

INTEGRATION DES DONNEES BIOLOGIQUES ET ECONOMIQUES
DANS L'EVALUATION DES TECHNOLOGIES AGRICOLES EN TERRE ARIDE

James Lowenberg-DeBoer et Germaine Ibro¹
Département de Recherches en Economie Rurale (DECOR)
Institut National de Recherches Agronomiques du Niger (INRAN)
B.P. 429, Niamey, Niger

Robert Deuson et Peter Ensink²
Department of Agricultural Economics
Purdue University
West Lafayette, Indiana 47907, USA

Assistant Professeur à l'université Purdue et économiste

Assistant Professeur et assistant de recherche à l'université Purdue

REMERCIEMENTS

Ces recherches sont financées par l'Agence des Etats-Unis pour le Développement International, Bureau des Sciences et Technologies, Projet: "Technologies de gestion de l'alimentation hydrique des sols" (immatriculé USDA PASA BST-4021-P-AG-1080-00).

Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement M. Maliki Kadi, Chef du Département de Recherches en Economie Rurale, MM. Patrick Jomini et A. Adafri, Assistants de Recherche au Département d'Agro-économie, à l'Université Purdue, à West Lafayette (Etat de l'Indiana, U.S.A.). Ils ont relu de façon critique ce document et ont contribué à son amélioration. Ils ne sont évidemment pas responsables pour les lacunes ou les erreurs que les auteurs auraient pu y laisser.

Bien que les auteurs citent certains travaux de recherche accomplis à l'INRAN, leurs vues ne représentent pas nécessairement celles de l'Institut et ce document n'engage en aucune manière la responsabilité de celui-ci.

RESUME

L'objectif de ce document est de démontrer l'utilisation de quatre techniques d'analyse dans l'intégration des données biologiques et économiques. Ces techniques sont: la budgétisation, la régression, la programmation mathématique, et la simulation. Quelques exemples, basés sur des recherches menées au Niger, illustrent les avantages respectifs de chaque méthode vis-à-vis de cinq critères pour leur application: l'expertise requise, les données nécessaires, le temps nécessaire pour l'obtention des résultats, leur crédibilité, et leur utilité pour divers utilisateurs. Il est démontré que la budgétisation fournit des estimations préliminaires et rapides sur les implications économiques de technologies biologiques. Les fonctions de production, estimées par régression, permettent une exploration systématique d'une grande variété de combinaisons d'intrants et d'extrants. La programmation mathématique peut être utilisée pour analyser les effets du temps et du risque sur l'adoption de technologies. Malgré leur utilité, ces trois techniques d'analyse (budgétisation, régression, programmation mathématique) sont limitées du point de vue de l'intégration des données biologiques et économiques. Seule la simulation permet une intégration étroite de ces données et une modélisation détaillée des processus biologiques et économiques et de leurs liens.

SUMMARY

The objective of this paper is to demonstrate the use of four analytical techniques to integrate biological and economic data. The techniques are: budgeting, regression, mathematical programming, and simulation. Some examples, based on research done in Niger, are used to illustrate the comparative advantages of each method with respect to five criteria: expertise required, data requirements, timeliness of results, credibility, and usefulness for various audiences. It is demonstrated that budgeting provides a quick, preliminary estimation of the economic implications of biological technologies. Production functions, estimated by regression, permit a systematic exploration of a wide variety of input-output relationships. Mathematical programming can be used to analyze the effects of time and risk on technology adoption. Despite their usefulness, these three analytical techniques (budgeting, mathematical programming, and regression) are limited in their ability to integrate biological and economic data. Only simulation allows a close integration of such data and the detailed modeling of biological and economic processes as well as that of the links between them. (Note: an English version of this paper is available upon request).

INTRODUCTION

Le développement de systèmes améliorés pour l'agriculture en terre aride est limité par des facteurs tant biologiques qu'économiques. Parce que l'agriculture en terre aride est à la merci des intempéries, la relation entre les dispersions des rendements et l'aptitude du preneur de décisions à supporter les risques est un élément crucial. L'idéal serait que les chercheurs biologistes soient guidés par une compréhension claire des contraintes économiques. De même, l'analyse économique devrait fidèlement refléter les phénomènes biologiques. Malheureusement, l'intégration d'informations d'ordre biologique et économique n'est qu'imparfaitement menée à bien. L'objectif du présent article est de souligner les aspects positifs et négatifs des techniques fondamentales utilisées pour intégrer les données biologiques et économiques. Nous y discuterons la mise au point de budgets partiels, les techniques de régression, la programmation mathématique et la simulation. Quelques exemples, basés sur des recherches menées au Niger, illustrent l'application de chaque méthode. Il s'agit de déterminer l'expertise requise, les données nécessaires, le temps nécessaire à l'obtention des résultats, la crédibilité et l'utilité des résultats pour divers utilisateurs.

