

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

**UN MODELE ÉPIDÉMIOLOGIQUE POUR PILOTER LE TRAITEMENT CONTRE *F. GRAMINEARUM* SUR
CÉRÉALES À PAILLE :
ANALYSE DE SENSIBILITÉ SUR LES PARAMÈTRES CLIMATIQUES**

C. CORRE ⁽¹⁾, E. GOURDAIN ⁽¹⁾, G. GRIGNON ⁽¹⁾, E. HÉRITIER ⁽¹⁾, V. MANSTRETTA ⁽²⁾, V. ROSSI ⁽²⁾

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

⁽²⁾Università Cattolica del Sacro Cuore, Plaisance, Italie

c.corre@arvalisinstitutduvegetal.fr

RÉSUMÉ

La fusariose de l'épi est une des principales maladies du blé, elle altère le rendement ainsi que la qualité du grain. Dans un contexte de limitation de l'usage des produits phytosanitaires et d'une réglementation sur les teneurs en mycotoxines à la récolte, ARVALIS, en collaboration avec l'université de Piacenza, développe un modèle afin d'optimiser le traitement contre *F. graminearum*, principale espèce productrice de mycotoxines sur blé. Ce modèle dit mécaniste décrit la phase sexuée de l'agent pathogène. Un premier prototype a été développé, basé exclusivement sur des variables climatiques. Afin de bien en comprendre les sorties et l'influence de chacun des paramètres du modèle sur ces sorties, une analyse de sensibilité a été réalisée à travers 3 méthodes : Morris, ANOVA et Random Forest. Ces méthodes ont donné des résultats cohérents permettant d'identifier les paramètres les plus influents du modèle.

Mots-clés : Fusariose des épis – Blé – *Fusarium graminearum* - Modélisation – Analyse de sensibilité.

ABSTRACT

AN EPIDEMIOLOGICAL MODEL TO GUIDE TREATMENT AGAINST *F. GRAMINEARUM* ON STRAW CEREALS: SENSITIVITY ANALYSIS ON CLIMATIC PARAMETERS

Fusarium head blight is a major disease of wheat; it alters the yield and grain quality. In a context of reduced use of pesticides and regulations on mycotoxins at harvest, ARVALIS in collaboration with the University of Piacenza is developing a model that aims to optimize treatment against *F. graminearum*, the main mycotoxins-producing species on wheat. This mechanistic model describes the sexual stage of the pathogen. A first prototype was developed based on climatic parameters. To understand better the model outputs and the influence of each of the model parameters on these outputs, a sensitivity analysis was performed through three methods: Morris, ANOVA and Random Forest. These methods gave consistent results, enabling us to identify the most influential parameters.

Keywords: *Fusarium* Head Blight – Wheat - *Fusarium graminearum* - Modeling – Sensitivity Analysis.

INTRODUCTION

La fusariose de l'épi est une maladie du blé induite par un complexe d'espèces fongiques présentes sur les grains en quantité variable selon l'espèce et le climat. Dans des essais réalisés par ARVALIS-Institut du végétal entre 2007 et 2009 en région Centre, la nuisibilité moyenne associée aux attaques de « fusarioses » est estimée en moyenne à 15 q/ha, suite à la sénescence prématurée des épillets. Associé à l'enjeu économique, cette maladie pose également problème en terme sanitaire puisqu'elle s'accompagne d'une accumulation de mycotoxines dans les grains récoltés. En Europe, les champignons pathogènes causant cette maladie sont du genre *Fusarium* et *Microdochium*. L'espèce la plus préoccupante en France est *F. graminearum* (FG), car elle est toxigène (contrairement au genre *Microdochium*), et présente dans environ 80% des grains à la récolte (Gourdain *et al.*, 2015). Ce

champignon est capable de produire des trichothécènes de type B dont le déoxynivalénol (DON), toxine réglementée depuis 2006 (Règlement CE n°1881/2006 du 19/12/2006, révisé par le règlement n°1126/2007 du 28/09/2007), et la plus fréquemment retrouvée dans les blés. Les grains contaminés peuvent donc devenir impropres à la consommation humaine, et perdre en valeur marchande. Des études menées par Gourdain *et al.* 2015 ; Lindblad *et al.* 2013 ; Mesterházy 2002 ; Schnerr *et al.* 2002, ont montré que le taux de DON dans les grains de blé était fortement corrélé à la quantité d'ADN de FG présente dans ces mêmes grains. Cet élément tend à montrer que *F. graminearum* est le principal producteur de DON sur les blés français. Les facteurs les plus influents sur l'infection des épis par FG, et donc sur le taux de DON à la récolte, sont le climat autour de la floraison, le précédent cultural, le travail du sol ainsi que la sensibilité variétale (Obst and Bechtel, 2000 ; Schaafsma *et al.*, 2001; Barrier-Guillot *et al.*, 2006; Lemmens, 2007; Gourdain *et al.*, 2009).

