

# EXPÉRIMENTATION AGRONOMIQUE ET EXPÉRIMENTATION INDUSTRIELLE<sup>(1)</sup>

Pierre Dagnelie

Faculté universitaire des Sciences agronomiques  
B-5030 Gembloux (Belgique)

pierre@dagnelie.be

## RÉSUMÉ

Les principes modernes d'expérimentation sont nés au cours des années 1920, dans le domaine agronomique, à partir des travaux de Ronald Aylmer Fisher. Ils ont été introduits ultérieurement dans d'autres domaines d'application, dont le secteur industriel. L'évolution qui en a résulté et les dangers qui peuvent en découler sont esquissés dans cet article. Quelques solutions sont également mentionnées.

## ABSTRACT

*The principles of modern experimentation were born in the years 1920, in the field of agricultural research, from the works by Ronald Aylmer Fisher. They were introduced subsequently in other fields of application, including the industrial sector. The evolution that has resulted and the dangers that may arise are outlined in this article. Some solutions are also mentioned.*

## L'APPORT DE R.A. FISHER

Appliquée occasionnellement déjà bien avant cela, l'expérimentation a connu une expansion considérable au cours du 19<sup>e</sup> siècle, à la suite notamment des travaux de Liebig (Justus von Liebig, 1803-1873), en matière d'engrais. Ces travaux ont en effet incité les collaborateurs de diverses stations de recherche agronomique à mettre en place à ce moment des essais comparatifs de grande ampleur. Tel est le cas en particulier, en Grande-Bretagne, pour la *Rothamsted Experimental Station*, à Harpenden (au nord de Londres).

Existant depuis plus de 150 ans, certaines de ces expériences sont toujours en cours. La figure 1, relative à l'expérience de Broadbalk, datant de 1843, en est une illustration (source : <[www.rothamsted.ac.uk/resources/ClassicalExperiments.html](http://www.rothamsted.ac.uk/resources/ClassicalExperiments.html)>).

Après quelques années, s'est posée la question de l'interprétation des résultats de ces expériences. Diverses publications ont paru à ce sujet à la fin du 19<sup>e</sup> et au début du 20<sup>e</sup> siècle. Et en 1919, la Station de Rothamsted engage Ronald Aylmer Fisher (1890-1962), mathématicien issu de Cambridge, en vue de contribuer à résoudre ce problème.

Très rapidement, Fisher publie une série d'articles à ce propos, et aussi, en 1925, son livre mondialement connu *Statistical methods for research workers*. Fisher quittera la Station de Rothamsted en 1933, et poursuivra sa carrière à Londres, Cambridge et Adelaïde (Australie).

---

<sup>(1)</sup> *Journal des Ingénieurs* **110**, 26-30, 2008.



Figure 1. Vue aérienne de l'expérience de Broadbalk (*Rothamsted Experimental Station, Harpenden, Grande-Bretagne*).

Fisher préconise le respect de trois principes – *replication*, *randomization* et *local control* – qui apparaissent clairement dans la figure 2 (cette figure, qui provient initialement d'une publication de Fisher datant de 1931, est reproduite ici dans la version qu'en donne Preece en 1990).

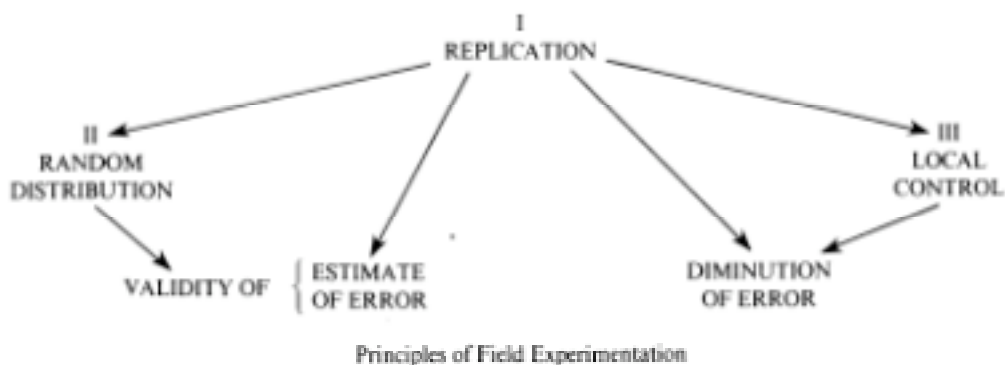


Figure 2. Présentation schématique des principes de Fisher.

