette originalité permet d'intégrer des processus ayant des répercussions multi-échelles et d'analyser leur impact global sur le fonctionnement d'une activité donnée à partir de boucles de rétroactions. De récents développements menés dans le cadre de plusieurs programmes de recherche ont montré les capacités d'adaptation de cette plateforme à des thématiques très diversifiées (Le Tixerant *et al.*, 2009, Tillier *et al.*, 2009, Tillier *et al.*, 2010) (modélisation de la production ostréicole en situation perturbée, simulation des émissions d'effluents en bassins versants, modélisation des activités de pêche sous contraintes climatiques, juridiques et environnementales).

En partant du socle méthodologique proposé par la plateforme DAHU, les travaux associés à ce projet auront pour finalité :

(1) d'identifier des niveaux d'échelles pertinents pour restituer la dynamique de croissance de la vigne sous contraintes environnementales. Cette étape servira à spécifier différents niveaux d'abstraction dans le futur modèle facilitant la réalisation de modélisations emboîtées.

(2) de construire un modèle d'activité viticole générique à l'échelle du terroir et d'y associer des stratégies de production qui serviront à construire un réseau d'agents réactifs

(3) d'identifier les règles d'adaptation des agents en fonction de l'évolution des contraintes environnementales et en particulier des changements climatiques aux échelles fines

(4) de formaliser un modèle de régression multiple permettant de restituer les relations entre les caractéristiques de surface des terroirs (morphologie, type d'occupation du sol) et les variables météorologiques et d'y associer des objets spatiaux. Cette analyse aura pour objectif de faciliter l'intégration des sorties de modèles climatiques à échelles fines comme contraintes de forçage des agents.

La réalisation de scénarios d'adaptation des pratiques viticoles au changement climatique par SMA 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.

4. Diffusion de l'information auprès des professionnels viticoles et sensibilisation aux effets du changement climatique

Cette dernière partie concerne l'implication et le transfert de l'information auprès de la profession viticole et notamment des propositions d'adaptation pour leurs terroirs viticoles.

Plusieurs outils de diffusion de l'information et de sensibilisation aux changements climatiques sont prévus :

Cartographie par Système d'Informations Géographiques (SIG) des terroirs viticoles : L'INRA d'Angers a élaboré une méthode d'étude intégrée des terroirs viticoles par cartographie SIG. Cette cartographie prend en compte aussi bien les facteurs environnementaux (composante géologique, agropédologique, composante paysagère, ...) que les facteurs humains du terroir (ex : type de cépages, pratiques culturelles, ...). Tous ces paramètres sont intégrés dans un SIG et permettent de définir des Unités de Terroir de Base (Barbeau *et al.*, 2008). A partir de ces différentes informations, les agronomes de l'INRA ont intégrés une « couche d'informations » proposant des conseils de techniques culturales (ex : un type de cépage spécifique) en fonction

des caractéristiques de l'unité de terroir. Les résultats présentés sous forme de cartes peuvent être utilisés directement à la parcelle grâce à leur précision (1/10 000ème). Actuellement, des enquêtes sont réalisées afin de mieux comprendre l'impact des sorties cartographiques sur les pratiques et stratégies de productions des viticulteurs. Il apparaît notamment que cette méthode cartographique par SIG a prouvé son intérêt en tant qu'outil de communication entre la recherche et les professionnels viticoles. **Dans le cadre du projet GICC-TERADCLIM, nous prévoyons d'intégrer une « couche » supplémentaire dans le SIG qui comprendra les résultats des simulations du changement climatique pour les 15-30-50 ans à venir avec également les propositions d'adaptation issues de la modélisation par Système Multi-Agent DAHU (ex : Adaptation matériel végétal et pratiques /conditions environnementales). Cet outil cartographique, qui permettra de sensibiliser les professionnels viticoles au changement climatique, sera utilisé dans les vignobles des Coteaux du Layon en partenariat avec l'INRA d'Angers (partenaire scientifique du projet) et le syndicat viticole des Coteaux du Layon (partenaire Acteur).**

