

**AFPP – ONZIÈME CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LES MALADIES DES PLANTES
TOURS – 7 AU 9 DÉCEMBRE 2015**

**APPORTS ET LIMITES DES MODELES DANS L’EVALUATION DES RISQUES FUSARIOSE ET DON A
DIFFERENTES ECHELLES SPATIO TEMPORELLES DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE**

E. GOURDAIN ⁽¹⁾, O. DEUDON ⁽¹⁾, C. CORRE ⁽¹⁾, G. GRIGNON ⁽¹⁾, B. MELEARD ⁽¹⁾

⁽¹⁾ARVALIS-Institut du végétal, Station expérimentale 91720 Boigneville

e.gourdain@arvalisinstitutduvegetal.fr

RÉSUMÉ

Fusarium graminearum, pathogène en cause dans la fusariose des épis de blé, est connu pour être fortement impacté par les conditions climatiques et pour conduire à des conséquences en termes de nuisibilité et de qualité sanitaire variables d’une année sur l’autre. La problématique autour du changement climatique soulève la question de l’évolution de ce pathosystème dans le futur et de son impact sur la teneur en déoxynivalénol (DON), mycotoxine réglementée produite par ce pathogène. L’étude présentée se penche sur l’utilisation des modèles de prévision des risques de développement de *F. graminearum* et de production de DON pour étudier cette problématique. Les résultats des simulations réalisées à partir des scénarios climatiques proposées dans le cadre de l’ANR Scampeï montrent que le risque de développement de *F. graminearum* et la production de DON ne devrait pas augmenter à l’échelle française malgré une certaine variabilité spatio-temporelle. Néanmoins, ces résultats sont à nuancer au regard des nombreuses sources d’incertitudes concernant les modèles climatiques et agronomiques, l’évolution de la culture du blé, des souches fongiques et des pratiques agricoles.

Mots-clés : Modélisation - Fusariose des épis - Blé - changement climatique - *Fusarium* – mycotoxines.

ABSTRACT

**EXPECTED CONTRIBUTION OF MODELLING IN FUSARIUM AND DON RISK MANAGEMENT AT
DIFFERENT SPATIAL AND TEMPORAL SCALES IN A CLIMATE CHANGE CONTEXT**

Fusarium graminearum, pathogen causing *Fusarium* head blight in wheat, is known to be strongly impacted by climate conditions and lead to variable consequences in terms of kernel damages and sanitary quality from one year to another. The issue around climate change raises the question of the evolution of this pathosystem in the future and its impact on the content of deoxynivalenol (DON), mycotoxin produced by this pathogen and regulated by the UE. The present study examines the use of predictive models to assess the risk of *F. graminearum* and DON production in the future. The results of simulations from climate scenarios proposed within the framework of the ANR Scampeï show that the risk of development of *F. graminearum* and the production of DON should not increase in the future in France in spite of a certain spatio-temporal variability. Nevertheless, these results are to be qualified in light of the many sources of uncertainties regarding climatic and agronomic models, changes in the cultivation of wheat, fungal strains and agricultural practices.

Keywords: Modelling - FHB - Wheat - climate change - *Fusarium* – mycotoxins.

INTRODUCTION

La fusariose de l'épi est une maladie du blé induite par un complexe d'espèces fongiques du genre *Fusarium* et *Microdochium* dont l'équilibre varie fortement selon les conditions agronomiques et le climat (Gourdain et *al.*, 2015). L'espèce dominante de ce complexe en France, *F. graminearum*, est capable de produire des mycotoxines dont le déoxynivalénol (DON), toxine réglementée depuis 2006 (Règlement CE n°1881/2006 du 19/12/2006). De nombreuses études ont mis en évidence l'impact des pratiques culturales (précédent, travail du sol, variété) et des facteurs environnementaux (pluie autour de la floraison) sur la production de DON et sur le développement de *F. graminearum*. De ces travaux, des modèles de prévision ont pu être développés (De Wolf et *al.*, 2003 ; Rossi et *al.*, 2003 ; Del Ponte et *al.*, 2005 ; Schaafsma et *al.*, 2007 ; Van der Fels-Klerx et *al.*, 2008 ; Gourdain et *al.*, 2009 ; Shah et *al.*, 2013) et parfois même être intégrés à des outils d'aide à la décision pour le pilotage des traitements fongicides. Le climat étant le facteur prépondérant dans la quantification du champignon (Gourdain et *al.*, 2015), il convient de se demander dans quelle mesure le changement climatique risque de modifier le comportement de ce pathogène (impacts directs) et l'interaction hôte/pathogène (impacts indirects). Quels seront les impacts des perturbations envisagées des paramètres climatiques (pluie, température, etc.) sur les différentes phases de développement du pathogène fongique (germination, infection, etc.) ? Pour ce faire, l'utilisation de modèles de prévision semblent être pertinente afin d'émettre des hypothèses quant à la possible évolution du pathogène dans le temps et dans l'espace.

L'étude du changement climatique nécessite des données climatiques du futur, appelées projections. Dans le cadre de l'ANR Scampei, des données climatiques dans le futur proche ainsi que dans le futur lointain selon deux scénarii d'évolution de la concentration en CO₂ ont été produites, à une résolution spatiale de 8 km, et peuvent donc être utilisées pour réaliser des projections sur des variables d'intérêt issues des modèles. La difficulté dans l'étude des effets du changement climatique sur les pathosystèmes réside dans les différentes sources d'incertitudes (Allard et Brisson, 2010). La première concerne les incertitudes autour des modèles climatiques. Il existe plusieurs modèles climatiques régionalisés pour l'étude des impacts du changement climatique, et même si tous s'accordent sur la hausse des températures, les projections en ce qui concernent les précipitations varient fortement d'un modèle à l'autre (Hawkins et Sutton, 2010). Une autre source d'incertitude provient des modèles agronomiques ou de prévision de développement des pathogènes qui comprennent aussi une part d'erreur. Enfin, l'interaction hôte/pathogène est amené à évoluer en fonction des changements de phénologie et de distribution spatiale de l'hôte ainsi que des évolutions de souches du pathogène, source importante d'incertitude lorsque l'on cherche à faire des projections avec nos connaissances actuelles du fonctionnement du pathosystème. Néanmoins, ces incertitudes ne doivent pas entraver les recherches dans ce domaine et, sous réserve de certaines précautions, il est possible de réaliser des projections avec l'aide de modèles. Ainsi, des travaux ont été publiés concernant les effets des changements climatiques sur les relations climat/hôtes/pathogènes (Gouache et *al.*, 2013 ; Launay et *al.*, 2014 ; Manici et *al.*, 2014) ainsi que sur les teneurs en mycotoxines (Miraglia et *al.*, 2009 ; Battilani et *al.*, 2010 ; Magan et *al.*, 2011) mais très peu concernaient *F. graminearum* (West et *al.*, 2012).

