



HAL
open science

Évolution retrospective du risque gélif hivernal en climat tempéré suite au réchauffement climatique

Thierry Castel, Christophe Lecomte, Yves Richard, Isabelle I. Lejeune-Henaut, Annabelle Larmure

► To cite this version:

Thierry Castel, Christophe Lecomte, Yves Richard, Isabelle I. Lejeune-Henaut, Annabelle Larmure. Évolution retrospective du risque gélif hivernal en climat tempéré suite au réchauffement climatique. Bourgogne-Franche-Comté Nature, 2019, 29, pp.325-334. hal-02185069

HAL Id: hal-02185069

<https://institut-agro-dijon.hal.science/hal-02185069v1>

Submitted on 20 Oct 2023

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.

Évolution retrospective du risque gélif hivernal en climat tempéré suite au réchauffement climatique

Thierry CASTEL¹, Christophe LECOMTE², Yves RICHARD¹, Isabelle LEJEUNE-HÉNAUT³
& Annabelle LARMURE²

Résumé

Les modalités du réchauffement climatique sur l'Europe de l'Ouest montrent pour les températures une rupture nette en 1987/1988. Deux régimes distincts de température ont eu cours de part et d'autre de cette rupture. Cela offre une opportunité pour évaluer un impact du réchauffement en Bourgogne-Franche-Comté. Peu de travaux documentent néanmoins les conséquences du réchauffement hivernal sur la végétation en général et les cultures en particulier. Pourtant, ces dernières années, des travaux suggèrent une augmentation du risque gélif présentée comme un effet paradoxal du réchauffement climatique. En combinant, sur la période 1958-2015, des données journalières et spatialisées de Météo-France avec un modèle de stress gel validé pour le pois d'hiver, nous avons étudié l'effet du réchauffement sur l'évolution du risque gélif sur cette espèce. Les résultats montrent que la diminution du stress gel observée suite à la rupture climatique masque une évolution subtile et opposée des deux composantes du risque que sont le nombre et l'intensité des événements stress-gel. L'augmentation du nombre d'événements gélifs supporte l'idée de « paradoxe » du réchauffement, tandis que la forte diminution de leur intensité est plus conforme à l'idée que l'on se fait des effets du changement climatique. Le mécanisme d'acclimation des plantes au gel et la structure de l'aléa climatique « gel » sont des éléments clés pour comprendre l'évolution du risque gélif hivernal en contexte de réchauffement. Nos travaux apportent des réponses sur les stratégies culturales et d'amélioration variétale à privilégier pour s'adapter aux changements climatiques projetés.

Mots-clés : climat, réchauffement abrupt, hivernal, risque gélif, acclimation.

Past evolution of winter frost risk due to warming in a temperate climate

Abstract

An abrupt warming shift of the surface temperature around 1987/1988 has been documented for the western part of Europe. The arising of two consecutive surface temperature climates offers opportunity to assess the warming impacts over the Bourgogne-Franche-Comté area. Few studies focus on the winter warming effects on vegetation and crops. Recent studies suggest however a paradoxical increase of frost damage in a warming climate. Based on the combination of a Meteo-France climate dataset with a winter frost stress model calibrated for pea, we assessed the winter frost damage evolution along from 1958-2015. Even if frost stress is decreasing at a whole after the temperature shift, subtle and opposite trends of the number and intensity of frost events are showed. The significant increase on the frost stress events partially supports the paradox of climate warming. The large frost stress intensity decrease displays a more intuitive evolution following the warming. The plant acclimation mechanism with the structure of the climate hazards are keys components in the assessment of winter warming impacts evolution. This work highlights the breeding and crop strategy for winter pea for adaptation purpose in the current and projected context of climate change.

Key words : climate, warming shift, winter, frost risk, acclimation.

¹ Centre de Recherches de Climatologie, UMR Biogéosciences 6282 CNRS - Université de Bourgogne Franche-Comté - 6 Boulevard Gabriel - 21000 Dijon, France - tcastel@u-bourgogne.fr

² UMR 1347 Agroécologie AgroSup Dijon, INRA - Univ. Bourgogne Franche-Comté - 21000 Dijon Cedex, France

³ USC 1411 Institut Charles Viollette - Adaptation au Froid du Pois, INRA, Estrées-Mons - BP 50136 - 80203 Péronne Cedex, France

1. Introduction

Les modalités du réchauffement climatique montrent des spécificités régionales dont il convient de tenir compte pour l'évaluation des impacts et la mise en place de stratégies d'adaptation. Il a été observé pour la façade ouest de l'Europe et la France en particulier une rupture nette et généralisée pour les températures de surface autour des années 1987/1988 (REID *et al.*, 2016 ; BRULEBOIS *et al.*, 2015). Ce changement abrupt s'est accompagné d'un réchauffement moyen de la température de surface (i.e. température à 2 mètres au-dessus du sol) de plus de 1 °C à l'échelle par exemple de

la Bourgogne-Franche-Comté (RICHARD *et al.*, 2014). Si elle ne s'est pas accompagnée d'un changement net sur les précipitations, ce réchauffement signe depuis les années 1960 la succession de deux climats pour le régime des températures. Cette succession offre l'opportunité 1) d'analyser les ressorts du changement climatique et 2) d'évaluer rétrospectivement les impacts du réchauffement sur différents compartiments de la biosphère (éco-, sylvo-, hydro-, agro-systèmes). Le présent travail qui concerne ce deuxième aspect articule des données climatiques et un modèle d'impact. Les métriques d'impact qui intègrent un large spectre de signaux climatiques s'avèrent bien adaptées pour tester notre capacité à correctement évaluer plusieurs facettes de la variabilité et du changement climatique (géographie, cycles, variabilité), pour de multiples variables clés (température, précipitations, rayonnement, évapotranspiration, humidité, vent etc.), et ce, au pas de temps journalier et à l'échelle des territoires (de quelques dizaines à quelques milliers de km²).

