

aspect physiologique et un aspect pédologique, qui sont réglés par des lois différentes et indépendantes. L'utilisation des engrais n'est qu'une façon expérimentale de modifier la quantité de N absorbé sur un endroit, et ainsi de simuler expérimentalement les effets des sols plus riches sur la production. Ceci démontre en même temps l'effet et l'efficacité des engrais eux-mêmes. La partie 5.2 traite de la relation entre N absorbé et la productivité de la végétation, les parties 5.3, 5.5 et 5.6 de la disponibilité de N dans le sol et les conséquences pour la productivité.

Niveau de production D: situation B, mais, en outre, la disponibilité du phosphore limite la production Dans cette situation, la production est déterminée surtout par l'absorption de phosphore (P) et il existe un rapport étroit entre la production et le cycle de P. Les variables d'état supplémentaires sont: la quantité de P dans la matière organique fraîche ou vieille, la quantité de P inorganique qui est facilement soluble dans le sol, et la quantité de P inorganique dans une forme qui est difficilement absorbée. Les processus de conversion des formes de P dans le sol sont assez complexes et pour cette raison il est plus difficile de trouver les éléments du cycle de P que ceux du cycle de N.

En pratique il importe surtout de déterminer si l'on a affaire à une situation au niveau de production C ou bien au niveau D. A cet effet on n'emploie pas encore des modèles, mais on utilise des observations faites dans les champs sur le rapport P/N dans la matière végétale (voir partie 5.2.4). Quand il est bas, les plantes réagissent d'abord et surtout à un meilleur approvisionnement en P, mais quand le rapport P/N est élevé, elles réagissent surtout à l'approvisionnement en N. L'idée centrale est que la quantité de P que les plantes ont pu absorber pose une limite supérieure à la quantité de N que les plantes peuvent contenir, et constitue donc aussi un facteur déterminant de la production végétale. Dans les parties 5.5 et 5.6 on en parle de façon plus détaillée.

Les modèles de la croissance des végétations au niveau de la production potentielle (situations A et B) sont généralement assez bien développés, parce que la connaissance fondamentale est suffisamment avancée. De tels modèles peuvent être employés, avec prudence, pour faire des prédictions de la productivité avec relativement peu d'informations spécifiques dans des situations concrètes. Des exemples de tels modèles sont présentes dans les parties 4.2 et 4.5. Un modèle simple, basé sur ces modèles compréhensifs, est décrit à la fin du chapitre 4 (partie 4.6). Les modèles aux niveaux de production C et D, où N ou P est le facteur limitatif, sont moins développés parce que la connaissance fondamentale est moins avancée. De tels modèles sont encore dans un stade préliminaire: la théorie et la quantification des paramètres nécessitent encore plus de recherche.

2.4 DES PROBLEMES ANALYTIQUES ET EXPERIMENTAUX

2.4.1 *Evaluation des modèles*

L'évaluation est le processus continu de juger la valeur des modèles. Il s'agit de la vérification de la consistance interne, de la comparaison des résultats du modèle avec les observations faites en réalité et du jugement de l'utilité du modèle.

La comparaison du comportement du modèle avec celui du système réel dans une situa-

tion analogue est le premier pas important. On est surtout intéressé au changement dans le temps des variables d'état tels que la biomasse, le contenu d'azote et de l'eau dans le sol. Dans les modèles plus détaillés on étudie les changements de ces variables dans le temps avec des intervalles de temps plus petits; aussi on distingue plusieurs subdivisions de ces variables d'état, comme les organes des plantes (feuilles, racines, semences), plusieurs couches de sol; les variables de vitesse sont calculées plus précisément mais en général aussi de façon plus complexe. Si on observe une concordance qualitative entre le modèle et la réalité on peut ensuite faire attention au degré de concordance quantitative.

S'il était possible de mesurer de façon non-destructive toutes les variables d'état et de vitesse et les propres paramètres, on pourrait le faire à un seul endroit, et une analyse statistique pourrait se limiter à l'analyse des erreurs de mesure et leurs conséquences. Cependant, la plupart des déterminations de ces variables se font d'une façon destructive, de sorte qu'elles doivent être mesurées partiellement à différents endroits. Dans ce cas l'hétérogénéité du terrain va jouer un rôle important. Ceci suscite des difficultés à la falsification des résultats d'un modèle quand l'hétérogénéité ne peut pas être limitée par des mesures de culture, telles que le labour, le nivellement, le drainage et autres encore. Par exemple: quand les résultats de 2 récoltes de biomasse à un intervalle de 10 jours sont de 5.000 et de 6.500 kg ha⁻¹, la vitesse de croissance est 150 kg ha⁻¹ jour⁻¹. Avec un coefficient de variation de 15%, l'erreur typique de la différence de biomasse est égale à $\sqrt{750^2 + 975^2} = 1.230$ kg ha⁻¹ et l'erreur typique de la vitesse de croissance est de 123 kg ha⁻¹ jour⁻¹. Un modèle permettant le calcul de la vitesse de croissance devrait être bien mauvais si l'on décide de rejeter le résultat du calcul en se basant sur de telles observations. Ceci n'implique pas que le comportement des modèles est toujours comme on s'y attend. Par exemple, un grand écart entre les résultats d'un modèle et des observations se trouvait des fois dans le sujet des transformations du phosphore dans le sol et son absorption, un des sujets le moins connus parmi nos investigations (partie 5.4). Mais ni la théorie, ni la méthode pour faire des observations sont suffisamment développées pour choisir le meilleur résultat entre les 2, et même pour attacher beaucoup de poids à cet écart, sauf pour conclure qu'il est nécessaire de faire plus de recherche pour éclairer ce système.

