

David Makowski, Hervé Monod

# Analyse statistique des risques agro-environnementaux

## Études de cas

$$\phi(n) = \left(1 - \frac{1}{12}\right) \left(1 - \frac{2}{12}\right)$$

$$P(A) = \frac{25}{216} \text{ et } P(B)$$

$$(\forall B \in \beta_{\mathbb{R}}) P_X(B) = P(X^{-1}(B)) \\ = P(\{\omega \in \Omega \mid X(\omega) \in B\})$$



Springer

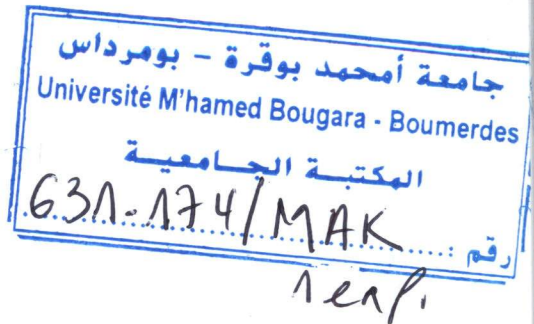
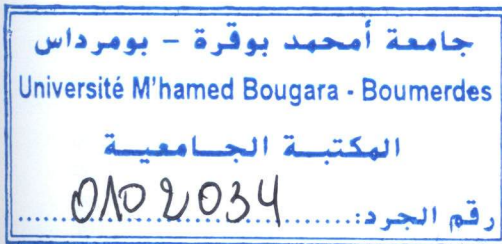
$$P(A_1) = 1 - P(\overline{A_1}) = 1 - (35)^{24} \approx 0.401$$

David Makowski  
Hervé Monod



# Analyse statistique des risques agro-environnementaux

## Études de cas



# Sommaire

## Sommaire

ix

|          |                                                             |           |
|----------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>                                         | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Notions de base</b>                                      | <b>5</b>  |
| 2.1      | Variables aléatoires et lois de probabilité . . . . .       | 5         |
| 2.1.1    | Variable aléatoire . . . . .                                | 5         |
| 2.1.2    | Variables aléatoires discrètes . . . . .                    | 6         |
| 2.1.3    | Variables aléatoires continues . . . . .                    | 7         |
| 2.1.4    | Valeurs caractéristiques d'une variable aléatoire . . . . . | 10        |
| 2.1.5    | Dépendance entre variables aléatoires . . . . .             | 12        |
| 2.2      | La notion de modèle en statistique . . . . .                | 14        |
| 2.2.1    | Description . . . . .                                       | 14        |
| 2.2.2    | Fonction de vraisemblance d'un modèle statistique . . . . . | 15        |
| 2.3      | Inférence statistique . . . . .                             | 16        |
| 2.3.1    | Approche fréquentiste et approche bayésienne . . . . .      | 16        |
| 2.3.2    | Estimateur . . . . .                                        | 17        |
| 2.3.3    | Test statistique et intervalle de confiance . . . . .       | 18        |
| 2.3.4    | Inférence bayésienne . . . . .                              | 19        |
| 2.4      | Les quatre étapes de la modélisation . . . . .              | 20        |
| 2.4.1    | Définition des variables . . . . .                          | 20        |
| 2.4.2    | Choix des équations . . . . .                               | 22        |
| 2.4.3    | Estimation des paramètres . . . . .                         | 22        |
| 2.4.4    | Évaluation des modèles . . . . .                            | 23        |
| 2.4.5    | Importance de la planification expérimentale . . . . .      | 23        |
| 2.5      | Exercices . . . . .                                         | 24        |
| <b>3</b> | <b>Modèles statistiques et évaluation des risques</b>       | <b>27</b> |
| 3.1      | Modèle linéaire . . . . .                                   | 27        |
| 3.1.1    | Définition . . . . .                                        | 27        |
| 3.1.2    | Généralité du modèle linéaire . . . . .                     | 28        |
| 3.1.3    | Estimation des paramètres . . . . .                         | 29        |
| 3.1.4    | Évaluation et limites du modèle linéaire . . . . .          | 30        |

