



HAL
open science

Le réchauffement climatique diminue-t-il le risque de dégâts par le gel pour les cultures de climat tempéré ?

Thierry Castel, Christophe Lecomte, Yves Richard, Isabelle Lejeune-Hénaut,
Annabelle Larmure

► To cite this version:

Thierry Castel, Christophe Lecomte, Yves Richard, Isabelle Lejeune-Hénaut, Annabelle Larmure. Le réchauffement climatique diminue-t-il le risque de dégâts par le gel pour les cultures de climat tempéré?. 27ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Jul 2014, Dijon, France. pp.271-277. hal-01117037

HAL Id: hal-01117037

<https://hal.science/hal-01117037v1>

Submitted on 14 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE DIMINUE-T-IL LE RISQUE DE DÉGÂTS PAR LE GEL POUR LES CULTURES DE CLIMAT TEMPÉRÉ ?

CASTEL T. ⁽¹⁾, LECOMTE C. ⁽²⁾, RICHARD Y. ⁽¹⁾,
LEJEUNE-HÉNAUT I. ⁽³⁾, LARMURE A. ⁽²⁾

(1) Centre de Recherches de Climatologie, UMR Biogéosciences 6282 CNRS, Université de Bourgogne, 6 bd Gabriel, 21000 Dijon, France [tcastel@u-bourgogne.fr ; yves.richard@u-bourgogne.fr]

(2) INRA, UMR 1347 Agroécologie, AgroSup-INRA, Université de Bourgogne, 17 rue Sully, 21000 Dijon, France [christophe.lecomte@dijon.inra.fr ; a.larmure@agrosupdijon.fr]

(3) INRA, UMR 1281 Stress Abiotiques et Différenciation des Végétaux cultivés, USTL-INRA, Estrées-Mons BP 50136, 80203 Péronne cedex, France [Isabelle.Lejeune@mons.inra.fr]

Résumé – Les réponses d'une culture d'hiver à l'augmentation des températures sont très complexes et variées. Dans un contexte de réchauffement, certains travaux pointent une augmentation paradoxale des dégâts du gel pour la végétation des climats froids et tempérés. Ces résultats nécessitent d'être précisés et élargis afin de documenter cette évolution pour les cultures d'hiver. Cinq séries complètes de températures quotidiennes (maximales et minimales) ont été analysées et alimentent un modèle de dégât du gel paramétré et validé pour le pois d'hiver (semis en automne). Ce modèle prend en compte l'acclimatation des plantes au froid (ou endurcissement), tout en permettant de changer la date de semis. La démarche a consisté à 1) caractériser la nature (amplitude, robustesse) du réchauffement, ce qui a permis l'identification de deux périodes (avant et après une rupture en 1987/1988) ; 2) simuler pour les mois d'octobre à mars les dégâts du gel en faisant varier la date de semis et les caractéristiques variétales de résistance-seuil au gel et de vitesse d'endurcissement ; 3) de quantifier l'évolution du risque par une modélisation simultanée de l'occurrence et de l'intensité des événements gélifs. Une augmentation moyenne de 1.1°C des températures annuelles est observée entre les deux périodes. Ce réchauffement entraîne paradoxalement une augmentation du nombre annuel moyen de jours de dégât de gel : de 3,5 à 4,5. Cette évolution est très sensible aux critères de résistance-seuil et de vitesse d'endurcissement. A l'opposé, l'intensité du risque décroît fortement de -14 à -6 degrés-cumulés avec une moindre sensibilité aux critères variétaux. Ces résultats suggèrent de nuancer l'effet paradoxal d'augmentation des dégâts par le gel avec le réchauffement climatique. Ils questionnent quant à l'évolution possible du risque en fonction des scénarios de changement climatique et des critères variétaux.

Mots-clés : climat, réchauffement, rupture, dégât gélif, endurcissement, cultures d'hiver.