Il est communément admis par la communauté scientifique que la période critique de sensibilité du blé à la fusariose est réduite à une dizaine de jours, de début épiaison à fin floraison. Quelques études ont malgré tout testé des contaminations tardives par *Fusarium spp.*, dont certaines dans lesquelles le DON a été mesuré à différents stades, toutes convergent vers une diminution des teneurs en DON lorsque les dates d'inoculation sont plus tardives (Hart *et al.*, 1984, Lacey *et al.*, 1999, Del ponte *et al.*, 2007 , Gourdain et Rosengarten, 2010). Ainsi la période possible de traitement fongicide anti-fusariose se situe dans cette fenêtre restreinte autour de la floraison. La sévérité de la maladie, et donc la nécessité d'un traitement, sont extrêmement liées aux conditions météorologiques durant cette période. Les symptômes n'apparaissant que plusieurs semaines après l'infection, les agriculteurs ont tendance à employer une stratégie de lutte systématique. En 2014, plus de 4 millions d'hectares de céréales ont été traités contre la fusariose des épis en France, ce qui correspond à 45 % des surfaces cultivées en céréales (Source : firmes phytosanitaires). Dans un contexte de réduction des pesticides (projet de plan Ecophyto II, 5 juin 2015) ainsi que de la nécessité de justifier les traitements, la fusariose des épis provoquée par *F. graminearum* est donc une maladie propice à une modélisation en vue de proposer un outil de pilotage du traitement fongicide. Cet outil constituerait un indicateur fiable pour décider de traiter ou non, ainsi qu'un levier d'optimisation des traitements.

L'objectif de cet article est de présenter un modèle mécaniste (nommé F.grami) reproduisant une partie du cycle épidémiologique de FG, ainsi que les méthodes d'analyse de sensibilité qui ont été mises en œuvre afin d'évaluer l'influence des paramètres du modèle sur ses sorties.

MATERIELS ET MÉTHODES

CONSTRUCTION DU MODELE F.GRAMI

Le modèle mécaniste F.grami calcule un nombre relatif journalier d'ascospores matures éjectées à partir de données météorologiques: température moyenne journalière, précipitations, humidité relative.

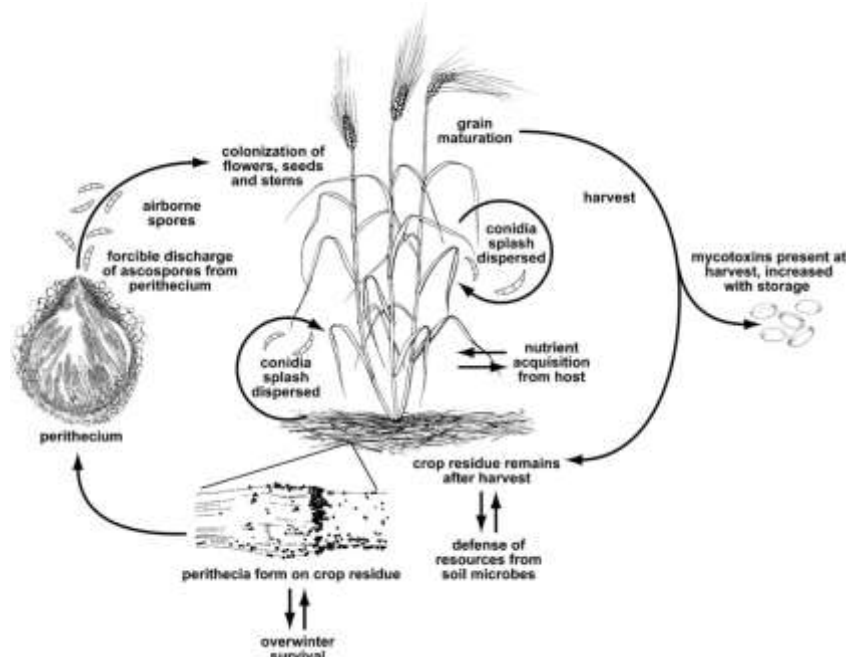
Ce modèle est développé dans le cadre d'un partenariat avec des institutions de cinq pays européens : l'Italie (Università Cattolica del Sacro Cuore de Piacenza), la Norvège (Bioforsk), la Suisse (Agroscope), la Suède (Swedish University of Agricultural Sciences) et le Royaume-Uni (Harper Adams University College). Il est implémenté en langage R (<http://www.r-project.org>).

L'épidémiologie de *F. graminearum* comme base du modèle

F. graminearum est un champignon capable de produire deux types d'inoculum (Figure 1) : i) les macroconidies issues de la reproduction asexuée, elles sont dispersées par les éclaboussures de pluie. Leur contribution à l'infection de l'épi est jugée négligeable (Markell, 2003). ii) les ascospores, produites par les périthèces par reproduction sexuée. Elles sont expulsées puis dispersées par le vent car plus légères que les macroconidies.

