

Chapitre 3

Les unités expérimentales

Sommaire

- 3.1 La notion d'unité expérimentale**
- 3.2 Les dimensions des unités expérimentales**
 - 3.2.1 Principes généraux
 - 3.2.2 Les bordures et les périodes tampons
- 3.3 La forme des unités expérimentales**
- 3.4 Le nombre de répétitions**
- 3.5 La variabilité du matériel expérimental**
 - 3.5.1 Principes généraux
 - ⊖ 3.5.2 L'étude de la variabilité par le modèle de SMITH
 - ⊖ 3.5.3 L'étude de la variabilité par l'analyse spatiale
- 3.6 Exemple : expérience d'uniformité**
 - 3.6.1 Présentation et données
 - ⊖ 3.6.2 Interprétation des résultats : modèle de SMITH
 - ⊖ 3.6.3 Interprétation des résultats : analyse spatiale

3.1 La notion d'unité expérimentale

1° Principe

L'*unité expérimentale*¹ est l'élément de base de l'expérience, qui est considéré individuellement durant tout le processus expérimental. Chacune des unités est notamment soumise au départ à un objet ou un traitement particulier et conduit à une ou plusieurs observations en fin d'expérience, quand ce n'est pas déjà au début ou au cours de l'expérience.

L'unité expérimentale peut se présenter sous des formes extrêmement différentes d'une discipline à l'autre et, au sein d'une même discipline, d'un type d'expérience à l'autre. La diversité des situations implique que le choix des unités expérimentales, et corrélativement de leurs nombres, doit toujours être réalisé avec le plus grand soin.

2° Domaine agronomique

Dans le domaine agronomique, et plus particulièrement en matière de productions végétales, l'unité de base est souvent une *parcelle*², c'est-à-dire une certaine étendue de terrain (en champ, en verger, en forêt, etc.) comportant un certain nombre de plantes. Le nombre de plantes en question est parfois précisé (parcelles de quatre arbres plantés à un écartement donné, par exemple) et parfois indéterminé (parcelles de blé d'une étendue donnée, par exemple).

Mais il peut s'agir aussi d'une seule plante (un arbre par exemple), d'une partie de plante (une branche ou un rameau, une feuille ou un morceau de feuille, un fruit ou un morceau de fruit, etc.), ou d'un groupe d'organes particuliers (un lot de graines par exemple)³.

Dans le domaine agronomique toujours, mais en productions animales, l'unité de base de l'expérience peut être un groupe d'animaux, un animal isolé ou une partie d'animal (un membre par exemple). On considère en particulier qu'un groupe d'animaux constitue une seule unité expérimentale quand tous les individus du groupe sont soumis à un même traitement, sont élevés ensemble, et sont l'objet d'observations globales (poids ou production de l'ensemble du lot d'animaux par exemple).

D'autre part, l'unité expérimentale peut aussi être un animal ou un groupe d'animaux observé durant une certaine période seulement. Quand, notamment, chacun des animaux mis en expérience, et considéré individuellement, reçoit consécutivement différentes alimentations, pour chacune desquelles une ou plusieurs observations sont réalisées, chacune des combinaisons animal-alimentation peut être considérée comme constituant une unité expérimentale particulière.

¹ En anglais : *experimental unit*.

² En anglais : *plot*.

³ Dans certains ouvrages d'expérimentation, le mot « parcelle » est utilisé dans un sens très large, qui englobe indistinctement les différentes situations que nous venons d'évoquer.

3° Domaine médical

Dans le domaine médical, l'unité de base de l'expérience est le plus souvent un patient, ou éventuellement un volontaire sain, auquel un traitement est appliqué et au sujet duquel des observations sont faites en général avant, pendant et après l'application du traitement, tout au long du processus expérimental.

D'autres possibilités peuvent cependant être envisagées. Lors de l'étude de traitements anti-allergiques par exemple, l'unité expérimentale peut être une certaine surface de peau, chaque surface élémentaire se voyant affecter un traitement ou objet particulier et conduisant à au moins une observation. Un même patient peut ainsi être « porteur » de plusieurs unités expérimentales, auxquelles correspondent différents objets.

Un même patient peut également se voir appliquer successivement plusieurs traitements, chacune des combinaisons patient-traitement pouvant alors être considérée comme une unité expérimentale.

4° Domaine industriel et laboratoire

Dans le domaine industriel et en laboratoire, l'unité expérimentale peut être tout ensemble ou tout élément ou groupe d'éléments qui est traité individuellement durant toute l'expérience. Il peut s'agir par exemple d'une boîte de conserve ou d'un groupe de boîtes de conserve, d'une éprouvette prélevée dans une bille de bois ou dans un panneau de fibres, d'un « échantillon » au sens chimique du terme, c'est-à-dire d'une certaine quantité d'une matière ou d'une substance quelconque, et aussi d'une automobile ou de certains éléments d'une automobile (pneus ou boîte de vitesse, par exemple), d'une certaine surface de mur ou de revêtement routier (dans la comparaison de différents enduits ou de différentes peintures), etc.

La diversité des situations et des possibilités est donc particulièrement importante dans ce secteur.

3.2 Les dimensions des unités expérimentales

3.2.1 Principes généraux

1° Principes théoriques

Dans le cas des parcelles, des lots d'animaux, etc., se pose la question des *dimensions*⁴ des unités expérimentales, en termes d'étendue, de nombre d'animaux, etc.

Au point de vue purement théorique, on peut démontrer qu'il y a généralement intérêt à définir, dans un terrain d'une dimension donnée, ou d'une façon plus

⁴ En anglais : *size*.

générale, pour un matériel expérimental d'une ampleur donnée, des unités expérimentales de dimensions aussi petites que possible.

Pour justifier ce principe, nous considérons à titre d'exemple le cas de lots d'animaux dont on pourrait supposer que les différents individus sont indépendants les uns des autres. Pour p lots de n animaux, en désignant par σ_A^2 la variance entre lots et par σ^2 la variance entre animaux dans les lots, on peut démontrer que la variance de la moyenne générale \bar{X} de tout ensemble de pn observations est [STAT2, § 9.3.4] :

$$\sigma_{\bar{X}}^2 = \sigma_A^2/p + \sigma^2/(pn).$$

Pour un nombre donné d'animaux pn et pour autant que la variance σ_A^2 ne soit pas nulle, la variance de la moyenne est donc minimale quand l'effectif n est égal à 1, c'est-à-dire quand chaque lot ne comporte qu'un seul animal.

Il est évident cependant que la constitution de lots plus nombreux, formés chacun d'un animal ou d'un très petit nombre d'animaux et devant être traités chacun individuellement, provoque généralement des dépenses ou des pertes de temps supplémentaires, qui peuvent éventuellement être chiffrées. On peut donc essayer de minimiser, non plus la variance de la moyenne, mais bien le coût total de l'opération [STAT2, § 9.4.4]. En général, cette seconde approche du problème ne modifie toutefois pas fondamentalement le principe énoncé ci-dessus.

De même, ce principe n'est pas modifié de façon sensible par le fait que les individus qui constituent une même unité expérimentale ne sont pas indépendants les uns des autres, comme peuvent l'être par exemple les différents animaux d'un même lot ou les différents arbres d'une même parcelle de verger ou de forêt.

2° Contingences pratiques

Par contre, diverses contingences pratiques s'opposent généralement de façon très nette à l'utilisation d'unités expérimentales de petites dimensions.

Il se peut par exemple que, dans une expérience relative à des animaux, on ne dispose pas d'un nombre suffisant de cages, de stalles ou de loges pour élever individuellement chacun des animaux ou pour constituer un grand nombre de lots d'effectif très réduit.

De même, dans une expérience en champ, en verger ou en forêt, la dimension des parcelles doit être suffisamment grande pour qu'on obtienne des résultats représentatifs (rendements par parcelle suffisamment élevés pour pouvoir être observés sans erreurs excessives, prélèvements d'échantillons suffisamment importants pour permettre la réalisation d'analyses foliaires, etc.). De plus, dans de nombreux cas, les parcelles doivent pouvoir être traitées à l'aide d'engins mécaniques (travail du sol, pulvérisation, etc.), qui nécessitent des étendues assez grandes, liées notamment au type de matériel utilisé.

3° Ordres de grandeur

En réalité, la dimension des unités expérimentales résulte le plus souvent d'un compromis entre les principes théoriques et les contingences pratiques. Bien qu'il n'existe aucune règle absolue en la matière, nous donnons quelques ordres de grandeur relatifs aux principaux types de productions végétales.

En horticulture (cultures maraîchères et cultures fruitières telles que le melon, le fraisier, etc.), sans utilisation de moyens mécaniques à l'intérieur des parcelles, on adopte souvent des dimensions de l'ordre du mètre carré ou de quelques mètres carrés, de manière à disposer d'au moins 4 à 10 plantes par parcelle.

En arboriculture fruitière, on serait tenté d'adopter la même norme de quatre plantes au moins par parcelle. Mais, avec des écartements de quelques mètres, on arrive rapidement à des parcelles de l'ordre de l'are et, de ce fait, à des expériences de très grande étendue. Aussi, doit-on fréquemment réduire le nombre d'arbres par parcelle, voire même utiliser des « parcelles » constituées d'un seul arbre et dites « mono-arbres ».

En grandes cultures et en cultures herbagères, on adopte souvent des dimensions qui sont de l'ordre de l'are ou de la dizaine d'ares, en relation notamment avec les moyens mécaniques utilisés.

En sylviculture enfin, les dimensions des parcelles sont extrêmement variables, en fonction de l'âge des peuplements considérés et de la durée des expériences. Les pépinières et les jeunes plantations s'apparentent respectivement à l'horticulture et à l'arboriculture fruitière, tandis que certaines expériences relatives à des peuplements forestiers âgés peuvent nécessiter des parcelles de 25 à 50 ares, voire même un hectare ou plus.

À ce propos, on se rappellera que les conditions mêmes dans lesquelles l'expérience est organisée constituent un élément important de la décision à prendre en ce qui concerne la dimension des parcelles (§ 1.2). La présence éventuelle de bordures, auxquelles est consacré le paragraphe suivant, est un autre élément de base de cette décision.