Abstract – Does global warming reduce the freezing injury risk to temperate climate crops? Winter crop response to a temperature increase is complex. Recent works point out, for cold climate vegetation, a paradoxical increase in freezing injury in a warming climate. Complementary works are needed to support these results for winter crops in temperate areas. To achieve this goal, five climatic records spanning a fifty years-long period for both daily minimum and maximum temperatures were analyzed with a model predicting frost hardiness and freezing damage for the winter pea crop. The methodological approach was based on three main steps: 1) the climate warming analysis of the 1987/1988 temperature shift, 2) the simulation from October to March of the winter freezing damage for various dates of sowing and various levels of pea frost threshold-resistance and hardening rate and 3) the modelling of evolution of freezing injury risk by simultaneously taking into account occurrence and intensity of freezing damage. The results show a 1.1°C average increase of mean annual temperature between both periods (1961/1987 and 1988/2012). A paradoxical increase of average occurrence of freezing damage events from 3.5 to 4.5 days is associated to the climate warming with highest sensitivity to the pea varietal characteristics (hardening rate and frost threshold-resistance). An opposite trend from -14 to -6 degrees is observed for the average intensity of freezing damage events. This latter trend is less sensitive to the properties of the pea varieties. Our results suggest a cautious analysis of the freezing injury risk increase paradox related to the observed climate warming. Finally, how the freezing injury risk may be affected for the various climate warming trajectories projected the 21st century.

Keywords: climate, warming, shift, frost damage, hardiness, winter crops.

Introduction

Les effets du changement climatique sont le plus souvent abordés sous l'angle des extrêmes de températures maximales au travers des vagues de chaleur ou des périodes de sécheresse (Quesada *et al.*, 2012). Pourtant, dans un récent article de synthèse, Ball *et al.* (2012) avancent que le réchauffement climatique entraîne une augmentation des dégâts du gel pour la végétation naturelle des climats froids (e.g. montagnard, sub-arctique). Cette évolution est également observée pour les forêts de feuillus en climat tempéré avec une augmentation des risques de dégâts du gel printanier (Augspurger, 2013). Ce résultat, paradoxal en première approche, renvoie aux mécanismes complexes d'acclimatation au froid (ou endurcissement)

que la végétation développe pour résister aux températures gélives et qui nécessitent une exposition des plantes à de faibles températures (Kalberer *et al.*, 2006 ; Pagter and Arora, 2013). Ainsi, des fins d'automne, des hivers et des débuts de printemps plus doux peuvent perturber les processus d'acclimatation, voire entraîner des désacclimations en plein hiver ou en début de printemps. Ceci rend la végétation plus vulnérable au gel (Pagter and Arora, 2012), même si les valeurs extrêmes de ce dernier sont relativement réduites. Ces résultats observés sur la végétation naturelle varient fortement en fonction des espèces. Cela rend difficile la quantification de l'évolution du risque qui nécessite de combiner la vulnérabilité des plantes avec l'évolution de l'aléa gélif et interroge quant à l'ajustement de stratégies pour les cultures des régions tempérées afin de s'adapter au changement climatique (Zheng *et al.*, 2012). Dans ce travail, nous cherchons à documenter ce dernier point en nous appuyant sur le réchauffement climatique observé en Bourgogne depuis 1961 (Cuccia, 2014) et sur un modèle de dégât de gel (Lecomte *et al.*, 2003). L'objectif est de quantifier l'évolution du risque de dégâts du gel sur la culture du pois d'hiver en 1) proposant un modèle probabiliste du risque, 2) précisant la tendance en lien avec les modalités du réchauffement et 3) évaluant les dégâts selon trois critères de la culture : date de semis, caractéristiques variétales de résistance-seuil et de vitesse d'endurcissement.

1. Données et évolution des températures en Bourgogne depuis 1961

Cinq séries complètes de températures maximales (Tmax) et minimales (Tmin) journalières couvrant la période 1961-2012 ont été extraites du réseau des stations de Météo France et de l'INRA réparties sur la région Bourgogne (Fig. 1 A). Ces séries montrent au pas de temps annuel une rupture significative dans les années 1987-1988 (Fig. 1 B). Cette rupture est partagée par l'ensemble des stations, quoique non significative pour la station de Châtillon-sur-Seine. Cette rupture se retrouve sur l'ensemble de l'Europe de l'Ouest (de Laat and Crok, 2013) et fait l'objet de recherches pour en déterminer les mécanismes (Sutton and Dong, 2012). Cette évolution s'est accompagnée pour la Bourgogne d'un réchauffement annuel de 1.1°C en moyenne. En automne et en hiver, les Tmin ont en moyenne plus augmenté que les Tmax : +0.9°C/+0.35°C et +1.06°C/+0.97°C, respectivement.