Ainsi, cet article fait état des résultats obtenus sur des projections réalisées à partir des données produites par le projet Scampei afin d'évaluer l'impact du changement climatique (sur le risque potentiel de développement de *F. graminearum* et de la teneur en DON dans les grains de blé. Pour cela, une situation agronomique type a été défini et différents modèles - modèle phénologique pour la culture du blé (Gouache et *al.*, 2012), modèle mécaniste pour le développement de l'inoculum (Corre et *al.*, 2015) et modèle statistique pour la concentration en DON (Gourdain et *al.*, 2009) - ont été utilisés pour les projections. Ce travail a fait l'objet d'une présentation lors d'une conférence en mai 2015 organisée par la Direction Générale Santé et sécurité alimentaire de la Commission Européenne.

MATERIEL ET METHODE

Pour étudier les apports et les limites des modèles de prédiction du risque *Fusarium* et DON associé dans un contexte de changement climatique, des simulations ont été réalisées sur des variables climatiques, phénologiques et pathogéniques à partir des différents scénarii climatiques.

LES SCENARII CLIMATIQUES

Pour réaliser l'étude, les séries climatiques utilisées sont issues du projet ANR Scampeï (Déqué, 2011). En effet, le projet a permis de développer une technique originale pour produire des séries quotidiennes du climat sur trois périodes (passé, futur proche et futur lointain) à la résolution de 8 km en fonction de la position géographique et de l'altitude. Les résultats présentés prennent en compte uniquement le modèle de climat ALADIN.

Deux projections climatiques d'évolution de la concentration atmosphérique en CO₂ ont été étudiées : un scénario dit médian (A1B) avec une projection d'une teneur en CO₂ en 2100 de 650 ppm ; un scénario dit pessimiste (A2) avec une teneur en CO₂ de 700 ppm d'ici 2100.

Quatre périodes ont été définies pour réaliser les projections :

- Le passé (REF) concerne des données climatiques de 1962 à 1990 issues du projet Scampeï, considérées comme les années de référence avant l'impact du changement climatique ;
- Le passé proche (REF_ARVALIS) concerne des données climatiques appartenant à ARVALIS issues de 315 stations météorologiques réparties sur le territoire français entre 2001-2011. Le choix de travailler sur ce jeu de données a été fait car les modèles développés par ARVALIS ont utilisé des données climatiques sur cette période ;
- Le futur proche (NF) concerne des données climatiques de 2022 à 2050 issues du projet Scampeï ;
- Le futur lointain (FF) concerne des données climatiques de 2072 à 2100 issues du projet Scampeï.

LES VARIABLES

Différentes variables issues de différents modèles, plus ou moins complexes, ont été étudiées. Les deux premières variables étudiées sont la date de floraison et la somme des pluies autour de cette date. En effet, la période de sensibilité du blé à l'infection par le pathogène étant située autour de la floraison, il semblait pertinent d'étudier dans un premier temps comment cette date pouvait évoluer. Pour cela, nous avons travaillé sur la variété Cellule dont la précocité permet d'être semée actuellement sur l'ensemble des territoires agricoles français emblavés en blé, avec une date de semis au 20 octobre. Pour cette étude, le modèle utilisé est un modèle phénologique d'apparition des stades du blé décrit dans Gouache *et al.* (2012). Ainsi, une première projection a pu être effectuée sur la date de floraison afin d'évaluer l'impact sur un cas-type donné du changement climatique sur la période de floraison. Puis une projection sur la somme des pluies autour de la floraison (+/- huit jours) a été réalisée.

La troisième variable sur laquelle des projections ont été réalisées est une des sorties du modèle mécaniste décrit dans Corre *et al.*, 2015. Ce modèle décrit la partie sexuée du cycle de *F. graminearum* (téléomorphe *G. zeae*) et calcule un nombre relatif d'ascospores matures éjectées au pas de temps journalier à partir de données météorologiques: température moyenne journalière et précipitations. Ce modèle combine 2 équations :

- une équation logistique pour le calcul du nombre d'ascospores matures :
$$Inoc_i = \frac{K}{1 + \left(\frac{\sum T10}{A}\right)^B}$$

Avec A, B et K des paramètres fixes ;

$\sum T10$: la somme des températures en base 10 depuis l'initiation des calculs (fonction de la pluie et de la température), cette somme est modulée selon la pluviométrie.

Les constantes du modèle ont été paramétrées à partir de données produites dans le cadre du travail mené par Manstretta (2015). L'étude de sensibilité de Corre et *al.* (2015) a mis en évidence que A et B sont parmi les paramètres les plus sensibles du modèle donc très impactés par les fluctuations du climat.

- le taux d'éjection est une variable binaire qui dépend uniquement de la pluviométrie des 3 derniers jours. Cette partie du modèle diffère de Corre et *al.* (2015) en raison de l'absence de données d'humidité relative dans nos scénarii.

La variable sur laquelle les projections ont été réalisées est le cumul d'inoculum autour de la floraison (+/-huit jours) pour le cas-type défini plus haut. A travers cette variable, on cherche donc à évaluer l'évolution de l'inoculum primaire selon différentes hypothèses d'évolution du climat.

Pour finir une dernière projection a été réalisée en utilisant un modèle statistique de prévision du risque DON. Ce modèle est un modèle linéaire du type :

$$LN(DON) = A_1 * AGRONOMY + A_2 * V1 + A_3 * V2 + \dots + A_{28} * V27$$

Avec A_i : les paramètres fixes du modèle ;

Agronomy : une variable qui combine le travail du sol (labour/non labour), le précédent cultural (maïs/autres) et la classe de sensibilité au DON de la variété (sensible/moyennement/pou) issue de la note publiée par le GEVES/ARVALIS.

V1 à V27 : les variables climatiques qui combinent des données journalières de pluie (en somme ou fréquence) et/ou de température (minimum/maximum/moyenne en somme ou fréquence) sur des périodes phénologiques données allant de la méiose à la floraison plus 15 jours. Ces variables sont recensées dans le tableau 1.