L'ensemble des photographies qui sont associées à ce texte et leurs légendes illustrent de différentes manières ce que peuvent être les « parcelles » des expériences agronomiques, en champ, en verger et en forêt, et leurs dimensions [DAGNELIE, 2009].

[Le modèle de SMITH et l'analyse spatiale, dont il est question respectivement aux paragraphes 3.5.2 et 3.5.3, peuvent contribuer à la détermination de la dimension et aussi de la forme optimales des parcelles [BHATTI, 2005 ; FAGROUD et [VAN MEIRVENNE, 2002].

3.2.2 Les bordures et les périodes tampons

1° Notion de bordure

Dans la plupart des expériences relatives aux productions végétales, des interférences plus ou moins importantes peuvent exister entre parcelles voisines, soit parce que les traitements appliqués aux différentes parcelles (épandages d'engrais, pulvérisations, etc.) ne s'arrêtent pas exactement aux limites des parcelles, soit parce que le système racinaire des plantes franchit tout naturellement ces limites, soit encore parce que se produisent des phénomènes particuliers de compétition ou de contagion entre plantes de parcelles contiguës.

Pour éviter que ces interférences n'influencent les résultats, on peut limiter l'observation à la partie centrale de chacune des parcelles, en considérant le pourtour comme constituant une simple *bordure*⁵.

La figure 3.2.1 indique ce que peuvent être la partie observée ou utile de quatre parcelles et leurs bordures, par exemple pour quatre variétés d'une même espèce végétale, les différentes variétés étant désignées par les chiffres 1, 2, 3 et 4.

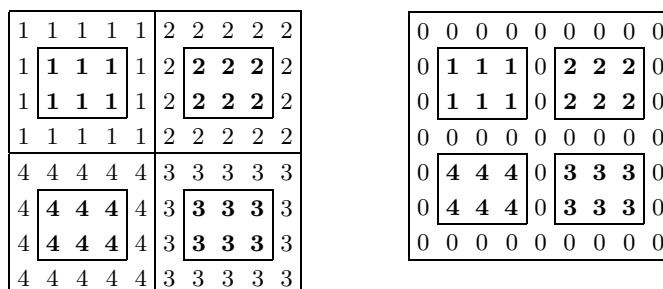


Figure 3.2.1. Exemples de parcelles entourées de bordures de deux types différents.

Dans le premier cas, les chiffres qui apparaissent en caractères gras indiquent les plantes ou les arbres qui devront être mesurés, tandis que les chiffres ordinaires représentent les bordures, constituées des mêmes variétés mais ne devant pas être l'objet d'observations. Dans le deuxième cas, les mêmes chiffres gras indiquent toujours les plantes ou les arbres qui seront mesurés, et les « 0 » forment des lignes simples de bordures constituées d'une variété témoin. On notera que, dans ce deuxième cas, les individus « témoins » ne sont pas considérés, au sens du paragraphe 2.2.2, comme un objet supplémentaire qui sera observé et analysé au même titre que les autres objets.

⁵ En anglais : *border, guard row*.

2° Dimensions des bordures

Les dimensions des bordures doivent toujours être fixées en tenant compte à la fois du matériel disponible et de l'importance des interférences qui peuvent exister entre les parcelles voisines.

Dans certains cas (arbres tout à fait isolés, dans un verger par exemple), il ne se justifie pas de prévoir quelque bordure que ce soit. Dans d'autres situations, par contre, il s'impose d'établir des bordures correspondant à une ou plusieurs lignes de plantation.

Mais il faut noter que toute bordure, aussi réduite soit elle, occupe rapidement une proportion importante du terrain disponible. Dans les deux exemples de la figure 3.2.1, cette proportion est respectivement de 70 et de 62 %, la surface utile des parcelles ne représentant que 30 et 38 % de la surface totale.

Aussi a-t-on souvent tendance, en pratique, à réduire et même à supprimer les bordures, alors que, cependant, des interférences entre objets voisins doivent de toute évidence être attendues. Tel est le cas notamment pour certaines expériences horticoles et forestières constituées de « parcelles » mono-arbres, essentiellement en raison du fait qu'on désire comparer par exemple un grand nombre (plusieurs dizaines) de variétés ou de provenances, et qu'il ne serait pas possible de prévoir, dans ces conditions, plusieurs répétitions de parcelles comportant chacune à la fois plusieurs arbres à mesurer et une bordure.

Nous reviendrons sur les problèmes d'interférences entre parcelles voisines au paragraphe 12.3.1.

3° Sentiers, chemins, etc.

Indépendamment des bordures dont chaque parcelle peut être pourvue individuellement, il est souvent nécessaire dans les expériences en champ, au sens large, de prévoir l'existence de sentiers ou de chemins d'accès et, parfois, d'une bordure générale isolant du milieu extérieur l'ensemble du terrain d'expérience. Ces différents éléments tendent à diminuer encore la proportion de la surface disponible qui est utilisée pour effectuer les observations.

Les photographies 2, 3, 4, 7 et 8 et leurs légendes [DAGNELIE, 2009] donnent diverses illustrations de ce que peuvent être les bordures, sentiers, etc. Les légendes de ces photographies fournissent en outre quelques indications complémentaires au sujet de la manière de délimiter, en pratique, les parcelles.

4° Productions animales

La notion de bordure peut être transposée au cas des expériences relatives aux animaux, si on considère comme analogues aux bordures les *périodes de transition* ou *tampons*⁶, d'adaptation à de nouvelles alimentations ou, d'une façon générale, à de nouveaux traitements.

⁶ En anglais : *buffer interval*.

Pour un animal qui devrait être soumis par exemple à trois alimentations (1, 2 et 3), au cours de trois périodes consécutives de deux semaines, comportant chacune un temps d'adaptation de neuf jours et une période d'observation de cinq jours, on pourrait adopter le schéma suivant :

2 2 2 2 2 2 2 2 2	2 2 2 2 2	1 1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1	3 3 3 3 3 3 3 3 3	3 3 3 3 3
-------------------	-----------	-------------------	-----------	-------------------	-----------

dans lequel les chiffres ordinaires désignent les journées d'adaptation et les chiffres gras les journées d'observation.

On notera que, dans ce cas, l'unité expérimentale est en fait la période de deux semaines. Sa longueur peut être discutée dans les mêmes termes que les dimensions d'une parcelle d'expérience en champ.

5° Domaine médical

Des problèmes semblables se présentent aussi dans le domaine médical. Non seulement, il faut très souvent prévoir des périodes suffisantes d'adaptation et d'observation avant le début de tout traitement, mais en cas d'application successive de plusieurs traitements aux mêmes patients, il faut organiser en outre des périodes de transition, dites de *wash out*.

6° Domaine industriel et laboratoire

Enfin, les mêmes principes s'imposent dans le domaine industriel et en laboratoire, et cela d'autant plus que les différents objets sont souvent étudiés de façon consécutive, dans une même installation (un même four, un même incubateur, etc.). Il importe donc de prévoir des temps d'adaptation suffisants entre les différentes manipulations.

De plus, des problèmes de dimensions des unités expérimentales et de « bordures » ou de zones tampons peuvent également se présenter dans des installations telles que des frigos, des étuves, des séchoirs, etc.

3.3 La forme des unités expérimentales

1° Principes

Dans le cas des expériences en champ, au sens large, en même temps que la dimension des parcelles, il faut en définir la *forme*⁷.

Quand le terrain ou le matériel disponible est relativement homogène, il y a généralement intérêt à adopter une forme aussi carrée que possible. C'est en effet dans ce cas que les interférences entre parcelles voisines sont les plus réduites, et que l'importance relative des bordures éventuelles est la plus faible.

⁷ En anglais : *shape*.

Si par contre, le terrain ou le matériel disponible présente une hétérogénéité marquée dans une direction donnée, il peut être plus intéressant d'adopter des parcelles rectangulaires, allongées parallèlement à la direction générale de cette hétérogénéité. L'appellation *gradient de fertilité*⁸ est souvent appliquée à une telle hétérogénéité, même si les différences dites « de fertilité » résultent en fait de circonstances telles que, par exemple, des conditions variables de drainage ou d'alimentation en eau le long d'un terrain en pente, ou un gradient d'éclairement ou de température dans une serre ou une chambre de culture.

De même, quand le terrain présente ou risque de présenter une forte hétérogénéité « en taches », ce qui se produit fréquemment dans les régions de mise en culture récente (présence de souches ou de restes de souches, de termitières ou de restes de termitières, etc.), on adopte de préférence des parcelles de forme allongée, qui permettent de mieux recouper les zones de fertilités différentes.

Au chapitre 6, la figure 6.1.1 illustre le cas de parcelles rectangulaires, allongées parallèlement à un gradient de fertilité et la figure 6.5.1 présente un cas de parcelles approximativement carrées. D'autres exemples sont donnés par les photographies 1, 3, 7, 10, 15 et 16 et leurs légendes [DAGNELIE, 2009].

2° Contingences pratiques

Mais à ces principes généraux, s'opposent souvent, ici également, des contingences pratiques liées notamment à la mécanisation.

Dans de nombreux cas, la largeur des parcelles ou la largeur de leur partie utile est essentiellement fonction de la largeur de travail des outils de préparation du sol, de semis, de pulvérisation ou de récolte. Il en résulte fréquemment qu'en grandes cultures par exemple, les parcelles d'expériences sont très allongées.

On remarquera que cet allongement ne fait qu'augmenter encore l'importance relative des bordures éventuelles.

⊖ 3° Distances de plantation

Dans les expériences destinées à comparer différents *écartements* ou différentes *distances de plantation*⁹, le recours à des unités expérimentales comportant toutes le même nombre d'individus conduit inévitablement à l'adoption de parcelles de dimensions variables, qu'il est bien difficile d'agencer sur le terrain.

On remplace parfois de tels ensembles de parcelles par des unités qui réunissent, de façon progressive, les différents écartements étudiés. Il peut s'agir notamment de lignes de plantation inégalement espacées, dans une ou dans deux directions, ou de segments d'anneaux circulaires, au sein de chacun desquels les plantations sont faites aux intersections de rayons et de circonférences concentriques de plus en plus éloignées les unes des autres. La figure 3.3.1 donne deux exemples de telles dispositions.