La rupture de 1987/1988, observée sur les températures des cinq séries de Bourgogne, nous conduit à scinder les séries climatiques étudiées en deux périodes afin d'analyser les effets du réchauffement observé sur l'évolution des risques de dégât par le gel.

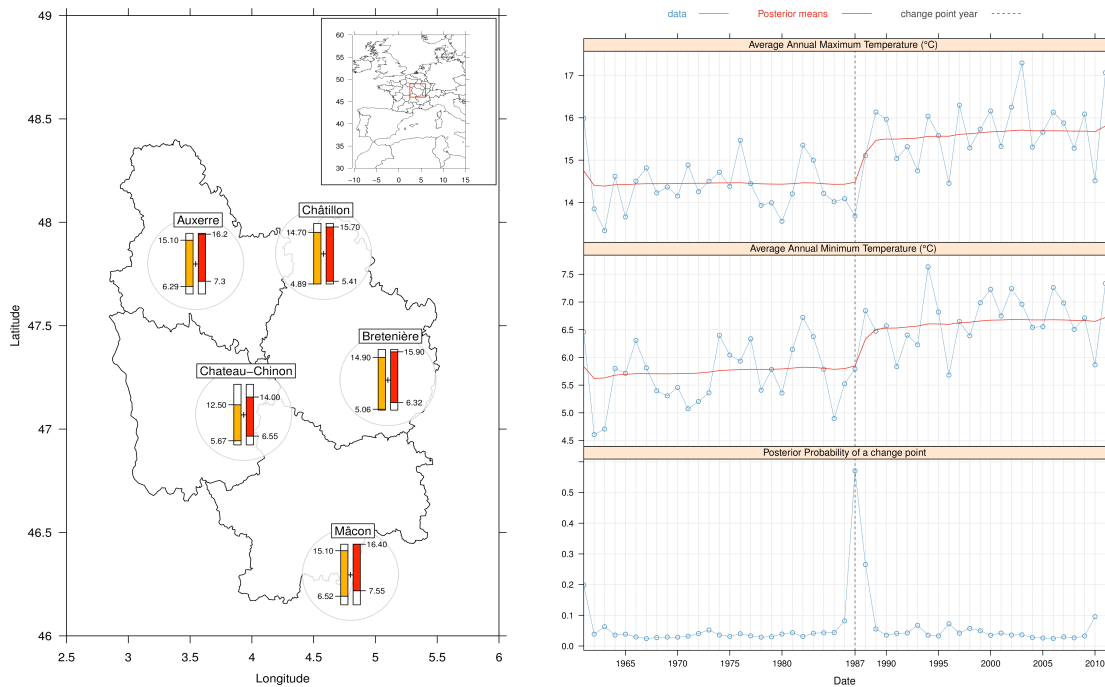


Figure 1 : gauche : Localisation et amplitudes moyennes des températures pour les périodes 1961-1987 (orange) et 1988-2012 (rouge) des cinq stations météorologiques ; droite : Variabilité des températures moyennes annuelles maximales (haut), minimales (milieu) et probabilité de présence d'une rupture (bas) calculée à partir d'une méthode bayésienne de détection de point de changement (Ruggieri, 2012)

2. Modélisation du risque de dégâts par le gel

La modélisation combine un modèle d'estimation des dégâts gélifs paramétré et validé pour le blé (Lecomte *et al.*, 2003), puis, pour diverses variétés de pois d'hiver, avec un modèle probabiliste d'occurrence simultanée du nombre et de l'intensité des événements gélifs. Le modèle de dégâts prend en compte l'acclimatation au froid (ou endurcissement) tout en permettant de changer la date de semis, et utilise les températures journalières minimales et moyennes comme variables d'entrée. La résistance effective (bornée par une valeur seuil dépendant de la variété) est calculée quotidiennement (trait plein vert de la figure 2).

