

discuté dans la partie 5.1.

Ces dernières situations se caractérisent par une production faible. La différence entre les 2 est souvent difficile à constater, entre autres parce que la fourniture d'azote et la fourniture de phosphore pour les plantes sur des sols non-fertilisés sont étroitement liées. Des modèles existent à ces niveaux de production (Penning de Vries, 1980). Pourtant, la quantification des processus est souvent difficile parce qu'il s'agit de quantités très limitées dans les conditions sahéliennes (l'absorption par saison est seulement de l'ordre de 10 kg ha^{-1} pour N et 1 kg ha^{-1} pour P) et pose même des problèmes d'identification des processus importants.

2.3 LA SYNTHÈSE ET LA SIMULATION DES SYSTÈMES DE PRODUCTION PRIMAIRE

Dans ce qui précède on a signalé l'importance dans le projet P.P.S. des modèles dynamiques de processus ou, autrement dit, des modèles à simuler. L'application de cette technique de modèles à simuler demande tant de connaissances sur ce terrain spécifique que le lecteur qui s'intéresse particulièrement à ce sujet, est conseillé de lire les comptes rendus de la littérature spéciale: (Ferrari, 1978, De Wit et Goudriaan, 1978, Penning de Vries, 1982a). Afin de donner quand même une idée de cette technique, on donnera dans cette partie un bref exposé de la technique de simulation et puis on discutera quelques aspects de l'application. Cette technique détermine un ordre de traitement des sujets et une façon d'argumenter qui sont suivis dans ce compte rendu.

Les modèles sont des représentations simples des systèmes, définissant un système comme une partie cohérente du monde réel. Il y a plusieurs types de modèles. Avec des modèles dynamiques, on imite des aspects du comportement (les changements des valeurs numériques des variables) du système réel. Si la formulation des relations dans le modèle est plus ou moins analogue aux relations entre les processus dans la réalité, on parle de *modèles à simuler*. Plus la formulation du modèle suit la réalité, plus le comportement du modèle suit aussi la réalité.

Dans les modèles à simuler, les éléments de base sont des quantités de matière ou d'énergie, des vitesses de changement de ces quantités et l'influence de l'environnement. Les quantités (ou proprement dit: *variables d'état*) sont par exemple la biomasse, le nombre de plantes, la quantité d'azote dans le sol, la teneur en eau, la température du sol, etc. Les *variables de vitesse* représentent les changements dans le temps des variables d'état. Leurs valeurs sont déterminées par les variables d'état d'une part, et par des variables externes d'autre part, à l'aide d'équations et paramètres propres à ces calculs. Cette quantification des relations est faite sur la base des connaissances sur les processus biologiques, physiques et chimiques; elle n'est pas faite par une analyse statistique du système à interpréter. Des *variables externes* caractérisent l'influence de l'environnement au système étudié. Elles peuvent être des variables météorologiques comme la pluie, la température de l'air, le vent, le rayonnement, ou bien la quantité de minéraux ajoutés au système.

Après avoir fait le calcul des vitesses, celles-ci sont réalisées dans un bref intervalle de temps selon le schéma suivant: la variable d'état à un moment $t + \Delta t$ équivaut à la variable d'état à un moment t plus la vitesse à un moment t multiplié par Δt :

$$\text{variable d'état}_{t+\Delta t} = \text{variable d'état}_t + \text{vitesse} \times \Delta t \quad (\text{formule 2.3.1})$$

Ceci donne les valeurs nouvelles des variables d'état, après quoi l'opération peut être répétée. Il va sans dire que les ordinateurs sont souvent indispensables à l'exécution de ces calculs.

Dans cette conception des systèmes, les variables de vitesses dépendent seulement de la valeur des variables d'état et celles des variables externes et la vitesse peut donc être calculée indépendamment de toutes les autres vitesses. Le fait que les vitesses sont indépendantes l'une de l'autre peut être illustré à l'aide d'un exemple. Il existe une relation étroite entre la vitesse de la croissance des plantes, exprimée par l'augmentation du poids de la biomasse sèche, et le résultat net de la photosynthèse dans les feuilles. Cependant, dans un modèle à simuler détaillé de la croissance de plantes, cette relation est le résultat des opérations simultanées de différents processus et non pas une relation directe. La vitesse de la photosynthèse contribue à la quantité de réserves d'hydrates de carbone dans la plante, et la vitesse de croissance des différents organes dépend de la quantité de telles réserves, bien qu'elle dépende aussi d'autres variables d'état. La photosynthèse s'arrête quand il fait nuit, mais la croissance continue jusqu'à ce que les réserves soient épuisées.

