REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE

M. OLLAGNIER
D. GROS

# Utilisation des fiches perforées à 80 colonnes pour l'interprétation des résultats des expériences agronomiques factorielles

*Revue de statistique appliquée*, tome 3, nº 2 (1955), p. 55-64
<http://www.numdam.org/item?id=RSA_1955__3_2_55_0>

# UTILISATION DES FICHES PERFORÉES A 80 COLONNES POUR L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES AGRONOMIQUES FACTORIELLES

par

**M. OLLAGNIER et D. GROS**

*Ingénieurs Agronomes à l'I.R.H.O.*

***L'application des méthodes statistiques à l'organisation rationnelle et à l'interprétation des expériences agricoles (comparaisons de variétés ou de fumures, génétique animale et végétale...) a pris, au cours des vingt dernières années, un développement considérable.***

***Dans ce domaine, les principaux artisans de ce développement ont été les Statisticiens et les Agronomes de la station expérimentale de Rothamsted (Angleterre), sous la direction du Professeur R. A. Fisher et du Docteur Frank Yates.***

***Le cours de statistique appliquée à la Biologie et à l'Expérimentation agricole, créé à l'Institut de Statistique de l'Université de Paris en 1942, et professé par M. Vessereau, a déjà formé un certain nombre de statisticiens français spécialistes de ces études dont l'efficacité et la rentabilité ont fait leurs preuves.***

***L'analyse des nombreux documents chiffrés résumant les observations de telles expériences, entreprises en série, nécessite une masse importante de calculs.***

***Dans l'article ci-après, MM. Ollagnier et Gros exposent comment l'emploi des machines à cartes perforées permet de traiter en temps voulu les informations recueillies.***

L'Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux (I.R.H.O.) a en Afrique Occidentale et Equatoriale des réseaux d'essais agronomiques sur le palmier à huile (5 stations expérimentales), sur le cocotier (2 stations), sur l'arachide (7 stations). Les calculs et l'interprétation des résultats sont effectués à Paris.

Au Sénégal, en particulier, nous cherchons à mettre au point une carte des fumures de la zone à arachide, et nous effectuons cette année dans ce seul territoire 80 essais dont une soixantaine d'essais d'engrais, répartis en une trentaine d'endroits différents.

Sur chaque essai, nous analysons l'influence des engrais sur dix à vingt facteurs :

| | |
|---|---|
| Facteurs du rendement | Récolte des parcelles en gousses<br>Récolte des parcelles en fourrage<br>Milliers de plantes présentes à la récolte<br>Rendement au décorticage |
| Facteurs de la nutrition | Teneur de la feuille en azote<br>Teneur de la feuille en phosphore<br>Teneur de la feuille en potassium<br>Teneur de la feuille en calcium<br>Teneur de la feuille en magnésium<br>Poids frais et poids sec de l'échantillon |

Comme nous en sommes encore au stade de la recherche, nous analysons les quantités d'éléments multipliées ou divisées par le poids sec de l'échantillon.

L'analyse statistique des résultats pour le seul territoire du Sénégal représente environ 700 à 1.000 analyses statistiques en série.

Etant donné le faible laps de temps qui s'écoule entre la récolte (novembre-décembre) et la préparation des programmes (février-mars) pour la campagne suivante (juin-juillet), il était intéressant de mettre au point et d'utiliser une méthode permettant l'analyse rapide des résultats.

*
*  *

Pour ces essais nombreux, dont la conduite et les observations sont confiées à des européens, on a uniformisé les schémas expérimentaux.

Nous utilisons principalement les types suivants :

n facteurs à deux niveaux (type $2^n$)

3, 4, 5 facteurs à trois niveaux (type $3^3$ à 27 parcelles ou 54 parcelles
$3^4$ à 81 parcelles
$3^5$ soit 243 combinaisons avec $\frac{1}{3}$ de répétition = 81 parcelles)

et des essais de type mixte :

$3 \times 3 \times 2$ en 72 parcelles

$3 \times 2 \times 2$ en 36 parcelles

$4 \times 4 \times 2$ en 32 parcelles

Le type de plan est conditionné par des considérations agronomiques ; lorsqu'une carence de tel élément est probable, nous consacrons plus de niveaux à son étude ; lorsque nous désirons expérimenter des formes plus ou moins nombreuses d'un engrais, le nombre de niveaux d'un des facteurs est ainsi déterminé.

