

Sur la manière d'organiser les expériences : afin d'obtenir un rendement maximum

Autor(en): **Linder, Arthur**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Archives des sciences physiques et naturelles**

Band (Jahr): **28 (1946)**

PDF erstellt am: **15.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-742867>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

SUR LA MANIÈRE D'ORGANISER LES EXPÉRIENCES

afin d'obtenir un rendement maximum

PAR

Arthur LINDER¹

INTRODUCTION. CLASSIFICATION DES EXPÉRIENCES.

Suivant le point de vue où l'on se place, il est possible de classer les expériences de différentes manières. Si l'on choisit comme critère la liberté d'organisation qui est laissée à l'expérimentateur, on peut faire la classification suivante.

D'un côté nous trouvons les travaux de l'astronome et du météorologue, où l'on ne peut guère parler d'expériences, mais plutôt d'observations. Viennent ensuite les sciences expérimentales telles que la zoologie, la chimie pharmaceutique, l'agriculture et la botanique, où l'expérimentateur *arrange* ou *organise* lui-même les expériences. Mentionnons enfin les expériences fictives que font les physiciens lorsqu'ils envisagent par exemple les transformations réversibles de la thermodynamique.

Dans ce qui suit, nous ne considérerons ni les observations proprement dites, ni les expériences fictives, mais nous étudierons comment un expérimentateur doit organiser ses expériences afin qu'il puisse tirer de ses résultats le maximum de renseignements.

¹ Conférence présentée à la Société de Physique et d'Histoire naturelle de Genève le 2 mai 1946.

BLOCS ARRANGÉS AU HASARD.

Nous voulons d'abord envisager une expérience tout à fait élémentaire.

On se propose de comparer la qualité de deux engrais A et B, en observant leur effet sur le rendement d'une plante déterminée. Il importe de bien définir au préalable ce qu'on entend par rendement.

Nous admettons que nous disposons pour cette étude d'un champ dont l'étendue est limitée. Comment utiliser ce terrain au maximum ? La manière la plus simple de procéder consiste à diviser le terrain en deux parties et d'ajouter dans une moitié l'engrais A, dans l'autre l'engrais B. Si le terrain A donne (par mètre carré) un rendement supérieur à celui du terrain B, pourrait-on en conclure que l'engrais A est de qualité supérieure à B ? Exception faite pour les engrais qu'on veut expérimenter, il faudrait qu'en A et B toutes les conditions fussent les mêmes : l'arrosage, le labourage, la distance entre les semis, l'insolation et surtout la fertilité du sol.

En effet, si nous observons dans la partie où se trouve A un rendement supérieur à celui de la partie où se trouve B, cela peut provenir soit de la supériorité de A, soit de la plus grande fertilité du terrain dans la région où on expérimente A. Il est impossible de séparer l'effet de la fertilité du sol de l'effet des engrais si l'expérience a été organisée comme nous venons de le dire. Ajoutons qu'il n'est pas même certain que les engrais augmentent le rendement ; il se pourrait qu'ils l'abaissent. En tout cas, il est indispensable de contrôler le rendement que l'on obtient sans engrais A et B.

Pour sortir de cette impasse, deux solutions différentes ont été proposées. La première cherche à *homogénéiser* complètement les conditions. Certainement on arrive toujours, avec suffisamment de patience, de temps et d'argent, à pousser cette homogénéisation très loin. On fait l'expérience dans des pots remplis de terre très homogène ; on tient ces pots dans une serre ; on les arrose, on les expose au soleil et aux courants

d'air de la même façon, etc. La seule différence de traitement sera donc l'apport de l'engrais A ou B.

Cette solution prête le flanc à deux objections. D'abord il est certain qu'on arrive jamais à une homogénéité parfaite, ceci d'autant moins que personne ne dispose des moyens illimités nécessaires à perfectionner les expériences dans cette direction. L'autre objection est celle-ci. Si l'on peut réaliser cette homogénéité, il est certain que l'expérience gagnera en précision; mais ce qu'elle gagne en précision, elle le perd en généralité. En effet, la comparaison est effectuée avec une grande précision, mais uniquement pour la terre très homogène et très spéciale préparée dans ce but. Or ces conditions plus ou moins artificielles, réalisées avec beaucoup de soins et de frais, ne sont pas du tout celles dans lesquelles on se trouve pratiquement.

Serait-il possible de concilier ces deux exigences: l'homogénéité d'une part qui est indispensable en vue de la précision de la comparaison, et l'inhomogénéité d'autre part, indispensable pour que les résultats présentent un caractère général.