|          |                                                                                                                   |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1.5    | Exemple : prédiction de la teneur en azote et de la teneur en protéines des grains de blé . . . . .               | 31         |
| 3.2      | Modèle linéaire généralisé . . . . .                                                                              | 48         |
| 3.2.1    | Définition . . . . .                                                                                              | 48         |
| 3.2.2    | Exemple : présence/absence d'oiseaux dans une prairie . . . . .                                                   | 49         |
| 3.3      | Modèle non linéaire . . . . .                                                                                     | 58         |
| 3.3.1    | Définition . . . . .                                                                                              | 58         |
| 3.3.2    | Exemple : reliquat d'azote dans le sol à la récolte . . .                                                         | 59         |
| 3.4      | Modèle hiérarchique . . . . .                                                                                     | 69         |
| 3.4.1    | Définition et intérêt . . . . .                                                                                   | 69         |
| 3.4.2    | Exemple : reliquat d'azote dans le sol à la récolte . . .                                                         | 72         |
| 3.4.3    | Exemple : variabilité intra-parcellaire des densités de mauvaises herbes . . . . .                                | 83         |
| 3.5      | Estimation de valeurs extrêmes par régression quantile . . . . .                                                  | 87         |
| 3.5.1    | Définition . . . . .                                                                                              | 87         |
| 3.5.2    | Exemple : risque de sclérotinia du colza . . . . .                                                                | 88         |
| 3.6      | Exercices . . . . .                                                                                               | 94         |
| <b>4</b> | <b>Optimisation des décisions et gestion des risques</b>                                                          | <b>97</b>  |
| 4.1      | Les quatre étapes de l'optimisation . . . . .                                                                     | 97         |
| 4.1.1    | Présentation . . . . .                                                                                            | 97         |
| 4.1.2    | Exemple : détermination d'une température optimale pour le traitement thermique du bois destiné à l'exportation . | 99         |
| 4.2      | Optimisation d'une règle de décision binaire par analyse ROC                                                      | 102        |
| 4.2.1    | Introduction . . . . .                                                                                            | 102        |
| 4.2.2    | Règle de décision binaire et ses deux types d'erreur . . .                                                        | 102        |
| 4.2.3    | Estimation et évaluation par la méthode ROC . . . . .                                                             | 103        |
| 4.2.4    | Exemple : gestion du risque d'invasion par les mauvaises herbes . . . . .                                         | 104        |
| 4.2.5    | Exemple : gestion du risque de sclérotinia du colza . . .                                                         | 110        |
| 4.3      | Optimisation d'une variable décisionnelle par simulation . . . .                                                  | 117        |
| 4.3.1    | Méthode . . . . .                                                                                                 | 117        |
| 4.3.2    | Exemple : calcul de doses optimales d'engrais . . . . .                                                           | 118        |
| 4.4      | Exercices . . . . .                                                                                               | 123        |
| <b>5</b> | <b>Analyse et communication de l'incertitude</b>                                                                  | <b>125</b> |
| 5.1      | Les différents types d'incertitude et leurs conséquences . . . . .                                                | 125        |
| 5.2      | Décrire l'incertitude par des distributions de probabilité . . .                                                  | 126        |
| 5.2.1    | Objectif . . . . .                                                                                                | 126        |
| 5.2.2    | Exemple basé sur des calculs analytiques : risque d'invasion par une espèce nuisible . . . . .                    | 127        |

|          |                                                                                                                |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.3    | Exemple basé sur des simulations de Monte-Carlo : reliquat d'azote dans le sol . . . . .                       | 129        |
| 5.2.4    | Exemple combinant un modèle dynamique et des mesures en cours de saison : estimation du carbone du sol . . . . | 134        |
| 5.3      | Calculer des indices de sensibilité . . . . .                                                                  | 138        |
| 5.3.1    | Objectifs et définitions . . . . .                                                                             | 138        |
| 5.3.2    | Exemple basé sur des simulations de Monte-Carlo : reliquat d'azote minéral dans le sol . . . . .               | 139        |
| 5.3.3    | Exemple basé sur des simulations planifiées : influence du parcellaire sur les flux de gènes . . . . .         | 142        |
| 5.4      | Exercices . . . . .                                                                                            | 145        |
| <b>6</b> | <b>Recommandations</b>                                                                                         | <b>149</b> |
| 6.1      | Quelques conseils . . . . .                                                                                    | 149        |
| 6.2      | Pour continuer . . . . .                                                                                       | 150        |
|          | <b>Bibliographie</b>                                                                                           | <b>151</b> |
|          | <b>Index</b>                                                                                                   | <b>159</b> |



Collection  
**Statistique  
et probabilités  
appliquées**

Dirigée par  
**Yadolah Dodge**

COMITÉ ÉDITORIAL :

**Aurore Delaigle**

Université de Melbourne, Australie

**Christian Genest**

Université McGill, Montréal

**Marc Hallin**

Université libre de Bruxelles, Belgique

**Ludovic Lebart**

Télécom-ParisTech, Paris

**Christian Mazza**

Université de Fribourg, Suisse

**Stephan Morgenthaler**

EPFL, Lausanne

**Louis-Paul Rivest**

Université Laval, Québec

**Gilbert Saporta**

CNAM, Paris

**David Makowski, Hervé Monod**

# Analyse statistique des risques agro-environnementaux

## Études de cas

*Cette collection met  
à la disposition du public  
intéressé par la statistique  
(étudiants, enseignants,  
chercheurs) des ouvrages qui  
concilient effort pédagogique  
et travail permanent  
de mise à jour.*

*Cette démarche implique  
de prendre en compte  
de façon sélective et critique  
les renouvellements  
des concepts, des champs  
d'application et des outils  
de traitement. Seules une  
compréhension profonde  
et une appropriation  
des connaissances  
permettront de s'adapter  
aux évolutions qui n'ont  
pas fini de bouleverser  
cette discipline.*

Conçu comme un véritable manuel pratique, ce livre est une introduction aux méthodes statistiques les plus couramment utilisées pour l'analyse des risques agro-environnementaux. Celles-ci peuvent être regroupées au sein de trois grandes sections :

- La modélisation des risques en fonction de facteurs environnementaux et anthropiques (modèle linéaire, modèle linéaire généralisé, modèle non linéaire, modèle hiérarchique, régression quantile) ;
- L'optimisation de décisions ou de règles de décision pour mieux gérer les risques, en intégrant des variables décisionnelles dans les modèles (optimisation de seuils de décision, optimisation par simulation, analyses ROC) ;
- L'analyse et la communication des incertitudes associées aux modèles (estimation et description de distributions de probabilité, assimilation de données, analyse de sensibilité).

L'utilisation de chaque méthode est illustrée par une ou plusieurs applications à des problèmes concrets (pollution de l'eau par les nitrates, invasion par des espèces nuisibles, flux de gènes d'une culture OGM vers une culture non OGM, etc.). Les programmes informatiques R ou WinBUGS utilisés dans les exemples sont présentés et commentés en détail. À la fin de chaque chapitre, des exercices permettront aux lecteurs de tester leur compréhension des méthodes étudiées.

30 € TTC

ISBN : 978-2-8178-0250-3



9 782817 802503

» [springer.com](http://springer.com)