⁸ En anglais : *fertility gradient*, *fertility trend*.

⁹ En anglais : *spacing*.



Figure 3.3.1. Exemples de « parcelles » destinées à la comparaison de différentes distances de plantation.

Dans les deux cas, en supposant que les croquis aient été dessinés à l'échelle de $1/50$, on trouve, outre une bordure constituée de 24 plantes, cinq lignes (droites ou courbes) de cinq plantes, qui peuvent être considérées comme étant distantes les unes des autres d'environ 20, 25, 32, 40 et 50 centimètres. Dans le premier cas, on obtient, à la fois, des systèmes de plantation carrés et rectangulaires (distances de plantation égales ou inégales, dans les deux directions), tandis que, dans le deuxième cas, les plantations peuvent être considérées comme « approximativement carrées » en chaque point (distances de plantation approximativement égales, en chaque point, dans toutes les directions).

Ces types particuliers d'unités expérimentales, qui ne sont évidemment pas faciles à installer sur le terrain, permettent de couvrir en une fois une gamme d'écartements dont les extrêmes sont ici dans le rapport de 1 à 2,5, et dont toutes les valeurs constituent une progression géométrique de raison :

$$\sqrt[4]{2,5} = 1,257.$$

Des informations complémentaires à ce sujet peuvent être trouvées notamment dans les articles de LIN et MORSE [1975] et NELDER [1962], et dans le livre de PEARCE [1976a]. Des dispositifs semblables ont également été utilisés en matière de fumures [CLEAVER *et al.*, 1970], et la question des données manquantes est abordée par BAR-HEN [2002].

3.4 Le nombre de répétitions

1° Principes

La définition des unités expérimentales, de leurs dimensions, etc. soulève inévitablement la question de la détermination du nombre d'unités expérimentales et du nombre de répétitions des différents objets.

Sur un plan théorique, le *nombre de répétitions* ou *répliques*¹⁰ peut toujours être fixé de façon précise en fonction des objectifs poursuivis. Le plus souvent cependant, le nombre total d'unités expérimentales est strictement limité, selon les moyens disponibles (terrain disponible, nombre d'animaux disponibles, temps ou moyens financiers disponibles, etc.), et le nombre de répétitions qu'il est possible de réaliser en découle inévitablement. Il est important d'avoir alors, malgré tout, une idée de la précision qu'on peut espérer obtenir, en fonction des moyens mis en œuvre.

Nous ne présentons ici que quelques formules simples, qui ne fournissent en fait que des solutions approchées. Nous considérons toujours un niveau de probabilité ou un risque de première espèce α égal à 0,05 (ou 5 %) et un risque de deuxième espèce β égal à 0,5 ou 0,1 (50 % ou 10 %) [STAT1, § 9.4.1, 10.3.1 et 10.4.1]. Différents logiciels généraux ou spécialisés permettent de traiter le problème de façon plus rigoureuse, éventuellement pour d'autres niveaux de probabilité ou risques d'erreurs.

[La littérature relative aux nombres d'observations à réaliser est particulièrement abondante. Elle comprend notamment des ouvrages entièrement consacrés à ce sujet, dont ceux de KRAEMER et THIEMANN [1987], MACE [1964], et ODEH et FOX [1991], et des articles généraux, tels que ceux de LEE et ZELEN [2000], LENTH [2001], et PARKER et BERMAN [2003].

Dans l'optique des expériences adaptatives ou séquentielles, dont il a été question au paragraphe 2.4.4, la détermination des nombres d'observations peut aussi être réalisée ou précisée en cours d'expérience, ce qui soulève des questions particulières quant au choix des niveaux de signification et quant à la réalisation des tests d'hypothèses [CHANG *et al.*, 2006; DUNNIGAN et KING, 2010; FRIEDE et KIESER, 2006].

Enfin, le problème considéré ici ne se pose évidemment pas de la même manière dans le cas des expériences réalisées en une répétition unique ou une répétition partielle ou fractionnaire (§ 2.3.2.8° et 2.3.3.1°).

2° Estimation d'une moyenne

Comme point de départ, on peut rappeler que, dans le cas de l'estimation d'une moyenne, la détermination du nombre n d'observations peut se faire à l'aide de la relation approchée :

$$n \simeq 4 cv^2/d_r^2.$$

Dans cette relation, cv est le coefficient de variation de la variable considérée, et d_r l'erreur relative maximum ou la marge d'erreur relative qui est admise au niveau de probabilité 0,05, cv et d_r étant généralement exprimés en pourcentages de la moyenne [STAT2, § 8.2.3].

¹⁰ En anglais : *replication*, *replicate*.

3° Comparaison de deux moyennes

En ce qui concerne la comparaison de deux moyennes, le problème peut être envisagé en termes de puissance, c'est-à-dire en fonction de la probabilité de mettre en évidence une différence donnée de moyennes [STAT1, § 10.4.1 et 10.4.2].

Les formules suivantes peuvent servir à déterminer de façon approchée les nombres d'observations qui correspondent à des puissances égales à 0,5 et 0,9, dans le cas d'échantillons indépendants, pour un niveau de signification égal à 0,05, et pour un coefficient de variation cv et une différence de moyennes δ_r , également exprimés en valeurs relatives [STAT2, § 8.4.4] :

$$n \simeq 8 cv^2/\delta_r^2 \quad \text{et} \quad n \simeq 21 cv^2/\delta_r^2.$$

On remarquera donc qu'en matière de comparaison comme en matière d'estimation de moyennes, aucune décision ne peut être prise valablement en l'absence d'informations suffisantes relatives d'une part à la variabilité du matériel expérimental, et d'autre part aux risques d'erreurs qui sont considérés comme acceptables.

4° Comparaison de plusieurs moyennes

Pour plus de deux objets, le problème de la détermination du nombre de répétitions est plus délicat encore, car il fait intervenir en outre la répartition présumée des valeurs des différentes moyennes [STAT2, § 9.4.2 et 9.4.3].

On peut cependant admettre que la solution de ce problème est, d'une façon générale, du type :

$$n = k cv^2/\delta_r^2,$$

où cv et δ_r sont, toujours en valeurs relatives, le coefficient de variation et la différence existant entre les moyennes extrêmes, et où k est un paramètre qui dépend des différents éléments considérés ci-dessus (risques d'erreur, répartition des moyennes, etc.).

Pour les besoins de la pratique, des indications assez précises peuvent être obtenues en admettant que, très souvent, la valeur de ce paramètre est de l'ordre de 10 pour une probabilité de mise en évidence des différences de moyennes égale à 0,5, et de l'ordre de 25 à 30 pour une probabilité égale à 0,9.

5° Précision à attendre

Le problème inverse, relatif à la détermination de la précision qu'on est en droit d'attendre, en fonction des moyens dont on dispose, peut être résolu en explicitant les formules précédentes par rapport à d_r ou δ_r .

La figure 3.4.1 permet aussi de résoudre graphiquement ce problème dans le cas de deux moyennes et, d'une manière approchée au moins, pour plus de deux

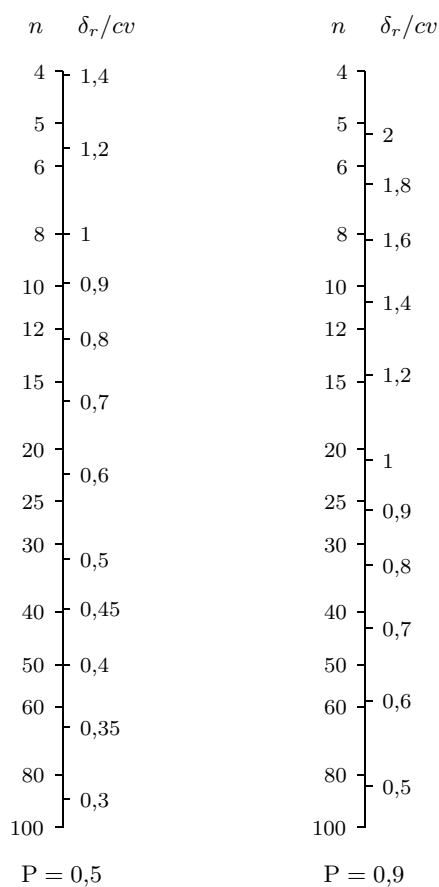


Figure 3.4.1. Relation entre l'effectif n de chacun des échantillons et le rapport δ_r/cv , dans le cas de la comparaison de deux ou, approximativement, de plus de deux moyennes, pour des probabilités de mise en évidence des différences égales à 0,5 et 0,9.

moyennes. Cette figure indique en effet, selon des échelles logarithmiques, les relations qui existent entre les effectifs n et les rapports δ_r/cv dans les deux cas considérés ci-dessus :

$$n \simeq 8 cv^2/\delta_r^2 \quad \text{et} \quad n \simeq 21 cv^2/\delta_r^2,$$

cv étant toujours le coefficient de variation et δ_r l'amplitude des moyennes (différence entre les moyennes extrêmes), exprimés en valeurs relatives.

Si par exemple, on ne dispose que de 10 unités expérimentales pour chacun des objets considérés, le quotient δ_r/cv est de l'ordre de 0,9 pour une probabilité égale

à 0,5, et 1,4 pour une probabilité égale à 0,9. C'est dire que, pour un coefficient de variation de 10 % par exemple, on ne peut espérer mettre en évidence que des différences de moyennes de l'ordre de 9 % avec une probabilité égale à 0,5, et 14 % avec une probabilité égale à 0,9.

Il n'est pas rare que, traité de cette façon, l'examen du problème que pose la détermination du nombre de répétitions conduise en fait à abandonner certains projets d'expériences, en raison de l'insuffisance du matériel ou du temps disponibles. Quand a priori, il n'y a guère d'espoir d'aboutir au moindre résultat satisfaisant, mieux vaut parfois, en effet, ne pas gaspiller les moyens limités dont on dispose.