TABLEAU I : Détail des variables agro-climatiques du modèle statistique DON

Table I : *Agro-climatic variables of the statistical DON model*

INTITULE	PARAMETRE	TYPE	BORNE INF	BORNE SUP
SOM ETP>4 MEIOSE-15 FLO+5	ETP	SOMME	MEIOSE-15	FLO+5
NBRE 2 J PLUIE>0.2 EPIAISON FLO+3	PLUIE	OCCURRENCE	EPIAISON	FLO+3
NBRE J PLUIE>1 SUIVI PLUIE=0 EPIAI+3 A FLO+15	PLUIE	OCCURRENCE	EPIAISON+3	FLO+15
NBRE J PLUIE>1 SUIVI 3J SECS EPIAISON+3 FLO+15	PLUIE	OCCURRENCE	EPIAISON+3	FLO+15
NBP514 NBRE J PLUIE>5 FLO-14 A FLO	PLUIE	OCCURRENCE	FLO-14	FLO
NBP17 NBRE J PLUIE>1 FLO-7 A FLO	PLUIE	OCCURRENCE	FLO-7	FLO
NBP37 NBRE J PLUIE>3 FLO-7 A FLO	PLUIE	OCCURRENCE	FLO-7	FLO
NBRE J PLUIE>1 FLO-7 FLO+3	PLUIE	OCCURRENCE	FLO-7	FLO+3
NBRE J PLUIE>0 FLO-7 FLO+3	PLUIE	OCCURRENCE	FLO-7	FLO+3
NBRE J PLUIE>1 SUIVI TMOY>16 MEIOSE - 1J A FLORAISON + 3J	PLUIE	OCCURRENCE	FLO-8	FLO+3
SOM PLUIE FLO-8 FLO+8	PLUIE	SOMME	FLO-8	FLO+8
NBPT118143 NBRE J PLUIE>1 SUIVI TMOY>=18 FLO-14 A FLO+3	PLUIE-T°C	OCCURRENCE	FLO-14	FLO+3
NBPT197 NBRE J PLUIE>1 ET TMIN>=9° FLO-7 A FLO	PLUIE-T°C	OCCURRENCE	FLO-7	FLO
NBPT397 NBRE J PLUIE>3 ET TMIN>=9° FLO-7 A FLO	PLUIE-T°C	OCCURRENCE	FLO-7	FLO
NBPT11673 NBRE J PLUIE>1 SUIVI TMOY>=16 FLO-7 A FLO+3	PLUIE-T°C	OCCURRENCE	FLO-7	FLO+3
NBPT11677 NBRE J PLUIE>1 SUIVI TMOY>=16 FLO-7 A FLO+7	PLUIE-T°C	OCCURRENCE	FLO-7	FLO+7
NBRE J 14.9<TMOY>30.1 ET PLUIE>0 FLO-7 FLO+10	PLUIE-T°C	OCCURRENCE	FLO-7	FLO+10
NBRE J TMOY>16 ET PLUIE>1 FLO-8 FLO+3	PLUIE-T°C	OCCURRENCE	FLO-8	FLO+3
TX07 MOY T°C BASE 0 FLO-7 A FLO	T°C	MOYENNE	FLO-7	FLO
NBRE J TMAX<30 ET TMIN>11 EPIAISON-11 A FLO+3	T°C	OCCURRENCE	EPIAISON	FLO+3
NBRE J TMOY>14.9 FLO-14 FLO+3	T°C	OCCURRENCE	FLO-14	FLO+3
NBRE J TMOY>9 FLO-18 FLO+3	T°C	OCCURRENCE	FLO-18	FLO+3
NBTMOY157 NBRE J TMOY<15° FLO-7 À FLO	T°C	OCCURRENCE	FLO-7	FLO
NBRE J TMOY>16 FLO-7 FLO+3	T°C	OCCURRENCE	FLO-7	FLO+3
NBRE J TMOY>14 FLO-7 FLO+3	T°C	OCCURRENCE	FLO-7	FLO+3
NBRE J TMOY>15 FLO-7 FLO+3	T°C	OCCURRENCE	FLO-7	FLO+3
SOM TMAX FLO-7 FLO+3	T°C	SOMME	FLO-7	FLO+3

En préalable à la prévision de teneur en DON, une pré-étude a été réalisée sur chacune des 27 variables climatiques afin d'observer à l'aide de boxplot la distribution de chacune des variables selon les six scenarii climatiques. L'objectif est en effet de s'assurer que le domaine de validité donné par la REF_ARVALIS, période sur laquelle le modèle de prédiction des teneurs en DON a été paramétré, est respecté dans chacun des scenarii envisagés afin de nous assurer que le comportement du modèle ne soit pas affecté.

Comme pour les autres variables, il est nécessaire de travailler « toutes choses égales par ailleurs ». Il a donc été décidé de se positionner dans une situation agronomique dite à risque et de faire les projections sur une situation type : variété Cellule, sensible à l'accumulation de DON (note 3), semée au 20/10 en précédent maïs/non labour.

LES PROJECTIONS

Pour chacun des six jeux de données climatiques utilisés (REF, REF_ARVALIS, NF_A1B, NF_A2, FF_A1B et FF_A2), des projections ont été réalisées sur le stade de floraison du blé via un modèle de développement des cultures (Gouache et *al.*, 2012) ; sur un paramètre climatique (pluie autour de la floraison) ; sur les sorties des modèles FG et DON et la variabilité spatio-temporelle a été étudiée. La lourdeur des calculs (réalisées avec le logiciel R) a contraint à ne réaliser la projection de la variable inoculum que sur six sites correspondant à six stations météorologiques pour REF_ARVALIS et six mailles (8*8 km) pour les autres scenarii (Mons en chaussée (80), Rots (14), Fagnières (51), Ouzouer-le-marché (41), Bergerac (24), En crambade (31)). Ces sites ont été choisis dans chacune des grandes régions productrices de blé en France afin d'obtenir une variabilité spatiale intéressante.

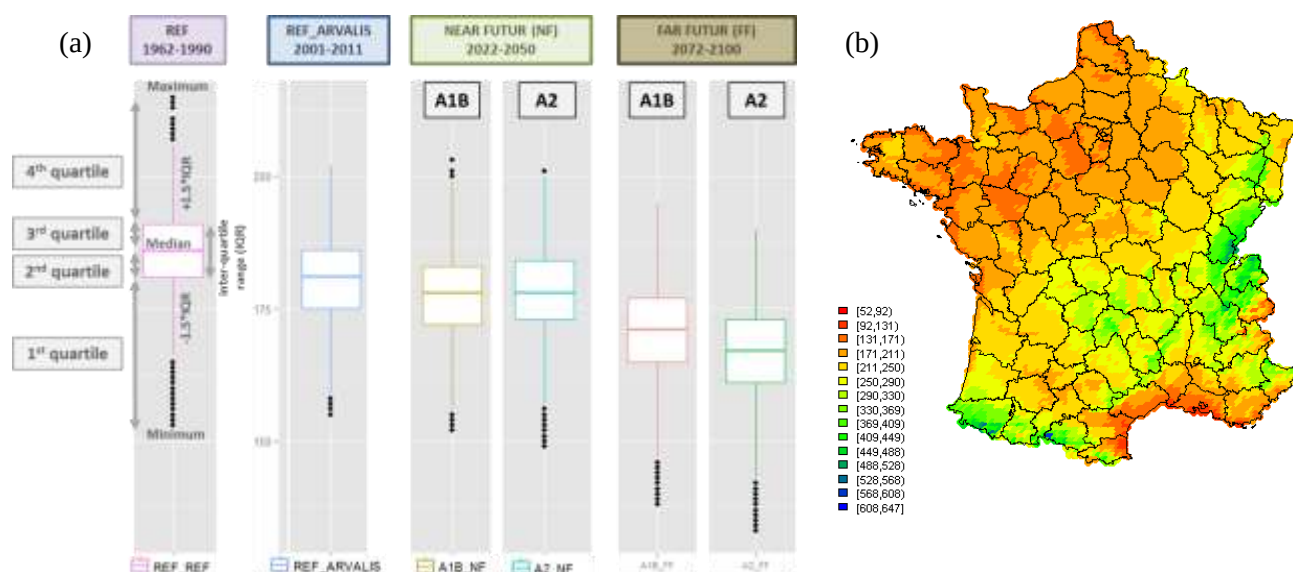
La variabilité temporelle est étudiée graphiquement par la construction de boxplots (boîtes à moustaches) réalisés sur les valeurs médianes prises annuellement sur l'ensemble du territoire (Fig. 1a). La variabilité spatiale est étudiée en cartographiant la valeur médiane pluri-annuelle du scénario concerné pour un point de grille (Fig. 1b).