Des ateliers participatifs avec les acteurs de la profession viticole : nous prévoyons la réalisation de ces ateliers afin d'analyser avec eux les points suivants :

- sensibilité et vulnérabilité à la variabilité climatique ;
- utilisation de l'information climatique pour la prévision des échelles courtes (quelques heures à plusieurs mois) ;
- besoins non couverts par l'information climatique disponible ;
- existence de couvertures (assurance) climatiques satisfaisantes et besoins non satisfaits ;
- sensibilité au changement climatique ;
- compréhension des causes et des enjeux pour la profession ;
- formation aux outils et méthodologies nécessaires au développement de stratégies d'adaptation ;
- construction/génération de stratégies possibles pour le secteur couvrant aussi bien de solutions « soft » et relativement flexibles (assurance, méthodes de vinification, institutions, services climatiques) à des solutions plus drastiques (déplacement des vignobles vers de régions plus adéquates, infrastructures pour l'irrigation,...) ;

Ces points seront abordés de manière progressive durant les 3 ans du projet afin de renforcer le dialogue avec la profession viticole et assurer une confiance durable entre la profession et la recherche.

En parallèle à ces ateliers participatifs, nous réaliserons des fiches synthétiques de communication et dissémination vers tous les producteurs. Pour chaque vignoble où nous avons installé des stations et des capteurs météorologiques, nous diffusons, aux viticulteurs et aux syndicats de vigneron, des fiches avec l'analyse des données météorologiques avec également le calcul d'indices bioclimatiques. Nous insistons sur la variabilité spatio-temporelle des données météorologiques entre chaque station. Nous mettrons en place également un site web dédié avec l'ensemble des résultats du projet d'intérêt pour la profession. Il reposera sur un SIG interactif permettant de visualiser les possibles impacts sur l'activité viticole dans un contexte de changement climatique. Ce site s'inspirera à la fois du projet GICC DRIAC et du projet européen CLARIS LPB.

Les fiches agro climatiques et le futur lien internet permettra à la profession viticole d'avoir accès aux analyses climatiques à l'échelle régionale et à celle de leur exploitation de façon à les confronter aux préconisations issues des études terroirs et mettre en œuvre les pratiques à court et moyen terme qui s'imposent.

Vulgarisation de l'information : Dans le cadre de l'ANR-TERVICLIM et de ce projet, nous avons commencé la réalisation d'un film de vulgarisation scientifique sur l'impact du changement

climatique à l'échelle des terroirs viticoles. Ce film montrera notamment la mise en place des expérimentations scientifiques dans les différents vignobles étudiés, les résultats obtenus et surtout les différents scénarios d'adaptation. Ce film sera réalisé en collaboration (notamment pour les questions de montage) avec le Centre de Ressources et d'Etudes Audiovisuelles (CREA) de l'université de Haute Bretagne.

C. Sites retenus

La modélisation physique et statistique de plusieurs scénarios du changement climatique sera réalisée dans les vignobles français : Val de Loire, Champagne, Provence.

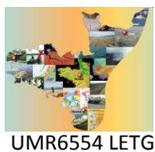
La modélisation multi-agents et scénarios d'adaptation (approche recherche/acteurs) est prévue pour les vignobles suivants:

- les Coteaux du Layon dans le Val de Loire (cf. ci-dessus)
- les vignobles de la Montagne Sainte Victoire : une collaboration avec l'Association des viticulteurs de la Montagne Sainte Victoire permet d'intégrer les acteurs dans le SMA. De plus, nous disposons pour chaque parcelle, des informations nécessaires pour la modélisation (ex : MNT, types de sol, occupation du sol, pratiques culturales, ...).
- Les vignobles de Mendoza (Argentine) : nous travaillons avec la bodega Alta Vista (vignoble à capitaux français) dans la région viticole de Mendoza. Les caractéristiques de cette bodegas sont que leur politique de production est très axée sur le terroir notamment sur les caractéristiques des sols. Nous disposons de toutes les informations nécessaires à la modélisation (ex : MNT, types de sol, occupation du sol, pratiques culturales, ...) et 15 capteurs ainsi que des stations météorologiques complètes ont été installés dans les vignobles. Les partenaires argentins de la *Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas (DACC)* fourniront les données météorologiques ainsi que leur expérience notamment le lien vers les autres bodegas.