LES BUDGETS

La budgétisation est un modèle très simple de la réalité économique. La rentabilité de certaines combinaisons input-output est évaluée en défalquant les coûts du revenu brut. On effectue l'optimisation en choisissant la combinaison input-output qui maximise le profit net. En général, les informations d'ordre biologique trouvent leur place dans le

budget sous forme de rendements et d'intrants nécessaires à la production. Elaborer un budget peut rendre opérationnelle l'utilisation de données provenant d'essais sur le terrain et d'autres recherches conçues avec, à l'esprit, le modèle additif linéaire¹. Ceci est dû au fait que tant l'élaboration du budget que les essais agronomiques sont conçus dans le but d'analyser les relations entre intrants et extrants dans certaines proportions précises.

En ce qui concerne l'intégration des données biologiques et économiques, le défaut majeur des budgets est que l'analyse est limitée à un nombre relativement faible de combinaisons input-output. Par exemple, Ly et al. ont évalué une variété améliorée de mil, une densité de semis alternative et un niveau de fertilisation en azote, en combinaison avec la densité alternative. Ils ont conclu que la variété améliorée montrait des rendements économiques positifs sur tous les sites mais que la rentabilité de la densité et de la fertilisation accrues pourrait être limitée aux saisons à bonnes précipitations. Les résultats suggèrent l'importance économique de ces innovations agronomiques mais laissent planer un doute sur les implications d'autres niveaux de densité et de fertilisation.

D'autre part, la variation des rendements et des prix pose des problèmes dans l'analyse budgétaire. Par exemple, pour établir un budget pour un nouveau système de production céréalière, on doit connaître les rendements, le prix des céréales et le prix de chaque intrant. Mais normalement on observe plusieurs rendements, par exemple parmi les répétitions d'un essai sur station ou parmi des paysans participant à un essai en milieu réel. De même, on observe plusieurs prix selon le vendeur, la période de vente, le lieu de vente et l'acheteur. Théoriquement on choisit le rendement et les prix

attendus. En pratique, on choisit le rendement moyen de toutes les répétitions d'un essai ou celui de toutes les exploitations correspondant à un même profil. De même, on choisit la moyenne des prix pour la période dans laquelle la plupart des produits est vendue ou la plupart des intrants est achetée. Toutefois, en choisissant seulement le rendement et les prix attendus, on perd beaucoup d'information sur la dispersion de ces variables.

Pour décrire les effets de la variation des rendements et des prix sur le choix des technologies, on utilise l'analyse de sensibilité². Cette analyse permet de recalculer le budget en utilisant plusieurs valeurs différentes pour les paramètres rendement et prix. En théorie on peut recalculer le budget au moyen d'un grand nombre de valeurs pour faire ainsi ressortir la dispersion des bénéfices. Cependant, pour rendre l'analyse moins complexe on se contente habituellement de faire varier un paramètre à la fois, et ce sur la base d'un petit nombre de valeurs choisies pour leur importance. Par exemple, Ly et al. ont calculé les bénéfices des nouvelles technologies pour la production de mil et de niébé sur la base de trois prix: le prix officiel, le prix du marché local à la récolte et le prix du marché local trois mois après la récolte. De plus, ils ont calculé le prix auquel le choix de technologie est modifié. Cette méthode donne une bonne idée de l'effet de la variation des prix des produits sur le choix de la technologie, mais ne révèle pas l'effet de la variation des prix des intrants ni la corrélation entre les prix et les rendements. Dans ce dernier cas, le phénomène de chute des prix, observé lors d'une bonne récolte ou, vice-versa, la hausse des prix qui suit une mauvaise récolte, ne sont pas appréhendés par l'analyse de sensibilité.

L'analyse de sensibilité révèle les effets des variations pour chaque paramètre sur le choix des technologies mais ne fournit pas de critère pour guider ce choix. En théorie on peut calculer une prime pour compenser le risque associé à une variation de prix ou de rendement et soustraire cette prime du bénéfice brut, avec les autres coûts de production, pour arriver au bénéfice net, mais jusqu'à présent les méthodes pour calculer cette prime se sont révélées compliquées et peu fiables. Si la dispersion des bénéfices nets est connue, on peut utiliser la dominance stochastique³ pour choisir entre les différentes technologies. La dominance stochastique consiste en certaines règles pour déterminer le choix entre deux dispersions de bénéfices. Les règles sont très générales et sont déterminées par l'attitude du preneur de décision envers le risque. Dans la plupart des cas, les budgets ne donnent pas suffisamment d'information pour permettre l'utilisation de cette technique.