La répétition (*Replication*) de chacun des traitements (ou des objets ou des éléments) qui sont étudiés, un certain nombre de fois dans une même expérience, a pour objectif de permettre une estimation de la variabilité résiduelle (*Estimate of error*), c'est-à-dire de la variabilité qui n'est pas liée aux traitements eux-mêmes, et simultanément, d'augmenter la précision de l'expérience (*Diminution of error*).

La randomisation (*Random distribution*), c'est-à-dire la répartition « au hasard » des différents traitements au sein des différentes parcelles d'une expérience en champ ou, d'une manière plus générale, au sein des différentes unités expérimentales, permet d'obtenir des estimations non biaisées de la variabilité résiduelle et de l'influence des traitements (*Validity of estimate*).

Enfin, le contrôle local (*Local control*, aussi qualifié ailleurs de *blocking*) a pour but, comme la répétition, d'augmenter la précision de l'expérience. Dans l'esprit de Fisher, ce « contrôle local » peut être réalisé par l'utilisation de divers dispositifs expérimentaux tels que des blocs, c'est-à-dire des ensembles de parcelles ou d'unités expérimentales voisines ou aussi semblables que possible, des carrés latins, etc. (ces différentes notions sont explicitées au cours du paragraphe suivant).

Parmi les trois concepts envisagés, le principal apport de Fisher est sans doute la randomisation et, corrélativement, l'obtention d'estimations correctes.

Bien d'autres notions peuvent être mises au crédit de Ronald Aylmer Fisher. On peut citer en particulier, en relation avec l'expérimentation, l'analyse de la variance et l'analyse de la covariance, dont l'objectif est précisément la comparaison de moyennes.

## LE PLAN D'EXPÉRIENCE

Toute expérience digne de ce nom doit normalement être l'objet d'une planification rigoureuse, donnant naissance à un *plan d'expérience* ou *protocole expérimental*. Les éléments constitutifs de ce document sont :

- la définition de l'objectif ou des objectifs de l'expérience et des conditions dans lesquelles celle-ci doit être réalisée ;
- la définition des traitements qui seront pris en considération ;
- la définition des unités expérimentales auxquelles les traitements seront appliqués ;
- la définition des observations à réaliser ;
- la définition de la manière dont les différents traitements seront affectés aux différentes unités expérimentales ;
- et quelques informations préliminaires relatives à l'analyse des résultats de l'expérience.

Il n'est pas possible de donner en quelques mots des informations générales relatives aux *objectifs* et aux *conditions* des expériences, mais il est bon de souligner le fait que ces éléments doivent toujours être définis de façon très précise.

Les *traitements* ou *objets* à comparer correspondent d'une façon tout à fait générale à différentes modalités (ou variantes ou niveaux) d'un ou de plusieurs facteurs, les facteurs pouvant être de nature qualitative (différents types d'engrais par exemple) ou de nature quantitative (différentes doses d'un même engrais par exemple).

Quand deux ou plusieurs facteurs sont pris en considération, il est opportun d'établir une distinction entre les expériences factorielles et les expériences non factorielles. Une expérience est dite factorielle quand chacune des modalités de chacun des facteurs est associée à chacune des modalités du ou des autres facteurs, et elle est dite non factorielle sinon.

Les figures 3 et 4 donnent des représentations schématiques de deux expériences destinées à étudier deux facteurs, l'une factorielle et l'autre non factorielle. La première (figure 3) fait intervenir trois niveaux pour chacun des deux facteurs, chacune des modalités d'un des facteurs étant associée à chacune des modalités de l'autre : il s'agit d'une expérience factorielle dite de type  $3^2$ . Les différentes modalités sont désignées conventionnellement par les valeurs  $-1$ ,  $0$  et  $+1$ , ce qui correspond parfaitement au cas des facteurs quantitatifs, mais, pour des facteurs qualitatifs, il pourrait tout aussi bien s'agir de différentes modalités non numériques et éventuellement non ordonnées, désignées par exemple par les lettres A, B et C. Le deuxième schéma (figure 4) correspond par contre à une expérience non factorielle, qui comporte cinq modalités pour le premier facteur et trois modalités pour le deuxième facteur. Ce type d'expérience concerne plus spécifiquement le cas de deux facteurs quantitatifs.