Sous nos latitudes, et en France en particulier, la majorité des travaux sur les impacts (e.g. coup de chaud, vague de chaleur, sécheresse) se concentrent sur la saison chaude (printemps et été). En revanche, peu de travaux s'intéressent aux conséquences du réchauffement automnal et hivernal. Si ce dernier est de plus faible ampleur (BRÛLEBOIS *et al.*, 2015, RICHARD *et al.*, 2014, TERRAY & BOÉ, 2013) et avec théoriquement moins d'effets directs sur la végétation (période de dormance), de récents travaux (BALL *et al.*, 2012) avancent pour les latitudes et altitudes élevées aux climats tempérés, montagnard à alpin et sub(ant)arctiques une possible augmentation des dégâts gélifs. Cette idée, initialement avancée par CANELL & SMITH (1986), suggère pour les (agro) écosystèmes de ces régions des modifications de leur vulnérabilité vis-à-vis du stress gel. Ainsi la végétation serait potentiellement plus sujette à subir des dégâts lors des basses températures (i.e. températures minimales). Cet effet, qualifié par ces auteurs de « paradoxe » du climat qui se réchauffe (BALL *et al.*, 2012), recouvre différentes situations. Une première concerne la modification du risque gélif printanier en lien avec une plus grande précocité des stades phénologiques. Par exemple, un arbre fruitier qui débouffe précocement sera vulnérable au gel de fin d'hiver (MENZEL *et al.*, 2006). Une augmentation de ces dégâts gélifs printaniers est depuis quelques années documentée en forêt (AUSPURGER, 2013 ; BIBLER & BUGMANN, 2018), en arboriculture et sur des herbacés (GU *et al.*, 2008) et plus récemment sur la vigne (MEIER *et al.*, 2018) avec pour cette dernière des tendances opposées, en fonction notamment de la localisation du vignoble. La deuxième situation concerne les dégâts gélifs hivernaux suite à la perturbation dans ce cas du mécanisme d'acclimatation. L'acclimatation des végétaux aux conditions de froid extrêmes s'appuie sur une exposition (progressive et continue) aux basses températures accompagnée d'une réduction de la photopériode (HÄNNINEN, 2006). Cette phase d'endurcissement conduit la plante à un état qui permet sa résistance/survie face aux températures minimales gélives hivernales. Des automnes et des hivers moins frais peuvent donc conduire à i) un moins bon niveau de résistance acquise, ii) retarder le processus d'acquisition de la résistance (i.e. vitesse d'acclimatation), iii) la dé-acclimatation au cœur de l'hiver et iv) accélérer la dé-acclimatation en sortie d'hiver. Isolées ou combinées, ces quatre possibilités aboutissent inéluctablement à une vulnérabilité accrue face à l'aléa climatique (vagues de gel). En climat sub-antarctique, une diminution de la résistance au gel a été observée (SIERRA-ALMEIDA *et al.*, 2018). En zone alpine, l'augmentation des dégâts gélifs est liée à une dé-acclimatation et à une fonte de neige précoce (RIXEN *et al.*, 2012). Ces résultats, qui appuient l'hypothèse d'une modification du risque gélif avec le réchauffement, sont obtenus principalement sur des climats froids « extrêmes ». Qu'en est-il en climat tempéré ?

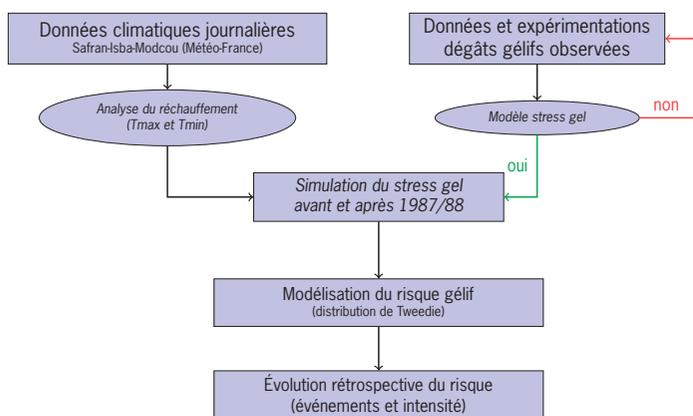
Peu de travaux sont conduits sur l'évolution du risque gélif hivernal en climat tempéré. Pourtant, la vague de gel soudaine de l'hiver 2011/2012, survenue à partir de la fin janvier jusqu'à la mi-février 2012 sur l'Europe (WMO, 2013), a généré d'importants dégâts. Les cultures de pois, de blé tendre et d'orge d'hiver du Centre-Est/Nord-Est de la France ont souvent dû être re-semées. Des dégâts de gel ont également été reportés pour les forêts du Grand-Est (Bulletin de bilan de la santé des forêts – http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/4p_ge_2016_v4.pdf). Cette vague de gel soudaine, intense et limitée dans le temps, survenue au cours d'un hiver plus doux que la moyenne, a surpris par l'ampleur de ses conséquences. Avec une moyenne de -5 °C sur 13 jours pour la température minimale et des minima locaux autour de -13 °C, les caractéristiques

climatiques de cet épisode ne permettent pas à elles seules d'expliquer l'ampleur des dégâts. Les variétés cultivées ainsi que les essences forestières étant susceptibles de résister à ces extrema, cela suggère clairement une plus grande vulnérabilité des plantes. S'agit-il d'un événement isolé ou d'une tendance de fond en lien avec le réchauffement climatique ?

En nous appuyant sur la succession des deux régimes de température observés au cours des 60 dernières années (RICHARD *et al.*, 2014 ; BRULEBOIS *et al.*, 2015) et sur un modèle de stress gel paramétré et validé pour le pois d'hiver (LECOMTE *et al.*, 2003 ; CASTEL *et al.*, 2017), nous proposons de traiter cette question. Nous présenterons tout d'abord l'approche méthodologique et les données mobilisées. Les principes du modèle de stress gel seront ensuite exposés autour de l'épisode gélif de l'hiver 2011/2012. La partie suivante présentera les résultats d'évolution des températures hivernales et du stress gel depuis la fin des années 50. Les modifications du risque gélif suite au réchauffement climatique hivernal seront enfin présentées. La dernière partie exposera les principales conclusions de ce travail.