Malgré ses faiblesses, l'élaboration d'un budget est un outil approprié pour l'évaluation de technologies agricoles sous régime pluvial. L'expertise économique requise pour développer les budgets est modeste. La budgétisation s'adapte aux sources de données les plus communes. Elle est rapide, ce qui aide à rendre les résultats ponctuels. De plus, un budget est relativement facile à comprendre. Ainsi, il possède une crédibilité qui fait défaut aux autres outils d'analyse économique car la plupart des preneurs de décisions peuvent en comprendre les composants.

A REGRESSION

En estimant des fonctions de production, on peut explorer plus à fond l'aspect économique de la surface de réponse⁴ aux intrants. Le calcul de

dérivées et d'autres méthodes d'optimisation peuvent être utilisés pour déterminer de manière systématique les stratégies préférées. Parmi les problèmes que posent les estimations de surface de réponses, on note que: 1) le choix de la forme fonctionnelle peut influencer les conclusions d'ordre économique; 2) les observations input-output sont nécessaires sur tout le continuum de réponse pour estimer avec justesse les choix économiques; 3) le nombre de variables possibles est limité par les données et les techniques statistiques.

Le problème lié au choix de la forme fonctionnelle est mis en évidence dans l'étude de Jomini et al. Pour une région de l'ouest nigérien, cette étude compare plusieurs taux de fertilisation pour identifier la teneur en phosphate du sol susceptible de maximiser les bénéfices économiques. Les auteurs utilisent une fonction de réponse quadratique et une fonction de réponse linéaire et plateau (RLP). Le niveau optimal de phosphate diffère sensiblement suivant la forme fonctionnelle utilisée. Les estimations obtenues par régression offrent tout au plus une approximation des processus biologiques complexes qui caractérisent la production agricole et animale. La forme de cette approximation doit être adaptée aux phénomènes biologiques mais n'est pas entièrement déterminée par la biologie. La fonction de production est un outil de prise de décisions. La meilleure fonction de production aboutit aux meilleures décisions. La forme de la fonction de production peut être déterminée par son utilité dans la prise de décisions autant que par les évidences biologiques. Ainsi, Jomini et al. indiquent que la fonction RLP peut être privilégiée alors que la fonction quadratique possède des propriétés statistiques supérieures.

Cet argument est basé sur la constatation que les recommandations basées sur une fonction quadratique sont souvent biaisées vers le haut. Les recommandations plus prudentes offertes par la fonction RLP sont jugées plus appropriées pour un pays en voie de développement tel que le Niger. Des recherches plus poussées portant sur le phosphate suggèrent que la différence entre les deux formes fonctionnelles pourrait provenir en partie de l'omission de variables représentant la disponibilité en azote et la pluviométrie.

Les données résultant d'essais agronomiques courants ne sont souvent pas assorties aux besoins de la régression linéaire. L'analyse de variance exige la répétition des traitements afin de séparer les sources d'erreurs. En général, les contraintes budgétaires limitent le nombre de répétitions de chaque traitement. C'est pourquoi l'on possède beaucoup d'informations sur quelques points mais la forme de la surface de production entre ces points est inconnue. La courbure de la fonction joue un rôle prépondérant dans la détermination des résultats d'ordre économique au moyen du calcul différentiel.

Au mieux, la régression peut fournir des estimations approximatives des réponses de rendement. Ceci est dû à l'inadéquation des données agronomiques aux besoins de l'estimation de fonctions de production. Pourtant grâce à la large disponibilité de logiciels de régression, le délai et l'expertise requis pour estimer ces fonctions est relativement réduit. On peut représenter les fonctions estimées et l'optimisation économique à l'aide de graphiques qui peuvent être compris par des preneurs de décisions d'horizons et de niveaux très différents.

LA PROGRAMMATION MATHÉMATIQUE

La programmation mathématique⁵ peut être utilisée pour modéliser de manière explicite les effets des contraintes imposées par la disponibilité de ressources, des délais et du risque sur le choix de technologies. On peut incorporer ces facteurs dans la budgétisation ou dans l'analyse de fonctions de production; cependant, les modèles de programmation permettent une analyse plus systématique de leurs effets. Les informations biologiques peuvent être incluses dans les modèles de programmation soit en tant que coefficients input-output, comme dans les budgets, soit en tant qu'estimations de fonctions de production.

