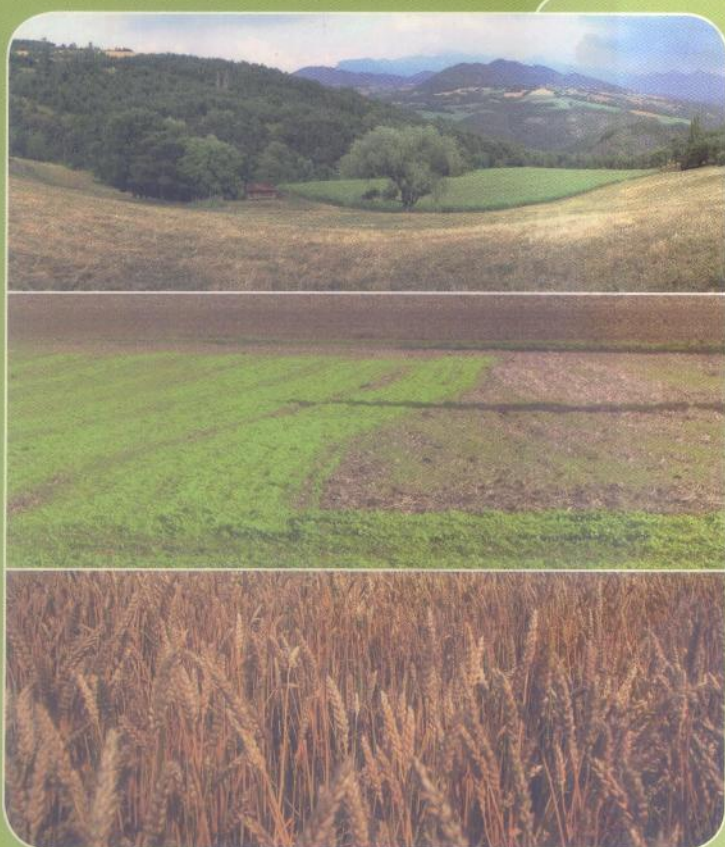


AGRICULTURE D'AUJOURD'HUI
Sciences, Techniques, Applications



Méthodes expérimentales en agronomie

Pratique et analyse



Michel Vilain

2^e édition

Editions
TEC
& **DOC**



MD056619

Lavoisier

AGR 85

AGRICULTURE D'AUJOURD'HUI
Sciences, Techniques, Applications



Méthodes expérimentales en agronomie

Pratique et analyse

2^e édition

Michel Vilain
Ingénieur agronome (INA Paris)
Licencié ès sciences



056619

(3)



MD056619

Editions
TEC
& **DOC**

11, rue Lavoisier
75008 Paris

Table des matières

Introduction à la première édition.....	1
Introduction à la deuxième édition.....	3

Première partie

Les outils statistiques

Chapitre 1

Rappels de statistique

1. Deux notions fondamentales : population et échantillon.....	7
2. Caractéristiques statistiques.....	8
2.1. Les données.....	8
2.2. Caractérisation et notations.....	8
2.3. Rappels des définitions.....	8
2.4. Variance et degré de liberté.....	10
2.5. Variables aléatoires et loi de probabilité.....	10
2.6. Représentations graphiques.....	10
3. Principales distributions.....	11
3.1. La loi binomiale.....	11
3.2. La loi normale.....	12
3.2.1. La distribution normale à une dimension.....	12
3.2.2. Distribution normale à 2 dimensions.....	14
3.3. Autres distributions statistiques.....	14
3.3.1. La distribution de Student.....	15
3.3.2. La distribution de χ^2	15
3.3.3. Distribution de F.....	17

Chapitre 2

Théorie de l'échantillonnage et estimation

1. Théorie de l'échantillonnage.....	19
1.1. Généralités.....	19

1.2. Distributions d'échantillonnage	20
1.3. Distributions et relations d'échantillonnage des principaux paramètres statistiques	20
1.3.1. Distribution d'échantillonnage de la moyenne \bar{X}	20
1.3.2. Distribution d'échantillonnage de la fréquence F	21
1.3.3. Distribution d'échantillonnage de la variance et de l'écart type	21
1.3.4. Distributions d'échantillonnage de différence ou de somme	22
1.4. Illustrations	23
2. Estimation des paramètres d'une population	28
2.1. Estimation ponctuelle	29
2.1.1. Notion d'estimateur	29
2.1.2. Estimateur de la moyenne	29
2.1.3. Estimateur de la variance et de l'écart type	29
2.1.4. Estimateur d'une proportion	30
2.2. Estimation par intervalle de confiance	30
2.2.1. Intervalle de confiance d'une moyenne	30
2.2.2. Intervalle de confiance d'une proportion	32
2.2.3. Intervalle de confiance d'une différence	33
2.2.4. Intervalle de confiance d'une variance et d'un écart type	34
2.3. Variations des estimations	35
3. Détermination de l'effectif d'un échantillon	36
3.1. Précision pour une moyenne	37
3.2. Précision pour une proportion	37

