

Stress hydrique et adaptation au changement climatique pour la viticulture et l'œnologie : le projet LACCAVE

Ollat N.¹, Touzard J.-M.²

¹ UMR EGFV, ISVV, INRA Bordeaux, chemin de Leysotte 33883 Villenave d'Ornon

² UMR Innovation, INRA Montpellier, 2 place Viala 34060 Montpellier cedex 1

Correspondance touzard@supagro.inra.fr

Résumé

Les effets du stress hydrique sur la vigne et la qualité du vin doivent être analysés aujourd'hui au regard des enjeux du changement climatique. L'article présente les enjeux et les premières synthèses du projet LACCAVE qui fédère les chercheurs INRA travaillant en France sur l'adaptation du secteur vigne et vin au changement climatique. Le projet vise à coordonner les travaux en cours dans différentes disciplines en les inscrivant dans une démarche de prospective. Dans un premier temps, nous rappelons les enjeux et la définition de l'adaptation. Nous présentons ensuite une synthèse des travaux réalisés sur les impacts du changement climatique, puis les premières réflexions sur les stratégies d'adaptation. Celles-ci combinent des innovations techniques (matériel végétal, pratiques agronomiques, procédés œnologiques...), avec des stratégies spatiales, des changements institutionnels et la possibilité d'évolution des représentations des consommateurs. Dans une dernière partie, le projet LACCAVE est présenté dans ses orientations générales et selon les différents groupes de travail qui le composent. En conclusion, les conséquences pour la recherche sont précisées, en soulignant que la capacité à construire des relations de coopération avec les viticulteurs et leurs organisations à l'échelle de clusters régionaux est l'un des principaux leviers de l'adaptation au changement climatique.

Mots-clés: changement climatique, vigne et vin, stratégies d'adaptation, recherche, innovation

Abstract: Water stress and adaptation to climate change for viticulture and oenology: the project LACCAVE

The effects of water stress on vine and wine quality must be analyzed today under the challenges of climate change. The paper presents the issues and the first syntheses of LACCAVE project that gathers INRA researchers working on the adaptation of the wine sector to climate change. The project aims at coordinating and mutually enriching the ongoing works in different disciplines by enrolling the researchers in a foresight approach. At first, we reviewed the issues and the definition of adaptation. We then presented a summary of the work done on the impacts of climate change and adaptation strategies. Adaptation combines technical innovations (varietal selection, agronomic practices, oenological processes ...), with spatial strategies, institutional changes and the possibility of changing representations of wine consumers. In the last part, the LACCAVE project is presented in its general direction and according to its different Work Packages. In conclusion, implications for research are suggested, highlighting the ability to build collaborative relationships with growers and their organizations across regional clusters. This is one of the main drivers of climate change adaptation.

Keywords: climate change, vine, wine, strategies of adaptation, research, innovation

La gestion du stress hydrique et les enjeux du changement climatique

Les conditions d'alimentation en eau de la vigne et plus particulièrement les stress hydriques ont une influence majeure sur le fonctionnement et l'organisation des systèmes de production viticole, mais aussi plus largement sur l'ensemble de la filière viti-vinicole. Les impacts de stress hydriques sur le développement de la vigne, sur les rendements et sur les processus de maturation du raisin se répercutent en effet sur la qualité du vin et donc ensuite sur la segmentation et le fonctionnement des marchés. Malgré ou grâce aux interventions œnologiques (selon l'optique corrective ou expressive envisagée), les impacts du stress hydrique sur la vigne influencent donc les décisions que les viticulteurs et les acteurs de la filière vont prendre pour se positionner dans ces marchés (choix de localisation d'une plantation, arbitrages qualité x rendement...) et pour construire les règles qui garantissent ces qualités et assurent la stabilisation de ces marchés. Le dispositif de signalisation et de garantie des Indications Géographiques (AOP, IGP) prend ainsi appui sur la complexité des interactions entre la vigne et l'eau, et sur la manière dont elles sont orientées par les pratiques agronomiques pour atteindre différentes qualités de vins.

La progression des connaissances sur les liens entre stress hydrique, rendements et qualités du vin est donc primordiale pour maîtriser les processus d'élaboration de la qualité, améliorer la compétitivité des vignobles et s'adapter à l'évolution des marchés. Mais aujourd'hui, l'enjeu est encore plus fort du fait du changement climatique. Les situations de stress hydriques pourraient en effet se multiplier du fait de l'élévation de la température moyenne, du raccourcissement de la période végétative et de l'accentuation des sécheresses estivales dans certaines régions (zone méditerranéenne dans un premier temps). Il apparaît ainsi important de resituer l'analyse du stress hydrique en viticulture dans le questionnement plus large des impacts du changement climatique et des stratégies d'adaptation permettant d'y faire face (Seguin, 2010 ; Ollat et Touzard, 2014).