Pour ces Trois sites, nous prévoyons les mêmes méthodes de diffusion exposés dans la partie D.4.

D. Programme de travail

Septembre 2010	Octobre-Janvier 2011	Janvier 2011-Décembre 2011
Réponse du MEEDDAT	Réunion entre les différents organismes partenaires. Attribution des tâches. Recrutement des contractuels liés au projet. Bilan des données in-situ disponibles et à recueillir. Bilan des données de base nécessaire pour la modélisation (sorties de modèles IPCC, données régionalisées, ...).	Modélisation méso-échelles et statistiques à l'échelle des terroirs expérimentaux. Intégration des scénarios IPCC. Mise en place de la plateforme SMA (acquisition des scénarios économiques RCP). Acquisition des données in-situ pour l'alimentation et la validation des modèles. Diffusion de l'information auprès de la profession viticole : fiches ; mise en place du site internet ; réunions.
Janvier 2012-Décembre 2012	Janvier 2013_ Décembre 2013	
Analyse des sorties de modèles. Lien entre les modèles physiques et statistiques. Scénarios d'adaptation aux changements climatiques.	Discussion des partenaires (recherche/acteur) et amélioration des résultats. Valorisation et synthèse des	



Diffusion de l'information auprès de la profession viticole. Discussion avec la profession viticole sur la pertinence des scénarios d'adaptation.	résultats. Construction des documents cartographiques et des documents de vulgarisation (ex : film, ...). Rédaction du rapport final et restitution.
--	--

E. Composition et descriptif des travaux de chaque partenaire

Acquisition des données météorologiques et agronomiques à l'échelle des vignobles expérimentaux

L'acquisition des données météorologique est gérée par le laboratoire COSTEL de l'UMR6554 LETG et l'ensemble des participants du programme. Des stages pour des étudiants de Master sont prévus pour l'ensemble des sites. Les observations agronomiques sont également effectuées par l'ensemble des participants agronomes mais selon une méthodologie mise en place par l'INRA Angers.

Certains professionnels viticoles participent également à l'acquisition des données.

L'analyse des données météorologiques (régionales et locales) est effectuée par les climatologues de l'UMR6554 LETG, de l'UMR8586 PRODIG, de l'université de Cuyo à Mendoza. Les analyses agronomiques sont effectuées par l'INRA d'Angers et de la Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas (DACC) à Mendoza.

Modélisation climatique à l'échelle des terroirs viticoles et intégration des scénarios IPCC avec notamment la mise en relation entre la modélisation physique (ex : RAMS, WRF, ..) et la modélisation statistique

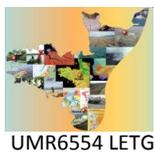
La modélisation statistique sera assurée par l'équipe de l'UMR8586 PRODIG avec la participation de certains membres de l'UMR6554 LETG. Un ingénieur d'étude en programmation informatique sera embauché pour 6 mois afin de programmer un modèle applicable à l'ensemble des vignobles.