Le caractère explorateur de l'analyse faite par le projet P.P.S. mène à l'emploi préférentiel de modèles essayés dans des circonstances divergentes et à un travail dont le but n'est pas tellement d'améliorer ces modèles, mais plutôt d'estimer dans les conditions sahéliennes les paramètres les plus sensibles.

2.4.2 Aspects statistiques complémentaires

Ce qui est écrit ci-dessus indique que pour l'examen des systèmes de croissance des plantes, des observations et essais aux champs sont une base indispensable. Cependant, la quantité de force physique et mentale dont nous disposons était restreinte, surtout dans les conditions sahéliennes où la recherche est chère et où les conditions sont difficiles. La question se présentait alors de savoir comment répartir de façon optimale la capacité de recherche entre les sites et les disciplines. Quant au site, il était inévitable de

concentrer les recherches pour la plus grande part dans un rayon de 20 kilomètre autour d'une base, sinon on perdrait trop de temps par le transport dans un terrain difficilement praticable pendant la période des pluies. Malgré cette contrainte il y a quand même de grandes variétés des conditions de croissance: types de sol, précipitation journalière, écoulement, et tout ceci en rapport avec les différences dans la végétation. Cette variabilité n'est pas seulement négative: on a cherché un endroit pour la base du projet où les conditions de terrain reflètent plus ou moins les différentes conditions qui existent au Sahel.

Dans une recherche d'orientation, c'est-à-dire une recherche dont les résultats à tous les stades déterminent la direction des recherches suivantes, il est obligatoire de donner beaucoup d'attention à beaucoup de sites. Ceci amène à beaucoup d'essais et forcément à peu de répétitions par site. Parfois même on ne fait pas de répétitions du tout parce que les observations demandent beaucoup de travail (telles que l'infiltration et l'utilisation de l'eau, les transformations de l'azote dans le sol et la réaction des différentes espèces de plantes à un traitement) et il est mieux de les faire une fois bien, que plusieurs fois superficiellement. Mais quelles sont alors la validité et la précision des données obtenues de l'expérimentation sur le terrain?

Si l'on calcule la moyenne d'un traitement sur les sites et les parallèles par site, la variance de la moyenne du traitement est égale à:

$$\text{var } \bar{x} = \frac{\sigma^2}{s} + \frac{\sigma_{sr}^2}{s} \quad (\text{formule 2.4.1})$$

où σ^2 représente la variance entre les champs d'essais répétés à l'intérieur d'un traitement dans un site, σ_{sr}^2 la variance de l'interaction du traitement x avec le site, r le nombre de parallèles par site et s le nombre de sites.

Parce qu'on dispose d'une capacité de travail limitée, faire plus de sites est au détriment des répétitions et inversement, faire plus de répétitions par site sera au détriment du nombre de sites. Au premier abord le produit s r peut donc être supposé constant: s r = c. La variance est alors égale à:

$$\text{var } \bar{x} = \frac{1}{c} (\sigma^2 + r\sigma_{sr}^2) \quad (\text{formule 2.4.2})$$

Ici r est l'unique paramètre qui peut être choisi librement et il est évident que la variance de la moyenne est la plus petite quand le nombre de répétitions est égal à 1, donc quand il n'y aura pas de répétitions par site. Dans ce cas, le nombre de sites où est fait l'essai est égal à c.