En France, ces enjeux ne sont pas anodins du fait de la place importante qu'occupent la vigne et le vin dans son économie et sa culture : le vin constitue près de 15% de la valeur de la production agricole du pays ; il est le deuxième poste d'exportation (avec près de 11 milliards d'euros en 2013) et induit de nombreux emplois ; il a aussi des effets positifs sur le tourisme, autre secteur stratégique pour la France, à travers sa contribution aux paysages, au patrimoine culinaire et culturel, à l'attractivité et l'identité du pays. Compte tenu de ces enjeux, l'INRA a décidé de lancer un projet de recherche pluridisciplinaire pour étudier les impacts du changement climatique sur la vigne et le vin, mais aussi les stratégies d'adaptation actuelles et futures. Vingt-trois laboratoires de recherche ont ainsi réuni leur expertise sur ces questions dans le projet LACCAGE (Long term impacts and adaptations to Climate Change in Viticulture and Enology) et proposer des scénarios d'adaptation pour les régions viticoles françaises. Des programmes de recherche étudiant les liens entre le changement climatique et la vigne ont aussi été lancés dans d'autres pays viticoles ou à l'échelle internationale au cours des cinq dernières années (Holland et Smit, 2010 ; Malheiro et al., 2010 ; Jones et Webb, 2010 ; Schultz et Stoll 2010). La plupart de ces projets restent centrés sur l'analyse des impacts du changement climatique sur une culture qui en est devenue un des témoins principaux. Des controverses importantes traversent la communauté scientifique internationale sur l'ampleur de ces impacts (Hannah et al., 2013), mais aussi sur la manière d'intégrer les stratégies d'adaptation dans la construction de scénarios pour les vignobles, par exemple à l'horizon de 2050 (Van Leeuwen et al., 2013). Le projet LACCAGE est précisément l'un des premiers projets multidisciplinaires de grande ampleur à se centrer sur la question de l'adaptation. Cet article propose une synthèse des recherches menées au plan international sur l'impact du changement climatique sur la vigne et le vin, puis explore les premiers travaux étudiant les stratégies d'adaptation, pour préciser finalement comment le projet LACCAGE poursuit ces recherches sur l'adaptation au niveau français.

L'adaptation au changement climatique: une priorité de l'INRA

Le changement climatique (CC) est bien là. Pour la fin du XXI^{ème} siècle, les différentes simulations prédisent des concentrations atmosphériques de CO₂ comprises entre 540 et 950 ppm. Selon les travaux du GIEC, la température pourrait en conséquence augmenter de 1,8 à 4 °C sur un siècle. Les modèles climatiques sont moins convergents pour les évolutions possibles des précipitations, qui augmenteraient légèrement, mais avec une diminution en été dans les zones tempérées, notamment méditerranéennes. Au-delà de ces évolutions moyennes, le CC se traduit aussi par une variabilité spatiale et temporelle plus importante, et une plus grande probabilité d'événements extrêmes.

Même s'il reste plus que jamais nécessaire de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) afin d'atténuer leurs effets sur le climat, il est maintenant clair que le CC va se poursuivre en raison de l'inertie du système bio-physique terrestre, des comportements routiniers ou opportunistes des entreprises et des consommateurs, et du recul des politiques publiques. L'adaptation est donc incontournable et doit être considérée, étudiée, accompagnée de manière complémentaire à l'atténuation. L'adaptation au CC peut être définie comme « l'ensemble des actions et processus visant à modifier les systèmes naturels et humains en réponse au changement climatique, afin de réduire leurs effets négatifs ou de tirer avantage de leurs effets positifs » (Hallegatte, 2009). Le CC va induire des coûts d'adaptation pour la société, mais il peut aussi apporter de nouvelles opportunités (Hallegatte et al., 2011).

Pour ces raisons, l'INRA a décidé de lancer le métaprogramme ACCAF (<http://www.accaf.inra.fr/>) : Adaptation aux Changements Climatiques pour les Agrosystèmes et Forêts. L'objectif d'ACCAF est d'évaluer les risques liés aux évolutions climatiques et aux événements climatiques extrêmes, et de définir des stratégies pour anticiper et prévenir les conséquences de ces crises. Il vise i) à simuler à différentes échelles les impacts du CC sur l'agriculture et les écosystèmes, ii) à favoriser l'adaptation des espèces cultivées à des modifications climatiques, mais aussi les capacités d'adaptation des systèmes de production agricole, iii) à développer des innovations techniques compatibles avec la réduction des GES, iv) à identifier les coûts et les avantages des pratiques d'adaptation et v) à proposer des formes d'organisation sociales permettant de renforcer les capacités d'adaptation au CC.

En 2014, 18 projets de différentes ampleurs sont soutenus par le métaprogramme ACCAF. Le secteur viti-vinicole y est vu comme un « système agricole modèle » permettant d'analyser à la fois les impacts du CC et la mise en œuvre de stratégies d'adaptation (Seguin, 2010). Un projet spécifique a donc été retenu sur la vigne et le vin, le projet LACCAVE. Il est l'un des projets les plus importants du métaprogramme.