Chapitre 3

Les problèmes de comparaison

1. Les types de comparaison	39
2. Les tests d'hypothèses	40
3. Les risques d'erreur	41
4. Puissance d'un test	42
5. Principaux types de tests	43
6. Conditions d'application	43

Chapitre 4

Méthodes de comparaison de deux paramètres

Section 1

Tests relatifs à deux moyennes

1. Tests d'égalité	46
1.1. Échantillons d'effectifs élevés	46
1.1.1. Principe du test	46
1.1.2. Applications commentées	47

1.2. Échantillons d'effectifs faibles	48
1.2.1. Principe du test.	48
1.2.2. Application commentée.	49
1.3. Récapitulation	40
2. Tests de conformité.	50
2.1. Cas où l'échantillon a un effectif élevé	51
2.2. Cas où l'échantillon a un effectif faible.	51
2.3. Autre mode de raisonnement	51
2.4. Applications commentées.	51
3. Cas particulier d'échantillons appariés	53
4. Puissance d'un test	54
4.1. Définition.	54
4.2. Principaux facteurs de variations de la puissance	56
5. Effectif minimal des échantillons.	57

Section 2

Tests relatifs aux proportions et aux variances

1. Tests relatifs aux proportions.	58
1.1. Tests d'égalité	58
1.1.1. Principe	58
1.1.2. Application commentée.	59
1.2. Tests de conformité.	59
1.2.1. Principe du test.	59
1.2.2. Application commentée.	60
2. Tests relatifs aux variances et aux écarts types	60
2.1. Tests d'égalité de 2 variances	60
2.2. Tests d'égalité de plus de 2 variances	62
2.2.1. Le test de Bartlett.	62
2.2.2. Le test de Hartley	63
2.3. Tests de conformité d'une variance ou d'un écart type	63

Chapitre 5

Comparaison de moyennes de plusieurs populations

Section 1

L'analyse de la variance

1. Pourquoi utiliser la variance ?	66
2. Présentation et identification des données	67
3. Test de comparaison et analyse de la variance à un seul facteur	69
3.1. Principe du test	69
3.2. Simulation des variations de F	70
4. Analyse de la variance à un facteur.	71
4.1. L'équation générale de la variance	71

4.2. Calculs pratiques des variations	73
4.3. Récapitulation	74
4.4. L'analyse de la variance : méthode d'estimation	76
4.5. Applications numériques	76
5. Analyse de la variance à deux facteurs	81
5.1. Présentation des données	81
5.2. Équation d'analyse de la variance pour 2 facteurs	82
5.3. Exécution pratique des calculs	84
5.4. Le test de Tukey	86
5.5. Application numérique	86
6. Analyse de la variance à plus de 2 facteurs	88
7. Importance des hypothèses	88

Section 2

Comparaisons multiples de moyennes

1. Généralités	89
2. Les différents tests	89
2.1. Le test t	90
2.2. Le test de Dunnett	91
2.3. Le test de Newman et Keuls	91
2.4. Le test de Duncan	92
3. Exemples comparatifs	92

Chapitre 6

Méthodes de comparaison de distributions

1. La problématique	95
2. Le critère χ^2	96
2.1. L'élaboration du critère	96
2.2. Formules et conditions d'application	96
2.3. Les tests	97
2.3.1. Test d'ajustement	97
2.3.2. Test d'indépendance	97
3. Applications commentées	98
4. Les tests de normalité	102
4.1. Utilisation des coefficients de Pearson	102
4.2. Ajustement et test χ^2	102
4.3. Droite de Henry	105