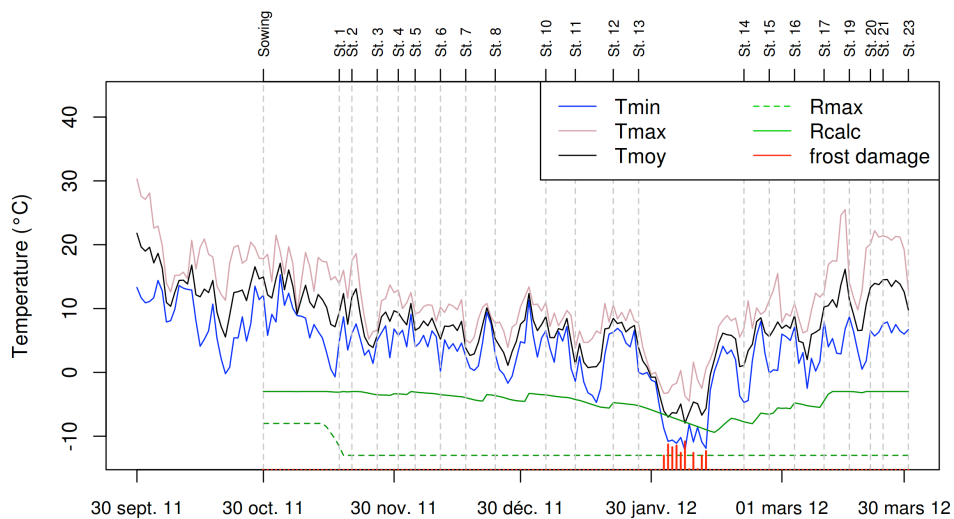


Figure 2 : Exemple d'application du modèle de calcul des dégâts du gel pour une variété de pois d'hiver avec une résistance-seuil de -13°C , une durée d'endurcissement de quarante-deux jours et une date de semis au 30 octobre 2011
Les barres rouges marquent les événements gélifs (nombre et intensité)

Les dégâts surviennent lorsque la température minimale passe sous la courbe de résistance effective (barres verticales rouges de la figure 2). Les dégâts gélifs exprimés en °C correspondent au cumul (nombre et intensité) de l'ensemble des événements survenus. La démarche a consisté à 1) calculer les dégâts du gel pour les mois d'octobre à mars de chaque période (avant et après 1987-1988) et de chaque station, 2) à simuler les dégâts en faisant varier la date de semis et les caractéristiques variétales de résistance-seuil et de vitesse d'endurcissement, pour un total de 480 situations et 3) à quantifier le risque de dégâts du gel avec l'ajustement d'un modèle de Tweedie (Dunn, 2004) pour chaque situation. Ce modèle mixte gamma-poisson permet d'ajuster simultanément des distributions d'événements rares avec inflation de zéros. Malgré des profils de distribution très différents, le modèle de Tweedie s'ajuste parfaitement aux histogrammes des dégâts gélifs (Fig. 3). Les distributions asymétriques des dégâts du gel montrent, selon les situations, une très forte variabilité allant de distributions à queues épaisses (cas des variétés à résistance-seuil faible de -8°C) à des distributions avec inflation de zéros (sans dégâts — cas des variétés à résistance-seuil élevée de -23°C). C'est à partir des fonctions de densité ajustées que le risque gélif (nombre et intensité) moyen par période est inféré. L'ajustement est significatif (test de Kolmogorov-Smirnov) pour l'ensemble des 480 situations étudiées (résultats non présentés).

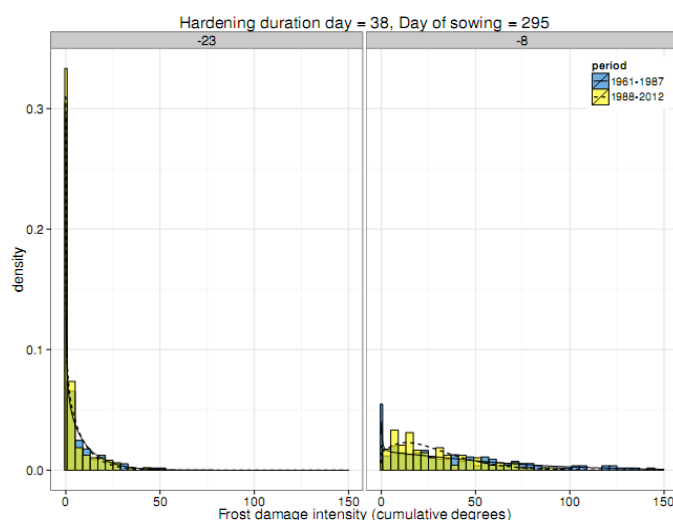


Figure 3 : Exemple de fonction de distribution de probabilité des dégâts du gel estimée (barres verticales) et ajustée par le modèle de Tweedie (traits) pour deux résistances-seuils avant et après réchauffement climatique