Ce champignon est monocyclique : il se reproduit sur des résidus de culture majoritairement, contamine les épis puis retourne à l'état végétatif, hivernant sur les résidus de culture.

Figure 1 : Cycle de vie de *F. graminearum* (forme sexuée: *Gibberella zeae*) Source: Trail et al. 2009.
(Life cycle of *F. graminearum* (sexual phase: *Gibberella zeae*))



Le modèle que nous développons s'appuie sur des données expérimentales et bibliographiques permettant de modéliser la phase saprophyte du champignon à travers la maturation des périthèces et des ascospores, ainsi que le taux d'éjection journalier en fonction de données de pluie et de température. La période de temps considérée commence en fin d'hiver, lorsque que les conditions climatiques rendent le développement de périthèces possible, et se termine fin août après la récolte du blé. Il ne prend pas en compte la phase pathogène du champignon.

Modélisation de la maturation des ascospores

La date à partir de laquelle le développement des périthèces est possible définit le début de la période à considérer. Ce développement commence pour une température de 8 à 12°C selon les sources (Dufault et al. 2006, Manstretta 2014) et les souches de champignons étudiées, et pour une humidité relative supérieure à 75% (Manstretta 2014). Les données d'humidité relative n'étant pas toujours disponibles, le modèle définit si un jour est humide ou non à partir de la pluviométrie :

- Condition 1 : si $\text{rain}_i \geq 0.5 \text{ mm}$ alors i est un jour humide
- Condition 2 : si $0.5 \leq \text{rain}_{i-1} < 5 \text{ mm}$ alors i est un jour humide
- Condition 3 : si $\text{rain}_{i-1} + \text{rain}_{i-2} \geq 5 \text{ mm}$ alors i et $i+1$ sont des jours humides

Avec rain_i correspondant à la quantité de pluie en mm du jour i .

Les seuils de pluviométrie utilisés ont été choisis à partir du modèle de Manstretta, 2014 (chapitre 2), permettant de connaître l'humidité des résidus de culture en fonction de la pluie. Le jour de démarrage des calculs est le premier jour d'une série de trois où la température journalière est supérieure à 10°C et dont au moins un jour est humide.

D'autres travaux de Manstretta, consistant en des comptages de périthèces et d'ascospores en conditions humides ou naturelles (Manstretta, 2014, chapitre 1) ont permis d'ajuster une équation logistique par la méthode des moindres carrés (package R nls2) donnant un nombre relatif cumulé journalier d'ascospores matures en fonction des jours humides et de l'accumulation de degrés jours en base 10 :

$$\text{rel}_{mat}(i) = \frac{K}{(1 + \frac{DD10_{u(i)}}{A})^B}$$

Avec $rel_{mat}(i)$ le nombre relatif cumulé d'ascospores au jour i ,
 K, A et B des constantes d'ajustement,
 $DD10_{u(i)}$ la somme de degrés jours en base 10 (DD10) calculée comme suit :
 { si $DD10_{u(i)} < x0$, somme de DD10 en ne prenant en compte que les jours humides
 { si $DD10_{u(i)} \geq x0$, somme de DD10 indépendamment de l'humidité

Ainsi, pour chaque jour le modèle calcule un potentiel infectieux avant éjection autrement appelé index d'inoculum $indexIno(i)$:

$$indexIno(i) = rel_{mat}(i) - rel_{mat}(i-1)$$

Modélisation de l'éjection des ascospores

Le modèle calcule un taux d'éjection de spores ($tauxEject(i)$) basé sur des données de Trail (1998). Il est déterminé par une fonction logistique :

$$tauxEject(i) = 0.1 + \frac{1}{1 + e^{a.6 - b.6 * RH(i)}}$$

Avec $RH(i)$ l'humidité relative du jour i , et $a.6$ et $b.6$ des constantes d'ajustement.

La constante de 0.1 est liée aux données avec un taux d'éjection de 0.1 pour une RH nulle.

Le modèle calcule le nombre relatif d'ascospores éjectées par jour $inoEject(i)$ comme suit :

$$inoEject(i) = stockIno(i) * tauxEject(i)$$

Avec $stockIno(i) = indexIno(i) + stockIno(i-1) - inoEject(i-1)$

En effet, le modèle considère un stock d'inoculum ($stockIno(i)$) constitué des nouvelles ascospores mures du jour ainsi que des ascospores mures produites les jours précédents mais non éjectées.

LES METHODES D'ANALYSE DE SENSIBILITE

L'analyse de sensibilité est une méthode d'évaluation de la qualité d'un modèle permettant de quantifier la part de la variabilité des sorties d'un modèle imputable à chaque facteur (variables d'entrée et paramètres), conditionnellement à leur intervalle d'incertitude (Wallach *et al.*, 2014). Nous avons mis en œuvre cette méthode sur les paramètres du modèle dans le but d'identifier les plus influents, et d'approfondir nos connaissances sur le fonctionnement du modèle. Huit paramètres ont ainsi été étudiés (Tableau 1). La finalité de cette opération est d'identifier les paramètres sur lesquels il faudra porter un effort de précision afin d'améliorer la qualité prédictive du modèle. La plage de variation des paramètres retenue est celle de leur intervalle de confiance à 95% (correspondant à la valeur estimée ± 2 fois l'erreur standard), et une variation de $\pm 20\%$ sera appliquée à ceux qui n'en ont pas.