2. Démarche, données climatiques et modèle de « stress gel »

La démarche méthodologique utilisée est calquée sur celle présentée par CASTEL *et al.* (2017). Dans le cas présent, les données climatiques utilisées sont les données SIM (Safran-Isba-Modcou – SOUBEYROUX *et al.*, 2008) de Météo-France. La démarche mise en œuvre a permis d'estimer les deux composantes du risque que sont le nombre moyen et l'intensité moyenne des événements « stress gel ». La figure 1 présente le diagramme des principales étapes de cette démarche et leur articulation. La chaîne hydrométéorologique SIM a été validée sur la France entière (QUINTANA-SEGUI *et al.*, 2008). Les données produites sont disponibles au pas de temps journalier et sur une maille continue de 8 km de résolution. Safran (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) fournit, à partir de la base de données climatologique de Météo-France et des produits de ré-analyse grande échelle du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF – DEE *et al.*, 2011), les principales variables climatiques (e.g. températures, précipitation, rayonnement) utilisées par la chaîne SIM.



Nous avons extrait les températures minimales et maximales des mailles Safran qui couvrent l'ensemble de la région Bourgogne-Franche-Comté sur la période allant d'octobre 1958 à mars 2015. Ces chroniques de températures ont permis i) d'analyser les modalités du réchauffement pour une période hivernale élargie (octobre à mars) et ii) d'alimenter le modèle de « stress gel » développé et validé pour différentes variétés de pois d'hiver (LECOMTE *et al.*, 2003 ; CASTEL *et al.*, 2017).

Figure 1. Diagramme de flux de la démarche méthodologique mise en place pour ce travail. Les données Safran-Isba-Modcou (SIM) proviennent de la chaîne hydrométéorologique de Météo-France (SOUBEYROUX *et al.*, 2008). Les données des dégâts gélifs utilisées pour paramétrer et valider le modèle de stress gel proviennent de sites expérimentaux de l'INRA situés à Chau-des-prés (Jura) à 900m d'altitude et un réseau de 13 essais de 2001 à 2005 comportant 5 sites (Clermont-Ferrand, Dijon, Colmar, Lusignan, Mons). La validation du modèle est présentée dans CASTEL *et al.* (2017). La modélisation du risque gélif est basée sur la distribution de Tweedie (DUNN, 2004) qui permet de modéliser simultanément l'occurrence et l'intensité des événements stress gel (CASTEL *et al.*, 2014).

L'analyse a d'abord consisté à caractériser l'évolution des températures moyennes et minimales journalières (utilisées par le modèle de stress gel) dont la moyenne a été calculée sur la période hivernale étendue (octobre à mars). Le stress gel a ensuite été calculé pour chaque maille sur l'ensemble de la période (57 hivers) à partir de ces températures. Le modèle permet le calcul pour différents traits culturaux et variétaux du pois d'hiver. Les configurations retenues (tableau I) couvrent 64 situations possibles pour la culture du pois d'hiver en Bourgogne-Franche-Comté.

Tableau I : Gamme des valeurs retenues pour les principaux critères variétaux et culturaux afin de simuler le stress gel du pois d'hiver en région Bourgogne-Franche-Comté. Cette gamme représente 64 situations pour la culture du pois.

Critères variétaux & culturaux	Gamme des valeurs
Résistance-seuil (°C)	-13 et -23
Vitesse d'acclimatation (jours)	35 .. 49 par 2 jours
Date du semis (jours)	2, 10, 21 et 31 oct.

En combinant les simulations de chacune de ces 64 situations pour les 57 hivers de la période 1958-2015 et les 751 mailles des données climatiques (permettant de couvrir la totalité de la région) un total de ~ 2,75 10⁶ calculs de stress gel est effectué. L'analyse statistique et l'estimation probabiliste du risque gélif ont été conduites à partir de cette « population » des résultats de stress gel en les découpant selon la période climatique (avant et après 1987/88) et/ou selon la localisation géographique (i.e. par maille). L'occurrence et l'intensité du stress gel sont estimées simultanément par l'ajustement des distributions de Tweedie (DUNN, 2004). CASTEL *et al.* (2014) ont montré que cette fonction de densité de probabilité était bien adaptée pour ajuster les distributions du stress gel qui sont bornées en zéro, fortement asymétriques avec des queues de distribution plus ou moins épaisses. Notons que, suivant les situations, ces distributions peuvent également afficher un nombre important de situations sans stress gel (i.e. une inflation de 0).

3. Principes du modèle de « stress gel »

Les principes du modèle de stress gel pour le pois d'hiver sont hérités du travail initialement conduit sur le blé (LECOMTE *et al.*, 2003). La paramétrisation du modèle concerne : l'identification des stades foliaires clés, l'estimation du niveau de la résistance seuil (i.e. maximale) et de la gamme de vitesse d'acclimatation, le rythme d'émission des feuilles ou encore la somme des températures à la levée. Le choix des paramètres et leur ajustement sont basés sur les connaissances de l'écophysiologie du pois et sur les expérimentations conduites sur les deux sites expérimentaux en Bourgogne-Franche-Comté et en France (Chaux-des-prés dans le Jura et réseau de 5 sites cf. légende de la figure 1). Dans le modèle, le climat pilote l'acclimatation et le stress via les températures journalières moyennes et minimales. La figure 2 résume le fonctionnement du modèle et permet d'illustrer la situation de stress gel simulé pour l'hiver 2011/2012. La plante est considérée en situation de stress lorsque la courbe des températures minimales (trait bleu continu) croise la courbe de la résistance effective (trait vert continu). Le stress gel correspond alors à la valeur cumulée (exprimée en degrés-jours) de la différence entre la valeur de résistance effective et la valeur pour le même jour de