Le procédé connu sous le nom de « blocs arrangés au hasard » a été choisi à cet effet ¹. Il repose sur le fait bien connu que deux parcelles voisines accusent une différence de fertilité plus petite que deux parcelles éloignées. Divisons donc notre terrain en quatre blocs compacts. Divisons ensuite chacun des blocs en trois parcelles, dont la première ne reçoit aucun engrais et les deux autres chacun des engrais A ou B.

I	O	A	B		O	A	B	III
II	O	A	B		O	A	B	IV

Schéma 1.

¹ Voir R. A. FISHER, *The Design of Experiments*. Oliver and Boyd, Edinburgh and London.

L'arrangement que je viens d'indiquer (schéma 1) présente un grave inconvénient. Si la fertilité augmente de gauche à droite, les parcelles B donnent un meilleur rendement que les parcelles A, et celles-ci un plus grand rendement que les parcelles O. Ainsi l'effet d'une variation de la fertilité se trouverait confondu avec l'effet de l'engrais. Ceci montre que cet arrangement systématique n'est pas à recommander.

En effet, l'essentiel de l'organisation par blocs arrangés au hasard consiste à répartir au hasard O, A et B à l'intérieur de chaque bloc. Cela ne veut pas dire qu'on les répartit de façon quelconque, mais que l'on fait intervenir le hasard, soit en jetant un dé, soit en se servant de cartes portant des chiffres et que nous brassons avant d'en tirer une qui nous indiquera le traitement à choisir.

Comment pourrions-nous interpréter les résultats d'expériences conduites d'après un tel schéma ?

En prenant d'abord les résultats des quatre blocs I, II, III, IV on obtient une indication sur la variation de la fertilité du sol, étant donné que les quatre blocs contiennent chacun les trois traitements.

Prenons le total des parcelles O, des parcelles A et des parcelles B. Cela nous permet de juger les disparités entre les traitements. Cette comparaison est correcte vu que nous tirons un élément de chaque bloc.

L'analyse statistique procède au moyen de ce qu'on appelle *l'analyse de la variance*. Envisageons les rendements des douze parcelles que nous désignerons par y_1, y_2, \dots, y_{12} . Calculons la moyenne arithmétique \bar{y} . Nous définissons alors la variance s^2 par la formule

$$s^2 = \frac{1}{11} \sum_{i=1}^{12} (y_i - \bar{y})^2 .$$

La somme de carrés $\sum_{i=1}^{12} (y_i - \bar{y})^2$ de cette formule nous donne une idée de la variation intégrale due à l'ensemble de toutes les causes qui déterminent le rendement. Désignons cette somme par S_1 . Pour obtenir la variance nous divisons par 11,

qui est le nombre de comparaisons indépendantes possible entre 12 parcelles (appelé aussi le degré de liberté).

De la même façon nous pouvons calculer une somme S_F de la variation de la fertilité et une somme S_T de la variation entre les traitements. En retranchant S_F et S_T de S_I nous obtenons une somme S_R attribuable à toutes les autres causes.

Admettons pour un instant que ni le traitement, ni le sol ne produisent une variation systématique du rendement. C'est ce qu'on appelle l'hypothèse du zéro. Admettons en plus que les variations accidentelles qu'on n'arrive jamais à éliminer soient distribuées en accord avec la courbe normale (courbe en cloche ou de Gauss-Laplace). Avec ces hypothèses, les rapports entre les variances calculées au moyen de S_F et de S_R donnent le plus souvent la valeur 1 et les écarts sont distribués d'une manière connue. Il en est de même pour les variances calculées à partir de S_T et S_R . Ces trois variances ne sont que trois estimations d'une même variance théorique inconnue: celle de tous les rendements qu'on obtiendrait en faisant dans des conditions semblables et avec l'hypothèse du zéro une infinité d'expériences.

Il existe des tables qui permettent de juger si l'hypothèse du zéro est vérifiée ou non.

Signalons encore que la méthode exposée pour deux engrais peut être appliquée à tous les autres domaines de la recherche. Voici quelques exemples: un médecin cherche à déterminer l'effet de l'ovomaltine sur le développement des enfants. Un bloc serait dans ce cas un groupe de trois enfants qui ne présentent pas de trop grandes différences, les traitements seraient par exemple aucun goûter, une tasse de lait ou une tasse d'ovomaltine au goûter. Application industrielle: une partie de machine doit être remplacée par une pièce faite d'un métal différent. Deux métaux sont à essayer. Les conditions différentes correspondant au facteur fertilité variable du sol seraient représentées par l'emploi de plusieurs sortes d'huiles.

Voici un exemple concret d'étude du rendement de différentes sortes de froment.

Rendements en bushels par acre.