Tableau 1 : Paramètres* utilisés pour l'analyse de sensibilité du modèle.

Table 1: Parameters used for the sensitivity analysis of the model.

	Estimation	Limite inférieure	Limite supérieure	Signification
Pmin	0.5	0.4	0.6	Seuils de pluie inférieur et supérieur de définition des jours humides
Pmax	5	4	6	
a.6	estimation	Estimation + 2*err std	Estimation - 2*err std	Paramètres de l'équation logistique du calcul du taux d'éjection
b.6	estimation	Estimation + 2*err std	Estimation - 2*err std	
x0	estimation	Estimation + 2*err std	Estimation - 2*err std	Paramètre de calcul de DD10_u
K	estimation	Estimation + 2*err std	Estimation - 2*err std	Paramètres de l'équation logistique du calcul de la maturation des ascospores
A	estimation	Estimation + 2*err std	Estimation - 2*err std	
B	estimation	Estimation + 2*err std	Estimation - 2*err std	

* Le modèle étant en cours de validation, le parti a été pris de ne pas fournir les valeurs des paramètres utilisés.

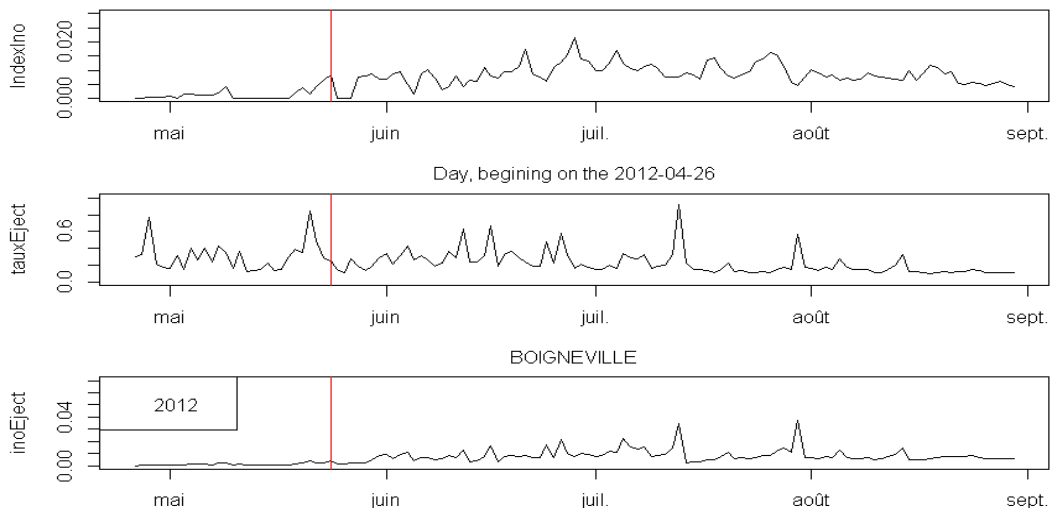
Les données de simulation

La valeur de sortie considérée pour l'analyse de sensibilité est le cumul d'ascospores éjectées 15 jours autour de la floraison. Afin de prendre en compte la variabilité du climat, nous effectuerons l'analyse de sensibilité sur neuf années (de 2006 à 2014) et cinq stations météorologiques reflétant la diversité du climat des principales zones de culture du blé tendre en France (Boigneville (91), Ouzouer-le-Marché (45), En Crambade (31), Château-Gontier (53), Rots (14)). La date de floraison de l'année pour la station considérée est calculée à partir d'un modèle de prévision (Gouache *et al.*, 2012) des stades pour un blé de variété Apache semé le 20 octobre, ceci afin de traiter un cas-type homogène : Apache peut être cultivé sur tout le territoire, mais nous n'avons pas toujours les références terrain associées.

La figure 2 donne un exemple de trois sorties du modèle (IndexIno, tauxEject et inoEject) pour la station Boigneville entre mai et septembre 2012. Pour l'analyse de sensibilité, une seule sortie est étudiée : la somme d'inoEject autour d'une date de floraison simulée.

Figure 2 : Nombre relatif journalier d'ascospores matures (haut), taux d'éjection journalier (milieu) et nombre relatif journalier d'ascospores éjectées (bas) calculés par le modèle en fonction du temps, à Boigneville en 2012. La date de la floraison est marquée par la ligne verticale rouge.

Figure 2: Relative daily number of mature ascospores (up), daily discharge rate (middle) and relative daily number of discharged ascospores (bottom) calculated by the model as a function of time, in Boigneville, 2012. The flowering date is represented by the red vertical line.