Le nombre de variables d'état que l'on peut distinguer dans les écosystèmes est très grand. Il ne s'agit pas seulement de plantes, d'herbivores, de micro-organismes, mais aussi de leurs différentes espèces, du nombre de représentants de ces espèces, de leur taille, de leur âge, du stade de développement, etc. Pour les plantes ce n'est pas uniquement le poids et la surface des feuilles qui sont importants, mais aussi leur teneur en azote et en minéraux, leurs enzymes et d'autres caractéristiques biochimiques. On pourrait facilement continuer cette énumération et c'est pourquoi il est complètement insensé d'essayer de faire des modèles basés sur la totalité des connaissances sur les processus biologiques, physiques et chimiques. La compréhension totale d'un système ne peut pas être un but acceptable d'un modèle. Les modèles sont nécessairement des représentations simplifiées de la réalité. Cette simplification se caractérise par le nombre restreint de variables d'état que l'on prend en considération.

Par analogie avec d'autres approches scientifiques on considère que l'on peut restreindre le nombre de variables d'état dans un modèle par la fixation très précise des limites du système à étudier, et en plus par une description détaillée des buts à atteindre. Avant chaque construction ou application des modèles, il faut commencer par une description nette de l'objectif.

Dans l'agriculture on peut en principe donner facilement ce but: l'acquisition de connaissances sur la relation entre la production agricole d'une part et les efforts humains d'autre part. On peut rendre ce but plus concret comme décrit dans la partie 1.3, ou bien encore plus concret dans les questions qui demandent, par exemple, la relation entre la dose d'azote et la production végétale dans les cas où les conditions du sol, le climat et le type de végétation sont suffisamment connus.

Pour chaque objectif il y a un optimum quant au nombre de variables d'état qui jouent un rôle dans les observations. L'applicabilité d'un modèle commence par s'agrandir selon que le nombre de variables d'état qui jouent un rôle dans le modèle, devient plus

grand. Mais à un moment donné, l'applicabilité commence à baisser parce que l'emploi d'une nouvelle variable d'état dévie l'attention sur les variables d'état qui étaient déjà prises en considération, justement parce que celles-ci étaient considérées comme plus importantes. Les efforts de trouver la classification des variables d'état dans l'ordre de leur importance prennent beaucoup de temps, et beaucoup de ces efforts dans le domaine de la construction des modèles dans l'écologie sont concentrés consciemment (ou encore plus souvent inconsciemment) sur ce procédé.

Dans le projet P.P.S. on a fait la simplification de l'approche des modèles à simuler en utilisant les 4 niveaux de production, rangées de façon hiérarchique, décrites dans la partie 2.2. On donne une esquisse des modèles à simuler qui caractérisent ces situations, en indiquant quelles sont les variables d'état et les variables externes les plus importantes, quelles sont les relations fonctionnelles les plus importantes, et le pourquoi du modèle à simuler.

Niveau de production A: Le rayonnement limite la production Les variables d'état sont: la biomasse sèche des plantes, la superficie des feuilles et la quantité de réserves en hydrates de carbone. Ces réserves augmentent par l'assimilation photosynthétique de CO_2 et diminuent par la synthèse de nouveaux tissus structuraux et par la respiration. Les relations fonctionnelles les plus importantes concernent l'assimilation de CO_2 des feuilles individuelles en relation avec l'intensité de la lumière et la température; les paramètres principaux sont des facteurs de conversion qui indiquent combien de réserves il faut pour la formation des tissus structuraux et pour l'entretien biochimique des tissus. Les variables externes sont: le rayonnement total global journalier, la température minimale et maximale de l'air. Il s'agit surtout de la vitesse de croissance journalière de la biomasse. Si l'on simule aussi la transpiration (qui s'appelle transpiration potentielle sur le niveau de production A), l'ouverture des stomates est simulée en même temps, et dans ce cas on prend aussi en considération les variables externes comme le vent et l'humidité de l'air. Selon l'objectif que l'on s'est fixé, on considère le développement de la superficie des feuilles comme étant donné ou bien alors on fait le calcul de ce développement en relation avec la croissance de la biomasse des feuilles. Ces processus sont surtout discutés dans la partie 4.2.