La modélisation physique méso-échelle sera assurée par l'UMR6554 LETG et l'UMR6016 LAMP avec la prévision d'embauche d'un post-doc de 18 mois pour intégrer les scénarios IPCC dans le modèle. Pour la partie argentine, l'UMR7159 LOCEAN et la DACC apporteront leur expérience en modélisation méso-échelles avec WRF. Pour le choix des scénarios IPCC en Argentine, nous profiterons de l'expérience issue du programme européen CLARIS (UMR7159 LOCEAN) où plusieurs sorties de modèles globaux et régionaux ont été testés. Dans le cadre de CLARIS, des comparaisons entre modélisation dynamique et statistique ont montré le potentiel d'une approche combinée des deux approches pour étudier les possibles impacts du changement climatique sur l'Amérique du Sud. Dans le cadre du nouveau projet européen CLARIS LPB, une action de réalisation d'ensembles de simulations régionales est coordonnée et permettra d'étudier à la fois la sensibilité des scénarios régionaux aux modèles globaux (conditions de bord) et au modèle régionale (paramétrisation physique).

Les méthodologies et les résultats seront confrontés avec l'équipe du LTHE de Grenoble.

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)

Cette partie sera totalement assurée par le laboratoire GEOMER de l'UMR6554 LETG. Un post-doc d'un an est prévu pour adapter le SMA Dahu à la viticulture. Des collaborations sont prévues avec les modélisateurs de l'UMR6016 LAMP, de l'UMR8586 PRODIG et de l'UMR7159 LOCEAN afin d'intégrer les différents modèles dans le SMA. Les données d'entrée concernant les



pratiques culturelles et le paysage seront fournies par l'INRA d'Angers par l'intermédiaire de l'atlas des terroirs notamment pour les vignobles des Coteaux du Layon.

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).

Le transfert de l'information et la sensibilisation des professionnels viticoles au changement climatique seront réalisés par l'ensemble des partenaires scientifiques en relation avec les syndicats (coteaux du Layon), les associations viticoles (Montagne Sainte Victoire), les vigneron (bodega Alta Vista à Mendoza) et la Chaire Unesco « Culture et Tradition du Vin ». Un poste d'ingénieur d'étude en agronomie est prévu à l'INRA d'Angers pour la diffusion de l'information notamment avec la mise en place du site internet où seront diffusées les données. Plusieurs stages de niveau Master sont prévus pour cette phase.

La réalisation et la coordination des ateliers participatifs avec les acteurs de la profession viticole sera entreprise par l'UMR7159 LOCEAN. Un CDD de 30 mois est notamment prévu pour la mise en place de ces ateliers dans les vignobles de Mendoza (Argentine).

III. Expérience et moyens des équipes dans le domaine considéré

Chaque équipe a une forte expérience dans le domaine de la mesure, de la modélisation climatique et des terroirs viticoles. Chaque équipe a dirigé ou dirige un programme national ou international dans le domaine considéré (cf. « Articulation avec des programmes régionaux, nationaux et européens conduits par les proposant ») et a publié dans des revues internationales. Par exemple, Philippe Boulanger a coordonné le numéro de février 2010 de la revue *Climate Change*.

Ci-dessous, 5 publications les plus significatives par équipes :

Asselin C., Barbeau G., Morlat R., 2001 – Approche de la composante climatique à diverses échelles dans le zonage viticole. Bulletin de l'OIV, vol 74, n° 843-844, mai-juin 2001, p 301-318

Asselin C., Barbeau G., Morlat R., 2003. Les terroirs viticoles : du concept au produit. In « Terroir, Zonazione, Viticoltura. Trattado internazionale » de Mario Fregoni, Danny Schuster et Andrea Paoletti. Phytoline Editore 2003. 648 p.

BARBEAU G ; CADOT Y ; STEVEZ L ; BOUVET M H ; COSNEAU M ; ASSELIN C ; MEGE A., 2001. Role of soil physical properties, climate and harvest period on must composition, wine type and flavour (*Vitis vinifera* L, cv chenin), Coteaux du Layon, France. Proceedings of the 26th world congress of the OIV Adelaide, Australia, 11-17 october 2001, section viticulture p 105-118.

Bigot S. et Rome S., 2010. Evolution pluridécennale des principales contraintes climatiques dans les préalpes françaises : conséquences potentielles sur les activités. Echogéo, sous presse.