Chapitre 7

Régression et corrélation

1. Généralités	109
2. La régression	110
2.1. La régression linéaire	110

2.2. Linéarisation	116
2.3. Quelques cas de régression non linéaire	117
2.4. Régression comportant plusieurs variables explicatives	118
3. Corrélation	118
3.1. Décomposition de la variation totale	118
3.2. Mesure de la corrélation	119
3.3. Expressions du coefficient de corrélation linéaire	119
3.4. Variance liée	120
3.5. Corrélation de rangs	121
4. Tests relatifs à la corrélation et la régression	124
4.1. Échantillonnage des coefficients de régression et de corrélation	124
4.2. Tests relatifs au coefficient de corrélation linéaire	126
4.3. Test relatif au coefficient de régression	127
4.4. Tests au moyen de l'analyse de variance	130
4.4.1. Test d'une corrélation	130
4.4.2. Test de linéarité de la régression	130
4.4.3. Application à la régression entre les poids et les longueurs des épis de maïs	132
5. Application de la régression à l'analyse des essais	135
6. Qualité et intérêt d'une régression	136

Chapitre 8

Analyse des données

1. Généralités	139
2. Les données	139
2.1. Les types de variables	139
2.2. La présentation des données	140
3. Rappel des méthodes d'analyse classiques	140
4. Les méthodes d'analyse multidimensionnelle	144
4.1. L'analyse en composantes principales	145
4.2. Analyse factorielle des correspondances	147
4.3. Les méthodes de classification	149
4.4. La méthode de segmentation	149
4.5. L'analyse factorielle discriminante	149

Deuxième partie

Pratique et analyse de l'expérimentation

Chapitre 9

Notions générales sur l'expérimentation

1. Le protocole expérimental	153
2. Le vocabulaire de l'expérimentation	154

2.1. Les facteurs et les traitements	154
2.2. Parcelles et dispositifs expérimentaux	155
3. Intervention des facteurs de variabilité	156
3.1. Les principales causes de variabilité	156
3.2. Mise en évidence de la variabilité	157
3.3. Appréciation de la variabilité	158
3.3.1. Généralités	158
3.3.2. Étude d'un exemple	158
4. Principes généraux de l'expérimentation	160
4.1. La nécessité des répétitions	161
4.2. La répartition au hasard	161
4.3. Interprétation statistique	162

Chapitre 10

Essais et dispositifs expérimentaux

1. Les principaux types d'essais	165
1.1. Essais simples et essais complexes	165
1.2. Durée des essais et réseaux d'essais	166
2. Notion d'interaction et essai factoriel	166
2.1. Mise en évidence	166
2.2. Intérêts et inconvénients des essais factoriels	167
2.3. Mesure de l'interaction	168
3. Les principaux dispositifs expérimentaux	169
3.1. Dispositif en couples	170
3.2. Dispositif en randomisation totale	170
3.3. Dispositif en blocs aléatoires complets	171
3.4. Dispositif en carré latin	172
3.5. Dispositifs avec parcelles subdivisées	174
3.5.1. Dispositif en split-plot	174
3.5.2. Dispositif en criss-cross	175
3.5.3. Comparaison des dispositifs expérimentaux	176
3.6. Dispositifs expérimentaux particuliers	176

Chapitre 11

Conception, réalisation et conduite des essais

1. Le plan d'expérimentation	179
1.1. Nécessité d'un plan	179
1.2. Élaboration d'un plan d'expérimentation	180
1.2.1. Le thème de l'expérimentation	180
1.2.2. Le choix des traitements	181
1.2.3. Le choix du dispositif et du matériel expérimental	182
1.2.4. Le choix du nombre de répétitions	184
1.3. Élaboration du plan parcellaire	185
1.3.1. Les caractéristiques parcellaires	185

1.3.2. Allées et dégagements	187
1.3.3. Affectation des traitements aux parcelles	188
1.4. Site expérimental et localisation	189
1.5. Le protocole expérimental	190
1.6. Budget d'une expérimentation	190
1.7. Simulation et recherche d'un dispositif	190
2. Installation et conduite d'un essai	193
2.1. Localisation parcellaire	193
2.2. Implantation d'un essai	193
2.3. La conduite de l'essai	195
2.3.1. Les objectifs et conditions d'intervention.	195
2.3.2. L'installation des cultures.	196
2.3.3. Les apports	196
3. Les observations et la récolte	198
3.1. Les conditions de réalisation	198
3.2. Les observations et les notations	198
3.3. La récolte	200
4. Le compte-rendu	202

Chapitre 12

Analyse et interprétation des essais

Section 1

Directives générales

1. Le recueil et l'examen des données	204
2. Traitement et interprétation des données	205
3. L'interprétation automatique	208
4. Compte-rendu et diffusion	209