Lorsqu'il s'agit d'essais étudiant simultanément des doses, des formes d'engrais, des densités, nous cherchons le plan qui s'adapte le mieux aux problèmes à résoudre.

*
*  *

La mise au point de l'interprétation des résultats par l'utilisation des fiches perforées a été faite à partir d'une publication de O. KEMPTHORNE, décrivant complètement le processus utilisé pour des essais étudiant 32 combinaisons entre 5 éléments sur machine SAMAS POWER.

Nous avons étudié l'adaptation de cette méthode aux moyens dont nous disposions :

- possibilité d'acheter une perforatrice et une vérificatrice qui permettent d'effectuer à l'Institut la préparation des cartes ;
- donner le travail de tri à une Société de travail à façon, sur machines BULL ;
- tenir compte du fait que la méthode n'est rentable que sur un certain nombre de cartes, d'où nécessité d'étudier la mise au point du procédé pour d'autres types d'expériences afin de ne pas tendre à réduire les plans d'expériences à un type unique d'essais.

*
*  *

La plupart de nos essais sont ainsi des essais factoriels étudiant les différentes combinaisons possibles entre les éléments, à divers niveaux.

Ils n'ont, en général, qu'une répétition. On ne peut alors obtenir l'estimation de l'erreur à partir des interactions entre traitements et blocs. Il a été cependant montré que si certaines interactions d'ordre élevé sont négligeables, leur carré moyen se comporte dans l'analyse de la variance comme le carré moyen des composantes de l'erreur, et peut par conséquent servir à fournir une estimation de celle-ci.

Les interactions qui constituent une estimation de l'erreur sont choisies avant de regarder les résultats, et en général une fois pour toutes, d'après leur rang.

Ceci justifie le fait que nous ne répétons qu'une seule fois l'étude de nos diverses combinaisons. Au point de vue calcul, si nous arrivons à décomposer facilement les interactions en une fonction linéaire, il ne reste qu'à élever quelques chiffres au carré (autant qu'il y a de degrés de liberté pour l'erreur) pour obtenir la variance de l'erreur.

*

* *

Dans le cas d'une expérience étudiant 32 combinaisons entre 5 facteurs A,B, C,D,E à deux niveaux (présence ou absence) il y a :

5 effets principaux
10 interactions de premier ordre
16 interactions de deuxième et troisième ordre dont 3 confondues avec les différences entre sous-blocs lorsque l'essai est réalisé en 4 blocs de 8 parcelles.

*

* *

Les effets principaux et les interactions peuvent être obtenus par une méthode d'addition soustraction de F.YATES qui correspond à l'établissement d'un tableau de signes :

| | | Parcelles ou traitements appliqués | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (-) | a | b | ab | c | ac | bc | abc | d | ad | bd |
| | A | - | + | - | + | - | + | - | + | - | + | - |
| | B | - | - | + | + | - | - | + | + | - | - | + |
| | AB | + | - | - | + | + | - | - | + | + | - | - |
| | C | - | - | - | - | + | + | + | + | - | - | - |
| | " | | | | | | | | | | | |
| Effets principaux ou interactions | ABC | - | + | + | - | + | - | - | + | - | + | + |
| | D | - | - | - | - | - | - | - | - | + | + | + |
| | ABCD | + | - | - | + | - | + | + | - | - | + | + |

L'effet A est la somme des parcelles a, affectées du signe + ; et des parcelles qui n'ont pas reçu a, affectées du signe - .

L'effet B est la somme des parcelles b, affectées du signe +, et des parcelles qui n'ont pas reçu b, affectées du signe -.

Pour obtenir l'interaction $A \times B$ (effet de A en présence de B, moins l'effet de A en l'absence de B), il suffit de multiplier entre eux les signes indiqués pour A et B.

L'interaction A B C est obtenue par le produit des signes de A, B et C ou de A B et C

Lu dans l'autre sens, ce tableau indique la participation + ou - des parcelles a, b, ab, etc... aux effets ou interactions A, B, AB, etc...