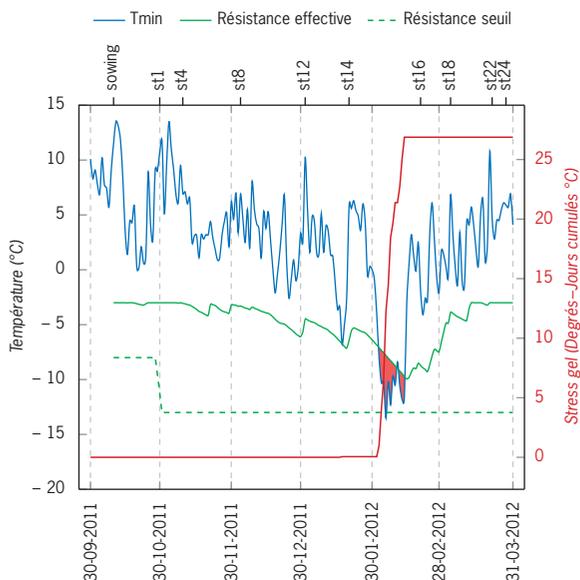


Figure 2. Fonctionnement du modèle de stress gel. La simulation porte sur une variété de pois avec une résistance seuil de -13 °C, une vitesse d'endurcissement de 42 jours, et un semis le 10 octobre 2011. La simulation est réalisée pour les conditions climatiques de Bretenière durant l'hiver 2011/2012. La courbe continue bleue représente l'évolution journalière des températures minimales. Les courbes vertes (continu et tireté) représentent respectivement les résistances maximale et effective du pois. Cette dernière peut être vue comme le niveau de vulnérabilité du pois. La courbe continue rouge indique le niveau du stress gel. Le pois est considéré en stress gel à chaque fois que la courbe bleue croise la courbe verte continue. La surface rouge correspond au stress gel cumulé exprimé en degrés-jours. C'est cette valeur qui sert d'indicateur du niveau de stress gel subi par les plantes.

la température minimale (zone en rouge). Il a été montré que cette valeur de stress gel était significativement corrélée aux dégâts gélifs observés au champ. En d'autres termes, le stress gel est un bon proxy des dégâts gélifs (CASTEL *et al.*, 2017).

La figure 2 permet également d'illustrer l'importance du mécanisme d'acclimation. En effet, la simulation montre que la survenue du stress gel et son amplitude sont déterminées par une résistance effective plus faible que la résistance seuil possible pour cette variété. Cette résistance effective peut être interprétée comme un indicateur du niveau de vulnérabilité au stress gel des plantes. Lors de cet épisode, la plus grande vulnérabilité du pois combinée à la survenue de l'épisode gel soudain est la cause première du fort niveau du stress gel et des importants dégâts associés. Notons que si le niveau de la résistance seuil avait été atteint les pois n'auraient subi qu'un très léger stress gel.

Le niveau d'acclimation a été perturbé par des températures moyennes journalières douces en fin d'automne et durant les mois de décembre et de janvier. Avec le réchauffement climatique, ce type de situation est susceptible de devenir plus fréquent. Le modèle de stress gel – qui permet de caractériser dynamiquement la vulnérabilité – combiné à l'évolution des températures (i.e. aléa climatique) offre un moyen d'évaluer et d'analyser l'évolution du risque gélif hivernal en contexte de changement.

4. Résultats

4.1. Évolution des températures et du stress gel

La figure 3A présente l'évolution inter-annuelle des moyennes des températures journalières minimales et moyennes calculées sur la période hivernale élargie et pour l'ensemble des mailles. Nous retrouvons pour les températures moyennes journalières une augmentation nette autour de 1987/1988. Ce signal de rupture est toutefois moins fort que pour le printemps et l'été. Pour les températures minimales, il n'y a pas de rupture. Une augmentation des températures minimales de 0,4 °C est mesurée entre les périodes avant et après 1987/1988 alors que pour les températures moyennes cette augmentation est de 0,83 °C.

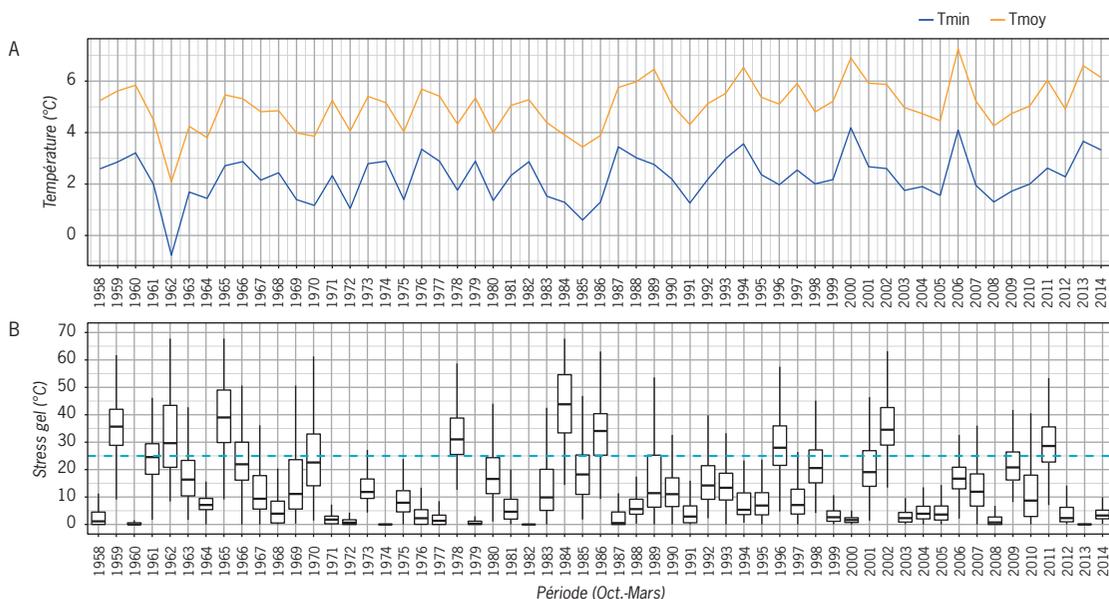


Figure 3. A) Évolution inter-annuelle des moyennes calculées sur la période hivernale étendue pour les températures minimales et moyennes journalières des 751 mailles. B) Évolution inter-annuelle du stress gel présentée sous la forme de boîte à moustaches qui résume la distribution du stress gel calculé pour une variété avec une résistance seuil de -13 °C et pour les 751 mailles. Le trait plein horizontal du milieu de la boîte correspond à la médiane alors que les traits horizontaux qui délimitent la boîte correspondent au 1^{er} et au 3^e quartile. La limite basse des « moustaches » correspond au 1^{er} percentile tandis que la limite haute correspond au 99^e percentile. Le trait tiré bleu, positionné à 25 degrés-jours, marque la limite entre les dégâts modérés/sévères et les dégâts sévères/létaux.