3. Évolution du risque de dégâts par le gel avec le réchauffement observé en Bourgogne

Le nombre de jours de dégâts augmente entre les deux périodes (Fig. 4). Il passe en moyenne de 3,5 à 4,5 jours par an. Cette augmentation significative ($p < 0.01$) du risque rejoint l'idée contre intuitive d'une augmentation des dégâts du gel avec le réchauffement (Ball *et al.*, 2012 ; Augspurger, 2013). Ce comportement peut être attribué à une perte de l'efficacité de l'acclimatation au froid avec des T_{min} plus chaudes. À l'opposé, l'intensité du risque (Fig. 4) décroît fortement — de -14°C à -6°C cumulés. Ces résultats suggèrent de nuancer l'effet paradoxal d'augmentation des dégâts par le gel avec le réchauffement climatique.

Ils montrent également l'importance de la décomposition du risque en termes d'occurrence et d'intensité. Ces deux critères ont probablement des effets différenciés sur la nature des dégâts gélifs et sur la croissance et la production des cultures. Enfin, il n'est pas envisageable de mimer les effets du réchauffement climatique sur des risques par un simple ajout de + 1°C aux températures mesurées sur la période 1961-1987. Dans ce cas, les tendances sont opposées à celles obtenues à partir des températures observées (barres grisées de la figure 4).

Ce résultat suggère que le réchauffement modifie profondément la variabilité climatique infrasaisonnaire, notamment dans la dynamique de transition des températures journalières.

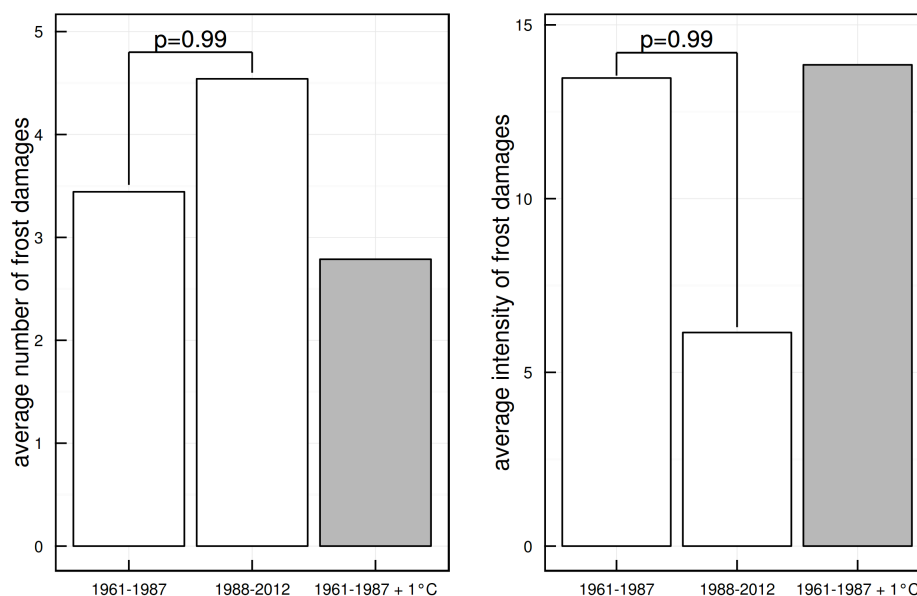


Figure 4 : Évolution du nombre moyen des événements gel et de l'intensité moyenne d'un événement avec le réchauffement climatique observé (barres blanches) et mimé (barres grisées)

La figure 5 présente, en fonction des dates de semis, des caractéristiques variétales de résistance-seuil et de durée d'endurcissement, la probabilité d'avoir une différence significative entre les distributions de dégâts dus au gel obtenues sur chacune des deux périodes climatiques. On constate que l'évolution du risque de dégâts du gel est très sensible aux critères de résistance-seuil et de durée d'endurcissement.