Figure 1 : (a) Boxplot d'un paramètre climatique (somme des températures maximales autour de la floraison) pour les différents scenarii étudiés

(b) Cartographie du paramètre somme de pluie (mm) du 1/4 et le 30/6 pour le scénario NF_A2

Figure 1: (a) Boxplot of a climatic parameter (sum of maximum temperatures around flowering) for the different scenarii

(b) Map of the sum of rain (mm) from 1/4 to 30/6 for NF_A2 scenario



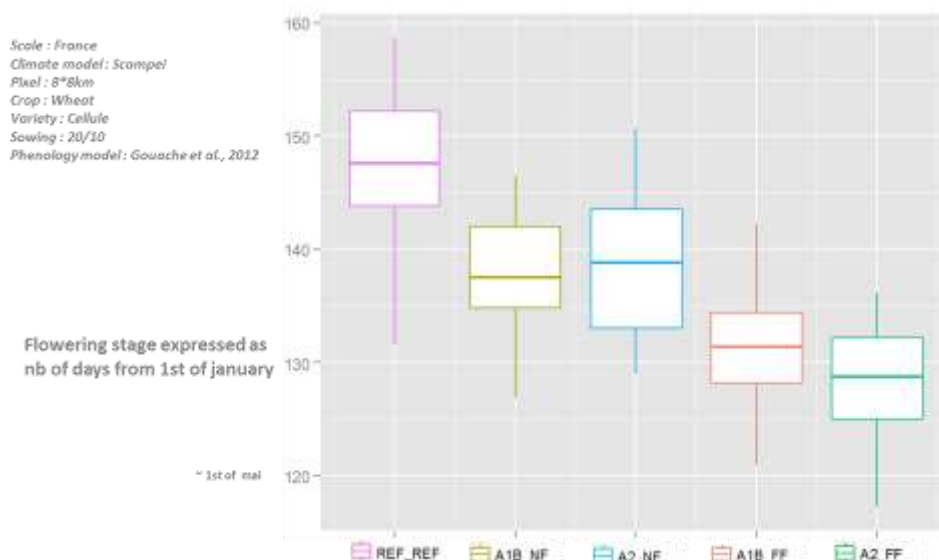
RESULTATS

PROJECTION SUR LA DATE DE FLORAISON

La figure 2 explicite la date de floraison exprimée en nombre de jours depuis le 1^{er} janvier en fonction des cinq scénarii climatiques Scampei pour une variété Cellule semée au 20 octobre. Les résultats montrent une nette diminution de ce nombre de jours, près de 10 jours dans le futur proche, quelque soit le scenario et 15 jours dans le futur lointain. On observe donc une précocification de la date de floraison. La variabilité semble par ailleurs diminuer avec le temps.

Figure 2 : Boxplot sur la date de floraison exprimée en nombre de jours depuis le 1/1 pour les différents scénarii.

Figure 2: Boxplot of the flowering date expressed as number of days from 1/1 for the different scenarii.

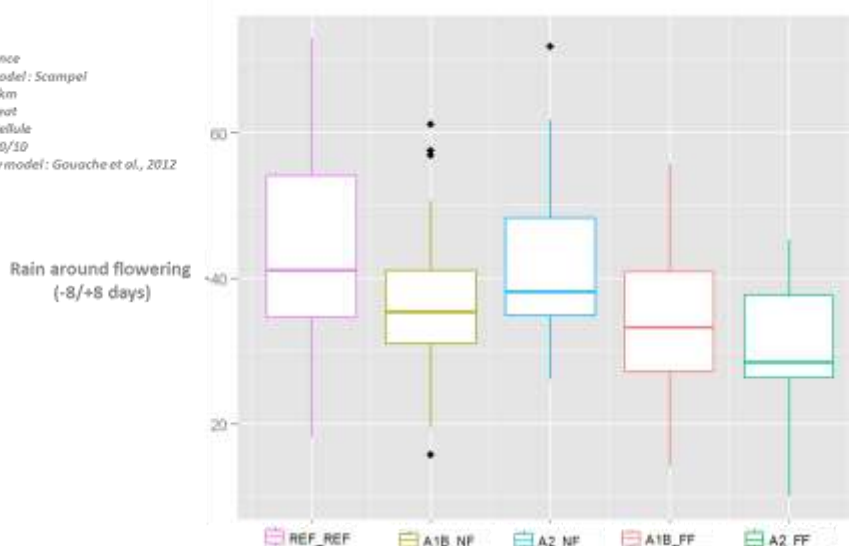


PROJECTION SUR LA PLUIE AUTOUR DE LA FLORAISON

La figure 3, qui donne la somme des pluies autour de la floraison selon les scénarii, met en évidence une grande variabilité sur la référence avec des pluies comprises entre 20 et 70 mm sur la période considérée pour 40 mm en médiane. En tendance, il semble qu'il y ait une légère diminution à moyen terme. Mais la réduction la plus forte est observée pour le scénario A2_FF, avec une médiane à moins de 35 mm et un maximum autour de 45mm.