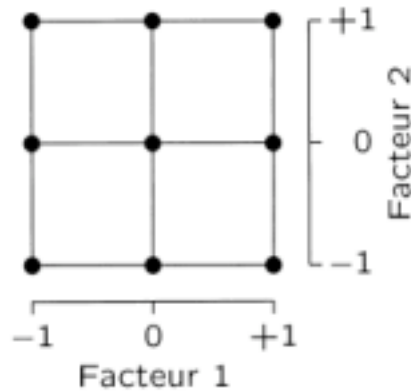


Figure 3. Exemple d'expérience factorielle à deux facteurs.

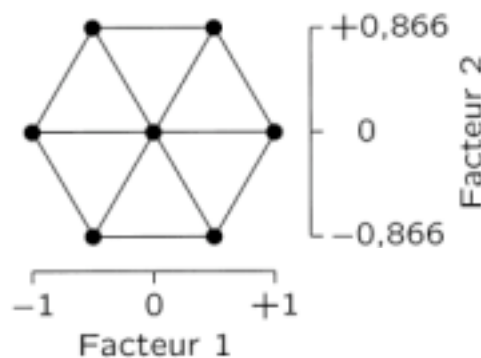


Figure 4. Exemple d'expérience non factorielle à deux facteurs.

Dans les expériences agronomiques classiques, telle que celle de Broadbalk, les *unités expérimentales* sont des parcelles d'une certaine étendue, le plus souvent de forme allongée, mais il peut être question aussi de plantes (des arbres considérés individuellement par exemple), de parties de plantes (branches, feuilles, fruits, etc.), d'animaux ou de groupes d'animaux, etc. Il importe évidemment que les unités choisies pour faire partie de l'expérience soient bien représentatives de l'ensemble plus vaste auquel on s'intéresse en réalité (ensemble des champs, des vergers ou des forêts d'une région donnée par exemple).

La définition des unités expérimentales est aussi l'occasion d'en fixer le nombre et, par là, de déterminer le *nombre de répétitions*.

Quant aux *observations*, il y a lieu, non seulement de définir la ou les variables ou caractéristiques à observer, mais aussi leurs modalités d'observation (méthodes et unités de mesure, échelles de mesure, procédures éventuelles d'échantillonnage, etc.).

Le mode d'affectation des traitements aux unités expérimentales définit le *dispositif expérimental*. Dans l'esprit de Fisher, cet aspect du plan d'expérience implique toujours une répartition au hasard (randomisation), au moins partielle.

Les figures 5 et 6 illustrent deux possibilités. La première (figure 5) consiste en une répartition complètement aléatoire, ici de cinq traitements (A, B, C, D, E) au sein de 20 parcelles, avec quatre répétitions de chacun des traitements (quatre parcelles pour chacun des traitements). La deuxième possibilité envisagée (figure 6) suppose au contraire, pour les mêmes nombres de traitements et de répétitions, la définition préalable de blocs, c'est-à-dire d'ensembles de parcelles contiguës, au sein de chacun desquels les traitements sont répartis au hasard et de façon indépendante, ce qui conduit à la notion de blocs aléatoires complets.

5	3	2	1
1	5	4	3
5	1	1	3
4	2	4	4
2	5	3	2

Figure 5. Exemple d'expérience complètement aléatoire.

3	4	4	3
5	3	5	4
1	5	1	1
2	1	2	5
4	2	3	2
Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3	Bloc 4

Figure 6. Exemple d'expérience en blocs aléatoires complets.

La notion de blocs peut être étendue à de nombreuses situations différentes de celle des parcelles d'un champ d'expérience. Le principe de base est toujours de définir des sous-ensembles d'unités expérimentales qui sont plus homogènes, par leur proximité, leur similitude, etc., que l'ensemble de toutes les unités expérimentales considérées dans l'expérience, en permettant ainsi d'accroître la précision des comparaisons. De nombreuses variantes, telles que les blocs incomplets, les carrés latins, les expériences en *cross-over*, etc. existent d'ailleurs.

Enfin, l'esquisse de l'*analyse des résultats* peut consister par exemple en un schéma d'analyse de la variance. Toujours dans le domaine agronomique, cette analyse a le plus souvent comme objectif de chiffrer l'importance de chacun des facteurs considérés et de leurs interactions éventuelles, c'est-à-dire des interférences possibles (synergie ou antagonisme par exemple) entre deux ou plusieurs facteurs.

