

Jacques Goupy

**L'USINE
NOUVELLE**



LES PLANS D'EXPÉRIENCES

Optimisation du choix des essais
et de l'interprétation des résultats

5^e ÉDITION



DUNOD

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	V
Avant-propos	IX
1 • Faites connaissance avec la méthode des plans d'expériences	1
1.1 Processus d'acquisition des connaissances	1
1.2 Étude d'un phénomène	3
1.3 Terminologie	4
1.4 Variables centrées réduites	8
1.5 Points expérimentaux	9
1.6 Plans d'expériences	10
2 • Votre premier plan d'expériences	15
2.1 Exemple 01 : je maîtrise la consommation de ma voiture	15
3 • Plan d'expériences pour 3 facteurs	31
3.1 Exemple 02 : des bijoux en or	31
3.2 Conclusion de l'étude	47
4 • Plans factoriels complets à 4 facteurs	49
4.1 Exemple 03 : la galette des rois	50
4.2 Fonction désirabilité	60
4.3 Application à l'exemple 03	64
4.4 Conclusion de l'étude	65
5 • Notions de statistique appliquées aux plans d'expériences	67
5.1 Exemple 04 : durée de vie des outils de coupe jetables	68
5.2 Notions de statistique appliquées aux plans d'expériences	71
5.3 Facteurs et interactions influents	81
5.4 Analyse de la variance	82
5.5 Application à l'exemple 04	85
5.6 Conclusion de l'étude	91

6 • Plans factoriels fractionnaires	93
6.1 Exemple 05 : le tellure	94
6.2 Théorie des alias	97
6.3 Calcul de Box	99
6.4 Relation d'équivalence	102
6.5 Générateurs d'alias	104
6.6 Construction pratique d'un plan fractionnaire	105
6.7 Nombre maximal de facteurs étudiés sur un plan de base	112
6.8 Application de la théorie des alias à l'exemple 05	112
6.9 Conclusion de l'étude	113
7 • Exemples de plans factoriels fractionnaires	115
7.1 Exemple 06 : la sulfonation	116
7.2 Exemple 07 : le spectrofluorimètre	124
7.3 Exemple 08 : les pommes de terre chips	140
8 • Ordre des essais	147
8.1 Nature des erreurs	148
8.2 Exemple 09 : le <i>Penicillium chrysogenum</i> (exemple de blocking)	151
8.3 Exemple 10 : les haricots de Yates	161
8.4 Exemple 11 : le broyeur (exemple de plan anti-dérive)	168
8.5 Avantages et dangers de la randomisation	175
9 • Plans pour surfaces de réponse	179
9.1 Présentation des plans composites	179
9.2 Présentation des plans de Box-Behnken	180
9.3 Présentation des plans de Doehlert	181
9.4 Exemple 12 : la rectification du contremaître (exemple de plan composite)	184
9.5 Exemple 13 : un yoghourt doux (exemple de plan de Box-Behnken)	194
9.6 Exemple 14 : l'insecticide (exemple de plan de Doehlert)	199
10 • Plans de mélanges	207
10.1 Contrainte fondamentale des mélanges	207
10.2 Représentation géométrique des mélanges	208
10.3 Plans de mélanges classiques	212
10.4 Modèles mathématiques des plans de mélanges	215
10.5 Exemple 15 : les trois polymères	217

11 • Notion de plan optimal	221
11.1 Exemple d'Hotelling	221
11.2 Pesées et plans d'expériences	223
11.3 Optimalité	225
11.4 Plans optimaux avec un modèle linéaire	229
11.5 Quand utiliser des plans optimaux ?	232
11.6 Adaptabilité des plans optimaux	232
11.7 Exemple 16 : développement d'un détecteur de fissures	235
11.8 Exemple 17 : les comprimés du pharmacien	240
11.9 Exemple 18 : la crème à bronzer	248
12 • Carrés latins et plans associés	255
12.1 Exemple 19 : les salaires – un facteur discret à plusieurs niveaux	255
12.2 Suite de l'exemple 19 – deux facteurs discrets à plusieurs niveaux	257
12.3 Carrés latins	264
12.4 Carrés gréco-latins	265
12.5 Carrés de Youden	266
12.6 Exemple 20 : étude de la pénétrométrie	267
12.7 Interaction entre facteurs discrets	270
12.8 Analyse de la variance d'un modèle avec interactions	274
13 • Les plans à facteurs mixtes	279
13.1 Plans à un facteur	280
13.2 Plans à deux facteurs	283
13.3 Plans à trois facteurs	284
13.4 Plans à quatre facteurs	285
13.5 Plans à n facteurs	286
13.6 Exemple 21 : les deux catalyseurs	287
13.7 Qu'aurait donné un plan fractionnaire ?	296
13.8 Conclusion sur les plans à facteurs mixtes	302
14 • Les plans en parcelles divisées ou plans split-plot	303
14.1 Introduction	303
14.2 Exemple 22 : le maïs	304
14.3 Exemple 23 : les revêtements anti-corrosions	313
14.4 Exemple 24 : céréale	319
14.5 Conclusion sur les plans split-plot	327

15 • Les plans uniformes	329
15.1 Introduction	329
15.2 Les différents plans uniformes	330
15.3 La modélisation mathématique de la réponse	340
15.4 Application	343
15.5 Plans uniformes pour plusieurs facteurs	350
15.6 Utilisation des plans uniformes en expérimentation classique	351
16 • Synthèse et conseils	353
16.1 Choix d'une méthode d'expérimentation	353
16.2 Expérimentation	359
16.3 Analyse des résultats	359
16.4 Acquisition progressive des connaissances	361
16.5 Recommandations	362
16.6 Limites de l'expérimentation	362
A • Origine des exemples	365
B • Comparaison de deux moyennes indépendantes	369
C • Séries d'essais laissant les facteurs principaux insensibles à une dérive linéaire	371
D • Introduction au calcul matriciel	377
E • Télécharger un logiciel de plans d'expériences	383
Bibliographie	385
Index	397
Liste des exemples	401