Nous comparerons les résultats de trois méthodes d'analyse de sensibilité que nous détaillerons. Ces méthodes seront mises en œuvre grâce au logiciel R. Pour chaque méthode nous effectuerons une analyse de sensibilité par station et par an, ce qui donnera 45 résultats, et nous moyennerons les indices de sensibilité obtenus par station afin d'intégrer la variabilité annuelle et d'observer l'effet station.

Méthode de Morris

La méthode de Morris est très utilisée pour les modèles complexes car elle fournit des indicateurs utiles, même avec un petit nombre de simulations. Elle donne les indices de sensibilité du premier ordre (variation partielle de la sortie induite par la variation du facteur considéré) ainsi qu'une information qualitative sur les interactions entre facteurs et la nature additive ou non-linéaire de leurs effets. Elle est basée en partie sur l'approche « One At a Time » (OAT) : cela consiste à faire varier de manière discrète dans un intervalle donné chaque paramètre l'un après l'autre en fixant les autres, et de calculer les sorties du modèle pour chaque combinaison de valeurs de paramètres fixées. La méthode de Morris utilise le principe de l'OAT sur différentes combinaisons des autres paramètres, ce qui permet de calculer les indices de sensibilité de chaque paramètre « sachant que les autres paramètres ont varié également ». Les indices de sensibilité des facteurs sont calculés comme suit : pour chaque facteur X_i et chaque combinaison k des paramètres, nous calculons la différence entre deux sorties où seul ce facteur a été modifié, ramenée à la valeur de la perturbation de ce facteur (Δ):

$$d_{k(X1)} = \frac{f(X1(k) + \Delta, X2(k), X3(k) \dots, Xn(k)) - f(X1(k), X2(k), X3(k) \dots, Xn(k))}{\Delta}$$

Nous calculons ensuite la moyenne (μ^*) des $d_{k(X1)}$ et leur écart-type (σ) sur l'ensemble des perturbations Δ et combinaisons K testées pour évaluer la sensibilité du modèle au paramètre $X1$. μ^* est une mesure de sensibilité : si sa valeur est relativement forte pour un paramètre, cela signifie qu'une perturbation de sa valeur a des effets importants sur la sortie. σ est une mesure des interactions et des effets non linéaires : si sa valeur est relativement forte pour un paramètre, ses effets dépendent de la valeur du paramètre (effet non linéaire) ou des autres paramètres (interactions).

Afin d'obtenir un résultat stable, nous avons testé 9000 simulations pour chaque année. La méthode de Morris a été mise en œuvre grâce à la fonction `morris()` du package R `sensitivity`.

La méthode d'ANOVA

Une deuxième méthode que nous avons choisi d'utiliser, beaucoup plus gourmande en temps de calcul, est l'ANOVA. Il s'agit d'une analyse de variance de la sortie du modèle en considérant toutes les combinaisons de valeurs des facteurs possibles : dans notre cas, pour 8 facteurs et 3 modalités par facteur possibles (estimation du paramètre et bornes de l'intervalle de confiance de cette estimation) cela représente 3^8 soit 6561 simulations à réaliser par année et par station. Cette méthode fournit un indice de sensibilité pour les facteurs seuls et pour les interactions entre facteurs. Cet indice est assez intuitif, puisqu'il s'agit du pourcentage de variabilité de la sortie causée par chaque effet. Pour chaque effet étudié, l'indice de sensibilité est calculé par station et par année en faisant le ratio de la somme des carrés de l'effet sur la variance totale de la sortie. Pour effectuer l'ANOVA, toutes nos variables (qui sont les paramètres du modèle) sont déclarées en facteur. Nous utiliserons la fonction de R `aov()` (anova de type I).

La méthode des forêts aléatoires

Enfin, il nous a semblé intéressant de mettre en œuvre la méthode des forêts aléatoires, qui est indépendante de la nature linéaire ou non linéaire du modèle, et détecte les interactions.

Les forêts aléatoires (Random Forest) sont une méthode statistique non-paramétrique introduite par Breiman en 2001 et sont de plus en plus utilisées en modélisation pour identifier les facteurs les plus explicatifs d'un processus donné. Le principe en est l'utilisation d'un grand nombre d'arbres de décision construits chacun avec un sous-échantillon de deux tiers des données totales. Pour chaque construction d'arbre, la décision à un nœud est faite en fonction d'un sous-ensemble de variables tirées au hasard. Chaque arbre donne une valeur prédite, toutes ces valeurs prédites par chaque arbre sont ensuite moyennées à l'échelle de la forêt. L'importance de chaque variable est mesurée grâce aux variations de MSE du modèle (Mean Squared Error) : si une variable est importante pour la prédiction, la perturbation de ses valeurs dans les arbres va induire une forte hausse de la MSE. Le tiers de données restant est utilisé pour estimer l'erreur de classification pour chaque arbre. La Random Forest sera mise en œuvre grâce au package R `randomForest`.