Il est utilisé pour l'établissement du code de perforation.

On utilise une fiche par parcelle.

Sur la fiche à 80 colonnes, on inscrit dans :

les colonnes 1 à 3 le numéro de l'essai
les colonnes 4 à 6 le traitement reçu par la parcelle
les colonnes 7 à 10 le rendement en gousses/ha
les colonnes 11 à 13 le nombre de plantes
les colonnes 14 à 16 le poids de fanes
les colonnes 17 à 19 le rendement au décorticage
les colonnes 20 à 22 la teneur en azote
les colonnes 23 à 25 la teneur en phosphore
les colonnes 26 à 29 la teneur en potassium
les colonnes 30 à 32 la teneur en calcium
les colonnes 33 à 36 la teneur en magnésium
les colonnes 37 à 39 le poids sec de l'échantillon

Sur les colonnes 49 à 80 est inscrite la participation positive ou négative de la parcelle, au total général et à chacun des 31 effets principaux ou interactions.

Contribution positive : perforation de la position 1
Contribution négative : perforation de la position 11

Les cartes sont passées sur une tabulatrice qui effectue la tabulation numérique des effets 5 par 5 sur un facteur déterminé et rend les résultats imprimés de la façon suivante :

| Indicatif de l'essai | Total | N | P | NP | K |
|---|---|---|---|---|---|
| 38 | 6 396 | 26. | 524 | 26 | 244. |
| 39 | 4 865 | 1 | 517 | 71. | 147. |
| : | - | - | - | - | - |
| | NK | PK | NPK | Ca | Na |
| 38 | 110. | 96. | 14. | 26 | 48. |
| 39 | 33 | 67. | 13 | 1 | 13 |
| : | - | - | - | - | - |

Un point indique les résultats négatifs.

Les résultats sont transcrits sur des imprimés (voir tableau I).

Le carré moyen de 13 interactions donne immédiatement la variance de l'erreur, puis l'erreur standard sur les effets.

En utilisant des fiches préperforées pour la partie droite le report des données numériques sur la fiche est rapide. On peut compter économiser une heure de calcul par facteur analysé ou 10 à 15 heures par essai selon le nombre de facteurs étudiés. Si l'on a à analyser un essai de type $2^6$, il y a, outre le total général, 63 effets principaux et interactions. La difficulté est tournée en établissant un deuxième jeu de fiches.

Du type précédent $2^5$ dérive le type $4 \times 4 \times 2$, toujours à 32 parcelles (4 sous-blocs de 8 ou 2 sous-blocs de 16). Chaque degré de liberté correspond à un effet de traitements consistant en une combinaison linéaire simple des rendements parcellaires.

A un facteur A à 4 niveaux sont associés 3 degrés de liberté qui peuvent être fractionnés en trois degrés de liberté individuels :

$$A' = a3 + a2 - a1 - a0$$

$$A'' = a3 - a2 - a1 + a0$$

$$A''' = a3 - a2 + a1 - a0$$

Tableau N°1

Exemple numérique d'analyse d'un essai de type 2

ESSAI N P K Ca Mg

Analyse des teneurs en P

| N° Colonnes | Effets | Effets Totaux |
|---|---|---|
| 49 | Total | 6.396 |
| 50 | N | - 0,026 |
| 51 | P | + 0,524 ** |
| 52 | NP | + 0,026 |
| 53 | K | - 0,244 ** |
| 54 | NK | - 0,110 |
| 55 | PK | - 0,096 |
| 56 | NPK | - 0,014 —— |
| 57 | Ca | + 0,026 |
| 58 | NCa | - 0,048 |
| 59 | PCa | - 0,010 |
| 60 | NPCa | + 0,112 —— |
| 61 | KCa | + 0,002 |
| 62 | NKCa | $\boxed{- 0,236}$ |
| 63 | PKCa | - 0,190 —— |
| 64 | NPKCa | - 0,064 —— |
| 65 | Mg | - 0,026 |
| 66 | NMg | + 0,036 |
| 67 | PMg | + 0,070 |
| 68 | NPMg | + 0,072 —— |
| 69 | KMg | - 0,038 |
| 70 | NKMg | - 0,028 —— |
| 71 | PKMg | - 0,042 —— |
| 72 | NPKMg | $\boxed{- 0,148}$ |
| 73 | CaMg | - 0,032 |
| 74 | NCaMg | + 0,074 —— |
| 75 | PCaMg | $\boxed{+ 0,036}$ |
| 76 | NPCaMg | - 0,062 —— |
| 77 | KCaMg | - 0,068 —— |
| 78 | NKCaMg | - 0,062 —— |
| 79 | PKCaMg | - 0,020 —— |
| 80 | NPKCaMg | - 0,082 —— |