Bigot S., Dedieu J.-P. et Rome S., 2009. Snow cover monitoring over French Alps based on SPOT-VEGETATION S-10 products. Application to the Vercors area for the time period 1998-2008. Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, SRef-ID: 03309.

Bigot S., Rome S., Biron R., Laurent J.-P., Lebel T. et Dedieu J.-P., 2010. Geophysical measures on a grassland of the high plateaus in the Vercors mountain (french Prealps): analysis of the local and regional hydroclimatic variations. Geophysical Research Abstracts, 12, accepté.

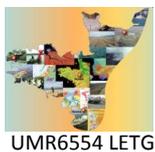
Bonnardot V. & Carey V.A, 2007. Climate change: observed trends, simulations, impacts and response strategy for the South African vineyards. Actes du colloque "Réchauffement climatique: quels impacts probables sur les vignobles?" (Dijon, 28-30 mars 2007), sous l'égide de la Chaire UNESCO Vin et Culture.

Bonnardot V. and Cautenet S., 2009. Mesoscale modeling of a complex coastal terrain in the South-Western Cape using a high horizontal grid resolution for viticultural applications. *J. App Met Clim.* 48, 19p.

Bonnardot, V., Planchon, O. et Cautenet, S., 2005: The sea breeze development under an offshore synoptic wind in the South Western Cape and implications over the Stellenbosch wine-producing area. *Theoretical and Applied Climatology*, **81** (3-4), 203-218.