Il est vrai que de cette façon la fiabilité de la moyenne obtenue est la plus grande, mais ceci est au détriment de chaque estimation de la grandeur de la fiabilité. En cas d'un échec d'un traitement à un seul site, toutes les informations sur ce site sont perdues aussi. Pour terminer, faire 2 répétitions par site demande souvent moins de travail que de doubler le nombre de sites. Tout compte fait, il est donc raisonnable de donner l'estimation de la moyenne du traitement en faisant autant qu'il est possible 2 répétitions. Les informations supplémentaires obtenues de cette façon peuvent être utilisées pour une analyse élémentaire de la fiabilité de l'estimation. Ceci reste une analyse

élémentaire parce que le nombre de degrés de liberté restant disponible pour l'estimation de la variance par site, dû au hasard, reste petit, même si l'on néglige toutes les interactions d'ordre plus élevé. D'ailleurs des traitements sans répétition passent inaperçus et un nombre non-négligeable se perd par une erreur dans le traitement, par destruction par le bétail ou les termites, par écoulement excessif ou d'autres problèmes encore. C'est pourquoi nous préférons estimer pour nos essais en général un coefficient de variance, et indiquer à l'aide de ce coefficient le degré de différences nécessaire entre les traitements, afin qu'il soit question d'une certaine fiabilité du point de vue statistique. L'erreur typique (s_x) de la moyenne (\bar{x}) de 2 observations

$$\bar{x} = 0,5 (x_1 + x_2) \quad (\text{formule 2.4.3})$$

est égale à

$$s_x = |x_1 - x_2| \sqrt{0,5} \quad (\text{formule 2.4.4})$$

de sorte que le coefficient de variation (CV) est égal à

$$CV = \frac{s_x}{\bar{x}} = \frac{|x_1 - x_2| \sqrt{2}}{x_1 + x_2} \quad (\text{formule 2.4.5})$$

Le nombre de degrés de liberté à 2 observations est au minimum, tel que l'exactitude de chaque estimation du CV à part est nulle. Pourtant presque 200 récoltes de 10 m² ont été faites en duplo, ce qui permet de faire une bonne estimation moyenne du CV. Ceci est fait avec la fig. 2.4.1 où la récolte \bar{x} est placée à l'axe horizontal et s_x à l'axe vertical. Le rapport entre l'erreur typique et la biomasse est linéaire et au premier abord le CV est constant à 17%. La différence minimale entre 2 traitements est représentée au tableau 2.4.1 en pourcents de la moyenne; quand elle est dépassée on peut admettre avec une chance inférieure à 5% que la différence est due au hasard. Ce tableau est utilisable pour un CV de 10, 15, 20 et 30% et pour 1-4 répétitions. Il est clair que les différences nécessaires pour pouvoir conclure à une signification deviennent considérablement plus petites quand on passe de 1 répétition à 2, mais que le bénéfice de plus de répétitions est relativement petit. Ce qui est également un bon argument pour réduire le nombre de répétitions.

Le CV de 17% se rapporte aux champs d'essais d'environ 10 m², aménagés sur un terrain ayant un aspect plus ou moins homogène au moment de l'aménagement, c'est-à-dire avant la saison des pluies. Plus tard cette homogénéité ne s'avère souvent pas effective. C'est pourquoi ce coefficient est environ 2x plus grand qu'aux essais faits dans les conditions hollandaises et même 4x plus élevé qu'aux essais faits sur sol nettement homogène des polders, récemment aménagés à l'ancien Zuyderzee aux Pays Bas. C'est ce qu'il faut apprendre à accepter. Avec 2 parallèles par site et le CV de 17%, on peut dire donc que quand la différence entre 2 traitements est supérieure à 28%, on peut parler de signification. Avec une différence au dessous de 28% il y a encore une indication à ce titre mais quand elle n'est pas confirmée par d'autres essais ou d'autres observations indépendantes, il vaut mieux ne pas y attacher trop d'importance. Il résulte du tableau

Fig. 2.4.1. La relation entre l'erreur typique (s_x) et la moyenne des récoltes (\bar{x}) faites sur le ranch dans les années 1976-1979. Chaque point représente la médiane de 20 observations, qui viennent chacune d'une récolte de biomasse de 10 m² en duplo.

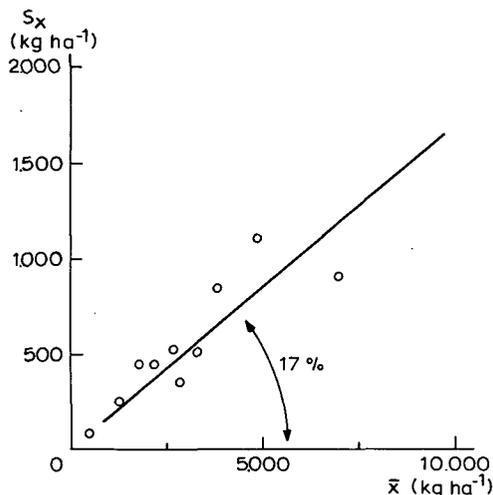


Fig. 2.4.1. The relation between the standard error (s_x) and the mean of the yields (\bar{x}) obtained on the ranch for the years 1976-1979. Each point represents the median of 20 observations, each of which comes from the biomass yield of 10 m² in duplicate.