Somme des carrés=0,085580/32 = 0,00267437

Degrés de liberté = 13

Carré moyen = 0,000205721

Erreur standard = ± 0,014343

Moyenne générale = 0,1999

Coefficient de variation = 7,18 %

Erreur standard sur les effets totaux = ± 0,0811

| | | 5 % | 1 % |
|---|---|---|---|
| t = | | 2,160 | 3,012 |
| Différences significatives sur les effets totaux | | 0,175 * | 0,244 ** |

—— = Interactions utilisées pour l'estimation de l'erreur

$\boxed{\phantom{xx}}$ = Interactions confondues avec les différences entre blocs.

A'' représente la composante quadratique.

2 A' + A''' la composante linéaire.

2''' - A' la composante cubique.

L'interaction AB est divisée en neuf composantes :

A' B' = (a3 + a2 - a1 - a0) (b3 + b2 - b1 - b0) = a3 b3 + a3 b2 - ... + a0 b0

A' B'' = (a3 + a2 - a1 - a0) (b3 - b2 - b1 + b0) = a3 b3 - a3 b2 - ... - a0 b0

.
.
.

A''' B''' = (a3 - a2 + a1 - a0) (b3 - b2 + b1 - b0)

Les interactions AC et BC se divisent chacune facilement en trois composantes.

L'interaction ABC se divise en huit composantes :

A'B'C' = (a3 + a2 - a1 - a0) (b3 + b2 - b1 - b0) (c1 - c0)

.
.
.

Le code de perforation indiquant la contribution des parcelles aux effets principaux et aux interactions ne comporte ici encore que des signes + ou -. L'erreur s'obtient à partir de 8 ou 12 composantes d'interaction, à élever au carré.

*
* *

## ESSAIS 3 x 3 x 3

La simplicité d'analyse de ces types réside dans le fait que les effets des traitements sont finalement tous des fonctions linéaires des rendements parcellaires avec des coefficients de + ou - 1 (seizième).

Dans le type 3 x 3 x 3 il est courant d'utiliser la répartition suivante des degrés de liberté dans l'analyse de la variance :

| | | Degrés de liberté |
|---|---|---|
| Blocs | | 2 |
| A | linéaire | 1 |
| | courbe | 1 |
| B | linéaire | 1 |
| | courbe | 1 |
| C | linéaire | 1 |
| | courbe | 1 |
| AB | linéaire x linéaire | 1 |
| AC | . | 1 |
| BC | | 1 |
| Erreur | | 15 |
| TOTAL | | 26 |

La partie gauche des fiches parcellaires (désignation de l'essai traitements, rendements), reste inchangée. Sur la partie droite, on utilise les colonnes 54 à 80 pour inscrire la participation des parcelles aux 26 degrés de liberté.

- <u>Effets linéaires</u> :

$$A' = 1/9 \left[(a2) - (a0)\right]$$

Dans la colonne 55 du tableau n° 2, les parcelles recevant le traitement a2 sont affectées du coefficient + 1 et celles ayant reçu a0 au coefficient - 1.

TABLEAU 2 : CODE DE PERFORATION UTILISE POUR UN ESSAI $3^3$ A 27 PARCELLES.

| | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N P K | Total | Nl | Nc | Pl | Pc | Kl | Kc | Nl Pl | Nl Kl | Pl Kl | Nc Pl | Nl Pc | Nc Kl | Nl Kc | Pc Kl | Pl Kc | Nc Pc | Nc Kc | Pc Kc | Wl | Wc | Xl | Xc | Yl | Yc | Zl | Zc |
| 0 0 0 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 |
| 0 0 1 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | | 11-2 | 1 | | | 11 | 11 | | 1-3 | | 1-3 | 1 | 11-2 | 11-2 | 1 | 1 | | 11-2 | 1 | 1 | | 11-2 |
| 0 0 2 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 11 | 11 | 11 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 | | 11-2 | 1 | 1 | | 11-2 | 1 | 1 |
| 0 1 0 | 1 | 11 | 1 | | 11-2 | 11 | 1 | | 1 | | | 1-3 | 11 | 11 | 1-3 | | 11-2 | 1 | 11-2 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 11-2 | | 11-2 |
| 0 1 1 | 1 | 11 | 1 | | 11-2 | | 11-2 | | | | | 1-3 | | 1-3 | | | 11-2 | 11-2 | 1-3-4-5 | | 11-2 | 11 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 |
| 0 1 2 | 1 | 11 | 1 | | 11-2 | 1 | 1 | | 11 | | | 1-3 | 1 | 11 | 11-2 | | 11-2 | 1 | 11-2 | 11 | 1 | | 11-2 | 1 | 1 | 11 | 1 |
| 0 2 0 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | 11 | 11 | 11 | 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 11-2 | | 11-2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 2 1 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 | | 11-2 | 11 | | | 1 | 11 | | 1-3 | | 11-2 | 1 | 11-2 | 11-2 | 11 | 1 | 1 | 1 | | 11-2 | 11 | 1 |
| 0 2 2 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 11 | 1 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | | 11-2 |
| 1 0 0 | 1 | | 11-2 | 11 | 1 | 11 | 1 | | | 1 | 1-3 | | 1-3 | | 11 | 11 | 11-2 | 11-2 | 1 | | 11-2 | | 11-2 | | 11-2 | | 11-2 |
| 1 0 1 | 1 | | 11-2 | 11 | 1 | | 11-2 | | | | 1-3 | | | | | 1-3 | 11-2 | 1-3-4-5 | 11-2 | 11 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 |
| 1 0 2 | 1 | | 11-2 | 11 | 1 | 1 | 1 | | | 11 | 1-3 | | 11-2 | | 1 | 11 | 11-2 | 11-2 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 |
| 1 1 0 | 1 | | 11-2 | | 11-2 | 11 | 1 | | | | | | 1-3 | | 1-3 | | 1-3-4-5 | 11-2 | 11-2 | 11 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 1 1 | 1 | | 11-2 | | 11-2 | | 11-2 | | | | | | | | | | 1-3-4-5 | 1-3-4-5 | 1-3-4-5 | 1 | 1 | | 11-2 | | 11-2 | 11 | 1 |
| 1 1 2 | 1 | | 11-2 | | 11-2 | 1 | 1 | | | | | | 11-2 | | 11-2 | | 1-3-4-5 | 11-2 | 11-2 | | 11-2 | 1 | 1 | 11 | 1 | | 11-2 |
| 1 2 0 | 1 | | 11-2 | 1 | 1 | 11 | 1 | | | 11 | 11-2 | | 1-3 | | 11 | 1 | 11-2 | 11-2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 |
| 1 2 1 | 1 | | 11-2 | 1 | 1 | | 11-2 | | | | 11-2 | | | | | 11-2 | 11-2 | 1-3-4-5 | 11-2 | | 11-2 | 11 | 1 | 1 | 1 | | 11-2 |
| 1 2 2 | 1 | | 11-2 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 11-2 | | 11-2 | | 1 | 1 | 11-2 | 11-2 | 1 | 11 | 1 | | 11-2 | | 11-2 | 1 | 1 |
| 2 0 0 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | 11 | 11 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | 11 | 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 0 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | | 11-2 | 11 | | | 11 | 1 | | 11-2 | | 1-3 | 1 | 11-2 | 11-2 | | 11-2 | 11 | 1 | | 11-2 | 11 | 1 |
| 2 0 2 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | 11 | 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | | 11-2 | 11 | 1 | | 11-2 |
| 2 1 0 | 1 | 1 | 1 | | 11-2 | 11 | 1 | | 11 | | | 11-2 | 11 | 1 | 1-3 | | 11-2 | 1 | 11-2 | | 11-2 | | 11-2 | 11 | 1 | 11 | 1 |
| 2 1 1 | 1 | 1 | 1 | | 11-2 | | 11-2 | | | | | 11-2 | | 11-2 | | | 11-2 | 11-2 | 1-3-4-5 | 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 11-2 |
| 2 1 2 | 1 | 1 | 1 | | 11-2 | 1 | 1 | | 1 | | | 11-2 | 1 | 1 | 11-2 | | 11-2 | 1 | 11-2 | 1 | 1 | 11 | 1 | | 11-2 | 1 | 1 |
| 2 2 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | 1 | 11 | 11 | 1 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | | 11-2 | | 11-2 |
| 2 2 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 11-2 | 1 | | | 1 | 1 | | 11-2 | | 11-2 | 1 | 11-2 | 11-2 | 1 | 1 | | 11-2 | 11 | 1 | 1 | 1 |
| 2 2 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 11-2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11 | 1 |