L'augmentation des températures moyennes est donc principalement portée au cours de cette période par l'augmentation des températures maximales. La figure 3B met en parallèle l'évolution inter-annuelle du stress gel calculée pour chaque maille. On observe tout d'abord que, suite au réchauffement, il n'y a pas de chute marquée du stress gel si ce n'est une diminution du nombre d'années avec des stress dépassant les 25 degrés-jours (ligne bleue tiretée) i.e. moins de stress forts entraînant des dégâts sévères à létaux. Le nombre d'années avec des stress gels nuls ou très faibles a également tendance à diminuer. Cette dernière évolution indique, suite au réchauffement, moins d'années sans stress. Ceci, en première approche, peut sembler surprenant. Avec le réchauffement apparaît un signal contrasté dans l'évolution du stress gel à l'échelle de la région. Notons pour l'hiver 2011/2012 un fort stress gel d'amplitude équivalente à ceux observés avant le réchauffement alors que les températures minimales et moyennes sont au-dessus des normales. Ces résultats montrent que non seulement il n'y a pas de tendance à la disparition, mais au contraire plus d'hivers avec du stress gel sur la culture.

4.2. Modification du risque gélif

La figure 4 qui présente les distributions du stress gel par période et pour les deux résistances seuil confirme cette évolution avec une diminution des forts stress et une augmentation des petits stress et du nombre d'années avec du stress. Ces résultats rejoignent ceux obtenus précédemment (CASTEL *et al.*, 2017). Un comportement similaire est observé pour les deux résistances seuil avec quelques nuances. Tout d'abord l'augmentation (diminution) s'opère pour les deux résistances -13 °C et -23 °C aux alentours de valeurs de stress différentes : 25 et 15 degrés-jours respectivement. Pour les fortes résistances seuil ce sont uniquement les petits stress entraînant des dégâts modérés qui ont augmenté alors que pour les variétés à résistance seuil plus faible ce sont à la fois les stress gels faibles et intermédiaires qui augmentent. Ces derniers peuvent conduire à des dégâts sévères sur les plantes. Ce qui est plus surprenant c'est le fait qu'avec le réchauffement, le nombre d'hivers sans stress ou à stress très faible (entre 0 et 5 degrés-jours) diminue.

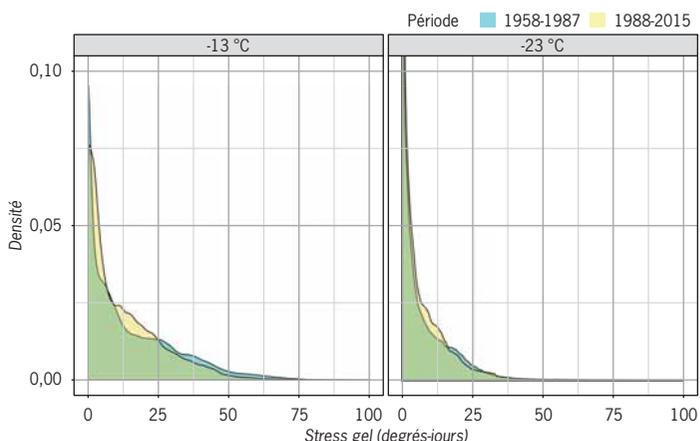


Figure 4. Distributions du stress gel avant et après 1987/1988 pour les résistances seuils de -13 °C et -23 °C pour toutes les dates de semis et pour l'ensemble des vitesses d'endurcissement (i.e. acclimatation). La surface verte correspond à la surface commune aux deux distributions. La couleur cyan indique une plus forte probabilité que les stress gels surviennent durant la période 1958/1987 alors que la couleur jaune indique une plus forte probabilité d'avoir du stress pour la période 1988/2015.

En d'autres termes, la probabilité d'occurrence d'hiver sans stress ou à stress très faible diminue (cyan, figure 4). Le changement observé dans les distributions du stress gel suggère donc une évolution subtile et en partie contre-intuitive. Le stress gel est une combinaison de processus discrets et continus. Le processus discret renvoie à la probabilité qu'il y ait ou pas stress tandis que le processus continu est la probabilité d'avoir une valeur de stress donnée. Pour affiner l'analyse nous avons utilisé la distribution de Tweedie qui permet de modéliser simultanément l'occurrence et l'intensité d'événements résultant de ce type de combinaison de processus (DUNN, 2004 ; CASTEL *et al.*, 2014). Ce modèle a été appliqué pour chaque période avant et après 1987/1988, pour chaque maille, pour les deux résistances seuil et pour toutes les configurations de date de semis et de vitesse d'acclimatation confondues. Les résultats sont présentés à la figure 5 avec au premier plan l'évolution du nombre des événements moyen par hiver. On constate une augmentation d'événements gélifs avec le réchauffement d'autant plus importante que la résistance seuil est faible. Ainsi pour -13 °C de résistance seuil on passe d'une moyenne d'environ 2 jours

de stress gel par hiver au cours de la période 1958-1987 à presque 3 jours par hiver au cours de la période 1988-2015.

L'augmentation est moins importante pour $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ de résistance seuil mais suit la même tendance. Dans les deux cas cette augmentation est statistiquement significative. À l'opposé, on observe une diminution significative de l'intensité moyenne d'un événement (encart de la figure 5) et cela pour les deux résistances seuil. Là aussi la diminution est plus marquée pour $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ de résistance seuil. Ces résultats confirment la modification de la structure du risque gélif suite au réchauffement. Ils permettent également de montrer que le risque gélif ne disparaît pas. Il augmente même en fréquence. Néanmoins son intensité diminue. Depuis 1988, il devrait donc y avoir moins de dégâts létaux et plus de dégâts modérés. Ceci serait à valider avec des données au champ.