- Bonnardot, V., Planchon, O., Carey, V.A. et Cautenet, S. 2002: Diurnal wind, relative humidity and temperature variation in the Stellenbosch-Groot Drakenstein winegrowing area. *South African Journal of Enology and Viticulture*, **23** (2), 62-71.
- Boulanger, J.-P. and Olga Penalba, Assessment of Climate Information Needs in the Argentinean Agro-business sector, Climatic Change, CLARIS Special issue, DOI 10.1007/s10584-009-9745-5.
- Boulanger, J.-P., G. Brasseur, A. F. Carril, M. Castro, N. Degallier, C. Ereño, J. Marengo, H. Le Treut, C. Menendez, M. Nuñez, O. Penalba, A. Rolla, M. Rusticucci, R. Terra, The European CLARIS Project: A Europe-South America Network for Climate Change Assessment and Impact Studies, Climatic Change, CLARIS Special issue, DOI 10.1007/s10584-009-9734-8.
- Boulanger, J.-P., J. Aizpuru, L. Leggieri, and M. Marino, A Procedure for Automated quality Control and Homogenization of historical daily temperature and precipitation data (APACH): Application to the Argentinean Weather Service Stations, Climatic Change, CLARIS Special issue, DOI 10.1007/s10584-009-9741-9
- Briche E., Beltrando G., Kergomard C. et Quénel H., 2009 : Analyse critique des sorties du modèle Arpège-Climat en climatologie : application au vignoble champenois/marnais. *Théoquant*, 9p.
- Briche E., Beltrando G., Madelin M. et Quénel H., 2007 : Tendances thermiques et indice de Huglin en Champagne. « Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles », Dijon, 28-30 mars 2006, (CD).
- Brosset D., Claramunt C. et Saux, E., 2007, A location and action-based model for route descriptions , in Proceedings of the 2nd International Conference on Geospatial Semantics, F. Fonseca, A. Rodriguez and S. Levashkin (eds.), Springer Verlag, LNCS 4853, Mexico, pp. 146-159.
- Brosset D. Claramunt C. et Saux, E., 2008, A stochastic algorithm for the optimization of wayfinding processes, PLACE : Workshop Giscience 2008, Utah Park, USA.
- Brosset D. Claramunt C. et Saux, E., 2008, An ACS cooperative learning approach for route finding in natural environment, proceedings of the 16th ACM GIS International Conference in Advances in Geographical Information Systems (ACM GIS), USA.
- Brosset D. Claramunt C. et Saux, E., 2008, Wayfinding in natural and urban environments: a comparative study, *Cartographica*, Toronto University Press, 43(1), pp. 21-30.
- Coulon C., Quénel H., Garcia de Cortazar I. et barbeau G., 2009 : La modélisation : un outil de pilotage du couple Climat-vigne? *Revue française d'Oenologie*. n°235, avril-mai 2009, 15-22.
- D'Orgeval, T., J.-P. Boulanger, M. J. Capalbo, E. Guevara, S. Meira, and O. Penalba, The value of seasonal climate information for agricultural decision-making in the 3 CLARIS sites, Climatic Change, CLARIS Special issue, DOI 10.1007/s10584-009-9746-4.
- Degallier, N., C. Favier, C. Menkes, M. Lengaigne, W. M. Ramalho, R. Souza, J. Servain, and J.-P. Boulanger, Toward an early warning system for dengue prevention: modeling climate impact on dengue transmission, Climatic Change, CLARIS Special issue, DOI 10.1007/s10584-009-9747-3.
- Deloire A, Vaudour E, Carey V, Bonnardot V, Van Leeuwen C, 2005. Grapevine responses to terroir: a global approach. *Jnl Int sci vigne vin*, Vol 39, **4**, 149-162.
- Le Tixerant M., Tissot C., 2008, Impact evaluation of a Marine Renewable Energy project on human activities dynamic, Second International Conference on Ocean energy (ICOE) "Targeting successful deployment of commercially viable ocean energy systems worldwide", Brest, 12 p.
- M. Le Tixerant, C. Tissot, F. Gourmelon, D. Brosset, 2010, Modelling of human activity development in coastal sea areas, *Journal of Coastal Conservation: Planning and Management*, in press.
- Maciel A., Monteiro A., Quénel H. et Beltrando G., 2007 : Extremos térmicos e vulnerabilidade num vinhedo do Entre Douro e Minho. *Finisterra*, vol XLII, n°83, 23-45.
- MORLAT R ; BARBEAU G ; ASSELIN C. 2001. Facteurs naturels des terroirs viticoles français : méthode et valorisation. P111-127. *Etudes recherche système agraires*, n°32.
- MORLAT R., (coordinateur) 2001. Terroirs viticoles : études et valorisation. Collection avenir œnologie. Edité par œnoplurimédia SARL à Chaintre. 118 p.
- Planchon O., Quénel H. and Corgne S., 2009: Assessing Precipitation and Large-Scale Weather Situations in Brittany: the Usefulness of the Hess-Brezowsky Classification. *Die Erde*. 140 (2), 1-27.
- POLIMENI, C. M., FELIPE FERNÁNDEZ.: Características climáticas de los valles del río Aconcagua (Chile) y Mendoza (Argentina), en: *Evaluación global del medio geográfico, como base de un ordenamiento racional en*



el principal corredor Bioceánico del Plan MERCOSUR: Valles del río Mendoza (Argentina) y Aconcagua (Chile) Editorial de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNCuyo, Mendoza 2003 (p.52 a 66)

POLIMENI, C. M., FELIPE FERNÁNDEZ.: Riesgos de origen climático, en: Evaluación global del medio geográfico, como base de un ordenamiento racional en el principal corredor Bioceánico del Plan MERCOSUR: Valles del río Mendoza (Argentina) y Aconcagua (Chile) Editorial de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNCuyo, Mendoza 2003 (p.88 a 93).

POLIMENI, C.M.: MENDOCLIMA- Concepto integral de un proyecto de climatología urbana del Gran Mendoza. UFZ- BERICHT. Nº 3 / 1997 REGIONALÖKOLOGIE. Workshops Mendoza Argentina. (en colaboración) (pág. 145-160) y (13 y 27)

POLIMENI, C.M: Estudio de la isla de calor en el Gran Mendoza según los tipos de tiempo y con estaciones fijas, en Actas de la Terceras Jornadas de Geografía Física, Universidad Católica de Santa Fe, mayo del 2000 (p. 67-68)

POLIMENI, C.M: La isla de Calor en el Gran Mendoza, en Meridiano. Revista de Geografía Nº 7. Centro de Estudios Alexander von Humboldt. Mayo de 1999. Buenos Aires. (p. 41- 52)

Quénol H. and Beltrando G., 2008: Impact of a new railway line embankment (Mediterranean TGV) on the frequency of spring frosts in a fruit-growing area of the Durance Valley (south of France). *Meteorological Applications*, **15/3**, 389-398.