Sorte	Blocs				Somme
	1	2	3	4	
<i>a</i>	27,8	27,3	28,5	38,5	122,1
<i>b</i>	30,6	28,8	31,0	39,5	129,9
<i>c</i>	27,7	22,7	34,9	36,8	122,1
<i>d</i>	16,2	15,0	14,1	19,6	64,9
<i>e</i>	16,2	17,0	17,7	15,4	66,3
<i>f</i>	24,9	22,5	22,7	26,3	96,4
Total	143,4	133,3	148,9	176,1	601,7

L'analyse de la variance aboutit à un tableau simple.

Effet	Somme des carrés	Degré de liberté	Variance	Rapports des variances, F		
				Calculés	Seuils de signification	
					5 %	1 %
Blocs	167,36	3	55,79	5,78	3,29	5,42
Sortes	1062,75	5	212,50	22,0	2,90	4,56
Reste	144,82	15	9,66	.	.	.
Total	1374,93	23

Les colonnes de 5% et de 1% contiennent les *seuils de signification*¹. Avec l'hypothèse du zéro nous trouvons une valeur de F supérieure à 3,29 et 2,90 respectivement en 5% de tous les rapports de variances basées sur 3 et 15 ou sur 5 et 15 degrés de liberté. Pour que ces seuils de signification soient valables, il faut, dans chaque bloc, répartir les traitements au hasard. Ainsi l'organisation de l'expérience est exactement en accord avec les fondements sur lesquelles sont établis les tests statistiques.

¹ Pour plus de détails nous renvoyons le lecteur à notre livre: *Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure*. Basel, Birkhäuser, 1945.

Dans l'exemple des cinq sortes de froment nous trouvons une valeur de F bien au delà des seuils de signification. La variation du rendement dépasse donc les variations accidentelles, aussi la variation des différentes sortes de froment est-elle significative.

En résumé, on peut affirmer qu'il existe — pour le problème de la comparaison de deux ou plusieurs effets lorsqu'il y a variation dans les bases de l'expérience — une organisation telle qu'il y a concordance complète entre la structure logique du problème, l'arrangement des expériences et l'analyse statistique.

CARRÉS LATINS.

Passons à un problème un peu plus compliqué, celui où il y a deux influences systématiques à éliminer. Il se présente, par exemple en agriculture, où on trouve souvent des variations de fertilité selon deux directions orthogonales. Lorsqu'on fait des expériences avec des animaux on trouve aussi des variations plus fortes entre des individus de différentes familles qu'entre des individus de la même famille. D'autre part les animaux sont parfois soumis à des conditions extérieures différentes.

Dans ces cas il convient d'organiser les expériences en carrés latins. Nous illustrons cette méthode par un exemple

Lignes	Colonnes				
	1	2	3	4	5
1	B	D	E	A	C
2	C	A	B	E	D
3	D	C	A	B	E
4	E	B	C	D	A
5	A	E	D	C	B

Schéma 2.

- A = saupoudré avant la pluie;
- B = saupoudré après la pluie;
- C = saupoudré une fois par semaine;
- D = pluie de soufre une fois par semaine;
- E = aucun traitement.

tiré, comme le précédent, de l'excellent traité de C. H. Goulden (*Methods of Statistical Analysis*, New York, John Wiley & Sons, 1939). Traitement du froment avec du soufre, afin de le préserver de la rouille. L'arrangement (schéma 2) est tel que chaque traitement se trouve une fois, mais une seule fois, dans chaque ligne et dans chaque colonne.

Ici aussi il importe de ne pas répartir les traitements d'une manière systématique, mais au hasard.

L'analyse statistique élimine soigneusement les variations dans la direction des colonnes aussi bien que dans la direction des lignes.

Effet	Somme des carrés	Degré de liberté	Variance	Rapports des variances, F		
				Calculés	Seuils de signification	
					5 %	1 %
Lignes	46,67	4	11,67	4,99	3,26	5,41
Colonnes	14,02	4	3,50	1,50	3,26	5,41
Traitements	196,61	4	48,62	20,8	3,26	5,41
Reste	28,04	12	2,34	.	.	.
Total	285,34	24

Nous voyons que la variation d'une colonne à l'autre, quoique plus forte que la variation accidentelle, n'est guère significative, tandis que d'une ligne à l'autre et d'un traitement à l'autre la variation est significative.

Une fois que la variation entre les traitements s'est révélée significative, il est permis de voir plus en détail quel est le traitement le plus favorable. Lorsque, par contre, les traitements n'accusent pas une variation essentiellement plus forte que les variations accidentelles, il faut prendre garde à ne pas tirer de conclusions de quelques différences qui semblent accentuées. De telles différences peuvent seulement être considérées comme des indications permettant de projeter des expériences destinées à étudier en détail le problème qu'elles suggèrent.