Les effets du changement climatique sur la vigne et le vin

La proposition du projet LACCAVE s'appuie d'abord sur un premier bilan des recherches internationales sur les effets du CC sur la vigne et le vin. Les conditions de production des raisins de cuve (*Vitis vinifera*) sont limitées à une frange climatique assez étroite. Ils sont par conséquent particulièrement sensibles au CC, avec des effets potentiels sur le rendement, la qualité et la viabilité économique (Jones et al., 2005). Les effets possibles du CC sur le développement de la vigne et sur les processus de maturation ont été récemment examinés par plusieurs auteurs (Garcia de Cortazar, 2006 ; Holland et Schmit, 2010 ; Duchêne et al., 2010 ; Mira de Orduna, 2010 ; Schultz et Stoll, 2010). Toutefois, les effets à long terme restent difficiles à prévoir et la diversité des réponses variétales ou les mécanismes d'adaptation propres aux plantes elles-mêmes sont encore mal connus.

La température joue un rôle majeur dans la régulation de la phénologie de la vigne. Il y a un accord général pour dire que tous **les stades phénologiques** seront avancés à l'avenir. Dans la seconde moitié du XXI^{ème} siècle, le débourrement pourrait être plus précoce de 3 à 18 jours, et la période de maturation de 20 à 40 jours par rapport aux 30 dernières années (Duchêne et al., 2010 ; Garcia de

Cortazar, 2006 ; Webb et al., 2007 ; Pieri, 2010). L'avancée de la période de maturation vers des jours plus chauds augmente l'impact de la température sur la maturation. Garcia de Cortazar (2006) a montré que la période de maturation pourrait être caractérisée par des températures supérieures à ce qui est observé aujourd'hui, de 4-6 °C dans le sud de la France et 6-8 °C dans la moitié nord de la France.

Les impacts du CC sur **la biomasse et le développement des fruits** sont plus difficiles à prévoir, en raison de multiples interactions entre paramètres et des différences variétales. L'activité photosynthétique est renforcée par une plus forte concentration en CO₂ dans l'atmosphère, mais des mécanismes de *rétroaction* interviennent et la respiration des plantes serait intensifiée (Schultz, 2000). Une expérimentation de culture de la vigne en atmosphère enrichie en CO₂ sur le Sangiovese (Bindi et al., 1996a ; Bindi et al., 1996b ; Webb et al., 2007) a montré que la surface foliaire et le poids sec végétatif total augmentent de façon plus importante que le poids sec des parties associées à la reproduction. L'effet de l'augmentation en CO₂ sur le rendement semble même plutôt négatif lorsque la température et le rayonnement solaire sont également plus élevés, avec des variations selon les cépages. Par ailleurs, le développement végétatif va accentuer les besoins en eau, amplifiant l'effet direct de la température sur la transpiration. Le confort hydrique des plantes serait moindre à partir de 2050, avec des impacts négatifs dans le Sud de la France (Pieri, 2010). Le contrôle de l'équilibre hydrique de la vigne dans des conditions climatiques modifiées (haute teneur en CO₂, température élevée, faible teneur en eau) est une question clé (Schultz et Stoll, 2010).

La **maturation du raisin** serait directement affectée par les paramètres environnementaux du CC, et indirectement par les effets de ces paramètres sur la physiologie et le microclimat de la canopée. La maturation se ferait dans des conditions beaucoup plus chaudes qu'aujourd'hui, avec des impacts sur la composition des baies et l'aptitude à élaborer les types de vins actuels (Duchêne et al., 2010). Une augmentation de la teneur en sucres des baies a été vérifiée pour les dernières décennies du XX^{ème} siècle (Duchêne et al., 2005 ; Ollat et al., 2013). Un effet important de la température sur l'acidité doit aussi être souligné. Combinée à une augmentation de l'absorption de potassium, elle induit une augmentation du pH du jus du raisin (Kliwer, 1971 ; Coombe, 1987), avec des différences variétales (Sadras et al., 2013). Les composés polyphénoliques et aromatiques, cruciaux pour la qualité, seront affectés en quantité et en qualité (Mori et al., 2007 ; Sadras et Moran, 2012). Les interactions entre températures élevées et intensité lumineuse sont en effet déterminantes pour ces éléments (Tarara et al., 2008).

Il faut également noter que les changements climatiques peuvent influencer **l'impact des ravageurs et maladies**. Ces changements vont en effet affecter à la fois l'épidémiologie des parasites et des champignons (sensibles aux évolutions de température et d'humidité), et la réceptivité des vignes à ces agents pathogènes, du fait des modifications des stades phénologiques et des états physiologiques des plantations (Mira de Orduna, 2010 ; Salinari et al., 2007 ; Pangga et al., 2011). Ces interactions complexes devraient être différentes selon les vignobles, avec vraisemblablement une pression pathogène accrue pour les régions septentrionales (fréquence accrue d'étés chauds et humides).

L'évolution attendue des principaux paramètres climatiques dans l'espace, confrontés aux conditions de développement de la vigne et de maturation des raisins pourrait avoir des **effets importants sur la répartition géographique possible des vignobles**. L'évolution des indices climatiques joue sur la répartition des variétés (Jones et Webb, 2010) et permettent de simuler leurs aires potentielles de plantation (Pieri, 2010). Si la structure de l'encépagement et les pratiques ne changent pas, une partie des vignobles actuels se trouverait dans des situations très difficiles pour obtenir des qualités acceptables de raisin et de vins, voire même pour maintenir des vignes productives. A l'inverse de nouvelles régions du Nord de la France deviendraient plus appropriées pour la viticulture (Malheiro et al., 2010). Ces changements géographiques pourraient avoir des effets indirects non négligeables sur les ressources en eau et les écosystèmes (Hannah et al., 2013).