Figure 3 : Boxplot sur la somme des pluies autour de la floraison (+/- 8 jours) pour les différents scénarii

Figure 3 : boxplot of the sum of raina round flowering (+/- 8 days) for the different scenarii



PROJECTION SUR LA QUANTITE D'INOCULUM

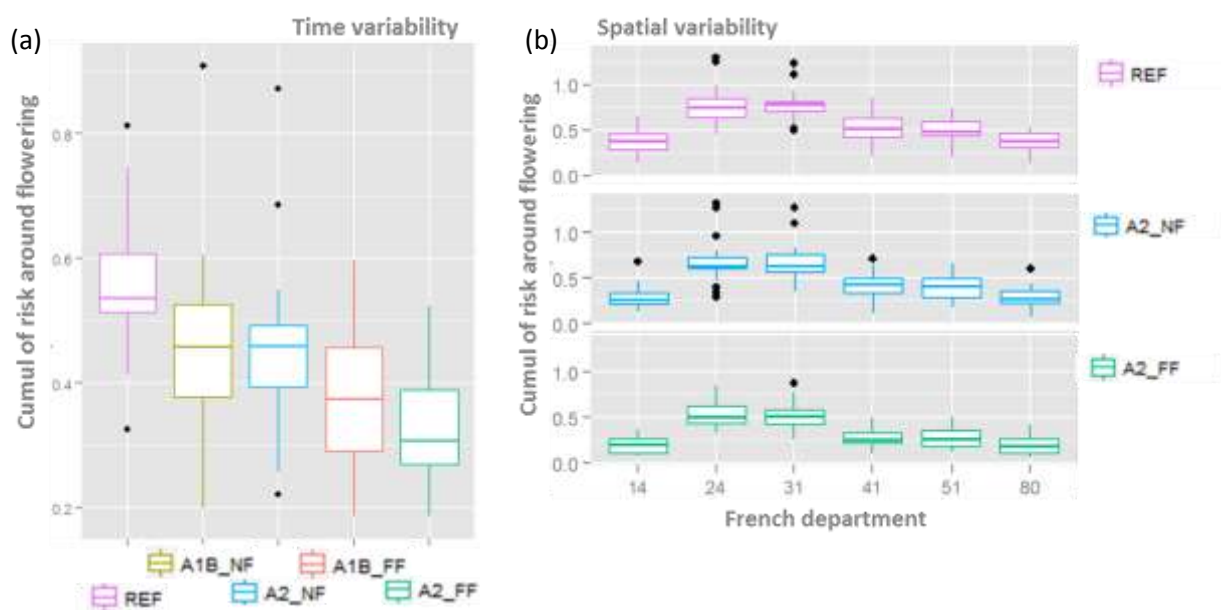
Pour rappel, cette projection n'est réalisée que sur six mailles. La figure 4a met en évidence une diminution claire de la quantité d'inoculum avec malgré tout quelques points extrêmes dans les scénarii futur proche. La variabilité interannuelle dans chaque scénario semble ne pas évoluer. La variabilité spatiale représentée dans la figure 4b sur trois scénarii souligne une disparité régionale importante et un classement des sites qui semblent se maintenir avec l'évolution envisagée du climat. Le risque sera certes plus faible, mais les régions les plus à risque resteront les mêmes.

Figure 4 : (a) Boxplot de la quantité d'inoculum prédite selon les différents scénarii

(b) Boxplot de la quantité d'inoculum prédite selon le point de grille exprimé par le département

Figure 4: (a) Boxplot of the predicted amount of inoculum for the different scenarii

(b) Boxplot of the predicted amount of inoculum according to the grid point expressed as the department



PROJECTION SUR LA TENEUR EN DON

Comme signalé plus haut, une première étape a consisté à étudier séparément l'ensemble des variables climatiques en comparaison avec la REF_ARVALIS afin de s'assurer que les domaines de validité soient respectés en préalable à la mise en œuvre du modèle. La figure 5 montre les deux types de profil obtenus sur les 27 variables. Pour la variable représentée dans la figure 5a, le domaine de validité est respecté, ce qui est le cas pour 23 variables. Pour celle de la figure 5b, des points extrêmes sont supérieurs à la REF-ARVALIS et sortent donc du domaine de validité pour les scénarii NF et FF. Ce résultat peut s'expliquer en partie par des températures plus élevées associées à des pluies plus faibles et peuvent ainsi conduire à un comportement du modèle inattendu, le modèle n'ayant pas été paramétré avec de telles valeurs.

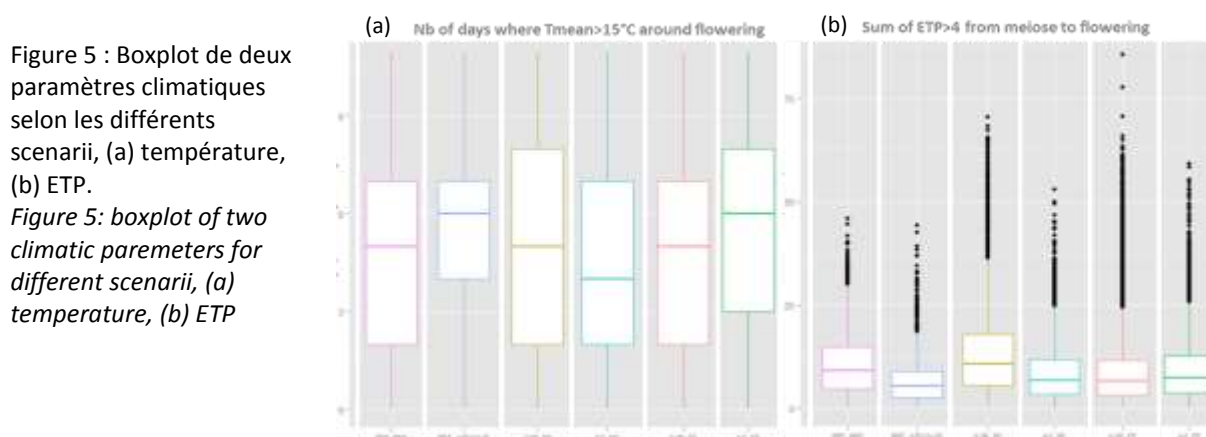


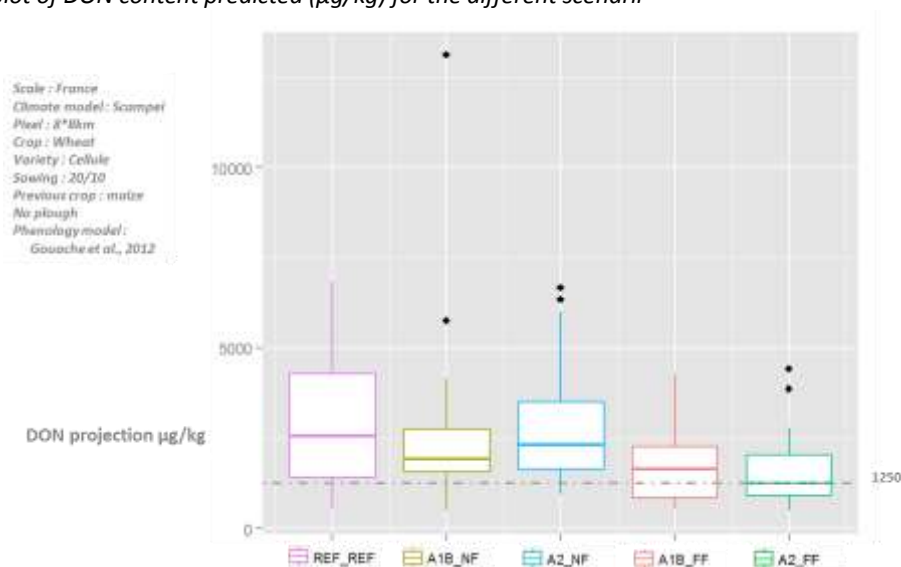
Figure 5 : Boxplot de deux paramètres climatiques selon les différents scénarii, (a) température, (b) ETP.