ARRANGEMENTS FACTORIELS.

On rencontre fréquemment le problème suivant. Un remède contient trois éléments efficaces. Quelle combinaison de ces trois facteurs nous fournit la composition optimale ?

Par une idée préconçue, due probablement à une application erronée de méthodes qu'on enseigne en physique élémentaire, ce problème est souvent traité de la façon suivante. On fait d'abord varier le facteur A, toutes les autres conditions restant inchangées. Ensuite on fait varier les facteurs B et C.

On peut obtenir une forte augmentation du rendement en organisant les expériences selon la méthode des « arrangements factoriels ».

Prenons un exemple industriel. La résistance à la traction de l'acier dépend entre autres de sa teneur en carbone, en silicium et en manganèse. Choisissons pour chaque élément, d'une part une faible teneur (désignée par 1), d'autre part une forte teneur (désignée par 2). Les huit possibilités qui se présentent peuvent être résumées sous forme d'un tableau (schéma 3).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
C	1	2	1	1	1	2	2	2
Si	1	1	2	1	2	1	2	2
Mn	1	1	1	2	2	2	1	2

Schéma 3.

Nous trouvons l'influence du carbone en prenant la différence des cas présentant une haute teneur en C et de ceux à faible teneur. Nous avons quatre différences: II-I, VII-III, VI-IV, VIII-V, telles que les deux termes ne diffèrent que par l'élément C.

Nous pouvons établir d'une manière analogue une évaluation de l'influence de Si et de Mn.

Nous trouvons donc, avec une seule série de huit expériences, l'influence des trois facteurs. Si, d'après le système habituel,

on voulait évaluer l'influence des trois facteurs avec la même précision, il nous faudrait vingt-quatre expériences.

Mais il y a plus. Les huit expériences nous donnent aussi une évaluation de l'influence simultanée de C et Si. En effet, si nous calculons les quatre différences VII-I, III-II, VIII-IV, VI-V, nous obtenons une mesure de l'influence du carbone et du silicium envisagés simultanément.

Evidemment nous pouvons de la même manière estimer l'influence des autres paires de facteurs, soit C, Mn et Si, Mn.

Enfin nous pouvons calculer l'influence simultanée des trois éléments en formant VIII-I, V-II, VI-III, VII-IV.

Je citerai comme exemple une étude qui a été entreprise par la maison Sulzer frères ¹. Les huit expériences énumérées ci-dessus ont été répétées quatre fois. Les teneurs employées pour ces essais étaient: carbone 0,1 et 0,3%, silicium 0,3 et 0,6%, manganèse 0,45 et 0,60%. Dans ces limites, les trente-deux expériences ont donné les renseignements suivants au sujet de l'augmentation de la résistance à la traction: lorsque la teneur en un de ces éléments — exprimée en pour cent — augmente d'une unité, la résistance augmente:

pour C	de 56,4 kg par mm ² ;
pour Si	de 12,6 kg par mm ² ;
pour Mn	de 13,3 kg par mm ² .

L'effet combiné de C et Si reste en dessous du seuil de signification; les deux autres combinaisons ont donné par contre des effets significatifs. Si l'on augmente la teneur en deux de ces éléments — évalués ensemble en pour cent — d'une unité, il en résulte une augmentation de la résistance à la traction:

pour Si-Mn	de 2,8 kg par mm ² ;
pour C-Mn	de 1,7 kg par mm ² .

L'effet du silicium et du carbone se trouve donc considérablement augmenté par la présence du manganèse.

¹ Dr. ing. E. ZINGG, Anwendung statistischer Methoden auf metallurgische Fabrikations- und Forschungsgebiete. *Revue Sulzer*, I, 1945.

Remarquons en passant que dans une étude basée sur 3.915 analyses d'acier, on avait trouvé (également dans les laboratoires des frères Sulzer) le résultat suivant: si la teneur en carbone d'un acier exprimée en pour cent augmente d'une unité, la résistance à la traction augmente de 55,7 kg par millimètre carré. Ce chiffre est très voisin de celui déterminé sur la base des trente-deux observations mentionnées ci-dessus !

CONCLUSIONS.

Il ressort de ce que nous avons dit qu'à chaque problème de recherche expérimentale correspond un certain arrangement optimum des expériences et à cet arrangement correspond une méthode déterminée d'analyse statistique. Cet arrangement et cette méthode donnent un maximum de renseignements sur le problème en exigeant un nombre minimum d'expériences.