L'ensemble de ces effets du CC sur les composants des raisins, le fonctionnement de la vigne et sa répartition spatiale auront des **impacts économiques et sociaux importants**. Les effets sur les rendements seront contrastés entre les régions, affectant en positif ou négatif les marges de manœuvre des exploitations et leur rentabilité économique (Holland et Smit, 2010). L'augmentation du taux d'alcool et le changement des profils aromatiques des vins peuvent aussi modifier, en bien ou en mal, la hiérarchie des préférences des consommateurs et influencer les prix (Pichery et Bourdon, 2007). On peut s'attendre en France à des évolutions différentes de la compétitivité des régions viticoles. Les Indications Géographiques jouent un rôle clé dans l'économie du vin en codifiant l'usage des variétés, la localisation des plantations et les pratiques techniques pour garantir une qualité liée à une origine. Les conditions climatiques des lieux d'origine se modifiant, les règles définissant chaque appellation vont être soumises à de fortes tensions, avec des révisions plus fréquentes des cahiers des charges, voire même une remise en cause plus globale du système des AOC. Les effets pourraient être contrastés selon les territoires sur les revenus, la valeur des plantations et l'emploi. C'est l'ensemble du système économique et institutionnel de la vigne et du vin qui pourrait donc être affecté.

Une diversité de leviers d'adaptation

La plupart des experts soulignent la complexité de la question du changement climatique pour la viticulture et l'élaboration du vin (Jones et Webb, 2010), touchant à des aspects physiques, biologiques, techniques, sociaux, économiques et culturels. Jusqu'à présent, l'essentiel des recherches ont concerné les impacts du CC sur les aspects physiques et biologiques de la viticulture. Toutefois, évaluer si le changement climatique représente un risque ou une opportunité dépend de la capacité des acteurs du secteur à s'adapter aux nouvelles conditions et peu d'études se sont penchées sur cette capacité (Holland et al., 2010 ; Viguié et al., 2014).

Une évaluation de la **perception du changement climatique** par les producteurs de vins dans trois pays européens a montré que la plupart d'entre eux en perçoivent certains éléments : les impacts sur le rendement, la qualité et les risques de ravageurs et de maladies ont été relevés avec de légères variations selon les pays. Des stratégies d'adaptations varient entre les pays et la volonté d'adopter de nouvelles pratiques sont corrélées avec le degré de modifications déjà envisagées, indépendamment du changement climatique (Battaglini et al., 2009). Une approche en terme de vulnérabilité a montré que de nombreux facteurs doivent être pris en compte pour évaluer les risques perçus par les producteurs et les types d'adaptations qu'ils emploient (Holland et al., 2010).

De nombreuses études permettent de repérer des **innovations techniques** qui sont des réponses possibles aux contraintes ou opportunités du CC, poursuivant en accéléré un processus historique d'adaptation permanente de la vigne à de nouveaux territoires et marchés (Schultz et al., 2010). La création variétale ou le choix d'introduire une variété exogène, par exemple plus tardive ou résistante à la sécheresse, est une première solution (Ollat et al., 2013). L'irrigation est proposée pour compenser les besoins accrus en eau de la vigne, notamment dans les zones méditerranéennes, avec différentes modalités de pilotage (Carbonneau et Ojeda, 2012). Les modes de conduite offrent aussi toute une gamme de changements possibles, pour raisonner la protection des grappes ou leur microclimat (Schultz et Stoll, 2010) ; la gestion des sols ou des vendanges sont des éléments sur lesquels jouent déjà les viticulteurs ; enfin, les pratiques œnologiques sont un domaine où les innovations peuvent compenser ou valoriser des effets du CC, par exemple pour réduire le taux d'alcool (Kuntoudakis et al., 2011).

Au-delà de l'adoption d'innovations techniques, c'est leur **gestion à l'échelle locale** qui est importante, en tenant compte de la diversité des ressources qui caractérisent un terroir. De grandes variations dans les conditions climatiques existent au sein d'un même région viticole, du fait de la géomorphologie, de l'occupation des sols ou même de la proximité de plans d'eau et de zones urbaines (Bois et al., 2008). Les paramètres environnementaux (température, eau, teneur en CO₂, composition minérale du sol)

interagissent et leurs effets combinés sur les nombreuses combinaisons de variétés / porte-greffe sont difficiles à prévoir, en particulier pour la composition de fruits. L'adaptation des pratiques techniques et du matériel végétal à l'échelle locale sera cruciale (Van Leeuwen et al., 2007 ; Ollat et al., 2011) et est en soi un domaine de recherche, à renouveler face à l'enjeu du CC.

