

Formations & Techniques

MANUEL D'UTILISATION DES PLANS D'EXPERIENCES

Une méthodologie robuste
pour modéliser empiriquement
un phénomène

Francis Baillet



La côte de l'ouvrage : 2-620-554

Table des matières

Introduction	11
CHAPITRE 1 : Notions essentielles pour l'utilisation de la méthodologie des plans d'expériences	13
A) Introduction : Dans quelles conditions utiliser cette méthodologie ?	13
B) Un exemple pour fixer les idées et le vocabulaire	14
B-1) Méthode OVAT (one variable at time).....	15
B-2) Optimisation par la méthode OVAT.....	15
B-3) Optimisation expérimentale par la méthodologie des plans d'expériences.....	18
B-4) Utilisation.....	19
C) Vocabulaire de base.....	20
C-1) La réponse Y	20
C-2) Les paramètres de l'étude X_i	24
C-3) Le domaine d'étude	30
C-4) Le modèle postulé.....	33
C-5) Le codage des paramètres	35
C-6) Le plan d'expériences.....	37
CHAPITRE 2 : Une méthodologie simple et rigoureuse pour éviter les erreurs	39
A) Introduction	39
B) Définir le problème	41
C) Les objectifs en « termes » de plans d'expériences.....	41
D) Définir les réponses et les moyens de mesure.....	42
E) Définir les paramètres maîtrisés et étudiés	43
F) Définir les paramètres subis et suivis.....	43
G) Définir le domaine d'étude.....	43
H) Evaluer la variabilité des réponses étudiées.....	44
H-1) Pourquoi ?.....	45
H- 2) Intérêts complémentaires de cette estimation	46
I) Exemple concernant notre avion.....	47
J) Evaluer ses contraintes	48
K) Suite de la méthodologie.....	49

CHAPITRE 3 : Réaliser les expériences	51
A) Réaliser des expériences.....	51
A-1) Influence du nombre d'expériences sur le coût d'une étude.	52
A-2) Influence des expériences sur la qualité du modèle obtenu	55
A-3) Influence des expériences réalisées sur la précision des coefficients du modèle obtenu	63
A-4) Nombre des essais et qualité d'une expérimentation	71
B) Propriétés générales et statistiques des plans d'expériences, propriétés des modèles obtenus	72
B-1) Introduction	72
B-2) Le plan d'expériences permet de construire d'autres plans pour des modèles plus complexes (séquentialité)	72
B-3) Le plan d'expériences ne nécessite pas un trop grand nombre de niveaux pour chaque facteur	76
B-4) Les propriétés statistiques des plans d'expériences.....	77
 CHAPITRE 4 : Le début d'une étude, constructions de liste d'expériences destinées à l'établissement d'un modèle linéaire sans interaction	 87
A) Réaliser un screening, déterminer un modèle linéaire sans interaction	88
A-1) Propriétés des matrices d'Hadamard	89
A-2) Exemple de notre avion	91
B) Autres constructions pour l'établissement de modèles linéaires.....	95
B-1) Fortes contraintes.....	95
B-2) De nombreux paramètres mais seulement quelques-uns qui ont un impact.....	97
C) Inconvénients de ces constructions particulières	97
 CHAPITRE 5 : Recherche d'un modèle prédictif : construction de liste d'ex- périences pour l'établissement d'un modèle avec interactions	 99
A) Prédire une réponse, valider un modèle sans interaction	99
A-1) Interactions ou effets quadratiques c'est quoi ?	100
A-2) Détection de la présence d'interactions.....	102
A-3) Détection de non linéarités (effets quadratiques)	106
B) Détermination des coefficients d'interaction.....	110
B-1) Introduction	110
B-2) Plan factoriel complet 2^k	111
B-3) Plan factoriel fractionnaire 2^{k-p}	121
B-4) Utilisation des tables de TAGUCHI	132