Krause et al. ont utilisé la programmation linéaire pour examiner les effets de la disponibilité en main-d'oeuvre et en capitaux sur l'adoption d'innovations en matière de production de mil et de niébé. Cette étude est en partie née des difficultés rencontrées par Ly et al. dans l'évaluation de la main-d'oeuvre familiale. La nature des informations biologiques utilisées par Krause et al. correspond à celle rencontrée dans les budgets de Ly et al.

Adesina et al. ont évalué les effets du risque sur la fertilisation du mil et du niébé. Ils ont utilisé un modèle MOTAD qui pondère les déviations négatives à partir des résultats escomptés et utilise des données historiques pour estimer ces déviations. Dans leur étude, Adesina et al. ont seulement utilisé le système traditionnel de culture sans engrais et une activité de fertilisation à un seul niveau.

Les modèles de programmation exigent une certaine expertise pour leur développement et leur interprétation. Pour développer des modèles réalistes, on doit posséder des informations solides sur le système d'exploitation, mais il est possible d'utiliser les mêmes informations biologiques que pour la

budgetisation et les études de fonctions de production. Pour être crédible, un tel modèle requiert une validation méticuleuse. Une fois cette crédibilité établie, les modèles de programmation peuvent offrir un aperçu systématique de ce qui adviendrait du système d'exploitation dans son ensemble si on y introduisait une nouvelle technologie, ou des types de contraintes qui font obstacle à l'adoption d'une telle technologie.

LA SIMULATION

Au sens le plus large, les modèles économétriques et de programmation, et même les budgets, sont des modèles de simulation. Ils tentent tous d'imiter la réalité. Au sens le plus restreint, le terme simulation s'applique généralement à des modèles complexes et non-linéaires qui n'entrent dans aucune autre catégorie. Les modèles de simulation biologique⁶ tentent de décrire de manière mathématique les procédés physiologiques de la croissance des plantes et des animaux. Les modèles peuvent intégrer des informations de type biologique provenant de sources diverses, telles que publications de recherches, données expérimentales et observations non-officielles de chercheurs sur le terrain.

Pour toutes les analyses du risque il faut connaître relativement bien les dispersions des bénéfices. Malheureusement, pour de nombreuses cultures dans les régions arides et semi-arides du monde, les dispersions des rendements sont pratiquement inconnues, même dans le cas de pratiques de production traditionnelles. En ce qui concerne les pratiques améliorées, les informations disponibles sur les dispersions de rendements sont souvent limitées à quelques essais expérimentaux. Pour compenser ces lacunes en données, on peut simuler les cultures pour un grand éventail de conditions

écologiques ce qui permet d'offrir de meilleures approximations des dispersions.

On peut utiliser les dispersions des rendements obtenues par la simulation dans toutes sortes d'analyses économiques particulièrement la dominance stochastique et les modèles de programmation. Pour mener une analyse de dominance stochastique, un budget est calculé pour chaque rendement simulé, c'est à dire on calcule la dispersion des bénéfices pour chaque option. Parce que la simulation peut fournir une estimation des rendements sur plusieurs années, la dispersion des bénéfices est bien connue et on peut appliquer les règles de dominance stochastique sans difficulté. Si de nombreuses stratégies se révèlent possibles, la dominance stochastique est peu pratique, et une analyse individuelle est requise pour chaque paire d'options. Avec les modèles de programmation on peut évaluer systématiquement un large éventail d'options simultanément, cependant il faut poser des hypothèses contraignantes en ce qui concerne l'effet du risque.

Krause et al. ont simulé les rendements et leur variabilité à long terme pour les cultures intercalaires de niébé et de mil améliorés au Niger pour estimer les coefficients de rendement pour un modèle de programmation. Pour ce faire, ils utilisèrent un modèle de simulation, mis sur tableur par Lowenberg-DeBoer et Cherney, qui est en fait une version modifiée du modèle GROWIT. La modification primordiale apportée au modèle original est la prise en compte des différents stades de développement de la plante. Dans le modèle, le mil et le niébé se font concurrence sur les plans de l'humidité et de la lumière naturelle. Les dispersions des rendements, obtenus avec des densités et des niveaux d'application d'engrais variables, sont estimées au moyen de données climatiques. Au Niger, on dispose de plus de 50 années de données

météorologiques quotidiennes, et ce pour un grand nombre de sites, mais il y a des lacunes. Par exemple, Krause et al. n'ont pas pu simuler les rendements pour 1975-1978, parce que certaines données pluviométriques manquent pour la région de Maradi. Les données climatiques peuvent être, elles aussi, simulées. Cependant, l'usage de données météorologiques historiques est préférable car il permet de renforcer la crédibilité des résultats en restant "proche des données réelles."