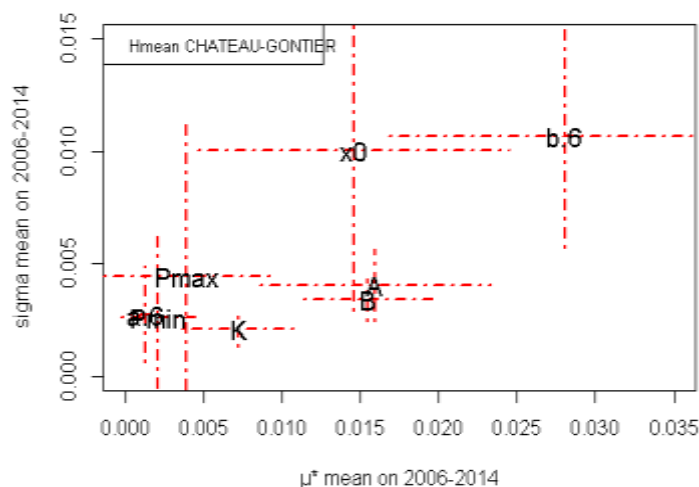
RESULTATS

Résultats de l'analyse de Morris

Il convient de classer les paramètres selon l'axe des μ^* , qui représente la sensibilité du modèle aux paramètres. L'axe des σ permet de savoir si le paramètre a un effet non linéaire sur le modèle, ou s'il existe des interactions avec d'autres paramètres. Globalement, le même classement est observé selon les cinq stations étudiées, avec quatre facteurs très influents : $b.6$, $x0$, B et A (exemple en Figure 3 pour Château-Gontier, les résultats pour les autres stations ne sont pas représentés ici car ils varient peu). L'observation des résultats année par année montre que les facteurs peu influents $Pmin$ et $Pmax$ le sont malgré tout certaines années (par exemple en 2011 à Ouzouer et En Crambade pour $Pmin$, en 2012 à Ouzouer et Rots pour $Pmax$).

Figure 3 : Résultat moyen avec écarts-types des indices (pointillés rouges) de l'analyse de Morris pour la station Château-Gontier entre 2006 et 2014.

Figure 3 : Mean result graph with indices' standard deviation (red dotted lines) for Morris analysis for the Château-Gontier station between 2006 and 2014.

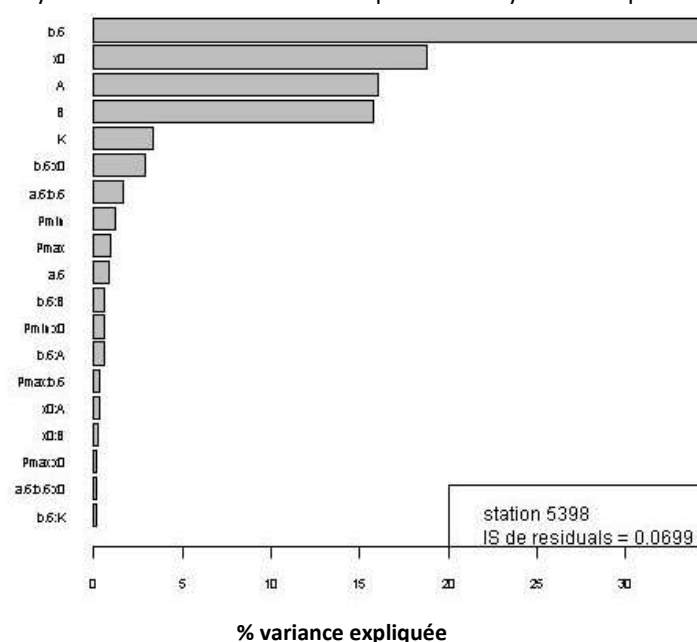


Résultats de la méthode ANOVA

La méthode ANOVA permet de préciser quels sont les effets d'interactions entre facteurs les plus influents. On observe ainsi des interactions b.6 :x0, a.6 :b.6, et Pmin :x0, ce qui est cohérent avec les résultat de Morris puisque x0 et b.6 avaient une forte valeur de σ (Figure 4).

Figure 4 : Résultat moyen de la méthode ANOVA pour la station Château-Gontier entre 2006 et 2014. Seuls les indices moyens supérieurs à 0.1% de la variabilité totale de la sortie sont représentés.

Figure 4: Mean result graph for ANOVA analysis for the Château-Gontier station between 2006 and 2014. Sensitivity indices below 0.1% of total output variability are not represented.