Niveau de production B: situation A, mais, en outre, l'eau du sol limite la production Afin de simuler la disponibilité d'eau pour les plantes, on représente le sol comme s'il était composé de couches. La quantité d'eau dans chaque couche est traitée comme une variable d'état et son accessibilité est calculée en tenant compte de la profondeur d'enracinement. Avec les valeurs des paramètres physiques du sol, comme la conductivité capillaire et la tension d'eau (qui dépend de la teneur en eau), il est possible de simuler des éléments du bilan d'eau comme l'infiltration, l'évaporation et l'absorption par les racines. L'absorption d'eau et la transpiration déterminent la teneur relative en eau des plantes et cette teneur relative détermine le degré d'ouverture des stomates. A l'aide de ces données, on détermine un facteur de réduction de la croissance potentielle et de la transpiration potentielle. Les processus au niveau de production B sont discutés plus en détail dans les parties 4.4, 4.5 et 4.6.

Niveau de production C: situation B, mais, en outre, la disponibilité de l'azote limite la production. Dans cette situation, la production dépend surtout de l'absorption d'azote (N) et ainsi il existe une relation étroite entre la production et le cycle de N. Les variables d'état les plus importantes sont: la quantité de N dans le sol sous forme de nitrate et d'ammonium et dans la matière organique du sol. La vitesse de conversion d'une forme à l'autre, l'absorption par les racines, le lessivage, et la dénitrification sont liés étroitement au bilan d'eau. De même la fixation de N par les algues et les légumineuses est liée à l'humidité du sol. Dans la plupart des cas on considère qu'il n'y a pas de différence essentielle entre le bilan d'eau de la situation C et celui de la situation B, de sorte que l'exécution du programme discuté ci-dessus pour le niveau de production B peut servir de point de départ pour le niveau C.

D'après Van Keulen et De Wit (1980) on peut décrire la relation entre la production et la disponibilité de N comme dans la fig. 2.3.1. Dans le quadrant 2 de cette figure on a mis la relation entre la production et la quantité de N absorbée et dans le quadrant 3 la relation entre l'absorption et la dose de N appliquée. La relation entre la production et la dose résulte de la combinaison de ces 2 relations (quadrant 1). L'avantage de cette façon de présenter les choses est que l'effet de N sur la production est subdivisé en un

Fig. 2.3.1. Le rapport entre la productivité et la dose d'engrais azoté appliqué (quadrant 1) est partagé dans le rapport physiologique entre la productivité et la quantité de N absorbée (quadrant 2), et le rapport pédologique entre la dose d'engrais appliqué et la quantité de N absorbée (quadrant 3).

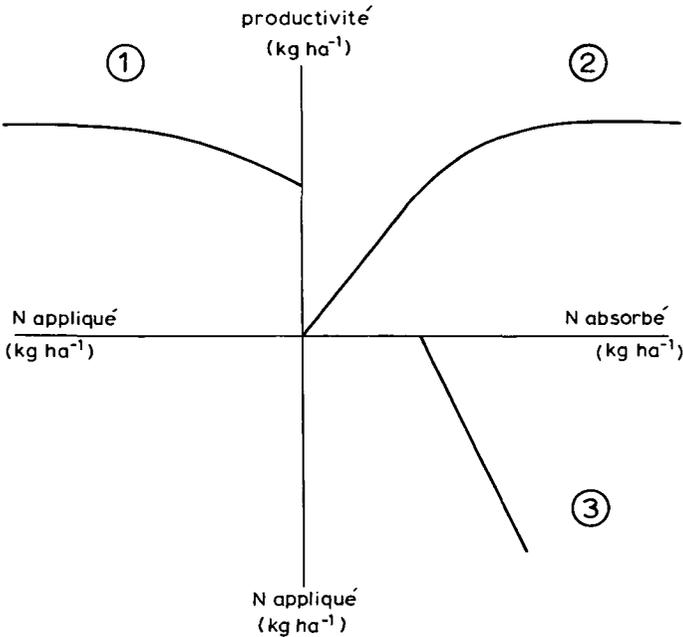


Fig. 2.3.1. The relation between productivity and the dose of N fertilizer applied (quadrant 1) is divided into the physiological relation between productivity and the amount of N absorbed (quadrant 2) and the pedological relation between the dose of fertilizer applied and the amount of N absorbed (quadrant 3).

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-