À cet égard, on peut noter que le problème de la détermination du nombre de répétitions est en général traité de façon très stricte dans le domaine médical, les objectifs étant fixés de manière précise en termes d'erreurs de première et de deuxième espèce. Ce problème est par contre très souvent relativement négligé dans le domaine agronomique, de nombreuses expériences étant organisées en adoptant simplement les nombres « traditionnels » de quatre, cinq ou six répétitions. Enfin, le problème est largement passé sous silence dans le domaine industriel, où le nombre d'objets à étudier prend en général le pas sur le nombre de répétitions à réaliser.

6° Différents dispositifs expérimentaux

La question de la détermination du nombre de répétitions peut être abordée comme nous l'avons envisagé ci-dessus quel que soit le dispositif expérimental utilisé, le coefficient de variation cv étant toujours celui qui concerne la source de variation qui sert de base de comparaison, et l'effectif n étant toujours le nombre de termes qui interviennent dans les moyennes qu'on désire comparer.

Dans une expérience en blocs aléatoires complets par exemple (§ 6.1), pour un seul facteur, cv est le coefficient de variation relatif à l'interaction objets-blocs et n est le nombre de blocs. De même, dans le cas d'une expérience en blocs aléatoires complets avec parcelles divisées (§ 7.1.1.1°), comportant p modalités du facteur associé aux grandes parcelles, q modalités du facteur associé aux petites parcelles, et r blocs, cv est le coefficient de variation relatif à la « variation résiduelle 1 » en ce qui concerne le facteur associé aux grandes parcelles, et le coefficient de variation relatif à la « variation résiduelle 2 » en ce qui concerne le facteur associé aux petites parcelles (§ 7.2.1.1°), tandis que l'effectif n est en fait égal à qr pour le premier facteur et à pr pour le deuxième facteur.

7° Proportions ou pourcentages

Le problème de la détermination du nombre de répétitions ou d'observations peut se poser aussi pour d'autres paramètres que la moyenne, et notamment dans le cas des proportions ou des pourcentages [STAT2, § 5.2.3 et 5.4.6]. La question peut être traitée à l'aide d'abaques semblables à ceux de la figure 3.4.1 ou à l'aide de formules et de logiciels particuliers.

3.5 La variabilité du matériel expérimental

3.5.1 Principes généraux

1° Connaissance de la variabilité

Les paragraphes précédents ont mis en évidence la nécessité de connaître de façon suffisamment précise la variabilité du matériel expérimental à étudier, pour pouvoir organiser valablement une expérience.

Dans certains cas, la connaissance de cette variabilité peut résulter d'expériences antérieures ou d'une étude bibliographique. On notera à ce sujet que des études particulières, malheureusement fort anciennes, ont été consacrées à la présentation d'ordres de grandeur de la variabilité d'expériences en champ [GARNER et WEIL, 1939; MA et HARRINGTON, 1948; NJOS et NISSEN, 1956; TERMAN, 1957]. Quelques indications relatives aux plantes de grandes cultures sont aussi données au paragraphe 11.1.3.2°.

Dans d'autres cas, cette connaissance peut exiger l'organisation préalable d'une *expérience pilote*¹¹. On entend par là une expérience préliminaire mise sur pied de façon relativement sommaire, basée sur l'utilisation d'un nombre réduit d'unités expérimentales et faisant intervenir éventuellement un petit nombre d'objets.

2° Expériences d'uniformité

Dans d'autres cas encore, l'étude de la variabilité du matériel expérimental peut se faire par la réalisation d'*expériences d'uniformité* ou *essais à blanc*¹², c'est-à-dire d'expériences préalables organisées sur le lieu même de l'expérience principale qui doit être mise sur pied ultérieurement, dans les conditions normales de cette expérience, mais sans que n'intervienne aucune différence entre objets. Les observations sont alors faites sur les unités mêmes de l'expérience principale, si celles-ci ont déjà pu être définies, ou sinon sur des unités de très petites dimensions.

On peut assimiler aux expériences d'uniformité les mesures ou les observations qui sont parfois effectuées dans le cadre d'expériences normales, avant toute application de traitements ou d'objets différenciés, quels qu'ils soient. Tel est le cas de l'exemple présenté au paragraphe 3.6.

La réalisation d'expériences d'uniformité peut évidemment être longue et coûteuse, en particulier dans le domaine agronomique, puisqu'elle nécessite le plus souvent une ou même quelques saisons de culture. Elle peut cependant se justifier pleinement en vue de l'organisation d'expériences de longue durée (expériences de rotation en grandes cultures, expériences forestières, etc.).

La littérature statistique contient d'ailleurs également des listes d'expériences d'uniformité qui, comme les références citées ci-dessus, donnent des ordres de gran-

¹¹ En anglais : *pilot experiment*.

¹² En anglais : *uniformity experiment*.

deur de la variabilité de différents types de matériel expérimental [CLAUSTRIAUX et ROUSSEAUX, 1974; COCHRAN, 1937; PEARCE, 1976a; SMITH, 1938].

⊖ 3.5.2 L'étude de la variabilité par le modèle de SMITH

1° Présentation du modèle

L'interprétation des résultats des expériences d'uniformité peut se faire en utilisant le *modèle de SMITH*¹³ [1938], qui met en relation la dimension des unités expérimentales et leur variabilité.

Si on désigne par σ_1^2 la variance relative aux parcelles unitaires sur lesquelles sont effectuées les observations initiales, par σ_2^2 la variance des moyennes des observations relatives à des couples de parcelles voisines (soit des parcelles deux fois plus grandes), et d'une manière générale par σ_n^2 la variance des moyennes des observations relatives à des ensembles de n parcelles contiguës (parcelles n fois plus grandes), le modèle de SMITH suppose que σ_n^2 évolue de la façon suivante en fonction du nombre n de parcelles considérées simultanément :

$$\sigma_n^2 = \sigma_1^2 / n^\beta.$$

Le paramètre β est généralement compris entre 0 et 1, et mesure en fait le degré de dépendance qui existe entre les parcelles voisines. La valeur 1 correspond à la situation classique d'un échantillon aléatoire et simple :

$$\sigma_n^2 = \sigma_1^2 / n \quad \text{ou} \quad \sigma_X^2 = \sigma^2 / n,$$

pour lequel il n'existe aucune dépendance entre individus observés [STAT1, § 8.3.1]. La valeur 0 correspondrait au contraire au cas où l'augmentation de l'étendue des parcelles n'en modifierait pas la variabilité :

$$\sigma_n^2 = \sigma_1^2,$$

c'est-à-dire à la situation tout à fait théorique où le coefficient de corrélation entre parcelles voisines serait strictement égal à 1.

2° Estimation du modèle

Par une double transformation logarithmique, on constate que le paramètre β se confond, au signe près, avec le coefficient de régression du logarithme des variances en fonction du logarithme du nombre d'unités expérimentales considérées simultanément :

$$\log \sigma_n^2 = \log \sigma_1^2 - \beta \log n.$$

¹³ En anglais : SMITH's model, SMITH's variance law.

En pratique, une difficulté se présente toutefois dans l'estimation de ce coefficient de régression, en raison du fait que les variances $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots$ sont habituellement estimées à partir d'effectifs inégaux. En conséquence, il y a lieu de procéder ici à un calcul de régression pondérée [STAT1, § 4.7.6], les nombres de degrés de liberté des différentes variances étant considérés comme coefficients de pondération. Des formules de calcul particulières relatives à ce problème sont données par SMITH [1938], et aussi par CLAUSTRIAUX et ROUSSEAU [1974], FEDERER [1955], et HATHEWAY et WILLIAMS [1958].

3° Surface optimale

En outre, SMITH propose de déterminer la surface optimale des parcelles d'expérience en fonction des valeurs estimées du paramètre β .

Dans ce but, désignons par $\hat{\beta}$ ces valeurs estimées, par c_1 les frais fixes relatifs à toute parcelle d'expérience d'une certaine dimension (observations, analyses de laboratoires, etc.), et par c_2 les dépenses relatives à toute parcelle unitaire minimale (coût du terrain, opérations culturales, etc.), c'est-à-dire aussi les dépenses qui interviendront de façon proportionnelle à l'étendue des parcelles d'expérience. La dimension optimale des parcelles, exprimée en nombre de parcelles unitaires, serait alors telle que :

$$n = \hat{\beta} c_1 / [(1 - \hat{\beta}) c_2].$$

Cette relation appelle cependant différents commentaires. D'une part, il faut faire remarquer qu'il n'est pas toujours facile d'estimer, même en valeur relative, les coûts c_1 et c_2 . D'autre part, il est possible de montrer que, dans la plupart des cas, on peut s'éloigner assez sensiblement de l'optimum théorique sans encourir de perte de précision importante, la perte de précision étant très limitée quand on se situe entre la moitié et le double de la surface optimale théorique [FEDERER, 1955; SMITH, 1938].

4° Compléments

Certaines situations tout à fait particulières peuvent également être envisagées. Tel est le cas notamment pour les expériences relatives aux cultures en terrasses [FIELDING et SHERCHAN, 1999; POULTNEY *et al.*, 1997].

En outre, il est bon de savoir que des analyses semblables à celles qui sont présentées ici peuvent être réalisées à partir des résultats d'expériences normales, faisant intervenir divers traitements ou objets, et non pas à partir des résultats d'expériences à blanc, en utilisant les résidus de l'analyse de la variance (§ 12.6.2°).

⊖ 3.5.3 L'étude de la variabilité par l'analyse spatiale

1° Corrélations et différences entre parcelles

D'autres approches, basées notamment sur le calcul des coefficients de corrélation ou des différences entre parcelles, ont aussi été proposées.

Le calcul des coefficients de corrélation entre parcelles peut être réalisé pour des séries (lignes ou colonnes) de parcelles contiguës, pour des séries de parcelles séparées par une seule série de parcelles intermédiaires, pour des séries de parcelles séparées par deux séries de parcelles intermédiaires, etc. La représentation graphique des différentes valeurs obtenues, en fonction des distances qui séparent les parcelles considérées, donne naissance à des *corrélogrammes*^{14 15}.

D'une manière fort semblable, on peut calculer la moyenne des carrés des différences entre parcelles, pour des parcelles contiguës, pour des parcelles séparées par une seule série de parcelles intermédiaires, pour des parcelles séparées par deux séries de parcelles intermédiaires, etc. La représentation graphique des résultats obtenus, en fonction des distances qui séparent les parcelles, donne naissance à des diagrammes appelés *variogrammes*¹⁶.