Parmi les différents éléments que nous venons d'évoquer, ceux qui retiennent le plus l'attention sont en général le choix des traitements (*treatment design*) et les modalités d'affectation des traitements aux unités expérimentales, c'est-à-dire le dispositif expérimental (*experimental design*).

## LA TRANSPOSITION DANS LE SECTEUR INDUSTRIEL

L'expérimentation industrielle (ou technologique) a connu ses premiers développements importants au cours de la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle. En témoignent notamment les dates de « naissance » de diverses revues. Les titres *Biometrika* et *Journal of Agricultural Science*, qui publient dès le début du 20<sup>e</sup> siècle de nombreux articles traitant d'expérimentation, ont été lancés respectivement en 1900 et 1905, alors que *Technometrics* et *Journal of Quality Technology* datent de 1959 et 1969.

La transposition dans le domaine industriel, des principes développés dans le secteur agronomique, a progressivement impliqué une évolution importante.

Ainsi, l'*objectif* poursuivi est fréquemment ici, non pas d'étudier individuellement les effets des facteurs et leurs interactions, mais bien, pour des facteurs quantitatifs, de déterminer une ou des relations qui expriment la ou les variables étudiées en fonction des facteurs considérés.

Il s'agit généralement de relations du premier ou du deuxième degré, qui définissent des lignes ou des surfaces de réponse, et qui permettent éventuellement de déterminer des conditions optimales de production, de fabrication, etc.

Le choix des *traitements* ou des objets qui interviennent dans les expériences est souvent modifié en fonction de cet objectif, la préférence étant donnée plutôt à des expériences non factorielles, telle que celle qui est présentée dans la figure 4.

Un cas particulier important est celui des mélanges de deux ou plusieurs substances ou composantes, ce qui correspond à des facteurs ne variant pas indépendamment les uns des autres, mais qui sont tels, au contraire, que la somme de leurs valeurs est constante. La figure 7 présente de façon schématique le cas de trois facteurs dont les valeurs peuvent varier de 0 à 100, avec une somme toujours égale à 100 (facteurs exprimés en pourcentages).

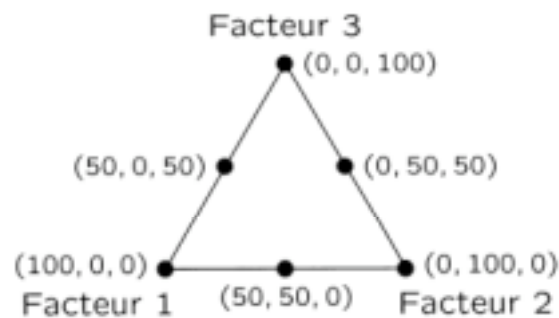


Figure 7. Exemple d'expérience relative à l'étude d'un mélange de trois substances.

Un autre objectif possible est, pour un nombre plus important de facteurs, la recherche du ou des facteurs les plus influents, ce problème étant connu sous le nom de criblage.

Les *unités expérimentales* peuvent être de natures très diverses : éprouvettes destinées à être soumises à des tests de résistance mécanique, divers volumes ou quantités de matière, etc. Mais souvent, la question n'est pas envisagée en termes d'unités expérimentales distinctes, les différents traitements étant en fait étudiés de façon consécutive dans une même « unité expérimentale » : un même four, un même incubateur, etc.

A cet égard, il faut noter aussi que les expériences de type industriel sont rarement l'objet de deux ou plusieurs *répétitions* complètes, seuls certains traitements ou certains points expérimentaux étant répétés. En ce qui concerne la figure 4, on pourrait envisager par exemple de répéter deux fois trois points expérimentaux seulement, choisis parmi ceux qui correspondent aux sommets de l'hexagone.

Une conséquence du fait que les différents traitements sont fréquemment étudiés en séquence est l'utilisation du terme « expérience » ou « essai » pour désigner *chacune* des manipulations individuelles, et non pas l'ensemble de celles-ci. Toujours pour l'exemple de la figure 4, on parlera volontiers, dans le domaine industriel, d'un ensemble de sept expériences ou sept essais (une expérience ou un essai pour chacun des sept traitements), et non pas d'une seule expérience ou un seul essai, pour l'ensemble des sept traitements.

Il en résulte aussi que l'expression « plan d'expérience » (au singulier) cède en général la place à « plan d'expériences » (au pluriel).