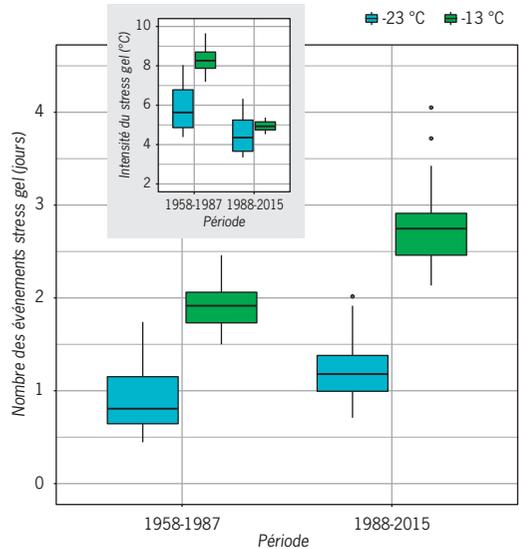


Figure 5. Au premier plan les boîtes à moustaches qui présentent l'évolution de la moyenne du nombre d'événements gélifs entre les deux périodes et pour chaque résistance seuil $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ (couleur verte) et $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (couleur cyan). L'encart au deuxième plan présente l'évolution de l'intensité moyenne d'un événement. Ces variables ont été estimées après ajustement des distributions de Tweedie.

4.3. Carte de l'évolution du risque

Ces résultats obtenus à l'échelle de la région Bourgogne-Franche-Comté masquent des différences infra-régionale qui sont présentées en figure 6. La carte d'évolution de la moyenne du nombre d'événements gélifs montre une augmentation quasi-généralisée

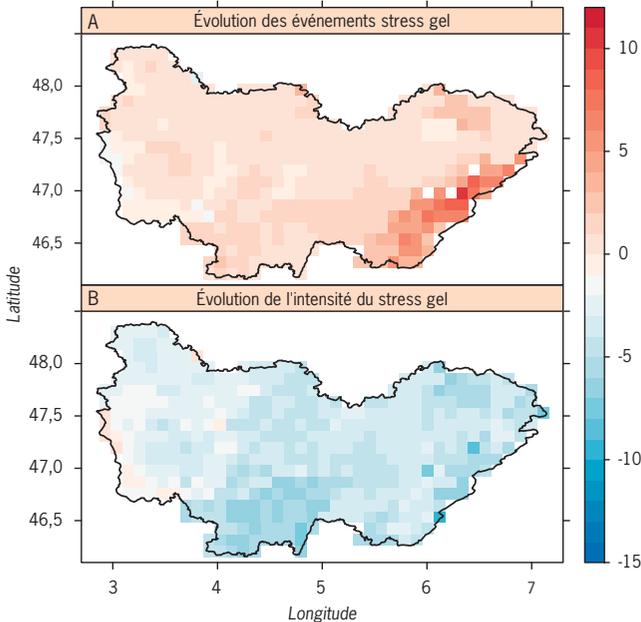


Figure 6. Carte de l'évolution (i.e. différence) de la moyenne A) du nombre des événements gélifs entre les périodes avant et après 1987/1988. B) de l'intensité moyenne des événements.

sur la région excepté sur une petite portion de sa frange occidentale (bordure de la Nièvre). Les plus fortes augmentations sont localisées sur les reliefs du Jura, des Vosges et, dans une moindre mesure, du Morvan. Pour les cultures, l'évolution marquée sur ces espaces ne porte pas à conséquence, car ce sont des zones presque exclusivement boisées ou en prairies. Par contre cela indique, pour ces espaces montagnards, une forte modification du risque de stress gel qui a ou aura des conséquences potentielles sur la végétation naturelle de ces zones. Si les mécanismes d'acclimation de cette dernière sont, aux valeurs de résistance seuil et de vitesse d'acclimation près, peu ou prou similaire à ceux mis en place par les cultures, les risques de dégâts gélifs possiblement sévères restent présents voire sont susceptibles d'augmenter.

Nous pouvons également observer que l'augmentation du nombre d'événements gélifs est globalement plus forte dans le sud de la région notamment en Saône-et-Loire, au sud de la Côte-d'Or et sur la plaine sud du département du Jura. La géographie de l'évolution de l'intensité moyenne des événements gélifs montre une diminution quasi généralisée (figure 6B), excepté là aussi pour une petite partie de la frange occidentale. On ne retrouve pas de structuration liée au relief même si les plus fortes diminutions sont localisées sur quelques mailles du Jura. La Saône-et-Loire affiche une plus forte diminution sur sa partie sud. La carte fait apparaître une organisation spatiale plus complexe qui semble être beaucoup plus liée aux spécificités climatiques locales qui déterminent l'organisation spatiale des températures minimales (ZHENG *et al.*, 2015). Ces éléments plaident pour une prise en compte des spécificités des territoires afin de caractériser le risque gélif hivernal.

5. Conclusion

Les résultats de cette étude confirment partiellement le paradoxe d'une augmentation du risque gélif de la végétation associé au climat qui se réchauffe tel qu'avancé par BALL *et al.* (2012). Si ce paradoxe a été documenté pour les risques gélifs printaniers sur la forêt (AUSPURGER, 2013 ; RIGBY & PORPORATO, 2008 ; RAMMIG *et al.*, 2010), la culture du blé (GU *et al.*, 2008 ; ZHENG *et al.*, 2015) ou la vigne (MEIER *et al.*, 2018) très peu de travaux présentent l'évolution hivernale de ce risque. Les dégâts de gel hivernaux sont déterminés par la température qui pilote les processus d'acclimatation et de dé-acclimatation (KALBERER *et al.*, 2006 ; PAGTER & ARORA, 2013). Ce processus clé pour acquérir la résistance au gel est modulé par la vitesse d'acclimatation (RAMMIG *et al.*, 2010) et la date de semis (ZHENG *et al.*, 2012). Une température plus chaude en hiver provoque une diminution de la résistance au gel par une moins bonne acclimatation. Cela peut expliquer l'augmentation simulée du risque de stress gel, malgré un réchauffement. Comme le réchauffement concerne plus les températures diurnes (ou maximales) qui pilotent l'acclimatation, la vulnérabilité a été plus fortement modifiée que l'aléa climatique. Ainsi la faible augmentation de la température minimale combinée à une plus grande vulnérabilité est probablement à l'origine du plus grand nombre d'événements gélifs. Des hivers moins « rudes » en termes d'extrema des températures minimales ont conduit d'un autre côté à une baisse de l'intensité du stress gel. La balance est en faveur d'une diminution globale de la valeur moyenne du stress gel en lien avec la forte diminution de l'intensité des événements. Toutefois, cela masque une évolution subtile et complexe du risque gélif. Cette complexité est le fruit d'un équilibre dynamique et d'une combinaison intime entre les traits de la culture et ceux du climat. La géographie de l'évolution du risque gélif en est une des illustrations et plaide pour produire une information climatique régionalisée à l'échelle des territoires. La régionalisation des climats projetés est un pré-requis pour 1) évaluer les impacts des changements climatiques 2) orienter les stratégies d'adaptation (e.g. sélection variétale combinant seuil de résistance élevé et vitesse d'acclimatation rapide) et 3) proposer des actions à l'échelle des territoires.