Ce calcul peut éventuellement être remplacé par le calcul de la moitié des carrés des différences entre parcelles, les diagrammes obtenus étant alors qualifiés parfois de *semi-variogrammes*¹⁷.

D'une façon comme de l'autre, les valeurs calculées et les diagrammes correspondants peuvent donner des indications fort semblables à celles qui sont fournies par le modèle de SMITH.

Le qualificatif *spatial* est souvent associé aux analyses qui sont réalisées de la sorte (*analyse spatiale*¹⁸, *corrélation spatiale*¹⁹, *variation spatiale*²⁰, etc.).

2° Champ aléatoire, géostatistique

L'étude des coefficients de corrélation et des différences entre parcelles peut conduire à la notion de *champ aléatoire*²¹, qui généralise la notion de processus aléatoire ou processus stochastique, relative aux modèles autorégressifs des séries chronologiques [STAT2, § 15.6.3]. Cette étude peut aussi faire intervenir les méthodes de la *géostatistique*²² [CRESSIE, 1993; GOOVAERTS, 1997; SCHABENBERGER et GOTWAY, 2005].

On peut trouver des informations particulières relatives au cas des expériences en champ dans les travaux de BREWER et MEAD [1986], KRISTENSEN et ERSBØLL [1992], et MODJESKA et RAWLINGS [1983].

¹⁴ En anglais : *correlogram*.

¹⁵ Ces diagrammes sont semblables à ceux qui interviennent dans l'étude des séries chronologiques, pour les coefficients d'autocorrélation [STAT2, § 2.4.2].

¹⁶ En anglais : *variogram*.

¹⁷ En anglais : *semi-variogram*.

¹⁸ En anglais : *spatial analysis*.

¹⁹ En anglais : *spatial correlation*.

²⁰ En anglais : *spatial variation*.

²¹ En anglais : *random field*.

²² En anglais : *geostatistics*.

3.6 Exemple : expérience d'uniformité

3.6.1 Présentation et données

1° Présentation

En vue d'illustrer les questions d'expériences d'uniformité, nous considérons le cas d'une plantation de thé relativement hétérogène, dans laquelle des chercheurs de l'Institut des Sciences agronomiques du Burundi envisageaient de comparer différentes fumures. Au moment où les observations dont il est question ici ont été réalisées, cette plantation était âgée d'une douzaine d'années et venait d'être remise à niveau²³.

Outre une bordure générale, la plantation comportait 960 théiers, plantés à des écartements de 1,2 m sur 60 cm, l'étendue totale prise en considération étant donc de 28,8 m sur 24 m (soit 6,912 ares). À titre expérimental, les récoltes relatives aux *tippings* ont été réalisées pour des groupes de quatre plantes, en constituant des parcelles unitaires de 2,4 m sur 1,2 m, comme l'indique la figure 3.6.1.

2° Données

Le tableau 3.6.1 contient les rendements obtenus pour chaque parcelle unitaire et pour l'ensemble des deux *tippings*, en tonnes par hectare.

La figure 3.6.2 fournit une représentation graphique de ces observations sous forme de « *boxplot* »²⁴. Elle met en évidence une certaine dissymétrie de la distribution des rendements, caractérisée notamment par la présence de quelques valeurs très élevées.

De plus, le calcul montre que le rendement moyen général est égal à 3,64 t/ha, avec une variance estimée égale à 3,49 (t/ha)², un écart-type égal à 1,87 t/ha et un coefficient de variation égal à 51,4 %.

Un examen attentif du tableau 3.6.1 montre aussi que les rendements varient, en première approximation, dans un rapport de 1 à 3 ou 4 de gauche à droite et

²³ Le théier est une plante qui peut atteindre naturellement une dizaine de mètres de hauteur et qui est habituellement taillée de manière à constituer, entre 60 cm et 1 m de hauteur, une « table de cueillette » horizontale. Indépendamment de la cueillette proprement dite, qui porte sur les jeunes feuilles et se fait de façon régulière, la « table » doit être reconstituée périodiquement par une opération de taille ou de mise à niveau. Cette opération est normalement suivie, avant la reprise des cueillettes de production, par une ou deux cueillettes d'égalisation appelées *tippings*.

²⁴ Les « *boxplots* » que nous présentons ont été réalisés à l'aide du logiciel Minitab. Les deux « boîtes » centrales sont délimitées par la médiane \tilde{x} et les quartiles q_1 et q_3 [STAT1, § 3.6.4.]; les lignes qui prolongent les « boîtes » s'étendent jusqu'aux valeurs observées extrêmes comprises entre les limites $q_1 - 1,5(q_3 - q_1)$ et $q_3 + 1,5(q_3 - q_1)$; et les points isolés représentent les valeurs qui dépassent ces limites, d'un côté ou de l'autre. Sous l'hypothèse d'une distribution normale [STAT1, § 6.6.2], les limites considérées correspondent aux valeurs $\bar{x} \pm 2,70s$, \bar{x} étant la moyenne observée et s l'écart-type observé : seules 0,7 % des observations devraient alors se situer en dehors de ces limites.

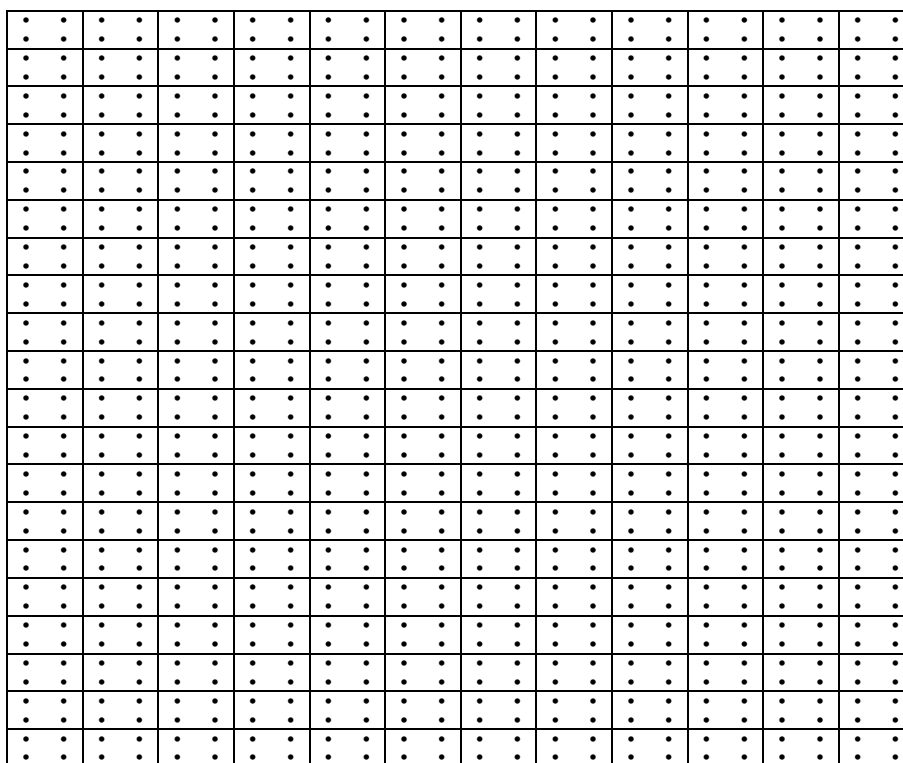


Figure 3.6.1. Expérience d'uniformité sur théier : représentation schématique de la plantation (40 lignes \times 24 colonnes) et des parcelles unitaires de quatre plantes.

dans un rapport de 1 à 1,5 ou 2 de haut en bas. Le tableau 3.6.2 et la figure 3.6.3 confirment cette double constatation.

⊖ 3.6.2 Interprétation des résultats : modèle de SMITH

1° Premiers regroupements

L'étude des résultats selon les principes développés par SMITH consiste à réunir, sur papier, les parcelles unitaires par groupes de 2, 3, 4, ..., et cela horizontalement ou verticalement, voire même dans les deux directions, et à recalculer dans chaque cas les rendements moyens par parcelle unitaire et leurs variances. Horizontalement par exemple, on obtient, pour des groupes de deux parcelles unitaires

Tableau 3.6.1. Expérience d'uniformité sur théier : rendements totaux des deux *tippings*, pour 240 parcelles unitaires de quatre théiers, en tonnes par hectare.

2,12	1,56	1,06	2,31	0,89	2,84	3,13	3,29	1,28	2,56	3,89	4,52
1,67	1,46	0,88	1,63	3,95	3,02	2,57	2,89	3,27	4,38	3,66	4,68
1,04	2,40	1,18	2,60	3,75	3,69	5,10	4,49	3,18	5,00	5,45	3,84
1,32	1,66	1,27	2,43	2,61	2,78	3,30	3,75	3,86	4,84	6,00	4,10
1,22	1,72	2,17	3,33	4,51	5,14	2,86	4,88	4,38	5,04	4,36	4,40
1,18	2,19	1,55	1,16	1,46	2,66	4,25	3,91	4,23	2,53	5,98	4,47
1,60	1,86	2,01	2,67	2,32	2,18	4,89	3,62	4,49	5,41	4,46	6,63
1,61	1,54	1,52	0,80	2,10	4,20	2,32	4,74	7,33	7,64	5,80	7,11
1,15	1,29	1,11	2,12	2,34	2,92	4,88	3,98	4,21	3,78	3,70	7,97
1,02	1,66	1,45	1,57	2,40	2,92	5,08	3,43	8,93	5,23	7,41	9,36
1,42	1,46	1,13	2,29	4,18	3,23	2,53	4,95	4,40	4,91	7,24	5,88
1,28	1,32	1,29	2,53	2,29	5,24	4,41	4,53	4,39	5,60	5,34	4,40
2,52	1,28	1,78	1,13	3,19	3,78	5,73	5,00	5,95	5,97	5,80	9,53
1,61	1,46	2,12	3,90	3,75	2,66	4,17	4,60	6,27	4,42	4,57	8,19
0,99	2,09	2,02	2,74	1,32	3,65	4,13	3,61	4,98	5,17	6,45	7,05
1,49	1,82	1,48	1,15	4,31	4,29	5,78	4,53	5,51	5,07	4,50	5,94
2,47	2,52	2,19	3,11	3,39	3,70	2,64	6,31	4,36	6,18	5,30	8,19
1,53	3,16	2,34	3,42	1,88	4,45	4,85	2,94	5,45	4,57	6,09	9,66
2,60	1,94	1,81	3,33	4,69	3,19	4,62	2,09	5,59	4,77	5,28	7,60
3,58	3,08	2,26	3,16	2,41	3,73	5,21	3,29	3,26	7,08	4,72	5,66

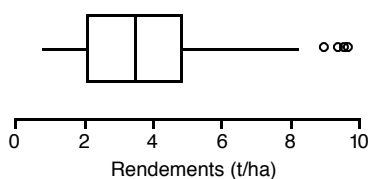


Figure 3.6.2. Expérience d'uniformité sur théier : présentation des rendements par parcelle sous forme de « *boxplot* ».