Tableau 2.4.1. La différence relative qui doit exister entre les résultats de 2 traitements pour conclure avec une certitude de 95% que cette différence n'est pas due au hasard est présentée dans ce tableau pour 16 combinaisons du coefficient de variation (CV) et le nombre de répétitions par traitement.

| Répétitions | CV = 10% | CV = 15% | CV = 20% | CV = 30% |
|-------------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 23% | 35% | 47% | 70% |
| 2 | 16% | 24% | 33% | 49% |
| 3 | 13% | 20% | 27% | 40% |
| 4 | 12% | 18% | 23% | 35% |

Table 2.4.1. The relative difference that must exist between the results of 2 treatments to conclude with 95% certainty that this difference is not due to chance is presented in this table for 16 combinations of the coefficient of variation (CV) and the number of replications per treatment.

2.4.1 que c'est de la peine perdue en conditions sahéliennes que d'essayer de faire des essais de façon que les petites différences de production puissent être démontrées de façon statistique sûre. D'ailleurs, ce n'est pas, et ça ne doit pas être le but de la recherche en question.

Une pareille observation des résultats des analyses du taux en azote (N) de la biomasse, basée sur environ 80 récoltes en duplo et sur le trajet des taux de N de 0,2-5,0% de la matière sèche, indique que le CV de ces chiffres est 15%. Parfois on trouve que la répétition avec la biomasse la plus élevée possède aussi le taux en N le plus élevé, parfois aussi c'est le contraire qui se passe. En général on doit conclure que ces

2 aspects d'une récolte fluctuent indépendamment. L'observation d'une certaine quantité de N dans la végétation, trouvée par multiplication de la biomasse et son taux en N, a donc un CV de $\sqrt{17^2 + 15^2} = 23\%$.

2.5 LES RELEVÉS BOTANIQUES

Pour l'analyse de la production actuelle, les différentes espèces qui composent la végétation ont été étudiées pour connaître leur importance relative et absolue, donc leur contribution individuelle dans cette production. Pour cette raison 35 sites ont été choisis entre les isohyètes 100 et 1.100 mm (voir partie 3.1). A l'intérieur du ranch de Niono 40 autres sites ont été également choisis. Tous ces sites ont été décrits à la fin de l'hivernage et à la fin de la saison sèche, au cours de 2-4 années successives.

Les 35 sites du trajet nord-sud ont été choisis après une description générale du paysage du parcours. Les critères de choix étaient: la représentativité du point de vue substrat (sol) et de la pluviosité moyenne et l'intensité d'exploitation vu l'état du terrain. De cette manière chaque site est différent des autres et donc unique dans son ensemble. Il n'a pas été possible d'étudier plusieurs sites ayant les mêmes caractères parce que le but était de décrire l'ensemble de la végétation du trajet à peu près au même stade, notamment à la fin de la croissance quand la biomasse est maximale et quand les graines ne sont pas encore tombées, ce qui implique qu'on n'avait que 3 semaines pour la réalisation des observations annuelles du trajet, un parcours de 2.500 km de pistes (aller et retour).

La répartition des sites (voir fig. 3.3.2) est telle que ces sites sont assez représentatifs de la zone sahélienne; il y a cependant un petit aperçu sur la savane. Par contre le Delta vif n'a pas été étudié dans ce cadre-ci. Quant au Delta mort il a été analysé en détail au ranch de Niono et les 40 sites choisis, l'ont été sur la base des substrats qu'on y distingue (fig. 3.3.4) et sur le degré d'exploitation.

Fig. 2.5.1. Impression de la richesse en espèces des groupements végétaux du ranch en rapport avec le substrat et la surface analysée; sur l'axe horizontal la somme cumulée des échantillons au hasard de 1 m², à l'intérieur d'une zone de 2 ha environ.
 ----- toutes les espèces observées; — les espèces représentant au moins 5% de la biomasse.

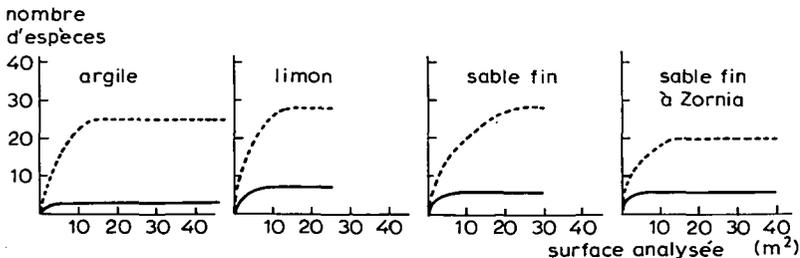


Fig. 2.5.1. Impression of the species richness of the plant groups on the ranch in relation to the substratum and the analysed surface; on the horizontal axis the accumulated sum of samples of 1 m² taken at random within an area of about 2 ha.
 ----- all the species observed; — the species that represent at least 5% of the biomass.