D'autre part, dans le cas de traitements étudiés en séquence, le *dispositif expérimental* se confond avec l'ordre de prise en considération des différents traitements. Et, pour des raisons de facilité ou de coût, qui peuvent être liées à la plus ou moins grande difficulté de modifier les conditions expérimentales pour les différents facteurs, le principe de randomisation est souvent négligé. L'ordre choisi est alors, le plus souvent, soit systématique, soit déterminé de manière à

minimiser le coût total des modifications des conditions expérimentales, c'est-à-dire le coût total des changements des modalités des facteurs.

Enfin, dans l'optique de la détermination de lignes ou de surfaces de réponse, en ce qui concerne l'*interprétation des résultats*, l'analyse de la variance cède largement la place à la régression, simple ou multiple.

## QUELQUES DANGERS

Le passage de l'expérimentation agronomique à l'expérimentation industrielle a eu pour conséquence d'accorder une importance accrue, voire parfois exclusive, au choix des traitements (*treatment design*), au détriment du dispositif expérimental (*experimental design*), c'est-à-dire aussi de négliger les principes de Fisher, par une absence ou un petit nombre de répétitions, une absence fréquente de toute randomisation, et une absence fréquente de tout système de blocs.

L'absence de *répétition* conduit tout naturellement à une méconnaissance de la variabilité résiduelle. Et même en présence d'un petit nombre de répétitions, la variabilité résiduelle reste relativement mal connue. Il en résulte inévitablement une grande imprécision dans l'estimation des moyennes, des différences de moyennes, etc. auxquelles on s'intéresse.

De même, l'absence de *randomisation* et de *blocs* peut avoir des conséquences néfastes. Un risque important, dans le cas d'expériences réalisées en séquence, est lié à l'existence éventuelle de dérives, c'est-à-dire d'évolutions progressives dans le temps des résultats d'expériences en fonction de facteurs qui ne sont pas maîtrisés. De telles dérives peuvent provenir notamment d'une évolution progressive de certaines qualités de la matière première qui intervient dans l'expérience, de l'évolution progressive dans le temps du réglage de certains instruments de mesure, etc.

A cet égard, on peut montrer que de telles dérives, même peu importantes, peuvent modifier sensiblement les conclusions déduites de certaines expériences. Des différences de moyennes qui seraient non significatives en l'absence de toute dérive peuvent par exemple apparaître comme significatives en présence de dérives, même relativement réduites, et vice-versa.

Les conséquences que nous venons d'évoquer sont évidemment sans importance, ou négligeables, si le matériel expérimental et les conditions expérimentales sont parfaitement stables, ou ne sont entachés que de très faibles variations non contrôlées. Ces conséquences peuvent par contre être très préjudiciables quand les fluctuations non contrôlées sont importantes.

Et notre pratique de la consultation statistique nous a amené à constater que, pour diverses raisons, les expérimentateurs sous-estiment très fréquemment l'importance des fluctuations non contrôlées auxquelles ils sont confrontés. Nous pensons donc qu'ils sous-estiment fréquemment les risques qu'ils peuvent encourir en n'accordant pas une attention suffisante aux principes de répétition, de randomisation et de *blocking*.

Il faut signaler enfin que la distinction entre expérimentation agronomique et expérimentation industrielle peut s'estomper, ou devenir tout à fait fallacieuse, dans certains secteurs, tels que l'agro-alimentaire et les biotechnologies. Dans de tels domaines, les expériences sont en effet souvent de type industriel, mais en faisant intervenir, comme en agronomie, un matériel biologique éminemment variable. De telles situations nécessitent évidemment une attention toute particulière.

## QUELQUES REMÈDES

Au cours des dernières années, différentes solutions ont été envisagées en vue de faire face, au moins partiellement, aux dangers que nous venons d'esquisser. La principale, et celle qui

est l'objet d'une littérature relativement abondante pour le moment, est l'application du principe du *split-plot*.

Ce principe est d'utilisation courante, depuis bien longtemps, dans les expériences agronomiques en champ. Dans le cas le plus simple d'une expérience factorielle comportant deux facteurs, il revient à procéder à une première répartition aléatoire pour les différentes modalités d'un des deux facteurs, dans des parcelles d'assez grande dimension, et de procéder ensuite à une deuxième répartition pour les différentes modalités de l'autre facteur, à l'intérieur de chacune des parcelles relatives au premier facteur pris en considération, en définissant ainsi des sous-parcelles, d'où le concept de « parcelle divisée » ou *split-plot*.