Plus largement, la **relocalisation des vignes et vignobles** est une alternative largement évoquée, à l'échelle locale, mais aussi régionale ou même continentale (Hannah et al., 2013). La recherche de parcelles plus fraîches ou disposant de sols avec une réserve utile plus importante guide déjà les plantations de viticulteurs de la vallée de la Loire ou du pourtour méditerranéen, par exemple en les déplaçant en altitude , parfois seulement de quelques dizaines de mètres sur un coteau (Delay et Zottele, 2011 ; Bonnefoy et al., 2012). L'objectif de réduire le risque climatique peut aussi motiver une stratégie spatiale à une échelle locale et régionale. Surtout, l'évolution des frontières climatiques offre la possibilité de créer en Europe de nouveaux vignobles dans des zones septentrionales, même si les investissements matériels et immatériels pour inscrire un vignoble dans un territoire sont importants et risquent de limiter ces relocalisations à grande échelle (Touzard, 2010a).

Enfin, les **changements institutionnels**, apparaissent incontournables. En France, l'évolution du système des appellations est une condition pour intégrer des innovations techniques ou modifications de zonage. La révision des cahiers des charges de chaque appellation sera donc un levier important de l'adaptation, associée à une évolution de la législation nationale (Code Rural). L'assouplissement en cours des conditions de l'irrigation pour les vignobles en AOP montre que l'INAO et le système des appellations peuvent évoluer assez rapidement face aux enjeux climatiques (INAO, 2014). La mise en place de systèmes d'assurance ou la constitution de clusters innovants à l'échelle régionale sont également des leviers importants, limitant les risques et renforçant les capacités des viticulteurs à faire face au changement climatique (Touzard, 2010b). La capacité d'adaptation du secteur vitivinicole est en effet influencée par des facteurs économiques, sociologiques et juridiques, mais aussi par la construction de nouvelles connaissances, des facteurs sur lesquels les acteurs peuvent agir collectivement (Chiffolleau et Touzard, 2014). Les stratégies d'adaptation seront alors différentes selon les régions viticoles, du fait des impacts particuliers du changement climatique sur des vignobles structurellement différents, mais aussi du fait de la manière dont les acteurs s'organisent pour innover dans chaque région (Hinnewinkel, 2007 ; Holland et al., 2010).

Une approche globale est alors nécessaire pour proposer des stratégies d'adaptation, associant innovation technique, stratégies de localisation et changements institutionnels. C'est l'ambition du projet LACCAVE.

Le projet LACCAVE

Le projet LACCAVE (2012-2015) est avant tout un projet d'animation scientifique. Il vise à renforcer l'échange de connaissances entre les équipes de l'INRA dans différentes disciplines (climatologie, génétique, écophysiologie, agronomie, œnologie, économie, sociologie...) en les inscrivant dans une démarche de prospective à l'horizon 2050. Pour cela, il s'appuie sur une vision globale de l'ensemble de la chaîne technique et de valeur du vin, permettant de repérer et d'analyser à la fois les différentes formes d'impact du changement climatique et surtout la diversité des leviers d'adaptation possibles. Cette analyse s'effectue à plusieurs échelles (plante, parcelle, exploitation, vignoble régional et secteur) avec une attention particulière au niveau régional où se différencient les impacts climatiques et peuvent se coordonner les stratégies d'adaptation.

Coordonné par deux scientifiques de Bordeaux et Montpellier, le projet s'organise en sept groupes de travail (GT), avec des assemblages disciplinaires différents. Pendant la durée du projet, les relations entre GT sont appelées à se renforcer, tout comme les collaborations avec les organismes techniques ou professionnels. LACCAVE s'est aussi associé un comité scientifique international, comprenant des

scientifiques d'Allemagne, Espagne, Etats-Unis, Brésil et Afrique du Sud. Le projet peut être détaillé en reprenant les objectifs et les activités engagées pour chaque GT.

GT1. Caractérisation et perception du CC

Ce GT vise à rassembler et à élaborer les informations sur le CC et ses effets sur la vigne et le vin, que ces informations proviennent de la communauté scientifique ou des viticulteurs. Il s'agit de partager en premier lieu les connaissances sur les travaux du GIEC et les résultats des simulations climatiques régionales à différentes échelles spatiales et à différents horizons (avant 2050, 2050-2100), provenant généralement d'autres projets (par ex. Climator, Terviclim, Teradclim). Le GT prend aussi en compte les perceptions du CC par les acteurs du secteur viticole et cherche à repérer les paramètres à partir desquels se construisent ces perceptions. Cette information, cruciale pour élaborer des stratégies d'adaptation, est produite à partir d'entretiens sociologiques dans les principales régions viticoles, et en Anjou par un travail sur les pratiques viticoles. Les travaux de ce GT concernent aussi les connaissances actuelles des participants au projet, estimant que leurs expertises sont incomplètes et qu'ils ont besoin de partager une vision commune et un vocabulaire commun sur le CC.