CHAPITRE 6 : Stratégies expérimentales permettant la détermination de modèles comportant des effets quadratiques	139
A) Introduction	139
B) Stratégies complètement séquentielles avec la détermination des effets linéaires et des effets d'interactions	141
B-1) Plans composites centrés dans une sphère	141
B-2) Plans composites centrés dans un cube	147
B-3) Petits plans composites	148
C) Stratégies partiellement séquentielles avec la détermination des effets linéaires et des effets d'interaction	150
C-1) Plan de Box Behnken	150
C-2) Application à notre problème d'avion en papier	152
C-3) Plans D-Optimaux	155
C-4) Tables de Taguchi à 3 niveaux	157
D) Stratégies non séquentielles avec la détermination des effets linéaires et des effets d'interaction	160
D-1) Plans D-optimaux	160
D-2) Plans réseaux de Dohmert	164
E) Bilan comparatif des stratégies pour notre exemple d'avion papier	178
CHAPITRE 7 : Spécificité des plans relatifs à la modification d'une composition ou plans de mélanges	181
A) Introduction	181
B) La contrainte fondamentale des mélanges	182
C) Représentation géométrique des mélanges	182
D) Méthodologie	185
E) Emplacement des points expérimentaux	186
E-1) Sans contrainte	186
E-2) Avec contraintes	191
F) Modèles mathématiques des mélanges	197
G) Plans de mélanges et plans d'expériences	198
CHAPITRE 8 : Validation des modèles obtenus, étude statistique des résidus	199
A) Introduction	199
B) Examen des R^2 et R^2 ajusté	201
B-1) Examen du R^2	201
B-2) Examen du R^2 ajusté	202
C) Analyse de variance (ou analyse de régression)	202

D) Analyse des résidus.....	205
D-1) Nécessité d'une transformation	206
D-2) Détection de la présence de points aberrants	207
D-3) Estimation de l'erreur.....	208
D-4) Influence de l'ordre des expériences	210
D-5) Influence de la valeur mesurée	212
D-6) Autres graphes.....	213
CHAPITRE 9 : Utilisation des modèles obtenus	219
A) Introduction	219
B) Utilisation du modèle pour une prédiction	220
C) Optimisation à l'aide du modèle obtenu.....	221
C-1) Optimisation d'une réponse :.....	221
C-2) Optimisation simultanée de plusieurs réponses	221
CHAPITRE 10 : Optimisation sans modèle	229
A) Introduction	229
B) La méthode OVAT (One Variable At Time)	230
B-1) Initialisation	230
B-2) Itérations	232
B-3) Exemple.....	233
B-4) Limites et améliorations possibles de la méthode.....	235
C) La méthode du Simplexe à 2 paramètres	236
C-1) Initialisation	236
C-2) Règles d'évolutions.....	237
C-3) Exemple.....	239
D) La méthode du simplexe à k paramètres.....	244
D-1) Initialisation du simplexe à k paramètres.....	244
D-2) Règles d'évolutions.....	248
D-3) Critères d'arrêt.....	248
E) Simplexe évolué : la méthode de Nelder et Meads.....	248
F) Evaluation comparée de la méthode du Simplexe et OVAT.....	250
G) Evaluation comparée des plans d'expériences classiques par rapport aux méthodes d'optimisation sans modèle (Simplexe, Ovat).....	250

CHAPITRE 11 : Etudes de cas et exemples concrets	253
A) Introduction	253
B) Exemple avec des contraintes très fortes sur le nombre d'expériences	253
B-1) Etude de l'impact de paramètres sur différentes réponses	254
B-2) Obtention d'un modèle prédictif pour une ou plusieurs réponses.....	256
C) Exemple d'utilisation d'un plan D-Optimal pour réparer un plan factoriel	260
C-1) Présentation.....	260
C-2) Examen et Exploitation des données disponibles	261
D) Comparaison sur un exemple concret de différentes stratégies pour l'obtention d'un modèle quadratique	265
D-1) Présentation de l'étude.....	265
D-2) Analyse des stratégies utilisées	268
D-3) Analyse des résultats expérimentaux	268
D-4) Analyse des prédictions avec les modèles obtenus	269
E) Comparaison sur un exemple concret d'un réseau de Dohler par rapport à d'autres stratégies.....	270
E-1) Présentation de l'étude.....	270
E-2) Stratégies mises en œuvre et résultats expérimentaux.....	270
E-3) Analyses des stratégies réalisées.....	273
E-4) Analyse des modèles obtenus	275
E-5) Prédictions à l'aide des modèles obtenus.....	278
E-6) Conclusions	278
 CHAPITRE 12 : Conclusions	 281
A) Conclusions.....	281
B) Conseils pour une étude.....	281
B-1) Etude séquentielle dans un domaine expérimental connu	282
B-2) Etude non séquentielle « one run » dans un domaine expérimental connu	283
 Bibliographie	 287
 Lexique	 289