La figure 8 illustre ce principe dans le cas d'une expérience en quatre blocs, avec un premier facteur comportant trois modalités et un deuxième facteur à deux modalités. Les trois modalités du premier facteur, auxquelles correspond chaque fois le premier chiffre des numéros des traitements (11, 12, 21, 22, 31 et 32), ont tout d'abord été réparties de manière aléatoire et indépendamment au sein des quatre blocs, en définissant au total 12 « grandes parcelles ». Et les deux modalités du deuxième facteur ont ensuite été réparties au hasard et indépendamment à l'intérieur de chacune de ces « grandes parcelles », en définissant 24 « petites parcelles » ou « sous-parcelles ».

21	11	32	11
22	12	31	12
32	31	12	22
31	32	11	21
11	21	22	32
12	22	21	31
Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3	Bloc 4

Figure 8. Exemple d'expérience avec parcelles divisées (*split-plot*).

Le principe du *split-plot*, qui possède de nombreuses variantes, a été transposé dans le domaine industriel sans en modifier l'appellation, même si, le plus souvent, il n'est plus du tout question de parcelles. Mais il faut savoir, au sujet de cette méthode, que des précisions parfois fort différentes sont obtenues pour les différents facteurs.

Ainsi, dans l'exemple de la figure 8, on doit s'attendre à ce que la précision relative au premier facteur (facteur associé aux « grandes parcelles ») soit nettement inférieure à la précision relative au deuxième facteur (facteur associé aux « petites parcelles »). Le premier facteur est en fait étudié une seule fois dans chacun des quatre blocs, et donc avec quatre répétitions, tandis que le deuxième facteur est étudié au sein de chacune des 12 « grandes parcelles », c'est-à-dire avec 12 répétitions.

Une autre piste développée au cours des dernières années est l'utilisation de blocs, non pas dans le sens traditionnel des blocs complets ou de leurs différentes variantes habituelles, mais en tenant compte de contraintes particulières. Les moyens modernes de traitement de l'information permettent en effet d'identifier des plans d'expériences qui répondent à certains critères d'optimalité, quels que soient le nombre de points expérimentaux potentiels, le nombre de blocs et le nombre d'unités expérimentales par bloc, mêmes si ces nombres sont très réduits.

Ces nouvelles utilisations du principe des blocs peuvent d'ailleurs être associées dans certains cas au principe du *split-plot*.

Enfin, des dispositifs particuliers, qui sont insensibles ou partiellement insensibles aux dérives, ou au moins aux dérives linéaires, ont également été proposés.



## QUELQUES RECOMMANDATIONS

En conclusion, nous pensons que, pour éviter les inconvénients que nous avons signalés, les principes de répétition (ou de répétition partielle, en vue d'obtenir une estimation suffisamment précise de la variabilité des résultats), de randomisation (ou de randomisation restreinte, comme le permet notamment le *split-plot*), et de *blocking* ne devraient jamais être perdus de vue ou passés sous silence, ni dans les ouvrages généraux relatifs à l'expérimentation, ni dans les protocoles expérimentaux.

En particulier, nous recommandons d'éviter toute transposition inconsidérée de principes relativement laxistes qui seraient acceptables pour des expériences à faible variabilité, ce qui est le cas de certaines expériences industrielles, à des expériences à forte variabilité, comme c'est en général le cas quand du matériel biologique est en jeu.

Nous préconisons en fait ainsi de toujours respecter un juste équilibre entre les différents éléments du protocole expérimental, et notamment entre le choix des traitements (*treatment design*) et le choix du dispositif expérimental (*experimental design*).

## POUR EN SAVOIR PLUS

Dagnelie P. [2003]. *Principes d'expérimentation : planification des expériences et analyse de leurs résultats*. Gembloux, Presses agronomiques, et édition électronique, <[www.dagnelie.be/expres.html](http://www.dagnelie.be/expres.html)>, 397 p.

Dagnelie P. [2008]. Le plan d'expérience évolue... *Rev. Modulad* **38** (à paraître), <[www.modulad.fr](http://www.modulad.fr)> et <[www.dagnelie.be/autrepub.html](http://www.dagnelie.be/autrepub.html)>.

Preece D.A. [1990]. R.A. Fisher and experimental design : a review. *Biometrics* **46** (4), 925-935.