Figure 5: boxplot of two climatic parameters for different scenarii, (a) temperature, (b) ETP

En ce qui concerne la projection sur les teneurs en DON prédites illustrée figure 6, une très légère diminution en médiane du risque est observée avec une réduction de la variabilité interannuelle notamment pour le scénario pessimiste futur lointain.

Figure 7 : Boxplot sur la teneur en DON prédite ($\mu\text{g/kg}$) pour les différents scénarii

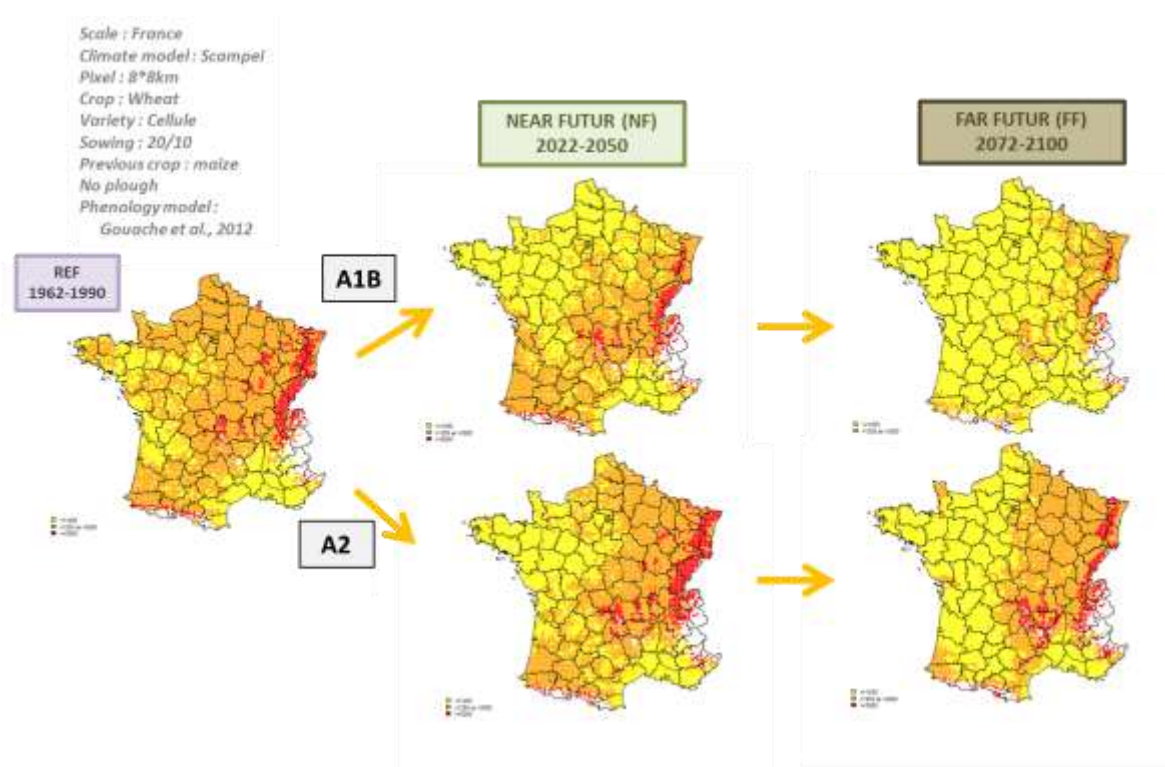
Figure 7: Boxplot of DON content predicted ($\mu\text{g/kg}$) for the different scenarii



Concernant la distribution géographique (Fig. 8), la diminution du risque est très nette par l'ouest dès le futur proche puis se déplace vers l'est dans le futur lointain. Pour la lisibilité des cartes, le choix a été pris de mettre les teneurs en DON prédites en classe par rapport à la limite réglementaire de $1250\mu\text{g/kg}$.

Figure 8 : cartographie de la teneur en DON médiane prédite mise en 3 classes (jaune ≤ 1250 ; orange >1250 et <3000 ; rouge ≥ 3000 $\mu\text{g/kg}$) pour les différents scénarii

Figure 8: map of predicted median DON content in 3 classes (yellow ≤ 1250 ; orange >1250 et <3000 ; red ≥ 3000 $\mu\text{g/kg}$) for the different scenarii