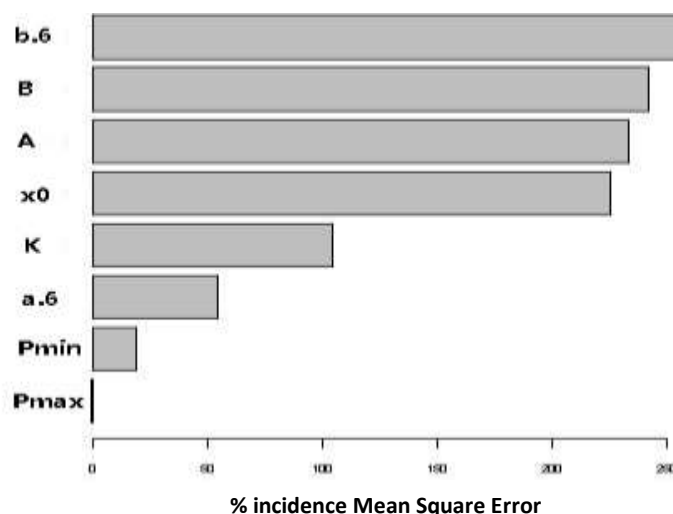


Résultats des Forêts Aléatoires

La méthode des Forêts Aléatoires permet de classer les paramètres par ordre d'influence. Les interactions sont comprises dans l'indice de sensibilité obtenu. Le classement obtenu avec cette méthode donne les mêmes variables influentes b.6-x0-B-A (Figure 5).

Figure 5 : Résultat moyen de la méthode Random Forest pour la station Chateau-Gontier entre 2006 et 2014.

Figure 5: Mean result graph for random forest analysis for the Chateau-Gontier station between 2006 and 2014.



DISCUSSION

La plupart des méthodes d'analyses de sensibilité supposent l'indépendance (non-corrélation) des variables d'entrée du modèle ou des paramètres, ce qui n'est pas le cas avec des paramètres météorologiques. Cette contrainte a été violée ici avec Morris: ceci constitue une des limites de l'étude, mais il n'y a pas de méthode définitive pour l'analyse de sensibilité. Les résultats obtenus, cohérents entre les 3 méthodes, nous ont permis de mettre clairement en évidence l'influence déterminante de quatre paramètres sur les sorties du modèle. Le classement des paramètres entre Morris et l'ANOVA est généralement conservé, mais nous observons souvent des inversions dans le classement des quatre paramètres principaux entre l'ANOVA et les Forêts Aléatoires. Elles peuvent être dues à la prise en compte des interactions dans les Forêts Aléatoires, alors que pour l'ANOVA l'effet du paramètre seul est séparé de l'effet de l'interaction. Nous observons également les mêmes influences fortes de Pmin et Pmax les mêmes années pour les 3 méthodes, ce qui met en évidence un effet année commun. Dans le cas de notre modèle, la méthode qui nous semble la plus facile à interpréter est celle de l'ANOVA. Cependant les temps de calculs assez longs qu'elle nécessite restreignent son utilisation à des modèles simples, ou avec peu de facteurs à étudier, de plus elle se limite normalement à l'étude de variable linéaire, ce que nous avons contourné en considérant les paramètres comme des variables qualitatives. Pour les modèles comportant un grand nombre de paramètres, une analyse de Morris peut être effectuée préalablement pour déterminer rapidement les facteurs les plus influents. Il existe également bien d'autres méthodes d'analyse de sensibilité (méthode de Sobol, FAST : voir Wallach *et al.*, 2014) qui n'ont pas été testées ici et qui pourraient être plus performantes selon les cas.

Concernant les variations des indices de sensibilité des paramètres selon les années, il serait intéressant de voir si elles sont causées par des variations du climat comme nous pouvons le supposer. Une étude qualitative a été effectuée pour voir dans quelle mesure une variation des données climatiques modifiait l'importance des paramètres : nous avons fait varier ces données en ne travaillant que sur une station météorologique, Boigneville, une année donnée, 2012 et avons effectué une analyse de Morris pour chaque perturbation des données. Nous en avons retenu qu'une variation d'humidité relative influait sur a.6 et b.6, une variation des précipitations influençait surtout Pmax, tandis qu'une variation des températures avait le même effet sur l'influence de tous les paramètres. Une étude plus approfondie serait nécessaire, mais nous pouvons néanmoins en déduire que le climat modifie bien l'influence des paramètres sur les sorties du modèle.

CONCLUSION

Les résultats de l'analyse de sensibilité montrent que quatre des paramètres du modèle épidémiologique F.grami sont très influents sur les sorties. Il convient maintenant d'entrer dans la phase de validation des sorties du modèle en les confrontant à des données réelles de terrain afin de vérifier que les paramètres estimés, notamment b_6 , A, B et x_0 soient les plus fiables possible. Une fois ce travail réalisé, il restera à pondérer les sorties du modèle par les paramètres agronomiques influant fortement sur le développement du pathogène : précédent cultural, travail du sol, variété. De plus un modèle complémentaire décrivant les espèces dominantes du complexe fusarien, *F. graminearum*, *M. nivale* et *M. majus*, serait nécessaire afin de bien prendre en compte le risque fusariose dans sa globalité et proposer ainsi une stratégie de traitement fongicides adaptée.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous remercions ARVALIS Institut du végétal qui nous a donné les moyens matériels de mener ces travaux. Par ailleurs notre avancement a été grandement aidé par les ingénieurs de l'institut, dont Romain Valade, Xavier Le Bris, Gilles Couleaud, Claude Maumené, Jean-Yves Maufras et Amandine Pierre qui ont participé à la réflexion sur le modèle F.grami, ainsi que François Piraux, Florent Duyme et Benoît Piquemal qui ont participé à la mise en œuvre des analyses de sensibilité.