Section 2

Interprétation d'essais simples

1. Analyse d'essais en randomisation totale et en blocs aléatoires complets.	211
1.1. Principes d'analyse pour un essai en randomisation totale	211
1.2. Principes d'analyse pour un essai en blocs aléatoires complets.	212
1.3. Exemples	213
2. Essais en carré latin	222
2.1. Principe d'analyse	222
2.2. Exemple	223
Annexe – Analyse de la variance et théorème de Pythagore.	227

Section 3

Interprétation d'essais factoriels

1. Essais en blocs aléatoires complets	229
1.1. Principe de l'analyse	229
1.2. Exemples d'analyse	231
2. Essais en split-plot	238
2.1. Principe de l'analyse	238
2.2. Exemples	240
3. Essais en criss-cross	247
3.1. Principe de l'analyse	247
4. Récapitulation et comparaisons des analyses selon le dispositif	252

Chapitre 13

Problèmes particuliers

1. Les conditions d'applications de l'analyse de variance et les transformations	255
1.1. Rappels des conditions d'application	255
1.2. La transformation des variables	256
1.2.1. Les principales transformations	256
1.2.2. Le choix d'une transformation	257
1.3. Exemples	257
2. Résultats manquants et résultats aberrants	267
2.1. Les origines et justifications	267
2.2. Analyses avec données manquantes	267
2.2.1. Les possibilités et les conséquences	268
2.2.2. Remplacement et corrections	268
2.3. Exemples d'essais incomplets	269
2.3.1. Analyse après abandon des blocs 4 et 5 incomplets	269
2.3.2. Analyse des résultats en randomisation totale	270
2.3.3. Analyse après estimation de données manquantes	271
2.3.4. Autre méthode	273
3. Compléments d'interprétation	274
4. Les essais répétés	286
4.1. Principe d'analyse d'une série d'essais	287
4.2. Cas des cultures pérennes	294
5. Les dispositifs non classiques	294

*Troisième partie***La modélisation***Chapitre 14***Modèles et prédiction**

1. Généralités	297
2. Les différents types de modèles mathématiques	297
3. Élaboration d'un modèle	298
3.1. Les principales étapes	298
3.2. Les variables et la forme des modèles	299
3.3. Utilisation des modèles	300
4. Exemples de recherche d'un modèle	300
4.1. Recherche d'un premier modèle	300
4.2. Recherche d'un deuxième modèle	304
4.3. Autres modèles possibles	307
5. Qualité d'un modèle	310
5.1. Résidus et distribution des résidus	310
5.2. Test statistique	310
6. La prédiction	310

*Quatrième partie***Les méthodes d'échantillonnage
et les enquêtes***Chapitre 15***Échantillonnage et sondage***Section 1***Méthodes d'échantillonnage et de sondage**

1. Les problèmes d'échantillonnage	316
1.1. Généralités	316
1.2. Définition et notation	316
1.3. Les erreurs lors de l'échantillonnage	317
1.4. L'effectif optimal des échantillons	317
1.5. Les méthodes d'échantillonnage	318
2. Les méthodes probabilistes	319
2.1. L'échantillonnage aléatoire simple	319
2.2. L'échantillonnage systématique	320
2.3. L'échantillonnage par grappes	322
2.4. L'échantillonnage avec stratification	326
2.5. L'échantillonnage à plusieurs degrés et à plusieurs phases	330
2.5.1. L'échantillonnage à deux degrés	330
2.5.2. L'échantillonnage à deux phases	334

Section 2

Pratique de l'échantillonnage

1. Présentation de la population	337
1.1. Origine et constitution	337
1.2. Principaux paramètres statistiques de la population	338
2. Le plan d'échantillonnage	339
2.1. Les éléments d'un plan d'échantillonnage	339
2.2. Définition des objectifs	340
2.3. Précision et effectif des échantillons	340
2.4. La base d'échantillonnage	342
2.5. Les données et leur utilisation	343
2.6. Notation et valeurs de référence	344
2.7. Les méthodes d'échantillonnage retenues	345
3. Échantillonnage aléatoire	345
3.1. Principe et application	345
3.2. Échantillonnage aléatoire simple	346
3.2.1. Étude et analyse d'un échantillon	346
3.2.2. Étude d'une série d'échantillons	347
3.3. Échantillonnage aléatoire par groupes	349
3.3.1. Échantillonnage de groupes linéaires	349
3.3.2. Échantillonnage de groupes rectangulaires	350
4. Échantillonnage systématique	352
4.1. Principe et réalisation	352
4.2. Choix de la raison	352
4.3. Étude d'un échantillon	353
4.4. Étude des distributions d'échantillonnage	354
5. Échantillonnage en grappes	356
5.1. Généralités et modalités pratiques	356
5.2. Étude et analyse d'un échantillon	356
5.3. Étude des séries d'échantillons	358
5.3.1. Échantillonnage en grappes linéaires	358
5.3.2. Échantillonnage en grappes rectangulaires	359
6. Échantillonnage avec stratification	361
6.1. Généralités et modalités pratiques	361
6.2. Extraction et analyse d'un échantillon	361
6.3. Étude d'une série d'échantillons	363
7. Échantillonnage à deux degrés	365
7.1. Généralités et réalisation	365
7.2. Étude et analyse d'un échantillon	365
7.3. Présentation des séries d'échantillons	368
7.3.1. Série d'échantillons : 10 UP/6 US	368
7.3.2. Série d'échantillons : 6 UP/10 US	369
7.4. Remarques	370
8. Le sous-échantillonnage	371
8.1. Les possibilités	371