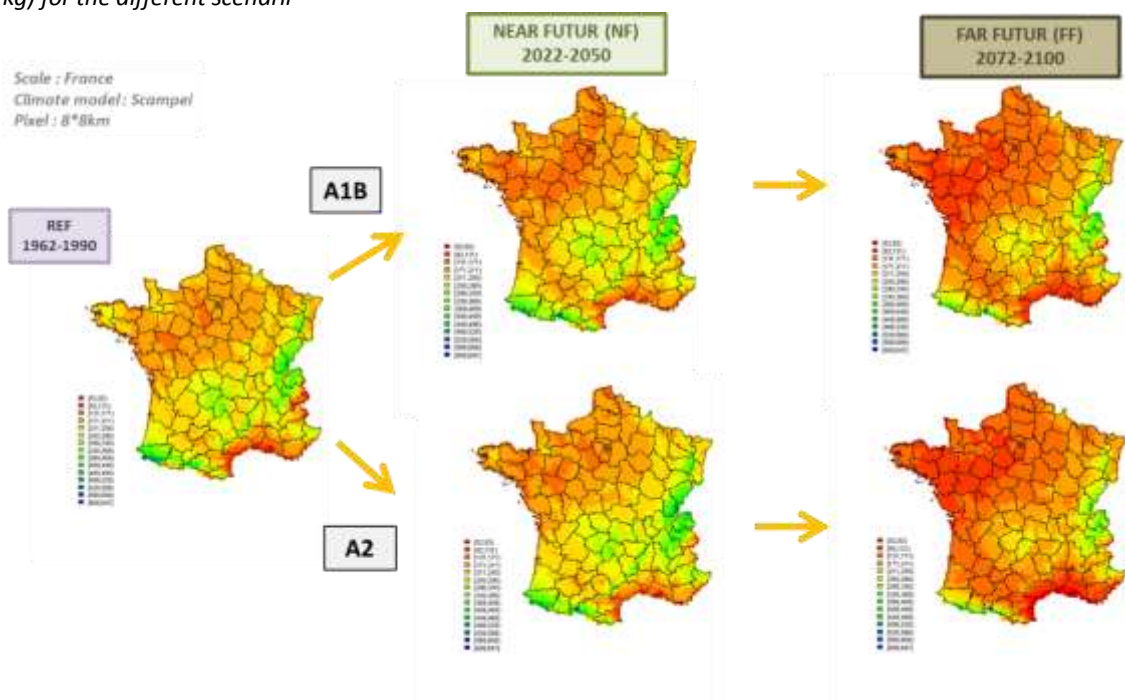


DISCUSSION

Les projections réalisées dans le futur proche et le futur lointain sur différentes sorties de modèles ont permis de tirer un certain nombre de tendance sur les possibles impacts du changement climatique sur le risque *F. graminearum* et DON du blé tendre. Pour réaliser cette étude, le choix a été fait de travailler toute chose égale par ailleurs en se focalisant sur une situation agronomique type. Les projections réalisées sur la date de floraison mettent en évidence une précocification de 10 à 15 jours concordant avec la littérature (Lawlor et Mitchell, 2000 ; Wang et *al.*, 2008 ; Bancal et Gate, 2010). L'utilisation de modèles de formalisme pourtant très différents, développés et validés avec des données différentes conduisent aux mêmes conclusions à savoir une quantité d'inoculum puis *in fine* une teneur en DON prédite dans les grains de blé plus faibles dans un contexte de changement climatique et ce d'autant que le scénario utilisé est pessimiste. Une des explications de cette tendance s'explique par une baisse des précipitations durant le printemps et plus particulièrement autour de la floraison. Or il a été démontré que les modèles aussi bien de production d'inoculum (Corre et *al.*, 2015) que de DON étaient particulièrement sensibles aux pluies (Gourdain et *al.*, 2009). Par ailleurs, pour chaque variable étudiée, une diminution de la variabilité interannuelle de chaque scénario est observée notamment pour le futur lointain, phénomène pouvant être expliqué par le fait que la plupart des variables sont des variables à effets de seuil. De plus, une importante disparité régionale est observée. L'observation des cartes de pluie sur la période printanière (Fig. 9) met en avant cette même disparité régionale et peut expliquer en partie l'impact sur la maturation, l'éjection et l'infection du pathogène. Les régions où la quantité de pluie diminue sur la période printanière sont les mêmes pour lesquelles la teneur en DON prédite à la récolte diminue. Néanmoins, une mise en garde importante doit être faite sur l'interprétation des résultats présentés en figures 6 et 7. En effet, pour simplifier l'étude nous sommes partis d'une situation agronomique homogène sur toute la France c'est-à-dire précédent maïs, non labour, variété sensible. Or cette situation ne représentait que 1 % des surfaces de blés emblavées (Agreste, 2006) et 7% en 2011 (Agreste, 2011). Ainsi, comme le nombre de combinaison a étudié pour avoir une vision réaliste du risque est trop importante, nous avons délibérément choisi une situation agronomique de référence très pessimiste.

Figure 8 : cartographie de la teneur en DON médiane prédite mise en 3 classes (jaune ≤ 1250 ; orange >1250 et <3000 ; rouge ≥ 3000 $\mu\text{g/kg}$) pour les différents scénarii

Figure 8: map of predicted median DON content in 3 classes (yellow ≤ 1250 ; orange >1250 et <3000 ; red ≥ 3000 $\mu\text{g/kg}$) for the different scenarii



Les publications qui se sont intéressées à l'impact du changement climatique sur la fusariose des épis du blé (West et *al.*, 2012 ; Waalwijk et *al.*, 2009) et plus généralement sur différents pathosystèmes (Gouache et *al.* 2013 ; Launay et *al.* 2014 ; Manici et *al.*, 2014) mettent en avant la difficulté de tirer des conclusions généralisables lors d'étude d'un pathosystème donné. Ce constat est lié aux différentes sources d'incertitudes qui incombent à ce type d'étude (Allard et Brisson, 2010). Première source d'incertitude, les incertitudes climatiques sur le climat futur. Dans cette étude, nous n'avons travaillé que sur un modèle de projection climatique alors qu'il en existe de nombreux autres. Or même si tous s'accordent sur une augmentation de la température, les projections en ce qui concernent les précipitations varient fortement d'un modèle à l'autre (Hawkins et Sutton, 2010) dont l'influence sur les modèles est forte. Pour obtenir des tendances plus robustes, il aurait fallu utiliser plusieurs modèles climatiques, ainsi que plusieurs modèles agro-climatiques. Malgré tout, d'autres sources d'incertitudes subsisteraient telles que la distribution spatiale des souches de pathogènes (Waalwijk et *al.*, 2009) et des espèces végétales ainsi que l'évolution des variétés cultivées et des pratiques agronomiques associées. En effet, il semble évident que les pratiques des agriculteurs s'adapteront à ces évolutions (Gouache et *al.*, 2012) auquel cas les hypothèses de travail pour réaliser cette étude ne seront plus d'actualité. Pour finir, les modèles utilisés (phénologique, de prédiction de l'inoculum et de DON) ont eux aussi leur part d'incertitude qui n'a pas été prise en compte dans cette étude et peuvent influencer sur les résultats.

Néanmoins, ces travaux apportent des éléments de réflexion indispensables pour orienter les travaux de recherche à conduire et les grandes orientations des décideurs politiques.

CONCLUSION

Sous réserve de la validation de leur domaine de validité climatique, l'utilisation de modèles agro-climatiques montre un intérêt scientifique et politique certain dans l'évaluation des risques de développement de pathogènes tels que *F. graminearum* qui s'accompagne d'un enjeu sanitaire et donc de santé publique. A travers les projections réalisées avec les scénarii climatiques issus du modèle climatique ALADIN dans le cadre de l'ANR Scampeï et en limitant notre étude à une situation agronomique donnée, l'étude montre que le risque d'infection du blé tendre par *F. graminearum* et la teneur en DON associée ne doit pas augmenter dans le futur proche et pourrait même diminuer dans le futur lointain, aussi bien dans le temps que dans l'espace. Cette diminution serait en partie due à une réduction des événements pluvieux au cours du printemps réduisant le potentiel infectieux du pathogène. Néanmoins, ces conclusions doivent être utilisées avec précaution en raison des nombreuses incertitudes autour des paramètres climatiques à l'échelle locale et principalement les événements pluvieux, des modèles utilisés, de l'évolution des variétés, des souches et des pratiques agronomiques. Pour être plus robustes, ces travaux doivent être réalisés avec d'autres modèles agro-climatiques et d'autres modèles climatiques, voire sur des données climatiques du sud de l'Europe, afin de confronter les résultats et d'en tirer une tendance.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Météo France (CNRM-GAME) qui nous a fourni les données du projet ANR Scampeï, ainsi que l'ensemble des partenaires impliqués dans le développement du modèle *F. graminearum*, Prof. Rossi et Valentina Manstretta (Università Cattolica del Sacro Cuore, Italie), Prof. Simon Edwards (Harper Adams University College, Royaume-Uni), Dr. Ingerd Skow-Hofgaard (Bioforsk, Norvège), Dr. Susanne Vogelgsang (Agroscope, Suisse), Dr. Paula Persson (Swedish University of Agricultural Sciences, Suède).