BIBLIOGRAPHIE

- Barrier-Guillot B., Delambre M., Morel A., Maumené C., Gouet H., Grosjean F., Leuillet M. 2006. Identification of agronomic factors that influence the level of DON in wheat grown in France. Mycotoxins and phycotoxins. Advances in determination, toxicology and exposure management. Edited by H. Njapau, S. Trujillo, H.P. van Egmond, D.L. Park. 239-247
- Breiman L. 2001. Random forests. Machine Learning, 45(1), 5-32.
- Del Ponte E.M., Fernandes J.M.C., Bergstrom G.C., 2007. Influence of growth stage on *Fusarium* head blight and deoxynivalenol production in wheat. Journal of Phytopathology 155, pp. 577-581.
- Dufault N. S., De Wolf E. D., Lipps P. E., Madden L. V., 2006. Role of temperature and moisture in the production and maturation of *Gibberella zeae* perithecia. In : Plant Disease, 90(5), 637-644.
- 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 – 9^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, 8 et 9 décembre 2009.
- Gourdain E., Rosengarten P., 2010. Blé tendre, attaques tardives de fusariose des épis et mycotoxines. Phytoma N°636, août-septembre 2010, 16-20.
- 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.
- Gourdain E., Maumene C., Valade R., Labreuche J. 2015. Lutte prophylactique contre la fusariose des épis : état des connaissances acquises dans le cadre du projet Casdar Ecofusa. AFPP – 5^{ème} Conférence Internationale sur les Méthodes Alternatives de Protection des Plantes, Lille, 11 au 13 mars 2015.
- Hart L.P., Pestka J.J., Liu M.T., 1984. Effect of kernel development and wet periods on production of deoxynivalenol in wheat infected with *Gibberella zeae*. Phytopathology 74, 1415-1418.
- Lacey J., Bateman G.L., Mirocha C.J., 1999. Effects of infection time and moisture on development of ear blight and deoxynivalenol production by *Fusarium spp.* in wheat. Ann. Appl. Biol 134, 277-283.

- Lemmens M., 2007. Genetical, ecophysiological and biochemical interactions modulating the biogenesis of *Fusarium* mycotoxins. In *Colloque scientifique RARE*, Arcachon, France, 3-4.
- Lindblad M., Gidlund A., Sulyok M., Börjesson T., Krska R., Olsen M., Fredlund E., 2013. Deoxynivalenol and other selected *Fusarium* toxins in Swedish wheat – Occurrence and correlation to specific *Fusarium* species. *International Journal of Food Microbiology*, 167 (2) : 284-291.
- 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.
- Markell S.G. et Franc L.J., 2003. *Fusarium* head blight inoculum: species prevalence and *Gibberella zeae* spore type. *Plant disease*, vol. 87, n°7, 814:820.
- Mesterházy A. 2002. Role of deoxynivalenol on aggressiveness of *Fusarium graminearum* and *Fusarium culmorum* and in resistance to *Fusarium* head blight. *European Journal of Pathology* 108 :675-684.
- Obst A., and Bechtel A. 2000. Conditions climatiques favorisant l'attaque des épis de blé par *Fusarium graminearum*. In *Réunion Club Fusariose, Bayer agro*.
- Schaafsma, A.W., Tamburic-Ilinic, L., Miller, J.D., and Hooker, D.C. 2001. Agronomic considerations for reducing deoxynivalenol in wheat grain. *Canadian Journal of Plant Pathology-Revue Canadienne De Phytopathologie* 23: 279-285.
- Schnerr, H. , Vogel, R.F. and Niessen, L. 2002. Correlation between DNA of trichothecene-producing *Fusarium* species and deoxynivalenol concentrations in wheat-samples. *Letters in Applied Microbiology*, Vol. 35, pp121–125
- Trail F, Gadoury D, Loranger R. 1998. Environmental parameters of ascospore discharge in *Gibberella zeae*. In: *Proceedings of the National Fusarium Head Blight Forum*. East Lansing, Michigan: Michigan State University. 11–13
- Trail F., 2009. The *Fusarium graminearum* Genome. In *Plant Physiol* Vol. 149.
- Wallach D., Makowski D., Jones J.W., Brun F. 2014. Sensitivity Analysis. In : *Working with Dynamic Crop Models, 2nd Edition. Methods, Tools and Examples for Agriculture and Environment*. Edition Elsevier, Etats-Unis, 175-191.