GT2. Bases physiologiques et génétiques de l'adaptation de la vigne au CC

Ce GT étudie les réponses de la vigne aux principaux paramètres concernés par le CC (CO₂ atmosphérique, température, eau) et les déterminants génétiques qui contrôlent ces réponses, en tenant compte des différences entre variétés de greffons et de porte-greffes. Sont mesurés les caractères liés à la phénologie, la croissance végétative, la consommation en eau, le développement des baies et leur composition (sucres, acides, composés phénoliques et arômes). Les effets des modifications de la composition des baies et de la microflore du vignoble sur les processus de vinification sont aussi examinés. L'essentiel des résultats collectés viennent d'autres projets de recherche et devraient être intégrés dans ce GT en utilisant une approche systémique. Deux opérations à caractère méthodologique sont engagées : un échange d'information sur les installations expérimentales, afin de définir des protocoles communs pour la description du matériel végétal (phénotypage) ; un travail de confrontation des approches de modélisation dans l'objectif de simuler les performances de la vigne dans les conditions climatiques futures.

GT3. Développement d'innovations techniques pour l'adaptation au CC

Ce GT vise à analyser les innovations techniques qui pourraient contribuer à l'adaptation des systèmes de production du raisin et du vin au CC. Ces innovations portent sur les pratiques œnologiques, considérées comme pouvant répondre à court terme à l'évolution de la modification des compositions des baies (exemple des techniques de désalcoolisation). Ces innovations concernent aussi les pratiques viticoles, notamment les choix de densité de plantation, la gestion des sols, les systèmes de conduite, la modification du rapport fruit/feuille, mais aussi l'irrigation. La valorisation de la diversité génétique pour les variétés de greffons et de porte-greffe existants est un autre aspect retenu. L'un des objectifs de ce groupe est en effet de concevoir des idéotypes à partir d'une évaluation des besoins des viticulteurs et du potentiel d'adaptation de la vigne. Une analyse plus globale des systèmes de culture innovants est également proposée, à partir d'un travail de thèse associant enjeux climatiques et enjeux environnementaux (réduction de l'usage de pesticides).

GT4. Évaluation des innovations techniques à une échelle territoriale

Ce GT évalue à l'échelle locale (petite région, bassin versant, terroir) les impacts du changement climatique en tenant compte des pratiques viticoles actuelles et nouvelles. Il vise à mesurer les conséquences de pratiques d'adaptation (innovations techniques et relocalisation) sur les paysages viticoles et sur la viabilité des systèmes de production. Pour ces évaluations, des méthodes multicritères sont utilisées sur le raisin et la typicité des vins, mais aussi sur des paramètres environnementaux (ressources en eau et sol). Les conditions d'adoption par les producteurs de pratiques d'adaptation sont étudiées à partir d'entretiens et de groupes de discussion. Des études de cas sont réalisées dans

différents vignobles (Val de Loire, Alsace, Languedoc-Roussillon). Dans ce GT, les chercheurs étudient l'hypothèse selon laquelle l'échelle locale est un niveau pertinent d'adaptation, en combinant différents niveaux d'actions et d'innovations, et en tirant avantage de la diversité et de la variabilité des ressources locales.

GT5. Evolution des stratégies économiques

Le CC aura un impact sur les coûts de production et la relation entre la qualité et l'origine géographique. Ces facteurs sont cruciaux pour la compétitivité des entreprises vitivinicoles à l'échelle locale, nationale mais aussi internationale. Le GT étudie les effets du CC sur les stratégies de production, mais aussi sur le goût des consommateurs. Si les consommateurs acceptent l'impact du CC sur la qualité du vin, les besoins de changements radicaux dans les systèmes techniques seront moins importants. Si les consommateurs ne l'acceptent pas, maintenir une qualité définie de vin devient alors un enjeu majeur pour les producteurs et les chercheurs, au moins à moyen terme. La concurrence entre les régions productrices et les évolutions possibles de la réglementation (système d'appellation) sont également analysées. Ce GT concentre néanmoins ses travaux sur l'évaluation de la perception des consommateurs (thèse financée par le projet), et sur les stratégies des producteurs en tenant compte du coût de l'adaptation.

GT6. Gestion et analyse des données

Ce GT fournit aux partenaires un appui pour la gestion des données. Les bases de données existantes et les systèmes d'information utilisés ont été identifiés. Le GT propose un système d'information qui tient compte des spécificités des différents domaines scientifiques concernés, mais avec des parties communes. Un appui méthodologique pour l'analyse et l'intégration de données complexes est aussi fourni aux participants.

GT7. Elaboration de scénarios stratégiques pour 2050

Une étude prospective est proposée pour élaborer et explorer plusieurs scénarios d'adaptation au CC. Ces scénarios fourniront un cadre conceptuel pour l'ensemble des GT du projet, et seront alimentés en retour par les résultats et l'expertise des différents GT. L'originalité de l'approche est de partir de quatre scénarios d'adaptation prédéfinis: un scénario « conservateur » qui n'intègre que des changements à la marge, permettant d'évaluer les impacts de l'adaptation passive ; un scénario « innovation pour rester » qui ouvre l'ensemble des vignobles à une large gamme d'innovations techniques ; un scénario « vignobles nomades » qui met en avant les possibilités de relocalisation des vignobles en fonction des conditions climatiques ; un scénario « libéral » qui permet de tester une situation où « tout est possible partout ». Ces quatre scénarios seront soumis aux producteurs dans différentes régions viticoles françaises afin de susciter un débat et de définir des stratégies réalistes. L'adaptation se fera *a priori* par de multiples étapes qui pourront se combiner différemment dans chaque région. Un travail spécifique (thèse) sur l'importance des relations de coopération entre la recherche et les entreprises viticoles vient compléter cette réflexion prospective.