On observe, en revanche, une moins grande sensibilité à la date de semis à partir de début novembre (jour 304). Au-delà de cette date, la différence de risque de dégâts par le gel est systématiquement significative entre les deux périodes (valeurs inférieures à 0.05), excepté pour le seuil de résistance de -25°C pour lequel la probabilité d'avoir une différence significative dans l'évolution du risque de dégâts par le gel est modulée par la durée d'endurcissement. Pour les autres résistances-seuils, cette modulation n'est visible que pour les semis précoces. À l'opposé, pour une résistance seuil de -10°C , le réchauffement climatique change significativement le risque gélif à toutes les dates de semis, selon les tendances observées sur la figure 4. Ces résultats montrent clairement que l'évolution du risque gélif est pour partie contre-intuitive, non-homogène et variété-dépendante. Ces résultats suggèrent qu'il convient de distinguer les deux composantes du risque que sont l'occurrence des événements gélifs et leur intensité. Cette décomposition indique qu'avec le réchauffement observé, c'est la nature du risque qui a évolué. En effet, d'un nombre modéré de dégâts gélifs de forte intensité, on est passé au cours des deux dernières décennies à un plus grand nombre de dégâts de faible intensité. Cette évolution de *nature* module probablement les types de dégâts par le gel et doit être intégrée dans une perspective de mesure des impacts et de stratégie d'adaptation variétale (Olesen *et al.*, 2011 ; Zheng *et al.*, 2012) face au réchauffement climatique.

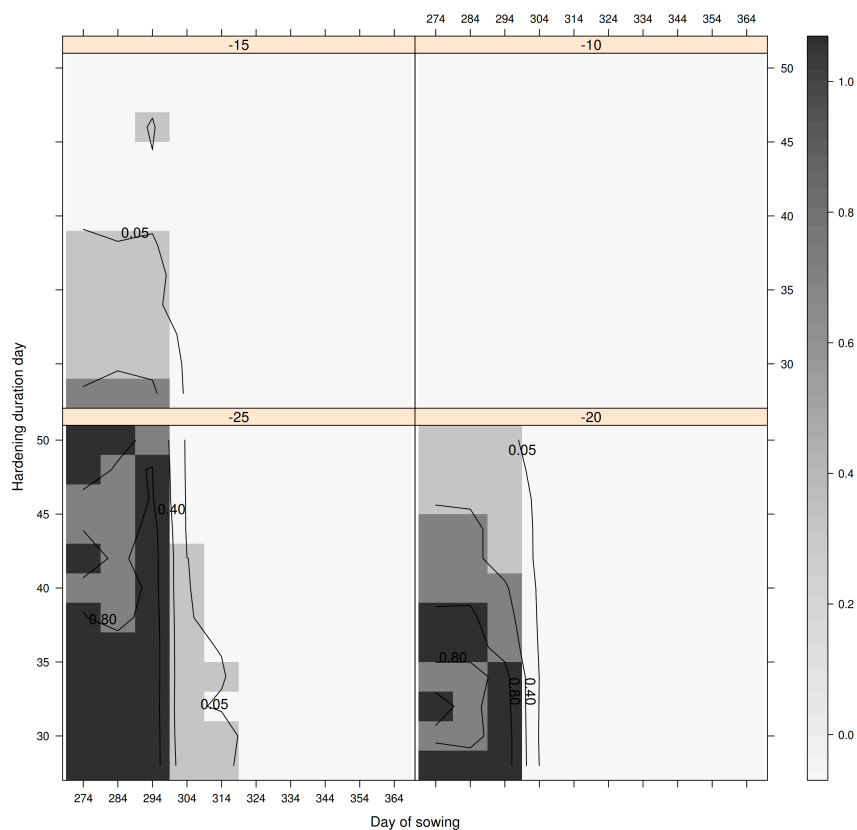


Figure 5 : Cartes de la probabilité d'avoir une différence significative entre les distributions calculées pour chaque période climatique en fonction des critères variétaux (endurcissement : hardening duration day ; résistance-seuil : frost resistance threshold) et des dates de semis (day of sowing). Une valeur de $p \leq 0.05$ indique une différence significative (test de Kolmogorov-Smirnov)