- <u>Effets courbes</u> :

$$A'' = 1/9 \left|(a0) - 2(a1) + (a2)\right|$$

Dans la colonne 56, les parcelles recevant les traitements a0 ou a2 sont affectées du coefficient + 1 et celles ayant reçu a1 du coefficient -2

- <u>Interactions de 1er ordre</u> :

- Linéaire × linéaire =

$$A' \times B' = 1/6 \left[(a2) - (a0)\right] \times \left[(b2) - (b0)\right]$$
$$= 1/6 \left[(a2b2) - (a2b0) - (a0b2) + (a0b0)\right]$$

Dans la colonne 61, les parcelles recevant les traitements a2b2ou a0b0 sont affectées du coefficient + 1 et celles recevant a2b0 ou a0b2 du coefficient - 1

- Linéaire × courbe =

$$A' \times B'' = 1/6 \left[(a2) - (a0)\right] \times \left[(b2) + (b0) - 2\,(b1)\right]$$
$$= 1/6 \left[(a2b2) + (a2b0) - 2\,(a2b1) - (a0b2) - (a0b0) + 2\,(a0b1)\right]$$

Dans la colonne 65, les parcelles recevant a2b2 ou a2b0 sont affectées du coefficient + 1, celles recevant a0b2 ou a0b0 du coefficient - 1, celles recevant a2b1 de - 2 et celles recevant a0b1 de + 2

- Courbe × linéaire = expression sysmétrique de la précédente

- Courbe × courbe =

$$A''\,B'' = 1/6 \left[(a0) + (a2) - 2\,(a1)\right] \times \left[(b0) + (b2) - 2\,(b1)\right]$$
$$= 1/6 \left[(a2b2) + (a2b0) - 2\,(a2b1) + (a0b2) + (a0b0) - 2\,(a0b1) - 2\,(a1b2) - 2\,(a1b0) + 4\,(a1b1)\right]$$

Dans la colonne 70, les parcelles recevant a2b2 ou a0b2 ou a0b0 sont affectées du coefficient + 1, celles recevant a2b1 ou a0b1 ou a1b2 du coefficient - 2, et celles recevant a1b1 de + 4

- Interaction de 2e ordre A × B × C :

Les 8 degrés de liberté de l'interaction de 2e ordre A × B × C peuvent être subdivisés en 4 paires orthogonales de 2 degrés de liberté chacune. Chaque paire est obtenue à partir des différences entre les totaux de 3 groupes de 9 parcelles. Les 4 ensembles de 3 groupes sont représentés par les lettres W, X, Y, Z (notations de F. Yates)

| | | W1 | W2 | W3 | X1 | X2 | X3 | Y1 | Y2 | Y3 | Z1 | Z2 | Z3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| a | b | niveau du 3e facteur c | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| 0 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| 2 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 |

Le tableau ci-dessus montre que toutes les combinaisons entre chaque paire de facteurs apparaissent dans chaque groupe de 9 parcelles, donc si les groupes correspondent aux blocs, les effets principaux et les intéractions de 1er ordre ne seront pas confondus.

Les 2 degrés de liberté de chacune des composantes W, X, Y, Z peuvent à leur tout être scindés en 2.

Un degré de liberté correspondant à un terme linéaire

$$W' = (W3) - (W1)$$

Dans la colonne 73, les parcelles du groupe W3 sont affectées du coefficient + 1 et celles appartenant au groupe W1 du coefficient - 1.