(huit théiers), les rendements moyens suivants :

1,84	1,68	1,86	3,21	1,92	4,20
1,56	1,26	3,48	2,73	3,82	4,17
⋮					

et pour des groupes de trois parcelles unitaires (12 théiers) :

1,58	2,01	2,57	3,66
1,34	2,87	2,91	4,24
⋮			

Tableau 3.6.2. Expérience d'uniformité sur théier : rendements moyens par colonne et par ligne (t/ha).

N ^{os} des col. ou lignes	Moyennes par	
	colonne	ligne
1	1,67	2,45
2	1,87	2,84
3	1,63	3,48
4	2,37	3,16
5	2,89	3,67
6	3,51	2,96
7	4,12	3,51
8	4,04	3,89
9	4,77	3,29
10	5,01	4,21
11	5,30	3,64
12	6,46	3,55
13	–	4,30
14	–	3,98
15	–	3,68
16	–	3,82
17	–	4,20
18	–	4,20
19	–	3,96
20	–	3,95
Moy. générale	3,64	

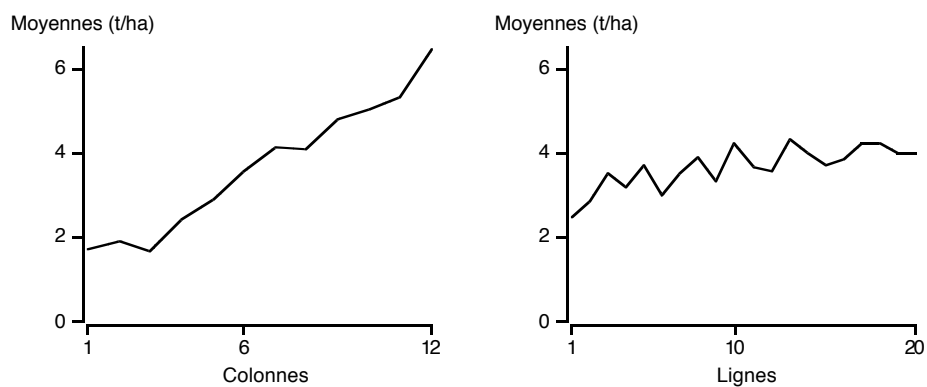


Figure 3.6.3. Expérience d'uniformité sur théier : évolution des rendements moyens par colonne et par ligne.

Les variances et les écarts-types correspondant à ces regroupements sont respectivement :

$$2,94 \text{ (t/ha)}^2 \quad \text{et} \quad 1,71 \text{ t/ha,}$$

ainsi que :

$$2,67 \text{ (t/ha)}^2 \quad \text{et} \quad 1,63 \text{ t/ha.}$$

2° Autres regroupements

D'une façon plus générale, le tableau 3.6.3 donne, pour une série de regroupements horizontaux et verticaux, les nombres de parcelles unitaires qui interviennent dans chaque parcelle obtenue par regroupement, les dimensions de ces parcelles, les nombres de théiers par parcelle, les nombres de parcelles, et les variances et écarts-types des rendements moyens par parcelle. Dans une direction comme dans l'autre, la réduction progressive de la variance et de l'écart-type en fonction de l'accroissement de l'étendue des parcelles se marque nettement, sans que cette réduction ne soit cependant considérable dans le cas présent.

Tableau 3.6.3. Expérience d'uniformité sur théier : résultats de différents regroupements des parcelles unitaires, par comparaison avec les valeurs correspondantes relatives aux parcelles unitaires elles-mêmes (ligne « 1 »).

Nombres de parcelles unitaires	Dimensions des parcelles (m)	Nombres de théiers par parcelle	Nombres de parcelles	Variances (t/ha) ²	Écarts-types (t/ha)
1	2,4 × 1,2	4	240	3,49	1,87
2	4,8 × 1,2	8	120	2,94	1,71
3	7,2 × 1,2	12	80	2,67	1,63
4	9,6 × 1,2	16	60	2,64	1,62
6	14,4 × 1,2	24	40	2,20	1,48
12	28,8 × 1,2	48	20	0,25	0,50
2	2,4 × 2,4	8	120	3,00	1,73
4	2,4 × 4,8	16	60	2,70	1,64
5	2,4 × 6,0	20	48	2,68	1,64
10	2,4 × 12,0	40	24	2,50	1,58
20	2,4 × 24,0	80	12	2,50	1,58

En outre, on peut noter que cette diminution est plus importante pour les parcelles allongées horizontalement et qu'elle est même brutale pour les lignes complètes (parcelles de 28,8 m sur 1,2 m). Ces constatations sont liées aux fortes fluctuations observées de gauche à droite, et la brusque réduction de variance ne doit pas être considérée comme exceptionnelle [PEARCE, 1976b].

D'autres regroupements pourraient également être réalisés simultanément dans les deux directions (parcelles de 4,8 m sur 2,4 m, 7,2 m sur 2,4 m, etc.).

3° Ajustement du modèle

L'ajustement du modèle de SMITH (§ 3.5.2), mettant en relation par régression pondérée les logarithmes des nombres de parcelles unitaires (ou, ce qui est équivalent, les logarithmes des superficies des parcelles) et les logarithmes des variances (première et cinquième colonne du tableau 3.6.3), conduit aux estimations suivantes :

$$\hat{\beta}_h = 0,506 \quad \text{et} \quad \hat{\beta}_v = 0,150,$$

respectivement pour les parcelles allongées horizontalement et verticalement. Ces valeurs confirment la plus grande variabilité observée dans une direction par rapport à l'autre.

On doit toutefois interpréter avec prudence la première valeur, en raison de la non-linéarité de la relation entre les deux caractéristiques prises en considération, qui résulte de la chute brutale de variance pour les parcelles de 28,8 m sur 1,2 m. En éliminant ce dernier type de parcelles, on obtient d'ailleurs un résultat sensiblement différent :

$$\hat{\beta}_h = 0,236.$$

Cette faible valeur, comme celle obtenue pour les regroupements verticaux, donne une indication chiffrée de l'importance des fluctuations observées dans les deux directions, à l'intérieur du terrain d'expérience qui est considéré ici.

4° Surface des parcelles

D'autre part, ces faibles valeurs conduisent également à la conclusion qu'il y a vraisemblablement intérêt, en dehors de toute contingence pratique, à utiliser dans ce cas de très petites parcelles d'expérience. Des regroupements ne pourraient en effet se justifier, au point de vue théorique, que si la quantité :

$$\hat{\beta} c_1 / [(1 - \hat{\beta}) c_2]$$

atteignait ou dépassait la valeur 2. Pour un coefficient $\hat{\beta}$ égal à 0,236, une telle situation ne pourrait se présenter que si le rapport c_1/c_2 (frais fixes, par parcelle d'expérience, sur frais variables, par parcelle unitaire) était de l'ordre de 6 au moins.

En raison de la présence de deux valeurs différentes du coefficient β , on pourrait envisager aussi de tenir compte simultanément des deux valeurs en utilisant un modèle de SMITH à deux dimensions :

$$\sigma_{n_h n_v}^2 = \sigma_1^2 / (n_h^{\beta_h} n_v^{\beta_v}),$$

dans lequel $\sigma_{n_h n_v}^2$ désignerait la variance de grandes parcelles qui seraient constituées horizontalement de n_h parcelles unitaires et verticalement de n_v parcelles unitaires (n_h colonnes contiguës de n_v parcelles unitaires ou n_v lignes contiguës de n_h parcelles unitaires).

⊖ 3.6.3 Interprétation des résultats : analyse spatiale

1° Corrélations et différences entre parcelles

Les observations présentées dans le tableau 3.6.1 peuvent aussi être traitées selon les principes d'analyse spatiale que nous avons esquissés au paragraphe 3.5.3. Dans cette optique, le tableau 3.6.4 donne les valeurs des coefficients de corrélation et des demi-moyennes des carrés des différences entre les parcelles qui occupent des lignes ou des colonnes plus ou moins éloignées les unes des autres.

Tableau 3.6.4. Expérience d'uniformité sur théier : coefficients de corrélation et demi-moyennes des carrés des différences entre parcelles, en fonction des distances qui les séparent ²⁵.