La validation d'un modèle de simulation est très importante parce que sans validation on ne sait pas si le modèle est suffisamment proche de la réalité pour être utilisable. Normalement la validation d'un modèle se fait en deux étapes. Dans la première étape (dite "validation formelle"), on compare les rendements simulés aux rendements observés pour une même période. Si les rendements simulés sont suffisamment proches des rendements observés, on peut affirmer qu'ils appartiennent à la même dispersion. Dans la seconde étape (dite "validation informelle"), le modèle et les rendements simulés sont examinés par les chercheurs biologiques (agronomes, pédologues, ...). Ils étudient le processus décrit par le modèle pour tenter de déterminer si celui-ci est une approximation raisonnable de la réalité et si les rendements simulés sont proches des rendements réels auxquels on peut s'attendre. Le développement et la validation d'un modèle de simulation favorise une interaction rigoureuse entre agro-économistes et agronomes parce que ce modèle permet des analyses à caractère multi-disciplinaire. Par exemple, Krause et al. ont validé leur modèle avec des rendements s'étendant sur deux années et sur deux sites. C'est presque le minimum. On peut avoir plus de confiance en un modèle basé sur un plus grand nombre d'années et de sites.

Un usage efficace de la simulation biologique dans l'analyse économique requiert le temps, l'expertise et la coopération entre chercheurs en matières biologique et sociale. La simulation exige beaucoup de données, mais offre une certaine souplesse quand au type d'information utilisable. Comme dans le cas des modèles de programmation, sa crédibilité exige une validation méticuleuse. La simulation permet d'estimer des dispersions de rendements qui ne pourraient être évaluées qu'après plusieurs années de travail empirique. La simulation peut faciliter la collaboration entre biologistes et chercheurs sociaux car elle offre un cadre de recherches dont les bases scientifiques conviennent aux uns comme aux autres.

CONCLUSIONS

La budgétisation est à même de fournir des estimations préliminaires et rapides sur les implications économiques de technologies biologiques. Bien que les fonctions de production estimées par régression ne soient que des approximations de procédés biologiques complexes, elles peuvent être utilisées pour explorer de manière systématique une grande variété de combinaisons d'intrants et d'extrants. Les modèles de programmation mathématique peuvent être utilisés pour analyser les effets du temps et du risque sur l'adoption de technologies. Cependant, ces modèles sont généralement limités du point de vue de l'intégration d'informations d'ordre biologique et économique au même niveau que celle obtenue dans la budgétisation et à l'analyse des fonctions de production. Plus que la budgétisation, l'analyse des fonctions de production ou la programmation mathématique, la simulation permet, grâce à sa souplesse, une modélisation détaillée des processus biologiques ainsi que l'établissement de liens étroits entre ces derniers et les processus économiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adesina, Akinwumi A., Philip C. Abbott and John H. Sanders. 1988. Ex-ante Risk Programming Appraisal of New Agricultural Technology: Experiment Station Fertilizer Recommendations in Southern Niger. *Agricultural Systems* 27:23-34.
- Anderson, Jock R., John L. Dillon, and Brian Hardaker. 1977. *Agricultural Decision Analysis*. Iowa State University Press.
- Dent, J.B., and M.J. Blackie. 1979. *Systems simulation in Agriculture*. Applied Science Publishers LTD, London.
- Heady, Earl O., and John L. Dillon. 1961. *Agricultural Production Functions*. Iowa State University Press.
- Jomini, Patrick, J. Lowenberg-DeBoer, and André Bationo. 1988. Optimal Long Term Phosphorous Fertilization in Western Niger. Document présenté à l'assemblée annuelle de l'Association des Agro-économistes Américains, à Knoxville, Tennessee (USA), du 31 juillet au 3 août, 1988.
- Krause, M.A., R.R. Deuson, J. Lowenberg-DeBoer, T.G. Baker, P. Preckel, C.Reddy, and M. Kadi, 1988. "The influence of the costs and terms of credit on agricultural technology adoption in Niger", manuscript.
- Krause, M.A., K. Maliki, K.C. Reddy, R.R. Deuson, and M. Issa. 1987. Labor Management Effect on Relative Profitability of Alternative Millet-Cowpea Intercrop Systems in Niger. Document présenté au Symposium de la Recherche en Systèmes de Production, à Fayetteville, Arkansas (USA).
- Lowenberg-DeBoer, J. and J.H. Cherney. 1988. Biophysical Simulation for Evaluating New Crops: The Case of Switchgrass for Biomass Energy Feedstock. *Agricultural Systems* (sous presse).
- Ly, Samba, Robert Deuson, Kadi Maliki, Gilbert Numa, Chandra Reddy and Scott Swinton. 1986. Evaluation des Essais en Milieu Réel sur les Cultures Associées Mil-Niébé: Résultats de la Campagne de 1985. Document présenté au Symposium de la Recherche en Systèmes de Production, à Manhattan, Kansas (USA).
- Martel, Alain. 1979. *Techniques et applications de la recherche opérationnelle*. Gaetan Morin, éditeur.