Thierry CASTEL

Climatologue, il est enseignant-chercheur à AgroSup Dijon et chercheur associé à l'UMR 6282 Biogéosciences CNRS/UBFC dans l'équipe Centre de Recherches de Climatologie. Ses travaux portent sur la régionalisation climatique et l'impact du changement climatique sur les agro-, hydro- et silvo-systèmes.



Christophe LECOMTE

Agronome et Améliorateur de plantes, ingénieur de Recherches à l'INRA de Dijon, UMR 1347 « Argoécologie », équipe « Génétique et déterminismes Environnementaux de l'Adaptation des Plantes aux Systèmes de culture Innovants » (GEAPSI). Il travaille sur les causes d'instabilité et les facteurs limitants de la production du pois protéagineux, qu'il caractérise et quantifie. Parmi ces facteurs, il travaille plus spécifiquement sur la résistance au gel hivernal en cherchant notamment à améliorer un modèle de calcul initialement mis au point sur le blé.



Yves RICHARD

Géographe Climatologue, enseignant-chercheur à l'université de Bourgogne, il est responsable de l'équipe Centre de Recherches de Climatologie de l'UMR 6282 Biogéosciences CNRS/UBFC. Ses recherches actuelles sont dédiées au changement climatique et aux îlots de Chaleur Urbains.



Isabelle LEJEUNE-HÉNAUT

Agronome et généticienne, chargée de recherches à l'INRA, membre de l'USC 1411 Institut Charles Viollette-Adaptation au Froid du Pois. Ses recherches portent sur l'identification des déterminants génétiques de la résistance au gel chez le pois dans le contexte du réchauffement climatique et ont des applications dans le domaine de la sélection variétale.



Annabelle LARMURE

Agronome Ecophysiologiste, elle est enseignante-Chercheuse à AgroSup Dijon, membre de l'équipe « Déterminismes Génétiques et Environnementaux de l'Adaptation des Plantes à des Systèmes de culture Innovants » de l'UMR 1347 Agroécologie. Ses recherches portent sur la caractérisation des impacts des stress climatiques sur les cultures de légumineuses et leur adaptation au changement climatique.

Les modalités du réchauffement en lien avec la dynamique climatique non-linéaire (entraînant des effets de seuil) modifient le risque gélif. Les cas de l'hiver 2011-2012 soutient l'idée que, loin de supprimer ce risque, le changement climatique l'atténue sans écartier – malgré des hivers plus doux – la survenue des pertes sévères voire totales notamment en cas d'abaissement brutal des températures. Or les cultures de pois d'hiver sont un des leviers importants pour une transition agro-écologique. Ces espèces fixatrices d'azote atmosphérique offrent un potentiel de rendement plus intéressant que le pois de printemps dans un contexte de minimisation des nuisances environnementales liées à l'usage des intrants.

Finalement cette évolution du risque gélif sur des agro-systèmes interroge indirectement sur l'évolution de la vulnérabilité de la végétation naturelle. Dans quelle mesure les biomes des moyennes latitudes ayant développé des stratégies d'adaptation spécifiques à des environnements climatiques « extrêmes » sont-ils susceptibles d'être impactés et résilients aux évolutions du climat futur ? L'idée de dette climatique (BERTRAND *et al.*, 2016) concernant la forêt fait écho à ce questionnement et à la nécessité d'une hybridation entre nos disciplines (climatologie, agronomie, écologie). La climatologie de l'environnement (GUYOT, 2013) ou ecological climatology (BONAN, 2015) plaide en ce sens.

Remerciements

Les auteurs remercient Annick AUFFRAY, Agnès TAMBURINI et Denis THÉVENIN des directions régionale et départementale de Météo-France pour la mise à disposition des données climatiques SIM (Safran-Isba-Modcou).