Distances	Corrélations entre		Différences entre	
	colonnes	lignes	colonnes	lignes
1	0,681	0,705	1,07	1,05
2	0,663	0,692	1,32	1,12
3	0,618	0,755	1,81	0,90
4	0,484	0,711	2,67	1,09
5	0,471	0,719	3,40	1,09
6	0,306	0,682	4,71	1,27
7	0,209	0,643	5,95	1,46
8	0,158	0,696	7,48	1,23
9	0,250	0,673	8,62	1,36
10	0,021	0,627	9,93	1,44
11	0,179	0,644	13,24	1,36
12	–	0,620	–	1,49
13	–	0,613	–	1,40
14	–	0,604	–	1,45
15	–	0,534	–	1,62
16	–	0,564	–	1,73
17	–	0,640	–	1,55
18	–	0,528	–	1,77
19	–	0,654	–	1,68

À la première ligne de ce tableau, la valeur 0,681 est le coefficient de corrélation entre les rendements des parcelles qui sont contiguës horizontalement (corrélation entre 2,12 et 1,56, 1,67 et 1,46, ..., 1,56 et 1,06, 1,46 et 0,88, ..., 1,06 et 2,31, 0,88 et 1,63, ..., si on se réfère au tableau 3.6.1). La valeur 1,07 est la moitié de la moyenne des carrés des différences de rendement entre les mêmes parcelles. Et les valeurs 0,705 et 1,05 sont obtenues de la même façon pour les parcelles contiguës

²⁵ Les distances sont exprimées en termes de longueur et de largeur des parcelles, et non pas en mètres (une distance « 1 » correspond au cas de parcelles contiguës, une distance « 2 » au cas de parcelles séparées par une seule colonne ou une seule ligne de parcelles intermédiaires, etc.).

verticalement (corrélation et différences entre 2,12 et 1,67, 1,56 et 1,46, ..., 1,67 et 1,04, 1,46 et 2,40, ..., 1,04 et 1,32, 2,40 et 1,66, ...).

À la deuxième ligne du tableau 3.6.4, les valeurs concernent les parcelles qui sont séparées chaque fois par une seule parcelle intermédiaire (2,12 et 1,06, 1,67 et 0,88, ..., 1,56 et 2,31, 1,46 et 1,63, ..., d'une part, 2,12 et 1,04, 1,56 et 2,40, ..., 1,67 et 1,32, 1,46 et 1,66, ..., d'autre part). Et il en est de même pour les lignes suivantes, avec des distances de plus en plus grandes entre parcelles. Les dernières valeurs 0,179 et 0,654 sont les coefficients de corrélation entre, respectivement, les rendements des parcelles des deux colonnes extrêmes et les rendements des parcelles des deux lignes extrêmes du tableau 3.6.1, tandis que les valeurs 13,24 et 1,68 sont les demi-moyennes des carrés des différences entre les rendements de ces mêmes parcelles.

2° Corrélogrammes et semi-variogrammes

La figure 3.6.4 présente le contenu du tableau 3.6.4 sous forme graphique. Il s'agit d'une part de deux corrélogrammes et d'autre part de deux semi-variogrammes.

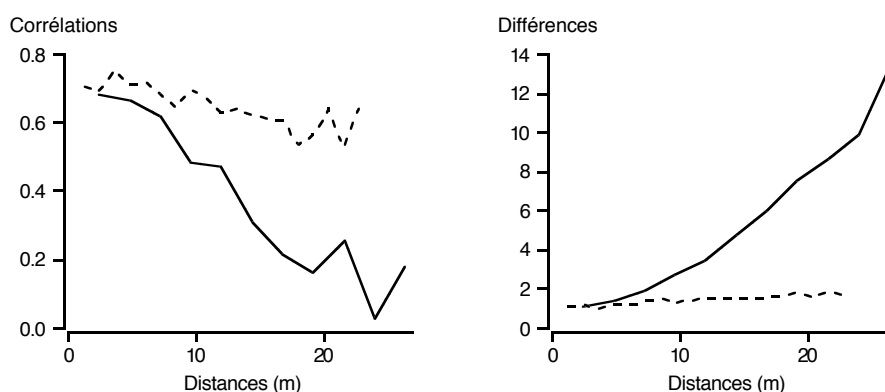


Figure 3.6.4. Expérience d'uniformité sur théier : évolution des coefficients de corrélation et des demi-moyennes des carrés des différences entre parcelles, en fonction des distances qui les séparent horizontalement (lignes continues) et verticalement (lignes discontinues)²⁶.

En ce qui concerne les corrélations entre colonnes, les valeurs obtenues diminuent rapidement et de manière sensiblement linéaire²⁷. Au contraire, les corré-

²⁶ Les distances sont exprimées ici en mètres et sont mesurées de centre de parcelle à centre de parcelle, soit par exemple 2,4 m horizontalement et 1,2 m verticalement dans le cas de parcelles contiguës.

²⁷ On notera qu'il n'y a pas lieu d'accorder une attention particulière aux irrégularités que présente l'extrémité droite du graphique, les points qui y figurent étant relatifs à des coefficients de corrélation obtenus à partir de petits nombres d'observations.

lations entre lignes évoluent peu, essentiellement en raison du parallélisme entre les lignes, qui est induit par les fortes différences entre colonnes (tableau 3.6.2 et figure 3.6.3).

Quant aux demi-moyennes des carrés des différences entre colonnes d'une part et entre lignes d'autre part, le tableau 3.6.4 et la figure 3.6.4 confirment ce qui a été observé antérieurement, à savoir les fortes différences entre les colonnes et les différences nettement moindres entre les lignes (tableau 3.6.2 et figure 3.6.3).

3° Étude géostatistique

Les demi-moyennes des carrés des différences entre les colonnes et entre les lignes, qui constituent les semi-variogrammes de la partie droite de la figure 3.6.4, sont normalement le point de départ d'une éventuelle étude géostatistique. Toutefois, une telle étude suppose que les observations prises en considération ne présentent aucune tendance générale croissante ou décroissante, dans l'une ou l'autre direction, ce qui n'est manifestement pas le cas pour l'exemple étudié.

Les tendances observées doivent en conséquence être éliminées par régression, en exprimant les rendements en fonction des coordonnées des parcelles, et l'étude géostatistique peut alors être envisagée pour les résidus de la régression.

Dans le cas présent, la régression linéaire suivante s'avère satisfaisante :

$$y = 0,409 + 0,179 x_h + 0,0536 x_v ,$$

y représentant les rendements (en t/ha), et x_h et x_v les coordonnées horizontales et verticales des centres des parcelles (en m), ces coordonnées étant mesurées à partir du coin supérieur gauche du dispositif. La variance résiduelle relative à cette équation de régression est égale à $1,14$ (t/ha)², alors que la variance initiale était égale à $3,49$ (t/ha)².

Le calcul des demi-moyennes des carrés des différences à partir des résidus de la régression ne fournit cependant guère d'informations complémentaires. Les variogrammes obtenus à partir des résidus se situent en effet au niveau de la variance résiduelle et ne présentent aucune tendance marquée supplémentaire. Il faut en conclure qu'il n'y a aucune irrégularité importante ou structure spatiale particulière en dehors des tendances générales linéaires²⁸.

²⁸ Nous remercions cordialement Patrick BOGAERT (Université catholique de Louvain, à Louvain-la-Neuve, Belgique) pour l'aide qu'il nous a apportée dans le traitement numérique de cet exemple.

Chapitre 4

Les observations

Sommaire

4.1 Différents types d'observations

4.2 La nature et l'enregistrement des observations

4.1 Différents types d'observations

1° Observations principales

Les observations qui sont faites au terme de l'expérience et qui sont directement liées à son ou à ses objectifs sont généralement considérées comme étant les *observations principales*¹. Ces observations peuvent être relatives à une ou à plusieurs variables ou caractéristiques.

Il peut s'agir, dans le domaine agronomique notamment, de rendements, de croissances en poids ou en hauteur, de teneurs en l'un ou l'autre élément, etc. Plus spécifiquement par exemple, dans le cas d'expériences relatives à la betterave sucrière, les principales variables habituellement considérées sont le rendement en racines (quantité de betteraves produite à l'hectare), la teneur en sucre ou richesse saccharine des betteraves, et le rendement en sucre (quantité de sucre produite à l'hectare), cette dernière variable résultant de la multiplication des deux premières.

[Au même titre que les facteurs pris en considération dans une expérience peuvent être qualifiés de paramètres d'entrée, variables explicatives, etc. (§ 2.1.1.5°), les variables observées au terme de l'expérience sont parfois appelées *paramètres de sortie* ou *observés*, *variables dépendantes* ou *expliquées*, *variables cibles*, *réponses*, etc.²]

2° Observations initiales

Des *observations préliminaires* ou *initiales*³ peuvent aussi être réalisées avant ou au début de l'expérience. Ces observations sont essentiellement destinées à pouvoir disposer d'un certain nombre d'informations relatives aux différentes unités expérimentales avant tout traitement.

De telles observations sont particulièrement importantes dans le domaine médical (caractérisation des différents patients avant l'expérience) et en expérimentation animale (poids initial des animaux par exemple). Dans le domaine médical, ces observations définissent ce qui est souvent appelé la *ligne de base*⁴ de l'expérience.

3° Observations et analyses intermédiaires

Dans certains cas, des *observations intermédiaires* ou *intérimaires*⁵ sont également réalisées à un ou à plusieurs moments différents, durant l'expérience. Il peut s'agir de variables ou de caractéristiques différentes de celles qui doivent être observées au terme de l'expérience (germination, croissance et différents stades du développement des plantes par exemple, dans les expériences de productions

¹ En anglais : *main observation, primary observation.*

² En anglais : *dependent variable, output, response, etc.*

³ En anglais : *preliminary observation, initial observation.*

⁴ En anglais : *baseline.*

⁵ En anglais : *intermediate observation, interim observation.*

végétales), ou d'observations qui portent au contraire sur les mêmes variables qu'au terme de l'expérience.

Ce dernier aspect est spécialement important dans le domaine médical, en relation notamment avec les problèmes éthiques sous-jacents. Des analyses statistiques comparables aux analyses finales, et dites *analyses intermédiaires* ou *intérimaires*⁶, sont en effet fréquemment réalisées à partir d'observations récoltées en cours d'expérience. Ces analyses peuvent alors conduire soit à une interruption de l'expérience, soit à une réévaluation de son ampleur, par une nouvelle détermination de sa durée ou du nombre de patients à prendre en considération, par exemple.

Il est évident que les conditions de réalisation de telles analyses et les éventuelles *règles d'arrêt*⁷ des expériences doivent être clairement définies dès le départ. En particulier, des questions d'adaptation des niveaux de signification des tests d'hypothèses doivent être envisagées, en vue de tenir compte notamment de la réalisation de tests multiples [STAT1, § 10.3.5].

4° Autres observations

Toutes les observations dont nous avons parlé jusqu'ici concernent les unités expérimentales elles-mêmes. Il faut y ajouter des observations relatives aux conditions dans lesquelles l'expérience se déroule.