8.2. Les techniques de sous-échantillonnage	372
8.3. Modèles hiérarchisés	372

Section 3

Comparaison des méthodes

1. Estimations et efficacité des méthodes	377
2. Normalité des distributions d'échantillonnage	378
2.1. Les objectifs et les moyens	378
2.2. Application	378
3. Les équations des droites d'ajustement	379
3.1. Exemple d'ajustement	379
3.2. Ajustement des poids moyens	381
3.3. Ajustement des fréquences	383

Annexes	385
Annexe 1. Population 1440 : Bas 1440	386
Annexe 2. Populations dérivées POP 236 et POP 353	388
Annexe 3. Échantillonnage en grappes	389
Annexe 4. Échantillonnage avec stratification	390
Annexe 5. Échantillonnage à 2 degrés	391

Chapitre 16

Notions générales sur les enquêtes

1. Généralités	393
2. Les types et la réalisation d'une enquête	393
3. Les méthodes de sondage	395
4. Le questionnaire d'enquête	396
5. Traitement et interprétation des données	397

Conclusion générale	399
----------------------------------	-----

Tables statistiques	401
Table 1. Distribution de la loi normale réduite	403
Table 2. Distribution de la loi de Student	404
Table 3. Distribution de χ^2	405
Tables 4. Distribution de F	
4.1. Probabilité 0,95	406
4.2. Probabilité 0,975	407
4.3. Probabilité 0,99	408
Tables 5. Test de Harley	
5.1. Valeurs critiques $\alpha = 0,05$	409
5.2. Valeurs critiques $\alpha = 0,01$	409
Tables 6. Test de Newman et Keuls	
6.1. Valeurs critiques $\alpha = 0,05$	410
6.2. Valeurs critiques $\alpha = 0,01$	411

Tables 7. Test de Dunnett	
7.1. Valeurs critiques $\alpha = 0,05$	412
7.2. Valeurs critiques $\alpha = 0,01$	413
Tables 8. Test de Duncan	414
Table 9. Seuils de signification à 5 % et 1 % des coefficients de corrélation	416
Bibliographie générale	417
Index	419



M

éthodes expérimentales en agronomie est essentiellement axé sur la méthodologie : conception et planification des expériences, aspects pratiques, échantillonnage, essais, exemples d'applications, analyse des résultats, utilisation de l'outil informatique...

À l'occasion de cette deuxième édition entièrement revue, la rédaction de certains chapitres a été totalement reprise et complétée. C'est le cas en particulier pour deux d'entre eux : la conception et la réalisation de l'expérimentation ainsi que l'obtention des échantillons où la réalisation pratique et l'interprétation statistique des données ont été des préoccupations permanentes.

L'architecture de l'ouvrage a été intégralement conservée : présentation des outils statistiques puis exposé de leurs utilisations en expérimentation et en échantillonnage où la limitation des développements mathématiques, l'un des objectifs constants lors de la première édition, a été totalement respectée. De nouveaux exemples ont été développés.

À l'heure où la production biologique marque de son empreinte l'agronomie et l'agriculture, cet ouvrage servira à valider les techniques innovantes de substitution proposées en permettant d'effectuer les expérimentations indispensables pour en faire des techniques valables. Très didactique, il est accessible au plus grand nombre de lecteurs : étudiants en agronomie, élèves de BTS de l'enseignement agricole ou techniciens des industries agrochimiques et des organisations agricoles.

Michel Vilain ingénieur agronome, licencié ès sciences, est également auteur de *La production végétale*, ouvrage en deux volumes paru chez le même éditeur.

www.lavoisier.fr



978-2-7430-1418-6