Conclusion

Le projet LACCAVE a été lancé en mars 2012, lors d'une assemblée générale organisée à Bordeaux ISVV. Il a déjà permis de faire le point sur les principaux effets du changement climatique sur la vigne et le vin, comme sur les innovations possibles pour envisager des stratégies d'adaptation. Ces premiers travaux ont fait l'objet d'un numéro spécial du Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin. Les collaborations entre les chercheurs ont également permis de prendre une position forte dans les débats scientifiques à l'échelle internationale, en particulier dans l'évaluation de l'ampleur des impacts du changement climatique sur les vignobles européens et des marges de manœuvre dont disposent les viticulteurs pour s'adapter (Van Leuwen et al., 2013). La construction d'un réseau scientifique

national, fortement connecté à l'international, est déjà un acquis important. L'enjeu maintenant est de fournir de nouvelles connaissances sur les stratégies d'adaptation en fonction de différents scénarios spécifiés à des échelles régionales. Le projet ne vise pas à fournir des solutions définitives, mais des outils qui aideront à élaborer les stratégies des producteurs, de la recherche et des pouvoirs publics.

Références bibliographiques

- Battaglini A., Barbeau G., Bindi M., Badeck F.-W., 2009. European winegrowers' perceptions of climate change impact and options for adaptation. *Regional Environmental Change* 9, 61-73.
- Bindi M., Fibbi L., Gozzini B., Orlandi S., Miglietta, F., 1996a. Modeling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. *Climate Research* 7, 213-224.
- Bindi M., Fibbi L., Gozzini B., Orlandi S., Seghi L., 1996b. The effect of elevated CO₂ concentration on grapevine growth under field conditions. *Acta Horticulturae* 427, 325-330.
- Bonnefoy H., Quenol V., Bonnardot V., Barbeau G., Madelin, Planchon O. Neethling E., 2012. Temporal and spatial analyses of temperature in a French wine-producing area: the Loire Valley. *International Journal of Climatology*. DOI:10.1002/joc.3552
- Bois B., Wald L., Pieri P., Van Leeuwen C., Commagnac L., Chery P., Christen M., Gaudillère J.P., Saur E., 2008. Estimating spatial and temporal variations in solar radiation within Bordeaux winegrowing region using remotely sensed data. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 42, 15-25.
- Carbonneau A., Ojeda H., 2012. Ecophysiologie et gestion de l'eau en viticulture. *Le Progrès Agricole et Viticole* 129 (21), 508-512.
- Chiffolleau Y., Touzard J.-M., 2014. Understanding local agri-food systems through advice network analysis. *Agriculture and Human Values* 31, 19-32
- Coombe B.G., 1987. Influence of temperature on composition and quality of grapes. *Proc. Int. Symp. Grapevine Canopy and Vigor Management*, Davis, USA (ISHS), pp 23-35.
- Delay E., Zottele F., 2011. Mountain landscape analysis a valorisation of viticulture. *Annual Report. Fondation E.MACH*.
- Duchêne E., Huard F., Dumas V., Schneider C., Merdinoglu D., 2010. The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate Research* 41, 193-204.
- Duchêne E., Schneider C., 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development* 25, 93-99.
- Garcia de Cortazar Auri I., 2006. Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France. PhD Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Montpellier, 291 pp.
- Hallegatte S., 2009. Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change* 19 (2), 240-247.
- Hallegatte S., Lecocq F., de Perthuis C., 2011. Designing climate change adaptation policies: an economic framework. *Policy Research Working Paper Series*
- Hannah L., Roehrdanz P.R., Ikegami M., Shepard A.V., Shaw M.R., Tabor G., Zhi L., Marquet P.A., Hijmans R.J., 2013. Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110, 6907-6912.
- Hinnewinkel J.C., 2007. Le vignoble bordelais à l'épreuve du changement climatique. In *Proceedings of "Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ? 28-30 mars 2007*, Dijon.
- Holland T., Smit B., 2010. Climate Change and the Wine Industry: Current Research Themes and New Directions. *Journal of Wine Research* 21, 125-136.
- INAO, 2014. Projet de cadre réglementaire de l'irrigation pour les AOC. Commission nationale Irrigation de l'INAO, 13 février 2014.
- Jones G.V., White M.A., Cooper O.R., Storchmann K., 2005. Climate change and global wine quality. *Climate Change* 73, 319-343.