Conclusion et perspectives

Le réchauffement climatique observé en Bourgogne depuis 1961 s'est fait par le passage d'un palier à un autre avec une rupture en 1987-1988. Cette rupture est présente sur toute l'Europe de l'Ouest. Cela offre un cadre opportun pour analyser l'effet du réchauffement sur l'évolution du risque gélif entre ces deux périodes. Ce travail montre l'intérêt du modèle proposé pour le calcul du risque de dégâts par le gel sur les cultures, en permettant notamment de décomposer la variation du risque selon trois critères (la date de semis, la résistance-seuil et la vitesse d'endurcissement des variétés) qui seront utiles pour limiter les impacts du gel sur les cultures et pour orienter l'amélioration variétale. Enfin, ces résultats questionnent quant à l'évolution possible du risque en fonction des scénarios du changement climatique et des critères variétaux. Seules les simulations climatiques issues de modèles climatiques globaux et/ou régionaux intégrant explicitement la non-linéarité de la dynamique atmosphérique et les principaux forçages (e.g. océaniques, continentaux) peuvent permettre de traiter cette question (Xu *et al.*, 2012).

Références bibliographiques

- Auspurger C.K., 2013: Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing. *Ecology*, **94**(1), 41-50.
- Ball M.C., Harris-Pascal D., Egerton J.J.G., Lenné T., 2012: *The paradoxical increase in freezing injury in a warming climate: frost as a driver of change in cold climate vegetation*. CABI (H ISBN 9781845938222), Eds Storey K.B., Tanino K.K., chapter 12, 179-185.

- Cuccia C., Bois B., Richard Y., Parker A.K., Garcia de Cortazar-Atauri I., Van Leeuwen K., Castel T., 2014: Phenological model performance to warmer conditions: application to Pinot noir in Burgundy. *JIVV*, revised.
- De Laat A.T.J. and Crok M., 2013: A Late 20th Century European Climate Shift: Fingerprint of Regional Brightening? *Atmospheric and Climate Sciences*, **3**, 291-300.
- Dunn P.K., 2004: Occurrence and quantity of precipitation can be modeled simultaneously. *Int. J. Climatol.*, **24**, 1 231-1 239.
- Kalberer S.R., Wisniewski M., Arora R., 2006: Deacclimation and reacclimation of cold-hardy plants: Current understanding and emerging concepts. *Plant Science*, **171**, 3-16.
- Lecomte C., Giraud A., Aubert V., 2003: Testing a predicting model for frost resistance of winter wheat under natural conditions. *Agronomie*, **23**, 51-66.
- Olesen J.E., Trnka M., Kersebaum K.C., Skjelvåg A.O., Seguin B., Peltonen-Sainio P., Rossi F., Kozyra J., Micale F., 2011: Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, **34(2)**, 96-112.
- Pagter M. and Arora R., 2013: Winter survival and deacclimation of perennials under warming climate : physiological perspectives. *Physiologia Plantarum*, **147**, 75-87.
- Quesada B., Vautard R., Yiou P., Hirschi M. and Seneviratne S.I., 2012: Asymmetric European summer heat predictability from wet and dry southern winter and springs. *Nature Climate Change*, **2**, 736-741, DOI : 10.1038/NCLIMATE1536.
- Ruggieri E., 2012: A bayesian approach to detecting change points in climatic records, *Int. J. Climatol.*, **33(2)**, 520-528, DOI : 10.1002/joc.3447.
- Sutton R.T. and Dong B., 2012: Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s. *Nature Geoscience*, **5**, 788-792, DOI: 10.1038/NGEO1595.
- Xu Y., Castel T., Richard Y., Cuccia C. and Bois B., 2012: Burgundy regional climate change and its potential impact on grapevines. *Climate Dynamics*, **39**, 1 613-1 626.
- Zheng B., Chenu K., Fernanda Dreccer M., Chapman S.C., 2012: Breeding for the future: what are the potential impacts of future frost and heat events on sowing and flowering time requirements for Australian bread wheat (*Triticum aestivum*) varieties? *Global Change Biology*, **18**, 2 899-2 914.