Ces *observations de contrôle*⁸ doivent porter à la fois sur les facteurs qui sont étudiés et sur les facteurs constants de l'expérience (§ 2.1.1.3°). On peut citer comme exemples, en ce qui concerne les facteurs qui sont étudiés, la température et la pression du fermenteur dans lequel l'expérience serait réalisée (culture de levures notamment), et en ce qui concerne les facteurs constants, la température et l'humidité, supposées constantes, du local dans lequel seraient effectués des essais de résistance de différents matériaux (bois ou matériaux à base de bois, etc.).

Indépendamment de ces observations de contrôle, qui sont normalement prévues dès la planification de l'expérience, il est essentiel de prendre note également, de façon précise, de tous les incidents ou accidents qui peuvent se produire en cours d'expérience (inondation de certaines parcelles ou dégâts de gibier dans un champ d'expérience, par exemple). Les constatations faites en ce qui concerne de tels incidents ou accidents peuvent en effet servir à expliquer, le cas échéant, certaines anomalies qui pourraient être constatées en fin d'expérience.

D'une manière générale, tout écart par rapport au protocole expérimental initial doit être soigneusement noté.

⁶ En anglais : *intermediate analysis, interim analysis*.

⁷ En anglais : *stopping rule*.

⁸ En anglais : *check observation*.

5° Utilisation des observations complémentaires

Les diverses observations complémentaires (observations initiales et intermédiaires, observations relatives à d'éventuelles anomalies, etc.) peuvent souvent être utilisées comme variables auxiliaires ou covariables dans des analyses de la covariance réalisées au cours ou au terme de l'expérience (§ 12.4.2). Elles sont susceptibles d'améliorer ainsi sensiblement la précision des résultats fournis par l'expérience.

4.2 La nature et l'enregistrement des observations

1° Nature des observations

Il est bon d'avoir toujours en tête les distinctions qui doivent être faites entre les observations ou les données de différentes natures [STAT1, § 2.4.1]. Il s'agit tout d'abord de la distinction entre *données quantitatives*⁹ et *données qualitatives*¹⁰.

Les données quantitatives peuvent être subdivisées elles-mêmes en *mesures* ou *mesurations*¹¹ d'une part, de type continu, et *dénombrements* ou *comptages*¹² d'autre part, de type discontinu.

Quant aux données qualitatives, une distinction doit être faite entre données *binaires*¹³ (présence ou absence d'un certain symptôme par exemple), données *ordinales*¹⁴, constituées de différents niveaux logiquement ordonnés d'un même caractère (différents degrés d'attaque d'un même parasite par exemple), et données *nominales*¹⁵, constituées de différents états d'un même caractère non susceptibles d'être logiquement ordonnés (différentes couleurs non ordonnées par exemple).

Il faut y ajouter le cas particulier des *rangs*¹⁶, qui résultent d'un simple classement d'un certain nombre d'individus, sans aucune attribution à chacun d'eux d'une note ou de toute autre appréciation.

2° Enregistrement des observations

Les diverses observations peuvent être enregistrées de façon visuelle et au moins partiellement manuelle, ou de manière automatique. Il peut s'agir plus particulièrement soit d'un enregistrement entièrement manuel, sur des documents de type « papier » (*formulaires* ou *fiches de terrain*¹⁷, et *cahiers* ou *livres de champ* ou

⁹ En anglais : *quantitative data*.

¹⁰ En anglais : *qualitative data*.

¹¹ En anglais : *measurement*.

¹² En anglais : *enumeration, counting*.

¹³ En anglais : *binary data*.

¹⁴ En anglais : *ordinal data*.

¹⁵ En anglais : *nominal data*.

¹⁶ En anglais : *rank*.

¹⁷ En anglais : *form*.

*de laboratoire*¹⁸), soit d'un enregistrement manuel réalisé immédiatement sur un support informatique (ordinateur ou autre matériel équivalent), soit encore d'un enregistrement tout à fait automatique (balance ou spectromètre par exemple, connecté à un ordinateur) [STAT1, § 2.4.2].

Quelles que soient les modalités adoptées, les observations doivent toujours être collectées avec le plus grand soin, selon des procédures bien définies. Il peut être opportun notamment de concevoir dès la planification de l'expérience des *cadres* ou des *fenêtres*¹⁹ de saisie des données.

En particulier, il y a lieu bien sûr de préciser de manière non équivoque les unités de mesure et les dates ou les stades de développement (de certaines maladies ou des plantes, par exemple), auxquels les observations doivent être réalisées. Il faut être attentif également au réglage et à l'étalonnage des appareils de mesure, aux modalités d'utilisation de ces appareils, etc.

3° Échelles d'observation

La définition des observations doit être considérée avec une attention toute spéciale lors de l'utilisation d'*échelles*²⁰, qui peuvent correspondre au cas des données qualitatives ordinales.

En ce qui concerne l'*analyse* ou les *épreuves sensorielles*²¹ notamment, diverses possibilités peuvent être envisagées et doivent faire l'objet d'un choix judicieux, adapté aux buts et aux conditions de l'expérience [DELVAUX, 1992; DEPLEDT, 2009; SVENSSON, 2000; URDAPILLETA *et al.*, 2001].

On peut tout d'abord demander aux évaluateurs ou juges de classer simplement un certain nombre de produits selon un ou plusieurs critères différents, les résultats étant alors des rangs. On peut aussi leur demander de cocher l'une ou l'autre de différentes mentions qui leur sont proposées, telles qu'en matière de goût, « très désagréable », « désagréable », « moyen », « agréable » et « très agréable », comme le montre la première partie de la figure 4.2.1. Dans certaines limites, les résultats obtenus de cette manière peuvent ensuite être éventuellement codés par exemple de 1 à 5.

Une autre solution, qu'illustre la deuxième partie de la figure 4.2.1, peut être de demander d'indiquer une réponse sous la forme d'un trait à porter sur une échelle graduée, le plus souvent de 1 à 7 ou de 1 à 9, qui comporte un certain nombre de mentions pouvant servir de repères. Toutes les valeurs allant de 1 à 9 dans l'exemple considéré, même non entières et alors exprimées sous forme décimale, peuvent se présenter et doivent être acceptées dans ce cas.

La dernière possibilité que nous évoquons est celle qui consiste à demander d'indiquer un trait sur une échelle non graduée et portant seulement, à ses extré-

¹⁸ En anglais : *field book*, *lab book*.

¹⁹ En anglais : *frame*.

²⁰ En anglais : *scale*.

²¹ En anglais : *sensory analysis*, *sensory evaluation*.

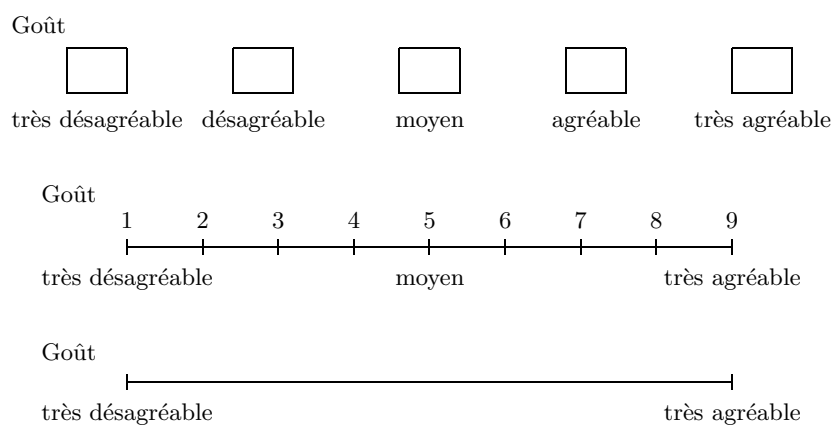


Figure 4.2.1. Exemples d'échelles pouvant être utilisées en analyse sensorielle.

mités, des indications telles que « très désagréable » d'une part et « très agréable » d'autre part (troisième partie de la figure 4.2.1). L'échelle en question peut se voir attribuer ultérieurement des valeurs numériques, allant par exemple de 0 à 1 ou à 10, ou aussi de 1 à 7 ou de 1 à 9, et les résultats sont alors exprimés sous la forme de nombres décimaux se situant entre ces valeurs extrêmes.

4° Échantillonnage

Dans certains cas, les observations ne portent pas sur la totalité de chacune des unités expérimentales, mais bien sur certains sous-ensembles. On peut citer par exemple l'analyse physique ou chimique d'échantillons de terre prélevés dans les différentes parcelles d'un champ d'expérience, l'observation de quelques feuilles ou quelques fruits d'une plante ou d'un groupe de plantes de chacune des parcelles, l'analyse de prélèvements sanguins ou urinaires, etc.

Le processus d'*échantillonnage*²² qui intervient dans un tel cas doit être clairement défini dans le protocole expérimental, et ce processus doit évidemment être scrupuleusement respecté au cours de l'expérience [STAT1, § 2.2].

5° Contrôle, traitement et sauvegarde des observations

L'enregistrement des données doit toujours être complété par un contrôle strict de celles-ci, ce contrôle pouvant être lui aussi soit visuel, soit réalisé selon des procédures automatiques. Les contrôles qui sont ainsi effectués doivent éventuellement permettre, selon des règles précises, d'apporter certaines corrections aux données collectées.

Quant au traitement ultérieur des observations ou des données, nous rappelons simplement quelques précautions qu'il est indispensable de prendre : procéder

²² En anglais : *sampling*.

toujours à un examen critique des données prises en considération, vérifier soigneusement toutes les transcriptions éventuelles (y compris tout encodage manuel sur ordinateur ou support informatique, etc.), être particulièrement circonspect quant à la validité de tout enregistrement ou traitement automatique des données, n'utiliser que des méthodes d'analyse bien connues, vérifier systématiquement les conditions d'application de ces méthodes, etc. [STAT1, § 2.4.2; STAT2, concl.].

Enfin, il importe de prévoir également dès le départ la sauvegarde ou l'archivage des données, en vue de pouvoir effectuer, si cela s'avère nécessaire, des contrôles ou des analyses complémentaires, et aussi dans l'optique d'une possible utilisation lors de la planification d'expériences ultérieures.