- Jones G.V., Webb L.B., 2010. Climate change, viticulture, and wine: Challenges and opportunities. *J. Wine Res.* 21, 103-106
- Kliewer W.M., 1971. Effect of day temperature and light intensity on concentration of malic and tartaric acids in *V. vinifera* grapes. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 96, 372-377.
- Kuntoudakis N., Esteruelas M., Fort F., Canals J.M., Zamora F., 2011. Use of unripe grapes harvested during cluster thinning as a method for reducing alcohol content and pH of wine. *Australian J. Grape Wine Res.* 17 (2), 230-238
- Malheiro A.C., Santos J.A., Fraga H., Pinto J.G., 2010. Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Climate Research* 43, 163-177.
- Mira de Orduna R., 2010. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International* 43, 1844-1855.
- Mori K., Goto-Yamamoto N., Kitayama M., Hashizume K., 2007. Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *J Exp Bot* 58, 1935-1945
- Ollat N., Brisson N., Denoyes B., Garcia de Cortazar-Atauri I., Goutouly J.-P., Kleinhentz M., Launay M., Michalet R., Pieri P., Van Leeuwen C., 2013. Les activités agricoles. In : Le Treut H. (Ed.) *Prévoir pour agir, la région Aquitaine anticipe le changement climatique*. Presses Universitaires de Bordeaux, pp. 108-125.
- Ollat N., Fernandez L., Romieu C., Duchene E., Lissarague J.R., Lecourieux D., Ageorges A., Kelly M., Cacho J., Rivas J., Lamuela R., Goutouly J.-P., Van Leeuwen C., Marguerit E., Peccoux A., Barrieu F., This P., Lebon E., Pellegrino A., Martinez- Zapater J.M., Toregrossa L., 2011. Multidisciplinary research to select new cultivars adapted to climate changes. XVIIth International GIESCO August 29 - September 2 2011, Asti and Alba, Italy.
- Ollat N., Touzard J.-M., 2014. Impacts and adaptation to climate change – New challenge for the French wine industry. *Journal International des Sciences de la Vigne et du vin*. Special issue climate change. 75-78.
- Pangga I.B., Hanan J., Chakraborty S., 2011. Pathogen dynamics in a crop canopy and their evolution under changing climate. *Plant Pathol.* 60, 70-81.
- Pichery M.C., Bourdon F., 2007. Éléments de réflexion sur quelques impacts économiques du réchauffement climatique sur la filière vitivinicole en Bourgogne. Colloque "Global warming, which potential impacts on the vineyards ?". Dijon 28-30 mars 2007.
- Pieri P., 2010. Changement climatique et culture de la vigne: l'essentiel des impacts. In : Ademe (Ed) *Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces*. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010). pp. 213-223.
- Sadras V.O., Petrie P.R., Moran M.A., 2013. Effects of elevated temperature in grapevine. II juice pH, titratable acidity and wine sensory attributes. *Australian J. Grape Wine Res.* 19, 107-115.
- Sadras V.O., Moran M.A., 2012. Elevated temperature decouples anthocyanins and sugars in berries of Shiraz and Cabernet Franc. *Australian J. Grape Wine Res.* 18, 115-122.
- Salinari F., Giogue S., Rossi V., Tubiello F.N., Rosenweig C., Gullino M.L., 2007. Downy mildew outbreaks on grapevine under climate change. *Bulletin OEPP* 37, 317-326.
- Schultz H.R., 2000. Climate change and viticulture: a European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian J. Grape Wine Res.* 6, 2-12.
- Schultz H.R., Stoll M., 2010. Some critical issues in environmental physiology of grapevines: future challenges and current limitations. *Australian J. Grape Wine Res.* 16, 4-24.
- Seguin B., 2010. *Coup de chaud sur l'agriculture*. Ed. Delachaux et Niestlé, Paris. 206p
- Tarara J.M., Lee J., Spayd S.E., Scagel C.F., 2008. Berry temperature and solar radiation alter acylation, proportion, and concentration of anthocyanin in Merlot grapes. *Am. J. Enol. Vitic* 59, 235-247.
- Touzard J.-M., 2010a. Ancrage territorial et construction de règles dans une organisation. In : Muchnick J., De Sainte Marie C. (Eds), *Le temps des SYAL*, Versailles, éditions QUAE.

Touzard J.-M., 2010b. Innovation systems and the competition between regional vineyards. Symposium international ISDA 2010, Montpellier, 25 June-1 July 2010.

Van Leeuwen C., Bois B., Pieri P., Gaudillère J.-P., 2007. Climate as a terroir component. Congress on climate and viticulture, 10-14 April 2007, Zaragoza, Spain.

Van Leeuwen C., Schultz H., Garcia de Cortazar I., Duchêne E., Ollat N., Pieri P., Bois B., Goutouly J.-P., Quénot H., Touzard J.-M., Malheiro A., Bavaresco L., Delrot S., 2013. Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine producing areas by 2050. Proceedings of the National Academy of Science of the USA, 110 (33). 3051-3052.

Viguié V., Lecocq F., Touzard J.-M., 2014. Viticulture and adaptation to climatic change. Journal International des Sciences de la Vigne et du vin. Special issue climate change. 53-59.

Webb L.B., Whetton P.H., Barlow E.W.R., 2007. Modelled impact of future climate change on the phenology of grapevines in Australia. Australian J. Grape Wine Res 13, 165-175.