Quénol H. et Monteiro A., 2007 : Variabilité spatiotemporelle des températures aux échelles fines dans le vignoble de vinho verde (Portugal) dans un contexte de changement climatique. « Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles », Dijon, 28-30 mars 2006, (CD).

Quénol H., Dubreuil V., et Lecerf R., 2008 : Apport des outils de la géomatique pour la spatialisation des risques climatiques. In *Climat et risques : changements d'approches*, Ed. Lavoisier. 43-59.

Quénol H., Maciel A., Monteiro A. et Beltrando G., 2007 : Variabilidade espacial do gelo primaveril nos vinhedos do Vinho Verde (Portugal), *Geografia*, jan/avr 2007, V.32, nº1, , 5-27.

Quénol H., Monteiro A. et Beltrando G., 2007 : Evolution récente des terroirs viticoles dans la région do Entre Minho e Douro (nord du Portugal). *Revue Internationale de Géomatique*, vol 17, 92-106.

Quénol H., Planchon O. et Wahl L., 2009 : Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 51,127-137.

Rome S., Bigot S., Anquetin S. et Dubus N., 2010. Climate change impacts in Drôme (French Department): the GICC-DECLIC PROJECT (2010-2012). *Geophysical Research Abstracts*, 12, accepté.

Rouan M., Kerbirou C., Levrel H., Etienne M., "A co-modelling process of social and natural dynamics on the isle of Ouessant: Sheep, turf and bike", special issue "Modelling with Stakeholders" of *Environmental Modelling & Software*, sous presse.

Tillier I., Tissot C., 2010, Modelling spatial use conflicts and Nature-Society interactions in coastal areas coupling MAS and GIS, in: Maanan M., Robin M., *Geomatic solutions for coastal environments*, Nova Science Publishers, Inc., 20 p., in press.

Tillier I., Tissot C., Rouan M., Trouillet B., Brosset D., Robin M., 2009. Modélisation du déroulement d'activités conchyliques en zone côtière par couplage sig/sma, MASHS : Modèles et Apprentissage en Sciences Humaines et Sociales, Toulouse, 12 p.

Tissot C., Cuq F., 2005. Modélisation spatio-temporelle d'activités humaines à fort impact environnemental, *Cybergéo : Revue européenne de géographie*, n°313, 20 juin 2005, 14 p.

IV. Valorisation envisagée

La valorisation envisagée dans ce projet concerne principalement la **partie B4** du chapitre précédent sur le transfert aux professionnels viticoles (ex : fiches, cartographie SIG, site internet, film...).

Les données météorologiques et agronomiques (ex : phénologie, ...) acquises sur l'ensemble des vignobles fourniront une base de données originale et intéressante pour la modélisation du changement climatique aux échelles locales. Nous espérons pouvoir pérenniser ces mesures le plus longtemps possible.



Au niveau scientifique, des participations à des colloques internationaux et des publications dans des revues scientifiques sont naturellement prévues.

Fin 2011, nous organiserons (dans le cadre de l'ANR-TERVICLIM) un séminaire international sur « l'observation et la modélisation spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique » à l'université Catholique de Valparaiso (Chili).

Il est également prévu la rédaction d'un ouvrage scientifique (accord avec les éditions Hermès Europe) sur « le changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles ».

Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles

Engagement pour les partenaires du projet

NOM-Prénom du porteur de projet : Hervé QuénoI

Structure : Laboratoire COSTEL, UMR6554 LETG du CNRS

Signature

Hervé QuénoI