Notes hors texte

¹Le modèle additif linéaire est la structure théorique de l'analyse de variance. Il présume que les effets du traitement peuvent être représentés par des quantités ajoutées à la moyenne globale comme suit:

$$Y_{ij} = a + b_i + e_{ij}$$

où Y est le rendement de la répétition j du traitement i , a est la moyenne globale, b est l'effet du traitement i , et e_{ij} est le terme d'erreur aléatoire.

²L'analyse de sensibilité consiste en un recalcul des budgets (ou tout autre modèle) en imposant un ensemble de paramètres différents pour tester la sensibilité des résultats au changement de ces paramètres. Par exemple, si le prix du mil (un paramètre) s'élève en moyenne à 60 FCFA le kilo mais varie entre 40 et 90 FCFA le kilo, un budget de référence pour la production du mil peut être calculé sur la base du prix moyen et ensuite être recalculé sur la base des prix minimum (40 FCFA kg^{-1}) ou maximum (90 FCFA kg^{-1}). On peut ensuite comparer les résultats de ces budgets avec ceux du budget basé sur le prix moyen et déterminer la sensibilité de deux-ci par rapport aux variations du prix du mil.

³La dominance stochastique est une méthode d'analyse du risque basée sur l'échelonnement de distributions de résultats qui se fait suivant des règles simples dictées par l'observation du comportement humain courant. Des distributions cumulatives sont utilisées. La première règle est basée sur l'observation que l'homme préfère plus à moins. On traduit cette observation en langage statistique en notant qu'une option A, dont la distribution cumulative se trouve toujours à droite de la distribution cumulative d'une autre option B, possède une plus haute probabilité d'aboutir à un certain niveau de résultat. Ainsi l'option dont la distribution cumulative se trouve à droite domine l'autre option. La deuxième règle est basée sur l'observation que l'homme préfère généralement éviter les résultats de faible valeur. Cette observation se traduit en termes statistiques en notant que la surface sous-jacente à la distribution cumulative peut mesurer cette tendance à éviter les résultats de faible valeur. Une option dont la surface sous-jacente à sa distribution cumulative est plus grande que celle d'une autre option à tout niveau de résultat est dite dominée par cette dernière (voir ch. 9, Anderson et al.)

⁴Les fonctions de réponse linéaire présumant que l'effet d'un intrant sur le produit est proportionnel à son niveau d'application, ainsi:

$$Y = a + bX,$$

où Y représente le rendement, a est une constante, b est l'accroissement proportionnel du rendement Y en fonction du niveau d'application de l'intrant X . La fonction de réponse quadratique permet à l'effet d'un intrant de varier avec le niveau de cet intrant, ainsi:

$$Y = a + bX + cX^2,$$

où c est un coefficient qui mesure le changement de l'effet d'un intrant au fur et à mesure ou le niveau de cet intrant change (voir Heady et Dillon.)

⁵La programmation mathématique est un outil d'analyse qui consiste à trouver la valeur de r variables de décision non-négatives $X_j = j, \dots, r$, satisfaisant m

équations ou inéquations (appelées contraintes) tout en minimisant ou maximisant une fonction-objectif (voir Martel.)

6 La simulation biologique est une procédure qui décrit les processus de vie des plantes ou des animaux au moyen d'équations mathématiques dont l'ensemble constitue un modèle qui permet d'estimer l'état de la plante ou de l'animal dans des conditions variées. Par exemple, on pourrait estimer les rendements de mil sous différents régimes de pluviométrie (voir Blackie et Dent.)