BIBLIOGRAPHIE

Agreste – Enquêtes pratiques culturelles 2006

Agreste – Enquêtes pratiques culturelles 2011

- Allard D., Brisson N., 2010. Analyse des sources d'incertitudes et de variabilités. In : Brisson N., Levrault F. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010). ADEME, 155 :168.
- Bancal M.O., Gate P., 2010. Changement climatique et culture du blé : l'essentiel des impacts. In : Brisson N., Levrault F. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Livre vert du projet CLIMATOR 2007-2010. ADEME, 155 :168.
- Battilani P., Van Der Fels Klerkx I., Miraglia M., Moretti A., Miglietta F., 2010. Modelling, predicting and mapping the emergence of aflatoxins in cereals in the EU due to climate change. *Petria*, 20 (2), 453–454.
- Corre C., Gourdain E., Grignon G., Héritier E., Manstretta V., Rossi V., 2015. Un modèle épidémiologique pour piloter le traitement contre *F. graminearum* sur céréales à paille : analyse de sensibilité sur les paramètres climatiques. *AFPP – 11ème Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes*, Tours, 7 et 9 décembre 2015. Article sous presse.
- Del Ponte E.M., Fernandes J.M.C., Pavan W., 2005. A risk infection simulation model for *Fusarium* head blight of wheat. *Fitopatologia Brasileira*, 30, 634–642.
- De Wolf E.D., Madden L.V., Lipps P.E., 2003. Risk assessment models for wheat *Fusarium* head blight epidemics based on within-season weather data. *Phytopathology*, 93, 428–435.
- Déqué M., 2011. Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes. *Projet SCAMPEI ANR-08-VULN-0009-01*.
- EC Commission Regulation 2006. Commission Regulation n°1881/2006 of 19 december 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. *Official Journal of the European Union* 20.12.2006 L364/5-L364-24.
- Gouache D., Bensadoun A., Brun F., Pagé C., Makowski D., Wallach D., 2013. Modelling climate change impact on Septoria tritici blotch (STB) in France: Accounting for climate model and disease model uncertainty. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 242–252.
- Gouache D., Le Bris X., Borgard M., Deudon O., Pagé C., Gate P., 2012. Evaluating agronomic adaptation options to increasing heat stress under climate change during wheat grain filling in France. *European Journal of Agronomy*, 39, 62–70.
- Gourdain E., Piraux F., Barrier-Guillot B., 2009. Les outils pour gérer le risque déoxynivalénol sur blé tendre et blé dur. *AFPP – 9ème Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes*, Tours, 8 et 9 décembre 2009.
- Gourdain E., Batina H., Du Cheyron P., Fourrey A., Gélisse S., Grignon G., Laval V., Maumené C., Méléard B., Valade R. 2015. Lutte contre les fusarioses des épis de blés : quantification des espèces du complexe fusarien, facteurs de risque et méthodes de lutte, article sous presse pour *Innovations agronomiques*.
- Hawkins E., Sutton R., 2010. The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics*, 37, 407–418.
- Launay M., Caubel J., Bourgeois G., Huard F., Garcia de Cortazar-Atauri I., Bancal M.O., Brisson N., 2014. Climatic indicators for crop infection risk: Application to climate change impacts on five major foliar fungal diseases in Northern France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 197, 147–158.
- Lawlor D.W., Mitchell R.A.C., 2000. Crop Ecosystem Responses to Climatic Change: Wheat. In : Reddy K.R., Hodges H.F. Climate Change and Global Crop Productivity. CAB International, London, 57: 80.
- Magan N., Medina A., Aldred D., 2011. Possible climate-change effects on mycotoxin contamination of food crops pre- and postharvest: Mycotoxins and climate change. *Plant Pathology*, 60, 150–163.

Manici L.M., Bregaglio S., Fumagalli D., Donatelli M., 2014. Modelling soil borne fungal pathogens of arable crops under climate change. *International Journal of Biometeorology*, 58, 2071–2083.

Manstretta V., 2014. Ascospore production, dispersal and survival in *Fusarium graminearum*, Thèse de doctorat en agronomie, sous la direction de Rossi V., Scuola di Dottorato per il Sistema Agro-alimentare, Piacenza.

Miraglia M., Marvin H.J.P., Kleter G.A., Battilani P., Brera C., Coni E., Cubadda F., Croci L., De Santis B., Dekkers S., Filippi L., Hutjes R.W.A., Noordam M.Y., Pisante M., Piva G., Prandini A., Toti L., van den Born G.J., Vespermann A., 2009. Climate change and food safety: An emerging issue with special focus on Europe. *Food and Chemical Toxicology*, 47, 1009–1021.

Rossi V., Giosuè S., Patteri E., Spanna F., Del Vecchio A., 2003. A model estimating the risk of *Fusarium* head blight on wheat. *European Plant Protection Organisation Bulletin*, 33, 421–425.

Shah D.A., Molineros J.E., Paul P.A., Willyerd K.T., Madden L.V., De Wolf E.D., 2013. Predicting *Fusarium* head blight epidemics with weather-driven pre-and post-anthesis logistic regression models. *Phytopathology*, 103, 906–919.

Schaafsma A.W., Hooker D.C., 2007. Climatic models to predict occurrence of *Fusarium* toxins in wheat and maize. *International Journal of Food Microbiology*, 119, 116–125.

Van der Fels-Klerx H.J., Kandhai M.C., Booij C.J., 2008. A conceptual model for identification of emerging risks, applied to mycotoxins in wheat-based supply chains. *World Mycotoxin Journal*, 1, 13–22.

Waalwijk C., van der Lee T.A.J., Yang L., de Vries P.M., Kema G.H.J., 2009. Are changes in the composition of the *Fusarium* Head Blight complex caused by climate change? *KNPV Symposium Pests and climate change*, 3 December, 2008, Wageningen, The Netherlands.

Wang H.L., Gan Y.T., Wang R.Y., Niu J.Y., Zhao H., Yanga Q.G., Li G.C., 2008. Phenological trends in winter wheat and spring cotton in response to climate changes in northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1242–1251.

West J.S., Holdgate S., Townsend J.A., Edwards S.G., Jennings P., Fitt B.D.L., 2012. Impacts of changing climate and agronomic factors on fusarium ear blight of wheat in the UK. *Fungal Ecology*, 5, 53–61.