Bibliographie

- 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. & LENNE T. 2012. The paradoxical increase in freezing injury in a warming climate : frost as a driver of change in cold climate vegetation. In : STOREY K.B. & TANINO K. (eds) *Temperature Adaptation in a Changing Climate: Nature at Risk*, CABI Climate Change (H ISBN 9781845938222):179-185.
- BERTRAND R., RIOFRIO-DILLON G., LENOIR J., DRAPER J., DE RUFFRAY P., GÉGOÛT J.-C. & LOREAU M. 2016. Ecological constraints increase the climatic debt in forests *Nature Communications* 7: 12643.
- BIGLER C. & BUGMANN H. 2018. Climate-induced shifts in leaf unfolding and frost risk of European trees and shrubs. *Scientific Reports* 8(1): 9865. doi:10.1038/s41598-018-27893-1
- BONAN G. 2015. *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge, 754 p. doi:10.1017/CBO9781107339200
- BOULARD D., CASTEL T., CAMBERLIN P., SERGENT A.S., BRÉDA N., BADEAU V., ROSSI A. & POHL B. 2016. Capability of a Regional Climate Model to simulate climate variables requested for water balance computation : A case study over northeastern France. *Climate Dynamics* 46: 2689-2716. doi:10.1007/s00382-015-2724-9
- BRULEBOIS E., CASTEL T., RICHARD Y., CHATEAU-SMITH C. & AMIOTTE-SUCHET P. 2015. Hydrological response to an abrupt shift in surface air temperature over France in 1987/88. *Journal of Hydrology* 531(3): 892-901. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.10.026
- CANNELL M.G.R. & SMITH R. I. 1986. Climatic warming, spring budburst and frost damage on trees. *Journal of Applied Ecology* 23: 177-191.
- CASTEL T., LECOMTE C., RICHARD Y., LEJEUNE-HÉNAULT I. & LARMURE A. 2014. Le réchauffement climatique diminue t-il le risque de dégâts de gel pour les cultures de climat tempéré? Colloque AIC 2-5 juillet 2014, Dijon.
- CASTEL T., LECOMTE C., RICHARD Y., LEJEUNE-HÉNAULT I. & LARMURE A. 2017. Frost stress evolution and winter pea ideotype in the context of climate warming at a regional scale. *OCL* 24(1): D106, 11 p. doi: 10.1051/ocl/2017002
- DEE D.P., UPPALA S.M., SIMMONS A.J., BERRISFORD P., POLI P., KOBAYASHI S., ANDRAE U., BALMASEDA M.A., BALSAMO G., BAJIER P., BECHTOLD P., BELJAARS A.C.M., VAN DE BERG L., BIDLOT J., BORMANN N., DELSOL C., DRAGANI R., FUENTES M., GEER A.J., HAMBERGER L., HEALY S.B., HERSBACH H., HÖLM E.V., ISAKSEN I., KÄLLBERG P., KÖHLER M., MATRICARDI M., McNALLY A.P., MONGE-SANZ B.M., MORCRETTE J.-J., PARK B.-K., PEUBEY C., DE ROSNAY P., TAVOLATO C., THEPAUT J.-N. & VITART F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137: 553-597. doi:10.1002/qj.828
- DUNN P.K. 2004. Occurrence and quantity of precipitation can be modelled simultaneously. *Int. J. Climatol.* 24: 1231-1239. doi: 10.1002/joc.1063
- GUYOT G. 2013. *Climatologie de l'environnement*. Dunod, 2^e édition, 544 p.
- GU L., HANSON P.J., POST W.M., KAISER D.P., YANG B., NEMANI R., PALLARDY S.G. & MEYERS T. 2008. The 2007 eastern us spring freeze: Increased cold damage in a warming world? *BioScience* 58: 253-262.
- HÄNNINEN H. 2006. Climate warming and the risk of frost damage to boreal forest trees: identification of critical ecophysiological traits. *Tree Physiology* 26: 889-898.
- KALBERER S.R., WISNIEWSKI M. & ARORA R. 2006. Deacclimation and reaclimation 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.
- MEIER M., FUHRER J. & HOLZKÄMPER A. 2018. Changing risk of spring frost damage in grapevines due to climate change? A case study in the Swiss Rhone Valley. *International Journal of Biometeorology* 62(6): 991-1002.
- MENZEL A., SPARKS T.H., ESTRELLA N., KOCH E., AASA A., AHAS R., ALM-KÜBLER K., BISSOLLI P., BRASLAVSKÁ O., BRIEDE A. *et al.* 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12(10): 1969-1976.

- QUINTANA-SEGUI P., LE MOIGNE P., DURAND Y., MARTIN E., HABETS F., BAILLON M., CANELLAS C., FRANCHISTEGUY L. & MOREL S. 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 47: 92-107.
- PAGTER M. & ARORA R. 2013. Winter survival and deacclimation of perennials under warming X climate : physiological perspectives. *Physiologia Plantarum* 147: 75-87.
- RAMMIG A., JONSSON A.M., HICKLER T., SMITH B., BARRING L. & SYKES M. 2010. Impacts of changing frost regimes on Swedish forests: Incorporating cold hardiness in a regional ecosystem model. *Ecological Modelling* 221: 303-313.
- REID P.C., HARI R.E., BEAUGRAND G., LIVINGSTONE D.M., MARTY C., STRAILE D., BARICHVICH J., GOBERVILLE E., ADRIAN R., AONO Y., BROWN R., FOSTER J., GROISMAN P., HÉLAOUËT P., HSU H.-H., KIRBY R., KNIGHT J., KRABERG A., LI J., LO T.-T., MYNENI R.B., NORTH R.P., POUNDS J.A., SPARKS T., STÜBI R., TIAN Y., WILTSHIRE K.H., XIAO D. & ZHU Z. 2016. Global impacts of the 1980s regime shift. *Global Change Biology* 22: 682-703. doi:10.1111/gcb.13106
- RICHARD Y., CASTEL T., BOIS B., CUCCIA C., MARTEAU R., ROSSI A., THÉVENIN D. & TOUSSAINT H. 2014. Évolution des températures observées en Bourgogne (1961-2011). *Rev. sci. Bourgogne-Nature* 19: 110-117.
- RIGBY J.R. & PORPORATO A. 2008. Spring frost risk in a changing climate. *Geophysical Research Letters* 35:L12703. doi: 10.1029/2008GL033955
- RIXEN C., DAWES M.A., WIPF S. & HAGEDORN F. 2012. Evidence of enhanced freezing damage in treeline plants during six years of CO2 enrichment and soil warming. *Oikos* 121: 1532-1543. doi: 10.1111/j.1600-0706.2011.20031.x
- SIERRA-ALMEIDA A., CAVIERES L.A. & BRAVO L.A. 2018. Warmer Temperatures Affect the in situ Freezing Resistance of the Antarctic Vascular Plants. *Frontiers in Plant Science* 9: 1456.
- SOUÛBEYROUX J.-M., MARTIN E., FRANCHISTÉGUY L., HABETS F., NOILHAN J., BAILLON M., REGIMBEAU F., VIDAL J.-Ph., LE MOIGNE P. & MOREL S. 2008. L'application Safran - Isba - Modcou (SIM), un outil pour la production opérationnelle et les études hydro-météorologiques. *La Météorologie* 63: 40-45.
- STÉFANON M., MARTIN-STPAUL N.K., LEADLEY P. *et al.* 2015. Testing climate models using an impact model: what are the advantages? *Climatic Change* 131(4): 649-661. doi: 10.1007/s10584-015-1412-4
- TERRAY L. & BOË J. 2013. Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties. *Comptes Rendus Geoscience* 345(3): 136-149. doi: 10.1016/j.crte.2013.02.003
- WMO, 2013. Assessment of the observed extreme conditions during late boreal winter 2011/2012. World Meteorological Organization, WCDMP-No 80, 16 p.
- ZENG B., CHENG K., DRECCER F. & 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: 2899-2914.
- ZHENG B., CHAPMAN S.C., CHRISTOPHER J.T., FREDERIKS T.M. & CHENG K. 2015. Frost trends and their estimated impact on yield in the Australian wheatbelt. *J. Exp. Bot.* 66(12): 3611-3623. doi: 10.1093/jxb/erv163