Un degré de liberté correspond à un terme courbe =

$$W'' = (W1) + (W3) - 2\,(W2)$$

Dans la colonne 74, les parcelles des groupes W1 et W3 sont affectées du coefficient + 1 et celles du groupe W2 du coefficient - 2.

Au point de vue perforation les indices -1 et -2 se traduisent par la perforation du II et du II et 2 et les indices + 1 ; + 2 et + 4 par la perforation du 1, du 1 et 3, et du 1, 3, 4 et 5.

- L'erreur qui comporte 15 degrés de liberté (6 des interactions linéaire × courbe, 3 des interactions courbe × courbe et 6 des 3 composantes de A × B × C non confondues avec le terme blocs) est obtenue de la manière suivante :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | somme | des | carrés | des | colonnes | 64 à 69/36 |
| + | " | " | " | " | " | 70 à 72/108 |
| + | " | " | " | " | " | 75 - 77 - 79/18 (*) |
| + | " | " | " | " | " | 76 - 78 - 80/54 (*) |

## SÉRIES MIXTES 3x2x2

Le schéma "balancé" étudie les 12 combinaisons entre 3 facteurs A,B,C avec 3 répétitions et une répartition en 6 sous-blocs de 6 parcelles.

Le schéma mis au point adapte l'interprétation décrite par F. YATES à l'utilisation des fiches perforées.

Il permet d'arriver à des fonctions linéaires pour les 11 degrés de liberté des traitements, tout en tenant compte des fractions d'interaction confondues avec les différences entre blocs.

Il met en jeu des facteurs de multiplication :

Perforation de :

| | | |
|---|---|---|
| - 5 | 11 et 2<br>11, 2 et 6 | utilisation de 2 colonnes |
| - 4 | 11 et 2<br>11 et 2 | utilisation de 2 colonnes |
| - 3 | 11, 2 et 6 | |
| - 2 | 11, 2 | |
| - 1 | 11 | |
| + 1 | 1 | |
| + 2 | 1 et 3 | |
| + 3 | 1, 3 et 4 | |
| + 4 | 1 et 3<br>1 et 3 | utilisation de 2 colonnes |
| + 5 | 1 et 3<br>1, 3 et 4 | utilisation de 2 colonnes |

(*) en suposant la composante W confondue avec le terme blocs

## CONCLUSION

Selon ces principes un grand nombre de types d'essais peuvent être interprétés par utilisation des fiches perforées.

L'avantage est de réduire au strict minimum les opérations à effectuer sur machines électriques, et d'éliminer tous les calculs classiques de sommes de carrés et de soustractions du terme de correction.

On peut aussi bien adapter à ce procédé de calcul les types utilisant le "confounding" total des interactions que ceux utilisant le "confounding" partiel.

Avec diverses adaptations ou artifices, on obtient d'autres informations : au lieu de se contenter du solde de certains effets, on peut faire imprimer les éléments constitutifs qui permettent d'établir sans calcul les éléments des tableaux de contingence pour la présentation des résultats.

Il est toutefois évident que le procédé n'est économique que lorsqu'on a à traiter des séries suffisantes d'essais. Nous faisons cependant passer ensemble des essais de types différents en faisant effectuer les tabulations colonne par colonne sur trois facteurs (rendements, nombre de pieds, fourrage).

| | |
|---|---|
| Les essais $2^5$ et $4 \times 4 \times 2$ | utilisent les colonnes 49 à 80 |
| Les essais $3^3$ | utilisent les colonnes 54 à 80 |
| Les essais $3 \times 2 \times 2$ | utilisent les colonnes 55 à 80 |

A partir de la colonne 55, le travail devient continu sur toute la série d'essais.

Un autre avantage est que l'on dispose des données enregistrées sous une forme commode et qu'elles peuvent servir au bout de plusieurs années pour des études d'ensemble, corrélations notamment.

## REFERENCES

KEMPTHORNE, O. The analysis of a series of experiments by the use of punched card. J. Roy. Stat. Soc. (Suppl) p. 118-127.

YATES, F. The design and analysis of factorial experiments. Imp. Bur. Soil Sci. Tech. Comm. 35, 1937.